



INAOE

**Dimensionamiento de un sistema de
transmisión de datos Fibra-Radio 5G**

por

Rodrigo Cuevas Terrones

M. I., BUAP

Tesis sometida como requisito parcial para
obtener el grado de

**DOCTOR EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ELECTRÓNICA**

por el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Diciembre 2024

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Ignacio Enrique Zaldívar Huerta

Investigador Titular del INAOE

Dra. Josefina Castañeda Camacho

Investigadora Titular de la BUAP

©INAOE 2024

Derechos reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias de esta Tesis en su
totalidad o en partes mencionando la fuente.



DEDICATORIA

A mi amada esposa Silvia María Martínez Ramírez.

En memoria de mis padres, Brígido Cuevas Valdez y Rosa María Alejandra Terrones González, quienes nos cuidan y bendicen desde el cielo.

A mi hijo Rodrigo Alberto Cuevas de León.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

- Mi gratitud y agradecimiento al INAOE, a la BUAP y al CONAHCYT, por el apoyo económico otorgado (679055)



- Mi gratitud y agradecimiento a las distintas Instituciones que proporcionaron las instalaciones, los medios y los recursos necesarios para la realización de este trabajo: el espacio de trabajo del INAOE, el Laboratorio de Comunicaciones Ópticas del INAOE y el Laboratorio de Potencia de la BUAP.
- Mi gratitud y agradecimiento al Doctor Ignacio Enrique Zaldívar Huerta y a la Doctora Josefina Castañeda Camacho, por la supervisión de este proyecto, y a todos los profesores que intervinieron con su valiosa contribución en mi formación doctoral.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi amada esposa **Silvia María Martínez Ramírez**, cuya determinación y apoyo incondicional en todos los aspectos imaginables fueron cruciales para este logro. Desde el día 1 de la Licenciatura hasta el día último del Doctorado siempre estuvo al pie del cañón, asumiendo todas las implicaciones y creyendo en mí.

A mis padres **Brígido Cuevas Valdez** y **Rosa María Alejandra Terrones González**, por cuidarnos y bendecirnos desde el cielo, por el infinito amor que siempre nos dieron, los valores inculcados, la educación recibida, y el gran ejemplo de constancia y determinación para nunca rendirnos cuando nos proponemos alcanzar metas que en su momento parecen demasiado lejanas.

A mis hermanos **Sara María Cuevas Terrones**, **Ricardo Cuevas Terrones** y **Rosa María Cuevas Terrones**, así como en la distancia a mi hijo **Rodrigo Alberto Cuevas de León**, por la enorme paciencia y gran apoyo moral todo este tiempo.

A mi suegro **José Juan Martínez Miguel**, así como a mi suegra **Rufina Rosa María Ramírez Álvarez** que ahora nos cuida desde el cielo, por su fe, sus ánimos, su gran paciencia y su apoyo moral en el proceso de este trabajo.

A mis compañeros de Doctorado **Blaise Tshibangu Mbuebue** (gracias por enseñarme a usar el laboratorio), **Itzel Sináí Castillo García** y **Eloy Mejía Yautentzi**, por su valiosa colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A mis mentores, **Dr. Ignacio Enrique Zaldívar Huerta** y **Dra. Josefina Castañeda Camacho**, no sólo por su valiosa guía, sino por el gran apoyo a nivel personal en los momentos difíciles durante todo este proceso.

RESUMEN

Este trabajo de tesis se ubica en el área de las comunicaciones ópticas e inalámbricas. En particular, se utiliza un sistema Fibra-Radio para el transporte de información vía fibra óptica y su distribución inalámbrica vía antena. La utilización de sistemas Fibra-Radio es consecuencia de la creciente necesidad de que los futuros sistemas de comunicaciones móviles 5G deberán ser capaces de afrontar una gran variedad de tipos de tráfico, desde aplicaciones de banda ancha y elevada tasa binaria. En ese sentido, se aprovechan las grandes prestaciones que ofrece el uso de la fibra óptica para el transporte de información a altas velocidades y frecuencias, y por otra parte la alta movilidad que provee el uso de antenas para transmisión inalámbrica. Este trabajo se centra en el estudio del esquema de acceso NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), dado que se considera una tecnología candidata para 5G. Específicamente, se proponen esquemas Fibra-Radio para el transporte de información para uno y dos canales vía fibra óptica y su posterior análisis de transmisión inalámbrica. Los resultados experimentales de los esquemas Fibra-Radio para la transmisión de señales digitales generadas por FPGAs, son soportados por respuestas de simulación obtenidas mediante el uso de los programas VPIPhotonics y Optisystem. Mientras que el enlace inalámbrico, así como el esquema NOMA, es estimado por simulaciones numéricas realizadas en MATLAB. Las evaluaciones consideran afectaciones inherentes a las transmisiones inalámbricas, como desvanecimientos, ruido e interferencias. Además, se realizan pruebas estadísticas considerando las influencias para diferentes niveles de ruido, y ubicación de los receptores en distintas posiciones dentro del sector de la celda de cobertura. De esta manera se pretende optimizar las prestaciones de estos sistemas al integrarlos, duplicando el número de destinatarios de las señales transmitidas en sistemas de última generación. Esto se lleva a cabo con el propósito de ofrecer una alternativa de optimización a nivel de capa física para un número creciente de usuarios de los sistemas de comunicaciones.

ABSTRACT

This Thesis is located in the optical and wireless communications area. In particular, a Fiber-Radio system is used to transport information via optical fiber and its wireless distribution via an antenna. The use of Fiber-Radio systems is a consequence of the growing need for future 5G mobile communication systems to handle a wide variety of traffic types, from broadband and high bit-rate applications. In this sense, the great benefits of optical fiber for transporting information at high speeds and frequencies are taken advantage of, as well as, the high mobility provided by the use of antennas for wireless transmission. This work focuses on the study of the NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) access scheme, since it is considered as a candidate technology for 5G. Specifically, Fiber-Radio schemes are proposed to transport information for one and two channels via optical fiber and its subsequent wireless transmission analysis. The experimental Fiber-Radio results for transmitting digital signals generated by FPGAs are supported by simulation responses obtained using the VPIPhotonics, and Optisystem software. The wireless link and the NOMA scheme are estimated by numerical simulations performed in MATLAB. The evaluations consider effects inherent to wireless transmissions, such as fading, noise, and interference. In addition, statistical tests are performed considering the influences of different noise levels, and the location of the receivers in different positions within the coverage cell sector. In this way, it is intended to optimize the performance of these systems by integrating them and doubling the number of recipients of the transmitted signals in state-of-the-art systems. This is carried out to offer an optimization alternative at the physical layer level for a growing number of users of communication systems.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL.....	5
1.1 Motivación.....	5
1.2 Esquemas Fibra-Radio y esquemas de acceso multiusuario... 	6
1.3 Situación actual y problema a resolver.....	9
1.4 Objetivos.....	10
1.4.1 Objetivo general.....	10
1.4.2 Objetivos específicos.....	10
1.5 Hipótesis.....	10
1.6 Metodología.....	11
1.7 Organización del documento de Tesis.....	12
1.8 Sumario.....	12
Referencias.....	13
CAPÍTULO 2: ESQUEMAS FIBRA-RADIO Y ESQUEMA DE ACCESO NOMA. 	15
Introducción.....	15
2.1 Esquema Fibra-Radio.....	15
2.2 Esquema de acceso NOMA.....	16
2.3 Estado del arte.....	18
2.4 Sumario.....	20
Referencias.....	20
CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS UTILIZADOS.....	25
Introducción.....	25
3.1 Fibras ópticas.....	25

3.1.1	Atenuación de la luz a través de la fibra óptica.....	26
3.1.2	Dispersión cromática.....	27
3.2	Modulador electroóptico.....	31
3.3	Transmisiones inalámbricas.....	34
3.3.1	Desvanecimiento, ruido e interferencia.....	36
3.4	Antenas.....	39
3.4.1	Parámetros de las antenas.....	40
3.4.2	Principales tipos de antenas según su patrón de radiación..	42
3.5	Sumario.....	44
	Referencias.....	45
 CAPÍTULO 4: SIMULACIONES FIBRA-RADIO.....		49
	Introducción.....	49
4.1	Simulación de un enlace Fibra-Radio para transmisión de datos por un canal.....	49
4.2	Simulaciones de esquemas Fibra-Radio para transmisión de dos señales de datos compartiendo un mismo enlace óptico.....	57
4.2.1	Simulación de un enlace Fibra-Radio por WDM.....	57
4.2.2	Simulación de un enlace Fibra-Radio utilizando un OBPF.	60
4.2.3	Evaluación en MATLAB del esquema de acceso NOMA...	63
4.3	Sumario.....	72
	Referencias.....	73
 CAPÍTULO 5: EXPERIMENTOS.....		75
	Introducción.....	75
5.1	Transmisión de datos generados por un FPGA a través de un enlace FSO.....	75

5.2	Transmisión de datos generados por un FPGA a través de un enlace óptico a modulación externa.....	79
5.3	Emulación de un sistema Fibra-Radio operando en las bandas S y C de radio frecuencia.....	82
5.4	Transmisión de dos señales de microondas compartiendo un mismo enlace óptico.....	88
5.5	Transmisión de dos señales digitales compartiendo un mismo enlace óptico.....	92
5.6	Sumario.....	100
	Referencias.....	101
 CAPÍTULO 6: CONCLUSIÓN GENERAL.....		103
 APÉNDICE A: Tratamiento de señales digitales en MATLAB.....		105
APÉNDICE B: Producción académica.....		107

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

En este capítulo se definen la motivación y el problema a resolver del presente trabajo. También se describen los objetivos, la hipótesis y la metodología que se lleva a cabo para alcanzarlos. Se da además un breve preámbulo sobre el área a la que está dirigido este trabajo.

La introducción está dividida en ocho secciones. En la primera, se plantea la motivación para la realización de este trabajo. En la segunda, se describe de manera general los esquemas Fibra-Radio y los principales esquemas de acceso multiusuario utilizados en las transmisiones inalámbricas, destacando entre ellos al esquema de Acceso Múltiple No-Ortogonal (NOMA, Non Orthogonal Multiple Access); también se explica la contribución al respecto. En la tercera, se comenta la situación actual sobre los sistemas de comunicación y el problema a resolver. En la cuarta, se especifica el objetivo general, así como los objetivos específicos. La hipótesis del trabajo se plantea en la quinta sección. La metodología para el desarrollo del trabajo se explica en la sexta sección. En la séptima, se enumera la organización de esta Tesis. Finalmente, se presenta el sumario de la presente introducción general.

1.1 Motivación

Los avances en las tecnologías de comunicación no se detienen; se deben a una demanda creciente no sólo de la cantidad de dispositivos electrónicos de comunicación (radios, TVs, teléfonos y equipos de cómputo) y de los servicios (radio, HDTV, telefonía e Internet) que están disponibles para los usuarios, sino también de los servicios cada vez más diversos que estos dispositivos son capaces de brindar, lo que ha hecho posible transmitir información de maneras cada vez más diversas, rápidas y eficientes. Desde los mensajes escritos transportados a pie, hasta los servicios de transmisión en tiempo real a través de medios guiados (cables metálicos o fibra óptica), y medios no guiados (aire), se observa que la evolución de los sistemas de comunicación es permanente. Ésta impone la necesidad creciente de encontrar nuevas formas de aprovechar los recursos que se utilizan para las comunicaciones, tales como la energía eléctrica (en cables metálicos), las ondas

electromagnéticas (en los medios inalámbricos como el aire), o la luz (en las guías ópticas).

1.2 Esquemas Fibra-Radio y esquemas de acceso multiusuario

En este escenario, se han desarrollado diversos métodos para combinar y optimizar los procedimientos de transmisión; una combinación de tecnologías como la óptica y la inalámbrica permite explotar en conjunto las ventajas inherentes a cada una. Por un lado, una solución conocida como *Esquema Fibra-Radio* utiliza fibra óptica para transportar señales a antenas transmisoras y radiarlas a múltiples usuarios, utilizando y combinando las ventajas de la fibra óptica y de la transmisión inalámbrica [1]. Con respecto a la fibra óptica, su gran ancho de banda, su inmunidad a las interferencias electromagnéticas (EMI, Electro Magnetic Interference) y su baja atenuación se utilizan de manera ventajosa, y con respecto a la transmisión inalámbrica, ésta proporciona movilidad absoluta a los usuarios sin necesidad de un terminal de conexión, además de que no depende de la longitud de un cable [2,3]. La Figura 1.1 muestra un esquema general Fibra-Radio, en donde los datos generados en un sitio central (CS, Central Site) se transmiten a través de un enlace óptico directamente a la estación base (BS, Base Station) para ser radiados. La señal transmitida inalámbricamente se ve afectada principalmente por el desvanecimiento, el ruido y la interferencia co-canal, entre otros fenómenos inherentes a este tipo de transmisión [4-7].

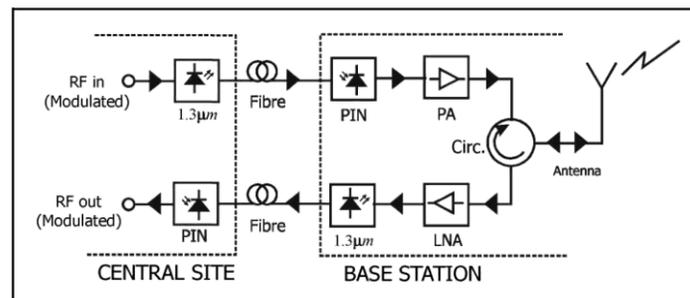


Figura 1.1. Esquema básico Fibra-Radio [8]

Por otro lado, en cuanto a los servicios de comunicación móvil (telefonía celular e internet inalámbrico), tal como se ha evolucionado considerablemente en el diseño

de los dispositivos móviles, también se ha hecho lo propio en el uso y aprovechamiento de las ondas electromagnéticas que éstos utilizan para establecer la comunicación inalámbrica; los primeros teléfonos celulares utilizaban los espectros de frecuencia de las transmisiones de radio disponibles, de modo que no se contaba con frecuencias de uso propio, ni con la tecnología para desarrollar redes de uso exclusivo. Posteriormente, los sistemas de transmisión y recepción fueron evolucionando a la par de la tecnología. Se dispuso paulatinamente de otros procedimientos, valores y espectros de frecuencia, hecho que se denominó como las “generaciones” de las redes de telefonía celular (que con el tiempo integraron el servicio de internet móvil); éstas han sido distinguidas por los usos que se les dan y los servicios que las redes son capaces de proporcionar a los usuarios (siempre atendiendo a la tecnología disponible de los dispositivos móviles con los que dichas frecuencias son aprovechadas). Las mencionadas generaciones son conocidas como 1G, 2G, 3G Y 4G, siendo ésta última la utilizada actualmente, y que cuenta ya con su propia actualización, la 4.5G, cuyo uso aún se alterna con 4G [9]. En la actualidad la tecnología inalámbrica de servicios de comunicaciones móviles está en proceso de migración e implementación de la quinta generación 5G. En este proceso se busca el aprovechamiento y la compatibilidad de las redes existentes y el desarrollo del Internet de las Cosas.

Ahora bien, un sistema de telefonía celular y/o de internet móvil requiere el acceso de múltiples usuarios a una determinada red de comunicación de manera simultánea sin errores, pérdidas de información o interferencias entre ellos. Para ello se requiere de una tecnología que lo facilite utilizando las frecuencias de radio disponibles; esto último es conocido como *Esquema de Acceso Múltiple o Multiusuario* [9]. Se han utilizado distintos esquemas de acceso a lo largo de la historia de la telefonía celular, obedeciendo a los avances tecnológicos en transmisiones inalámbricas y a la capacidad de los dispositivos con los que se utilizan dichas frecuencias. Los esquemas de acceso multiusuario constituyen la esencia misma del funcionamiento de la tecnología de radio en el sistema celular, dado que en ésta se requiere compartir al máximo el espectro disponible de frecuencias de radio. Para expresar mejor el concepto, la Figura 1.2 muestra el

diagrama a bloques básico de un sistema inalámbrico de comunicaciones para varios usuarios, indicando en qué lugar se encuentra ubicado el esquema de acceso múltiple [9]. La señal destinada a cada usuario es demodulada y decodificada dentro de cada uno de manera independiente; la manera de hacerlo depende directamente de la estrategia de modulación y del esquema de acceso utilizados. Un distintivo de cada generación es principalmente el esquema de acceso. El acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, Frequency Division Multiple Access), el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access), el acceso múltiple por división de código (CDMA, Code Division Multiple Access) y el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access) se han utilizado en 1G, 2G, 3G, y 4G, respectivamente [9]. Con el propósito de soportar más usuarios se propone el acceso múltiple no ortogonal (NOMA), el cual, junto con OFDMA, está destinado a ser implementado en 5G [9,10].

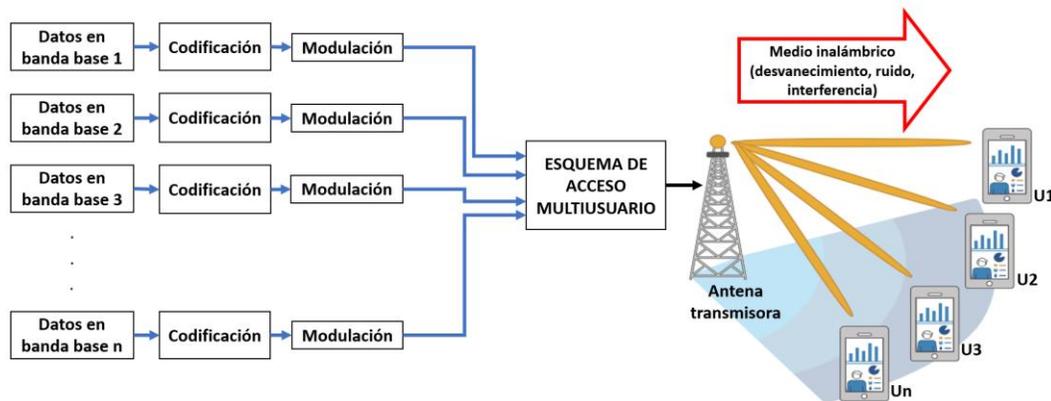


Figura 1.2. Esquema de acceso multiusuario para transmisión inalámbrica [9].

Considerando las ventajas de la transmisión por fibra óptica y de la propagación inalámbrica de la información para su difusión a través de estrategias 5G, **en el presente trabajo se propone la realización de un estudio teórico y experimental de un sistema de comunicación óptico a modulación externa, y el posterior acondicionamiento de la información para tener de esta manera un esquema de acceso multiusuario NOMA integrado a un sistema Fibra-radio.** Esto permitirá optimizar aún más las prestaciones de ambos sistemas. Se busca

entonces la transmisión de dos señales digitales con esquema de acceso a través de fibra óptica, y posteriormente, a través de una antena a nivel de capa física.

1.3 Situación actual y problema a resolver

En las últimas décadas, el crecimiento de los servicios de comunicaciones se ha dado de manera exponencial. De acuerdo con CISCO, se estima que en el 2022 existieron más de 28,000 millones de dispositivos a nivel mundial, incluidos 12,000 millones de dispositivos móviles y conexiones de IoT, además de que el 82% de todo el tráfico IP es video [11]. El número de usuarios de Internet en México tuvo un crecimiento considerable en los años recientes. Se estima que actualmente 107.3 millones de mexicanos ya son usuarios de internet a través de cualquier dispositivo [12]. El crecimiento anual de este sector en México desde 2014 se ilustra en la Figura 1.3, en la cual también se indica el porcentaje en cada aumento.

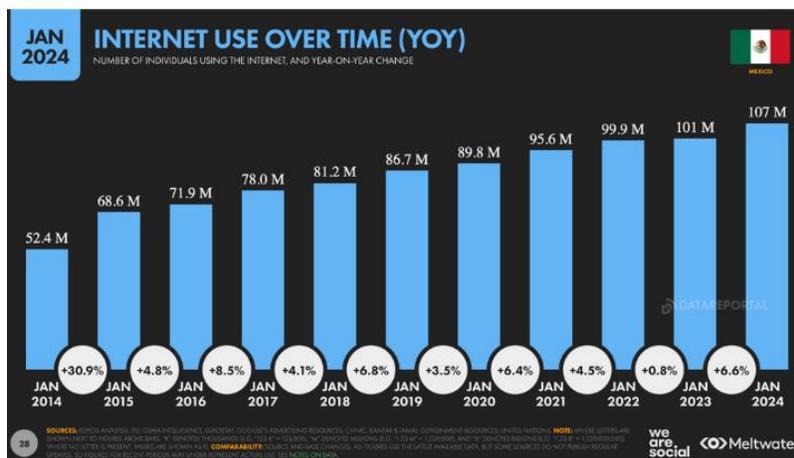


Figura 1.3. Crecimiento de la población usuaria de Internet en México [12].

Esto representa un 83% de la población total en México. Se debe destacar también que las conexiones móviles cobran relevancia, pues el 97.3% de la población se beneficia de ellas de una u otra forma, sean o no usuarios directos [13].

Ante el aumento vertiginoso en el número de dispositivos existentes, que demandan en igual proporción los recursos para comunicarse, y de la eficiencia y variedad de los servicios proporcionados por los sistemas de telecomunicaciones, una solución es la propuesta de tecnologías nuevas para el procesamiento o la generación de las señales que transportan a los datos. **Un enlace Fibra-Radio con un esquema de**

acceso de nueva generación como NOMA, el cual permite multiplicar el número de usuarios integrados en un sistema de comunicación, además de que se dispone del ancho de banda que brinda la fibra óptica para ubicar un número importante de frecuencias portadoras en cada enlace, enfatizando que NOMA permite ubicar más de un usuario en una misma frecuencia.

1.4 Objetivos

El proyecto consiste en el análisis y estudio, la simulación, la implementación física y el dimensionamiento de un sistema de transmisión de datos que integra el sistema Fibra-Radio con el esquema de acceso multiusuario NOMA. Los objetivos para llevarlo a cabo son los siguientes:

1.4.1 Objetivo general

Dimensionar e implementar un sistema de transmisión de datos Fibra-Radio 5G.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Entender el funcionamiento de un sistema de comunicación vía fibra óptica a modulación externa.
2. Analizar la operación de un esquema Fibra-Radio.
3. Comprender el funcionamiento del esquema de acceso NOMA.
4. Crear un conjunto de simulaciones para sistemas de comunicación Fibra-Radio y NOMA.
5. Evaluar experimentalmente el prototipo de un sistema de comunicación Fibra-Radio.

1.5 Hipótesis

Actualmente, los estudios y aplicaciones de los esquemas Fibra-Radio se centran en su evolución, buscando formas de transportar señales eléctricas en frecuencias cada vez mayores aprovechando aún más las prestaciones de la fibra óptica. Por otro lado, el esquema de acceso NOMA sigue siendo objeto de estudio y desarrollo, buscando formas de añadir más usuarios a una señal determinada y optimizando

los sistemas para una recuperación más efectiva y con menos errores en la información recibida. Los resultados sobre estos estudios se observan y se comentan en la sección del estado del arte del Capítulo 2 de esta Tesis. En la mayoría de los trabajos mencionados, así como en la observación de la situación actual, se nota un crecimiento permanente en el número de usuarios de los servicios de comunicación. Éste trae la necesidad de resolver los requerimientos actuales de servicios de transmisión de datos para un número creciente de usuarios.

Un esquema de acceso inalámbrico multiusuario NOMA integrado en un sistema híbrido Fibra-Radio permitirá combinar las ventajas de ambos sistemas. El principal aporte de este trabajo es establecer una potencial técnica para poder multiplicar el número de usuarios que soporta un sistema de comunicaciones a nivel de capa física.

1.6 Metodología

La metodología para diseñar e implementar un sistema Fibra-Radio con esquema de acceso NOMA se describe a continuación:

- Determinar el tipo de modulación óptica que se va a utilizar, así como la fuente láser, la fibra óptica, el modulador electroóptico y el fotodetector.
- Definir, con base en lo anterior, la longitud de onda de la luz láser que es usada como portadora.
- Determinar las antenas que se utilizan para la transmisión inalámbrica, así como la frecuencia de operación.
- Diseñar y realizar simulaciones computacionales de sistemas de comunicación electroópticos e inalámbricos.
- Realizar experimentos en laboratorio con dispositivos electroópticos, eléctricos y de tecnología inalámbrica.
- Implementar el prototipo propuesto.

- Realizar pruebas de transmisión-recepción y evaluar el funcionamiento del sistema implementado.

1.7 Organización del documento de Tesis

El presente documento está compuesto por seis capítulos organizados de la siguiente manera: el primero presenta una introducción general sobre el trabajo, la cual contiene la motivación, la descripción general de los esquemas Fibra-Radio y de los principales esquemas de acceso multiusuario usados en las comunicaciones inalámbricas actuales, la contribución, la situación actual sobre los sistemas de comunicación y el problema a resolver, los objetivos, la hipótesis y la metodología, y finalmente, la organización del escrito. El segundo capítulo describe de manera detallada a los esquemas Fibra-Radio y al esquema de acceso NOMA, y presenta el estado del arte sobre ambos. El tercer capítulo describe a los principales dispositivos que componen al esquema propuesto: la fibra óptica, el modulador electroóptico y las antenas, así como los conceptos de las transmisiones inalámbricas y el esquema de acceso NOMA. En el cuarto capítulo se muestran simulaciones computacionales de sistemas Fibra-Radio: el primero para un solo usuario, y el segundo y tercero para dos usuarios, los cuales integran el esquema de acceso NOMA. El quinto capítulo describe los experimentos realizados en laboratorio y sus resultados. Finalmente, en el sexto capítulo se presenta la conclusión general. La producción académica se describe en el apéndice B. Cada capítulo contiene una sección final de las referencias utilizadas.

1.8 Sumario

Se explicó la estructura general del presente documento de Tesis, enumerando los motivos y el propósito para la realización del trabajo, así como los objetivos, la hipótesis y la metodología que se siguió. En el siguiente capítulo se describe el concepto de un esquema Fibra-Radio y de los principales esquemas de acceso que se utilizan en las transmisiones inalámbricas, destacando el esquema NOMA, y se presenta el Estado del Arte respecto a estos temas.

Referencias.

- [1] S. Ahmed, S. Saffar, S. Mustafa, & S. Atroshy. "A Review on Radio Over Fiber Systems For Long Distance Communication," Academic Journal of Nawroz University (AJNU), 2021. doi: <https://www.doi.org/10.25007/ajnu.v1n3a1363>
- [2] Diez ventajas de tener conexión a internet por fibra óptica (en línea). Disponible en: <https://www.hp.com/cl-es/shop/tech-takes/diez-ventajas-de-tener-conexion-a-internet-por-fibra-optica>
- [3] Advantages of wireless communications (en línea). Disponible en: <https://www.ecstuff4u.com/2017/11/advantages-of-wireless-communication.html>
- [4] Y. Zhou, V. W. S. Wong, & R. Schober, "Performance Analysis of Cooperative NOMA with Dynamic Decode-and-Forward Relaying," GLOBECOM 2017 – 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017, p. 2. <https://www.doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254925>
- [5] J. Castañeda-Camacho, & D. Lara-Rodríguez, "Teletraffic analysis of an overlaid system using CDMA and TDMA with cell coverage area restriction," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, vol. 57, cap. 2, pp. 828–846. <https://www.doi.org/10.1109/TVT.2007.905616>
- [6] J. Castañeda-Camacho, G. Mino-Aguilar, L. Cortez, J. E. M. Gutiérrez-Arias, J. F. Guerrero-Castellanos, & G. A. Muñoz Hernández, "Montecarlo Simulation Applied to Measurement of the Impact of the Smart Antenna Technology in Digital Cellular Systems," Ingeniería, Investigación y Tecnología, 2015, pp. 207–212. <https://www.doi.org/10.1016/j.riit.2015.03.005J>
- [7] J. Castañeda-Camacho, & D. Lara-Rodríguez, "Ordered Hunt Schemes for Overlaid CDMA Cellular Systems," Ingeniería, Investigación y Tecnología, 2010, Vol. 11, pp. 349-365. <https://www.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2010.11n3.030>

- [8] K. M. Maamoun & H. T. Mouftah, "A survey and a novel scheme for RoF-PON as FTTx wireless services," 2009 6th International Symposium on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), Alexandria, Egypt, 2009, pp. 246-253, doi: <https://www.doi.org/10.1109/HONET.2009.5423063>
- [9] A. F. M. S. Shah, A. N. Qasim, M. A. Karabulut, H. Ilhan & M. B. Islam, "Survey and Performance Evaluation of Multiple Access Schemes for Next-Generation Wireless Communication Systems," IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 113428-113442, doi: <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104509>
- [10] F.-L. Luo, & Ch. Zhang, "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): Concept and Design", Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementation, John Wiley & Sons, Ltd., 2016, pp. 143-168. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7572737>
- [11] Cisco prevé más tráfico IP en los próximos cinco años que en toda a historia de Internet (en línea). Disponible en: <https://news-blogs.cisco.com/emea/es/2018/11/27/cisco-preve-mas-trafico-ip-en-los-proximos-cinco-anos-que-en-toda-la-historia-de-internet>
- [12] Estado de Internet en México (en línea) Disponible en: <https://marketing4ecommerce.mx/estado-de-internet-en-mexico/>
- [13] El incremento de usuarios de Internet en México (en línea). Disponible en: <https://adnmedialab.com/2024/04/03/el-incremento-de-usuarios-de-internet-en-mexico>

CAPÍTULO 2: ESQUEMAS FIBRA-RADIO Y ESQUEMA DE ACCESO NOMA

Introducción

Una vez explicado en el capítulo anterior el procedimiento del presente trabajo, la forma en que se lleva a cabo y las razones por las que se realiza, en éste se describe a los sistemas Fibra-Radio y al esquema NOMA. Este capítulo consta de cuatro secciones. En la primera se describe al sistema Fibra-Radio. En la segunda se explica el funcionamiento del esquema de acceso NOMA. En la tercera se encuentra el Estado del Arte correspondiente a los dos sistemas. Finalmente, en la quinta sección se presenta el resumen.

2.1 Esquema Fibra-Radio

El esquema Fibra-Radio es una solución tecnológica que utiliza un cableado de fibra óptica para distribuir señales a antenas transmisoras y radiarlas a los destinatarios de dichas señales. Aprovechando en conjunto las ventajas de la fibra óptica y las de la transmisión inalámbrica [1-3].

Un esquema Fibra-Radio se ilustra en la Figura 2.1, en la que se muestra que, en el CS, una señal eléctrica que contiene la información que se desea transportar modula un haz de luz, el cual es inyectado en el enlace óptico que cubre la distancia requerida. Posteriormente, en la unidad de radio remota (Remote Radio Unit, RRU) se recupera el haz de luz y se entrega la señal eléctrica, la cual finalmente se radia por una antena.

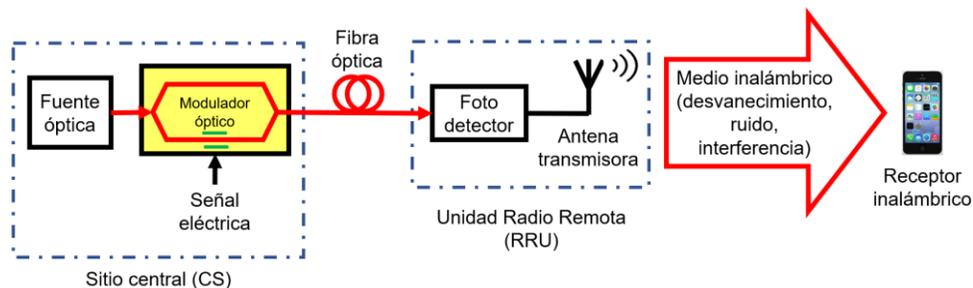


Fig. 2.1. Enlace Fibra-Radio.

Actualmente, la tecnología Fibra-Radio se ha convertido en una opción muy robusta en términos de cobertura, seguridad y confiabilidad. Este sistema se está implementando para mejorar el rendimiento y proporcionar un mayor ancho de banda y un mayor alcance a las comunicaciones móviles; estos sistemas tienen ventajas que incluyen menor atenuación y asignación dinámica de recursos, además de que pueden transferir señales de alta frecuencia que admiten tecnologías de red de última generación [4].

2.2 Esquema de acceso NOMA

NOMA es un esquema de acceso multiusuario para transmisiones inalámbricas. Esto significa que dos o más señales que requieren transmitirse se integran en una sola sin interferirse ni interrumpirse entre sí. En los sistemas de transmisión inalámbrica existen diversos procedimientos para lograrlo; en las distintas generaciones de tecnología inalámbrica se han desarrollado diversos esquemas de acceso, y los principales son FDMA (implementado en 1G), TDMA (implementado en 2G), CDMA (implementado en 3G), y OFDMA (implementado y actualmente usado en 4G y 4.5G) [5].

La estrategia de nueva generación es el esquema de acceso multiusuario NOMA [6] (cuyo uso se considera para 5G además de OFDMA), que realiza el multiplexado de señales en el dominio de la potencia. **La clave es tener señales portadoras que puedan ser moduladas en frecuencias iguales y que posean diferencias significativas en sus niveles de potencia, sumándolas en una sola señal, de modo que sea posible establecer más de un enlace en una misma frecuencia aprovechando las diferencias de nivel entre las potencias.** Esto se ilustra en la Figura 2.2 (a), en la que se observa la asignación de una sola potencia por frecuencia (como en OFDMA), comparada con la asignación de más de una potencia por frecuencia (como se configura NOMA), lo cual se aprecia en 2.2 (b).

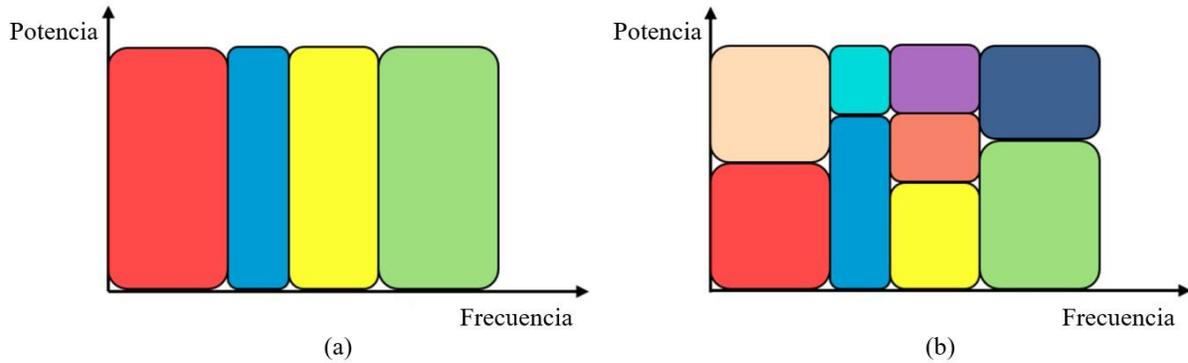


Fig. 2.2 (a) Acceso múltiple ortogonal (como se usa en OFDMA), y (b) acceso múltiple no ortogonal (NOMA) [7].

La Figura 2.3 muestra un esquema NOMA de enlace descendente para dos usuarios. El esquema de acceso NOMA considera una señal (destinada al usuario 1) con el nivel de potencia más bajo, y en consecuencia, la otra (destinada al usuario 2) con el nivel de potencia más alto. La señal total NOMA transmitida de forma inalámbrica consiste en su suma.

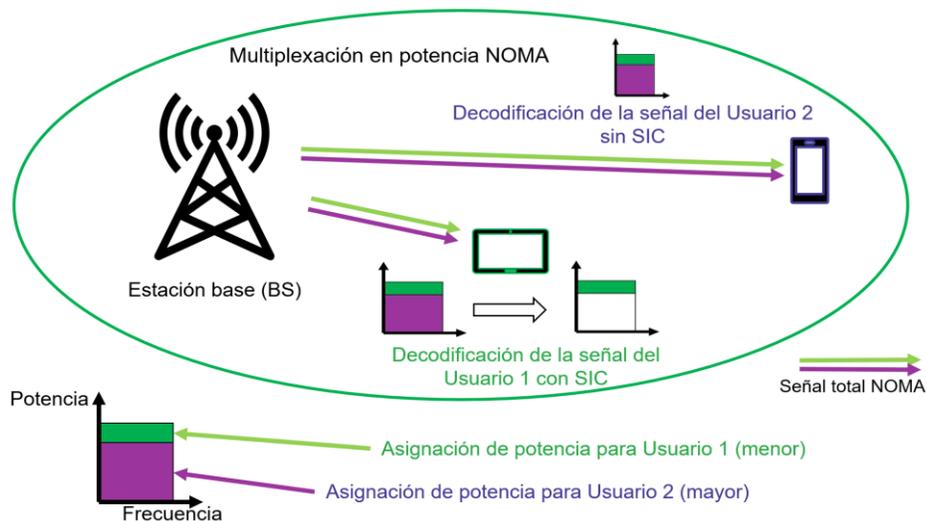


Fig. 2.3. Enlace descendente NOMA para dos usuarios [6].

La señal para cada usuario es generada y/o procesada en la BS. Dado que un esquema de acceso NOMA realiza la distinción de señales asignando diferentes niveles de potencia, la estrategia de modulación digital QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) [8] en este trabajo se considera como la adecuada para este propósito, ya que realiza la modulación en fase manteniendo la frecuencia y la amplitud de la

portadora. Esto da mucha robustez al objetivo perseguido, permitiendo asignar a voluntad un nivel de potencia a cada señal sin afectar los datos transmitidos. Además, se elige QPSK porque actualmente se usa (además de 16QAM) [8] en las tecnologías 4.5G y 5G.

Para separar los datos de cada usuario receptor, al demodular la señal total recibida el usuario más lejano recupera directamente el mensaje cuya modulación tenía una mayor asignación de nivel de potencia, mientras que la señal para el otro es considerada como ruido. En el usuario más cercano, la señal con el nivel de potencia más bajo se recupera por la diferencia entre la señal total recibida y la señal con el nivel de potencia más alto. Este procedimiento se conoce como **Cancelación de Interferencia Sucesiva** (SIC, Successive Interference Cancellation) [9], también ilustrado en la Figura 2.3. Por ello, SIC es una técnica adecuada para separar y recuperar las señales que fueron sumadas en el esquema NOMA para su transmisión.

2.3 Estado del arte.

Los esquemas de Fibra-Radio se han estudiado desde hace varios años. Los trabajos que se han reportado en la literatura disponible se refieren no sólo a su uso, sino también a su evolución. Por ejemplo, en [10], se propone y se demuestra experimentalmente un enlace Fibra-Radio con transmisión de doble eficiencia espectral y compensación del desvanecimiento de potencia causado por la dispersión cromática. En [11], se propone un sistema conocido como Power-over-Fiber (PoF) para la transmisión de energía a través de fibra óptica. En [12], se demuestra la funcionalidad del esquema Fibra-Radio con diferentes frecuencias de transmisión simultánea, utilizando un multiplexor digital para la selección de frecuencias y canales. Un esquema denominado Radio-Fibra se caracteriza en [13], donde una señal de microondas proporcionada por una antena receptora se suministra a un modulador óptico. En [14], se propone un esquema híbrido con un sistema Fiber-To-The-Home (FTTH) combinado con un sistema de aplicaciones inalámbricas móviles, utilizando un modulador óptico doble y dos señales diferentes (en alta frecuencia y en banda base). En [15], se desarrolla un esquema Fibra-Radio

utilizando un cable radiante para la transmisión inalámbrica. En [16], se simula un sistema Fibra-Radio basado en modulación 16QAM utilizando un modulador de polarización. En [17], se describe un proyecto de Fibra-Radio para implementar una red de televisión digital en Indonesia. El diseño de una red óptica pasiva con esquema Fibra-Radio es reportado en [18]. En [19] se lleva a cabo un análisis de distintos formatos de modulación para los esquemas Fibra-Radio.

En cuanto a NOMA, también los trabajos existentes se refieren no sólo a su uso, sino también a su desarrollo y evolución. Dado el crecimiento en la demanda de servicios, el progreso reciente de los sistemas NOMA se analiza en [20], en donde se proporciona una revisión de las tecnologías de acceso múltiple desarrolladas en los últimos 50 años, analizando su integración con las tecnologías emergentes. En [21], se simula un sistema NOMA combinado con MIMO (Multiple Input – Multiple Output) de 8 antenas, formando un esquema NOMA-MIMO 8x8. En [22], se evalúa el rendimiento de NOMA con respecto a OFDMA. En [23], se presenta un estudio comparativo de distintos algoritmos utilizados en NOMA para la asignación de potencia. En [24], se propone una técnica para mejorar la capacidad de acceso inicial de los usuarios en una red no terrestre 3GPP utilizando NOMA. Para mejorar la tasa de usuarios del borde de una celda, en [25], se propone el NOMA cooperativo (CNOMA), donde el usuario cercano actúa como un relé y retransmite los datos del usuario del borde de la celda. En [26], se utiliza la Era de la Información (Age of Information, Aol) para investigar qué tan recientes son los datos existentes sobre NOMA y SIC. En [27], se estudian criterios para la asignación de niveles de potencia en un esquema NOMA para un número arbitrario de usuarios. Un estudio sobre la eficiencia de NOMA en redes multiantena se realiza en [28]. Finalmente, una simulación y su análisis sobre la Tasa de Error de Bits y la probabilidad de corte de señal en un esquema NOMA se llevan a cabo en [29].

En estos trabajos se demuestra que tanto el enlace Fibra-Radio como el esquema de acceso NOMA poseen características y ventajas de las que anteriormente no se disponía, lo que los ubica como opciones importantes en el futuro de las

telecomunicaciones. Sin embargo, **no se localiza alguno en el que se implemente NOMA en un enlace Fibra-Radio.**

2.4 Sumario

Se describieron los sistemas Fibra-Radio y al esquema de acceso NOMA. También, un estudio del estado del arte permitió conocer los trabajos recientes que se han llevado a cabo en ambas áreas. En el próximo capítulo se describe a los principales elementos que componen a un sistema Fibra-Radio tanto en la parte óptica como en la parte inalámbrica, incluyendo su teoría fundamental y el concepto de transmisiones inalámbricas.

Referencias

- [1] S. Islam, M. F. Khan, M. Z. Hossan & M. A. Amin, "An Overview of Radio over Fiber (RoF) Technology," 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kannur, India, pp. 749-752, 2019. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ICICICT46008.2019.8993233>
- [2] G. Keiser, "Advantages of Optical Fibers," Optical Fiber Communications, 4th Edition, McGraw Hill, 2000, p. 5.
- [3] Advantages of Wireless Communications (en línea). Disponible en: <https://www.ecstuff4u.com/2017/11/advantages-of-wireless-communication.html>
- [4] S. Ahmed, S. Saffar, S. Mustafa, & S. Atroshy, "A Review on Radio Over Fiber Systems For Long Distance Communication". Academic Journal of Nawroz University (AJNU), 2021. doi: <https://www.doi.org/10.25007/ajnu.v1n3a1363>
- [5] A. F. M. S. Shah, A. N. Qasim, M. A. Karabulut, H. Ilhan & M. B. Islam, "Survey and Performance Evaluation of Multiple Access Schemes for Next-Generation Wireless Communication Systems," IEEE Access, vol. 9, pp. 113428-113442, 2021. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104509>
- [6] F.-L. Luo, & Ch. Zhang, "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): Concept and Design", Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementation, John Wiley

- & Sons, Ltd., 2016, pp. 143-168. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7572737>
- [7] J. Cheon, & H.-S. Cho, “*Power Allocation Scheme for Non-Orthogonal Multiple Access in Underwater Acoustic Communications*,” *Sensors*, vol. 17, p. 2465, 2017. doi: <https://www.doi.org/10.3390/s17112465>
- [8] A. S. Bahuguna, K. Kumar, Y. P. Pundir, & A. V. Bijalwan, “*A Review of Various Digital Modulation Schemes Used in Wireless Communications*,” *Proceedings of Integrated Intelligence Enable Networks and Computing. Algorithms for Intelligent Systems*, Springer, Singapore, pp. 561-570, 2021. https://www.doi.org/10.1007/978-981-33-6307-6_56
- [9] N. Iswarya, & L. S. Jayashree, “*A Survey on Successive Interference Cancellation Schemes in Non-Orthogonal Multiple Access for Future Radio Access*,” *Wireless Pers Commun*, vol. 120, pp. 1057–1078, 2021. <https://www.doi.org/10.1007/s11277-021-08504-1>
- [10] D. Shan, A. Wen, W. Zhai & M. Tan, “*All-Optical Double Spectral-Efficient RoF Link With Compensation of Dispersion-Induced Power Fading*,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 1-7, 2021. doi: <https://www.doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3090065>
- [11] L. C. Souza, E. S. Lima, & A. C. S. Junior, “*Implementation of a Full Optically-Powered 5G NR Fiber-Wireless System*,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 1, 2022. doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3144368>
- [12] H. Y. Kao, S. Ishimura, K. Tanaka, K. Nishimura, & R. Inohara, “*End-to-End Demonstration of Fiber-Wireless Fronthaul Networks Using a Hybrid Multi-IF-Over-Fiber and Radio-Over-Fiber System*,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 13 no. 4, 2021. doi: <https://www.doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3106706>
- [13] B. M. Haas, & J. D. McKinney, “*Characterization of a downconverting, phase-modulated rf-over-fiber link with a single modulator*,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 4, 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2846415>
- [14] C. T. Lin, J. Chen, P. C. Peng, C. F. Peng, W. R. Peng, B. S. Chiou, & S. Chi, “*Hybrid optical access network integrating fiber-to-the-home and radio-over-fiber*

- systems," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 19, no. 8, pp. 610–612, 2007. doi: <https://www.doi.org/10.1109/LPT.2007.894326>
- [15] A. G. Correa-Mena, J. A. Seseña-Osorio, M. E. Diago-Mosquera, A. Aragón-Zavala, & I. E. Zaldívar-Huerta, "Optical transmission of an analog TV-signal coded at 2.24 GHz and its distribution by using a radiating cable," Electronics, Vol. 9, no. 6, pp. 1-9, 2020. doi: <https://www.doi.org/10.3390/electronics9060917>
- [16] J. Sruthi, A. Chandrasenan, K. G. Sreeni, R. S. Jeena & J. Zacharias, "A 16 QAM RoF System based on Polarization Modulator," 2021 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), Bangalore, India, pp. 01-05, 2021. doi: <https://www.doi.org/10.1109/CONECCT52877.2021.9622597>
- [17] D. Rusdiyanto & C. Apriono, "Radio over Fiber for Implementing Digital Television Network in Indonesia," 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Indonesia, pp. 321-325, 2020. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ISITIA49792.2020.9163717>
- [18] H. Shanan & M. Çiydem, "Radio over Fiber Passive Optic Network Design," 2022 2nd International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI), Istanbul, Turkey, pp. 1-5, 2022. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ICMI55296.2022.9873808>
- [19] H. Khalil et al., "Performance Analysis of Modulation Formats for Next Generation RoF Systems," in IEEE Access, vol. 9, pp. 139393-139402, 2021, doi: <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116351>
- [20] Y. Liu, C. Ouyang, Z. Ding, & R. Schober, "The Road to Next-Generation Multiple Access: A 50-Year Tutorial Review," 2024. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2403.00189>
- [21] B. Hidayat & Iskandar, "Capacity Evaluation of Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) using 8×8 MIMO in Rayleigh Fading Channel," 2022 8th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta, Indonesia, pp. 1-4, 2022. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ICWT55831.2022.9935368>

- [22] G. Arora & N. P. Singh, "*Performance Enhancement of Wireless Network by Adopting Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Technique*," 2020 First IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA), Kurukshetra, India, pp. 1-5, 2020. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ICMICA48462.2020.9242829>
- [23] M. Atrouche, S. Ayad & B. Mounir, "*Comparative Study of Fairness and Fixed Power allocation Algorithms : In Non-Orthogonal Multiple Access system*," 2022 7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA), Mostaganem, Algeria, pp. 1-5, 2022. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ISPA54004.2022.9786285>
- [24] G. Im, D. H. Jung, J. -B. Kim & J. G. Ryu, "*Empowering User Capabilities via Non-Orthogonal Multiple Access in 3GPP Non-Terrestrial Networks*," 2023 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, pp. 1617-1619, 2023. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ICTC58733.2023.10393009>
- [25] J. Helen Sheeba, V. B. Kumaravelu & A. L. Imoize, "*Rate Maximization of Cell-Edge Users Through Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access*," 2023 4th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSPC), Coimbatore, India, pp. 361-366, 2023. doi: <https://www.doi.org/10.1109/ICSPC57692.2023.10125888>
- [26] Q. Ren, T. -T. Chan, J. Liang & H. Pan, "*Age of Information in SIC-based Non-Orthogonal Multiple Access*," 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Austin, TX, USA, pp. 800-805, 2022, doi: <https://www.doi.org/10.1109/WCNC51071.2022.9771565>
- [27] G. Taricco, "*Fair Power Allocation Policies for Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access Transmission With Complete or Limited Successive Interference Cancellation*," in IEEE Access, vol. 11, pp. 46793-46803, 2023, doi: <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3274470>
- [28] B. Clerckx et al., "*Is NOMA Efficient in Multi-Antenna Networks? A Critical Look at Next Generation Multiple Access Techniques*," in IEEE Open Journal of

the Communications Society, vol. 2, pp. 1310-1343, 2021. doi:
<https://www.doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3084799>

- [29] B. Pavithra and P. Chakraborty, "*Performance Analysis of Bit Error Rate, Capacity and Outage Probability using Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access (PD-NOMA) and Orthogonal Multiple Access (OMA) with Far/Near User,*" 2022 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, pp. 166-170, 2022. doi:
<https://www.doi.org/10.1109/ICICCS53718.2022.9788438>

CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS UTILIZADOS.

Introducción

En referencia a los esquemas Fibra-Radio y NOMA descritos en el capítulo anterior; en éste, se describen las principales características de los dispositivos utilizados en el presente trabajo, en la parte de transmisión óptica e inalámbrica. Este capítulo consta de cinco secciones. En la primera, se describe la fibra óptica estándar y se explican algunos de los conceptos que constituyen su teoría de operación y uso. En la segunda, se describe al modulador electroóptico de intensidad de luz y su funcionamiento. En la tercera, se describen las transmisiones inalámbricas y se explica el procedimiento de transmisión de NOMA. La cuarta sección, describe a las antenas y explica su funcionamiento. Finalmente, en la quinta sección se presenta el sumario.

3.1 Fibras ópticas

Básicamente, una fibra óptica monomodo está constituida por un filamento llamado núcleo y una capa que lo cubre, llamada revestimiento. Este último cuenta a su vez con una cubierta de material que le da protección, previniendo daños causados por factores externos. El núcleo presenta un perfil cilíndrico de diámetro a (de entre 8 y $10 \mu m$), rodeado del revestimiento de diámetro exterior b ($125 \mu m$), como se muestra en la Figura 3.1.

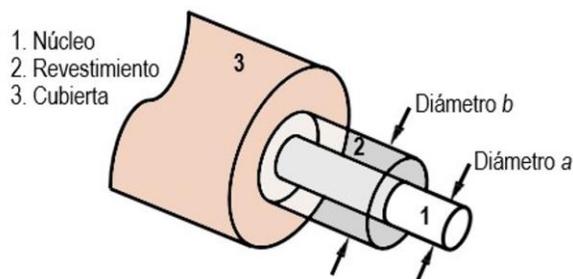


Figura 3.1. Estructura física de una fibra óptica.

Los materiales que componen el núcleo y el revestimiento generalmente están compuestos por dióxido de silicio (SiO_2). Al núcleo se le agrega algún dopante para

incrementar el valor de su índice de refracción [1], que puede ser Germanio (Ge), Fósforo (P), o Boro (B) [2]. El índice de refracción n_1 es para el núcleo, y n_2 es para el revestimiento, ($n_1 > n_2$). Esto permite el confinamiento de la señal luminosa en el núcleo.

Existen dos fenómenos principales presentes en la fibra óptica. Éstos son la *atenuación* y la *dispersión*. El primero da como resultado la pérdida de potencia de la señal óptica; mientras que el segundo, provoca el ensanchamiento temporal de las señales transmitidas. Ambos fenómenos son función de la longitud de onda. En las siguientes subsecciones se explica el concepto y el efecto de cada uno de ellos.

3.1.1 Atenuación de la luz a través de la fibra óptica

La atenuación es la disminución de la intensidad de la luz; es el mecanismo responsable de la pérdida de potencia de la señal. Es un factor que limita la distancia máxima entre el transmisor y el receptor en un enlace de comunicaciones ópticas.

La atenuación α se expresa en dB/Km . Las pérdidas de potencia en una fibra óptica son el resultado de la suma de varios *mecanismos de atenuación* que pueden ser clasificados en *intrínsecos* y *extrínsecos*.

a) *Mecanismos intrínsecos: Absorción Ultravioleta (α_{UV}), Absorción infrarroja (α_{IR}), y Dispersión Rayleigh (α_{RL}).*

b) *Mecanismos extrínsecos: Absorción por Iones OH^-_1 y Absorción por Iones OH^-_2 .*

En la Figura 3.2 se muestra la variación de las atenuaciones provocadas por los mecanismos anteriormente mencionados, así como la atenuación total α_{TOTAL} , la cual está dada por

$$\alpha_{TOTAL} = \alpha_{UV} + \alpha_{IR} + \alpha_{RL} + OH^-_1 + OH^-_2 \quad (3.1)$$

En la Figura 3.2, la región de longitudes de onda alrededor de 1500 nm se conoce como *tercera ventana de transmisión*. Debido a su menor atenuación, ésta es la ventana actualmente utilizada en los sistemas de comunicaciones ópticas. Se observa también un mínimo de atenuación en torno a la longitud de 1300 nm , y se

conoce como *segunda ventana de transmisión*. Mientras que la región alrededor de 850 nm es conocida como *primera ventana de transmisión* [3].

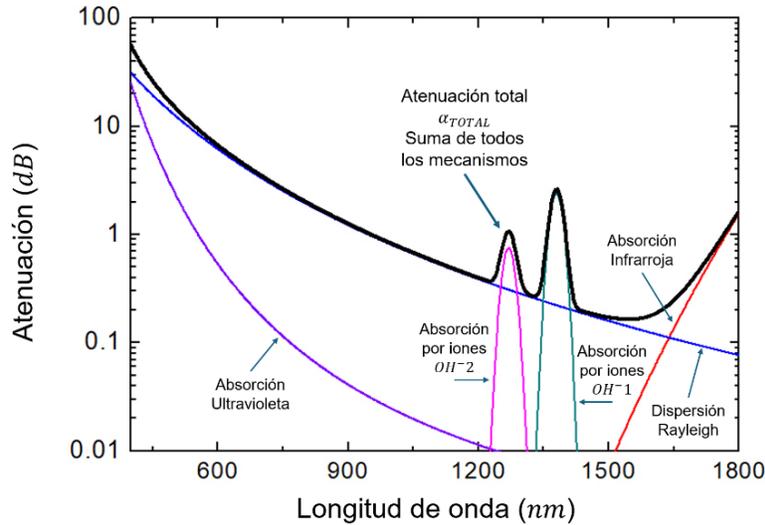


Figura 3.2. Curva de atenuación total en una fibra óptica expresada en dB/Km, y curvas de los mecanismos de atenuación, todas en función de la longitud de onda de la señal.

3.1.2 Dispersión cromática

La dispersión cromática es consecuencia de la dependencia del índice de refracción n de un material con respecto a la longitud de onda λ de la luz que se propaga a través del material, y se modela con la *Ecuación de Sellmeier* [4]:

$$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3^2} \quad (3.2)$$

Los valores de A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 y B_3 son los *Coefficientes de Sellmeier*, y son específicos para cada material. En el caso del SiO₂ se sustituyen los coeficientes correspondientes [5] y la ecuación (3.2) se resuelve para para n :

$$n = \sqrt{1 + \frac{0.6961663 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794 \lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2}} \quad (3.3)$$

La Figura 3.3 muestra la evaluación de la ecuación (3.3) para $700 \leq \lambda \leq 1800$ nm, rango dentro del cual se encuentran las longitudes de onda utilizadas en los sistemas de comunicaciones ópticas.

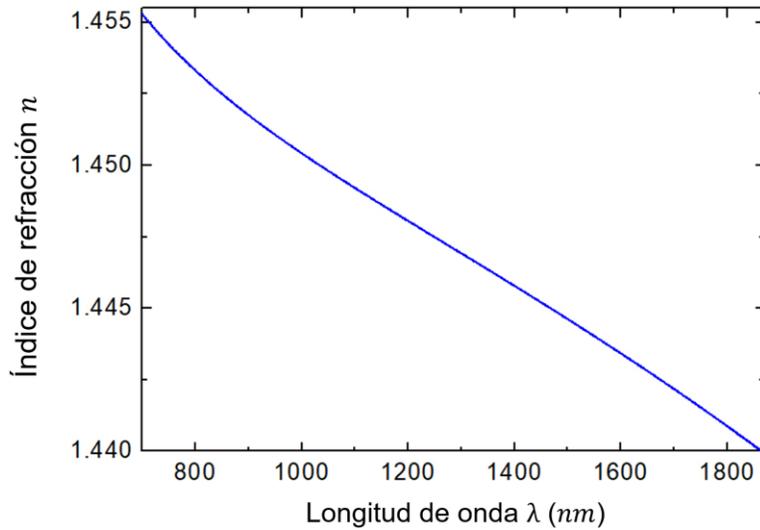


Figura 3.3. Evolución del índice de refracción del SiO₂ en el rango de las longitudes de onda usadas en las comunicaciones ópticas.

La luz inyectada en la fibra está compuesta por diversas longitudes de onda. En consecuencia, al variar el índice de refracción del material de la fibra en función de la longitud de onda, cada componente espectral del haz de luz se propaga a una velocidad particular distinta a las de los otros componentes. Por lo tanto, la presencia del grupo de componentes provoca diferencias de velocidad de propagación entre ellos, lo que a su vez ocasiona que el pulso total a la salida se entregue ensanchado en el dominio temporal y atenuado con respecto al pulso de entrada, como se muestra en la Figura 3.4.

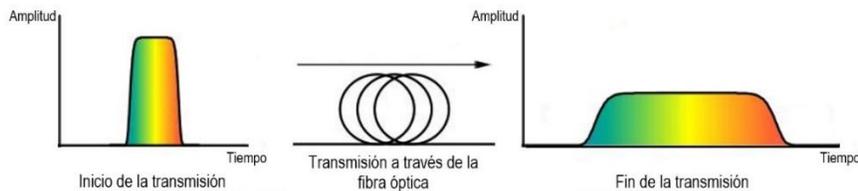


Figura 3.4. Ilustración del concepto de dispersión cromática [6].

La velocidad total del grupo de componentes o *velocidad de grupo* v_g se describe con la expresión (3.4) [7],

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (3.4)$$

en donde ω es la frecuencia angular de la onda luminosa, $\omega = 2\pi c/\lambda$, y β es una constante de propagación en función de λ , $\beta = 2\pi n(\lambda)/\lambda$. c es la velocidad de la luz en el vacío.

Entonces, el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión del material es consecuencia de las diferentes velocidades de los componentes espectrales inyectados en la fibra desde la fuente óptica. Esto sucede porque la velocidad de una onda de luz que se propaga en el medio dieléctrico varía de forma no lineal con la longitud de onda, y se dice que un material muestra dispersión material cuando la segunda derivada del índice de refracción con respecto a la longitud de onda no es cero (es decir, $d^2n/d\lambda^2 \neq 0$).

La magnitud del ensanchamiento del pulso debido a la dispersión del material se puede obtener considerando el *retraso de grupo* τ_g en la fibra óptica, que es el recíproco de la velocidad de grupo v_g definida por la ecuación (3.4). Por tanto, el retraso de grupo viene dado por:

$$\tau_g = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (3.5)$$

Tomando en cuenta la distancia total que recorre el haz de luz, es decir, la longitud L de la fibra, el retraso material de grupo τ_m se define como

$$\tau_m = L \frac{1}{v_g} = L \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (3.6)$$

Por lo anterior, el ensanchamiento del pulso que recorre la distancia L puede ser evaluado considerando la dependencia de τ_m con λ , en donde de la ecuación (3.6) se tiene

$$\frac{d\tau_m}{d\lambda} = \frac{L\lambda}{c} \left[\frac{dn}{d\lambda} - \frac{d^2n}{d\lambda^2} - \frac{dn}{d\lambda} \right] = -L \frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (3.7)$$

La dispersión cromática para fibras ópticas se suele citar como un valor de $|d^2n/d\lambda^2|$. Sin embargo, puede ser dado en términos del parámetro de la dispersión material D , que es definido por

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_m}{d\lambda} = \frac{\lambda}{c} \left| \frac{d^2n}{d\lambda^2} \right| \quad (3.8)$$

que está expresada en $ps/nm \cdot Km$ [8]. Esto significa que cada unidad corresponde a un ensanchamiento de un *picosegundo* por cada *nanómetro* de la longitud de onda central (es decir, la de mayor amplitud) del haz de luz, para cada *kilómetro* de fibra óptica.

En una fibra óptica estándar la dispersión cromática es aproximadamente 0 para un haz de luz con longitud de onda central de 1310 nm , y de aproximadamente 17.46 $ps/nm \cdot Km$ en la longitud de onda de 1500 nm ; ésta última longitud de onda es la usada en comunicaciones ópticas debido a su menor atenuación. Para lograr que la dispersión cromática sea mínima para 1500 nm , se modifica el perfil de índice de refracción de la fibra. Estas fibras de diseño particular, que trasladan la longitud de onda de mínima dispersión a 1500 nm , se denominan fibras *de dispersión corrida* [9].

El parámetro de dispersión $D(\lambda)$ para cada uno de los tipos de fibra se calcula mediante la función

$$D(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left[\lambda - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (3.9)$$

en donde λ_0 es la longitud de onda central y S_0 es la pendiente de dispersión, la cual es 0.092 $ps/(nm^2 \cdot Km)$ para fibra óptica estándar y 0.06 a 0.08 $ps/(nm^2 \cdot Km)$ para fibra de dispersión corrida [10].

Como resultado de la evaluación de la ecuación (3.9), la Figura 3.5 muestra las curvas de dispersión cromática de la fibra óptica estándar y de la fibra óptica de dispersión corrida.

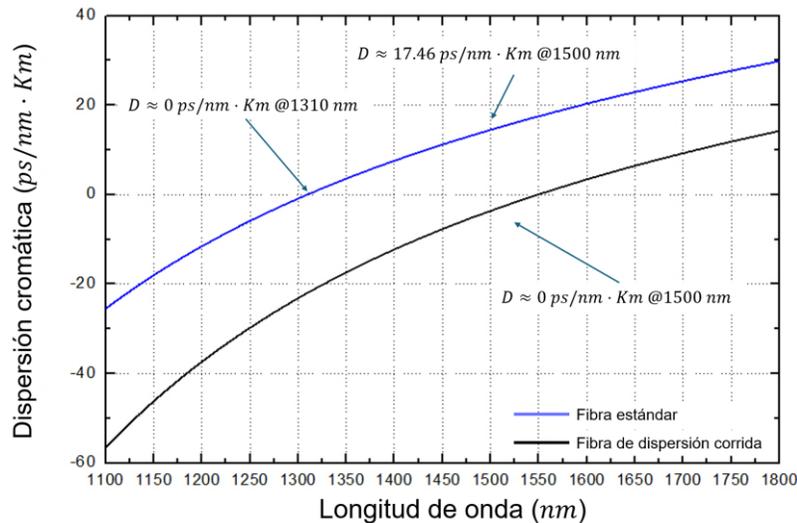


Figura 3.5. Curvas de dispersión cromática para fibra estándar (trazo azul) y para fibra de dispersión corrida (trazo negro).

3.2 Modulador electroóptico

Un modulador electroóptico es un componente cuya función principal es modular, mediante una señal eléctrica, la intensidad y/o la fase de un haz de luz con el propósito de transmitir datos en el dominio óptico [11].

En este trabajo se utilizan los moduladores de intensidad de luz, cuya operación se basa en los principios de la *Electro-óptica*. Ésta es una rama de la Fotónica [12] que trata sobre la modulación, conmutación y redirección de los haces ópticos, entre otras acciones [11].

Para explicar el funcionamiento de un modulador electroóptico de intensidad, es necesario conocer el funcionamiento de un modulador electroóptico de fase. Éste puede ser construido como un dispositivo fotónico integrado, como se muestra en la Figura 3.6, lo que permite que opere a velocidades muy altas y a voltajes relativamente bajos. Para esto, una guía de onda es fabricada sobre un sustrato electroóptico hecho de material birrefringente [13], que frecuentemente es el Niobato de Litio ($LiNbO_3$), integrando la guía de onda hecha de un material como el Titanio (Ti) para incrementar el índice de refracción [11].

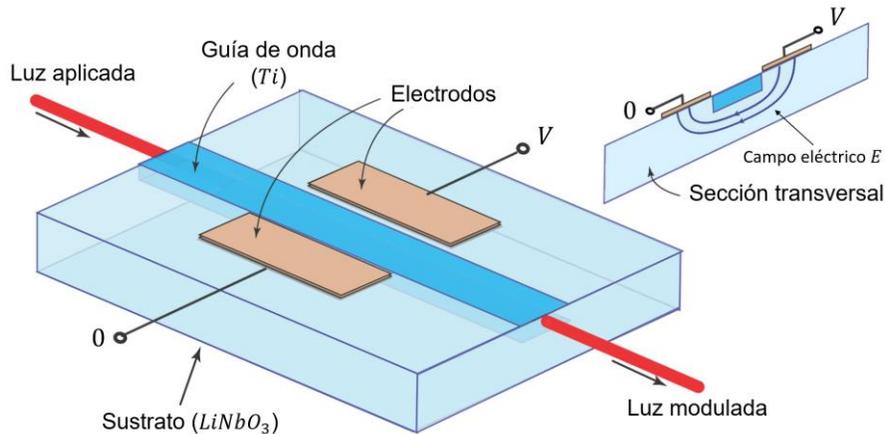


Figura 3.6. Modulador de fase usando el efecto electroóptico [11].

En la Figura 3.6 se observa que un campo eléctrico E es aplicado a los electrodos a los lados de la guía de onda, lo que modifica el índice de refracción de la guía, provocando un cambio de fase en la luz que se propaga. El cambio en el índice de refracción es pequeño, sin embargo, la fase de la onda de luz puede ser modificada significativamente si la distancia del viaje es mucho mayor a la longitud de onda del haz. El voltaje aplicado mediante el cual es posible variar la fase óptica en 180° se conoce como *Voltaje π* (V_π). Cuando se usa una Configuración Transversal [11] y el ancho de la guía de onda es mucho menor que su longitud, V_π puede ser relativamente bajo, del orden de menos de $10 V$. De este modo, los moduladores de fase pueden ser operados a frecuencias de conmutación más allá de los $100 GHz$ [11]. La luz es conducida hacia el interior y hacia el exterior del modulador utilizando fibras ópticas.

Los cambios de fase por sí mismos no modifican la intensidad de un haz de luz; colocando el modulador de fase en una de las ramas de un interferómetro [14] se tiene un modulador de intensidad. En la Figura 3.7 se muestra un interferómetro Mach-Zehnder (MZ) [11] en el que se integra un modulador de fase. Un interferómetro MZ está compuesto por dos divisores de haz en forma de "Y" conectados entre sí por dos guías de onda rectas paralelas, llamadas ramas. A su vez, de los divisores en "Y" se prolongan dos puertos, uno de entrada y uno de salida, que enlazan el MZ con el exterior utilizando fibras ópticas. Para un MZ de

igual apertura y distancia entre sus ramas, un haz de luz ingresa y se divide en dos señales de igual amplitud, para luego recombinarse al final del puerto.

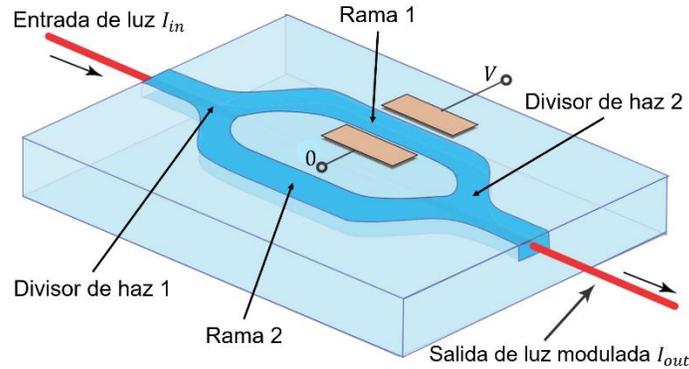


Figura 3.7. Un interferómetro MZ y un modulador electroóptico de fase integrados funcionan en conjunto como un modulador de intensidad [11].

Si el haz de luz incidente es dividido equitativamente en dos partes, la intensidad transmitida a través del puerto de salida I_{out} del interferómetro está relacionada con la intensidad del haz incidente I_{in} por

$$I_{out} = \frac{1}{2}I_{in} + \frac{1}{2}I_{in}\cos\varphi = I_{in}\cos^2(\varphi/2) \quad (3.10)$$

en donde $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ es la diferencia entre el cambio de fase del haz de luz al propagarse por las ramas del interferómetro, siendo φ_1 la fase del haz en la rama 1 y φ_2 la fase del haz en la rama 2. La función de transferencia del interferómetro es entonces $\vartheta = I_{out}/I_{in}\cos^2(\varphi/2)$.

Por la presencia del modulador de fase en la rama 1, se tiene $\varphi_1 = \varphi_{1_0} - \pi V/V_\pi$ [11] (φ_{1_0} es la fase de la onda de luz en la rama 1 en ausencia del campo eléctrico), de modo que φ es controlado por el voltaje aplicado V en concordancia con la relación lineal $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_0 - \pi V/V_\pi$, en donde la constante $\varphi_0 = \varphi_{1_0} - \varphi_2$ depende de la diferencia del recorrido de la luz entre las ramas. La función de transferencia ϑ del dispositivo es por lo tanto una función del voltaje aplicado V :

$$\vartheta(V) = \cos^2\left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\pi V}{2 V_\pi}\right) \quad (3.11)$$

Esta función está ilustrada en la Figura 3.8 para un valor arbitrario de φ_0 . El dispositivo puede ser operado como un modulador lineal de intensidad ajustando la diferencia óptica de recorrido de los haces de modo que $\varphi_0 = \pi/2$, operando en la región lineal cercana alrededor de $\vartheta = 0.5$. Dado lo anterior, se tiene un Modulador de Intensidad Mach Zehnder (MZ-IM, Mach Zehnder Intensity Modulator). Alternativamente, la diferencia óptica de recorrido de los haces puede ser ajustada de manera que φ_0 sea múltiplo de 2π . En tal caso, $\vartheta(0) = 1$ y $\vartheta(1) = 0$. El MZ-IM conmuta la luz en encendido-apagado conforme V es conmutado entre 0 y el máximo [11].

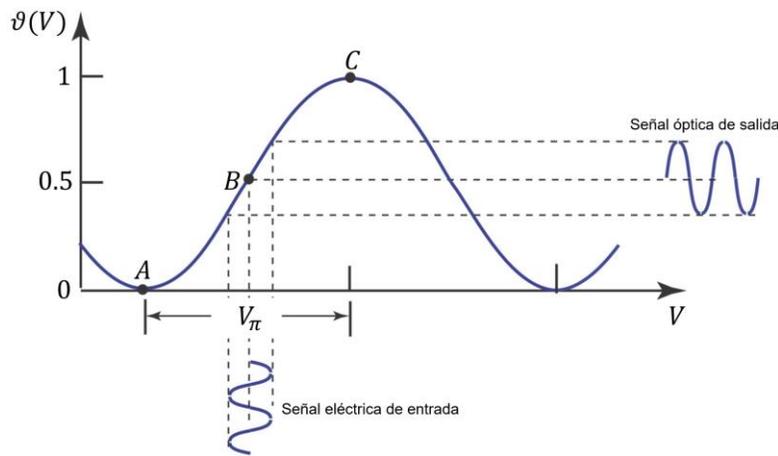


Figura 3.8. Función de transferencia de un MZ-IM. [11].

3.3. Transmisiones inalámbricas

En general, se entiende por *Transmisiones inalámbricas*, o *Comunicaciones Inalámbricas*, a aquellos enlaces que se realizan entre dispositivos que intercambian datos o información por medios no guiados, utilizando *Ondas de radio*. Éstas se encuentran dentro del *Espectro electromagnético* [15]. Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina *Radiación Electromagnética*. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce la radiación electromagnética. La región del espectro electromagnético ocupada por las ondas de radio se denomina *Espectro Radioeléctrico*. En la Figura 3.9 se representa en forma gráfica al espectro electromagnético.

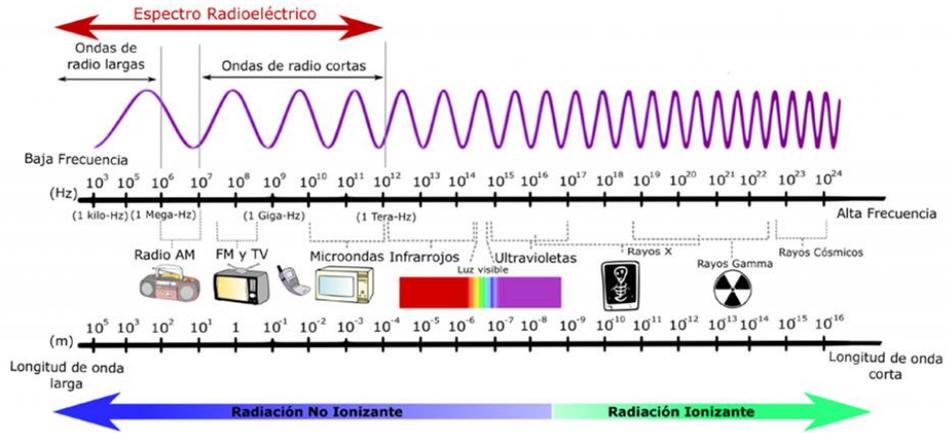


Figura 3.9. Ilustración del Espectro Electromagnético, señalando la porción ocupada por el Espectro Radioeléctrico [15].

Las frecuencias del Espectro Radioeléctrico están determinadas por dos factores: sus características para la propagación de las ondas electromagnéticas, entendiendo que éstas se comportan de manera diferente entre unas frecuencias y otras, y los avances tecnológicos logrados por el ser humano. Así, en la conferencia de la ITU-R (Sector de Radiocomunicaciones de la *International Telecommunications Union*, ITU, entonces denominada CCIR) de 1947 [16], se definió a la *Radiocomunicación* como *Toda telecomunicación producida utilizando ondas electromagnéticas de frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 3 GHz*. De acuerdo con el actual Reglamento de Radiocomunicaciones de la ITU-R [17], en la actualidad se considera que el espectro radioeléctrico es el conjunto de ondas cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de 3 GHz y que se propagan por el espacio sin guía artificial. En la práctica, en la actualidad no se asignan frecuencias para radiocomunicaciones por debajo de 9 KHz, por no ser frecuencias aptas para ello y por su baja tasa de transmisión, ni por encima de 275 GHz, por limitaciones tecnológicas. No obstante, existen frecuencias fuera de este rango reguladas por UIT-R (por ejemplo, en infrarrojos y en luz visible, en frecuencias del orden de THz) que se emplean también para radiocomunicaciones [15].

El Espectro Radioeléctrico, a su vez, se divide en bandas de frecuencias que se asignan a diferentes servicios. En la Tabla 3.1 se muestran los valores de las frecuencias utilizadas y la denominación de cada una de ellas [18].

Tabla 3.1. Frecuencias y denominaciones de espectro radioeléctrico [18].

BANDA	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	DENOMINACIÓN	USOS PRINCIPALES
VLF	3 KHz a 30 KHz	100 Km a 10 Km	Very Low Frequency	Navegación
LF	30 KHz a 300 KHz	10 Km a 1 Km	Low Frequency	Navegación
MF	0.3 MHz a 3 MHz	1 Km a 100 m	Medium Frequency	Radio comercial AM
HF	3 MHz a 30 MHz	100 m a 10 m	High Frequency	Radio comercial de onda corta
VHF	30 MHz a 300 MHz	10 m a 1 m	Very High Frequency	Radio comercial FM
UHF	0.3 GHz a 3 GHz	1 m a 10 cm	Ultra High Frequency	TV digital, microondas terrestres
SHF	3 GHz a 30 GHz	10 cm a 1 cm	Super High Frequency	Microondas terrestres y por satélite
EHF	30 GHz a 300 GHz	1 cm a 1 mm	Extremely High Frequency	Enlaces experimentales punto a punto

3.3.1. Desvanecimiento, ruido e interferencia

En una transmisión inalámbrica intervienen factores que afectan de distintas maneras a la señal transmitida. Éstos pueden estar presentes de manera natural en el entorno o producirse durante la propagación de la señal. Algunos de estos factores son:

Ruido (Z_i), definido como Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise). Representa a una señal no deseada presente en el entorno y carente de información, que se suma a la señal transmitida. Matemáticamente es modelado mediante una variable aleatoria con distribución Normal [19].

Desvanecimiento por múltiples trayectorias (h). Consiste en variaciones de potencia causadas por reflejos de la señal original, que a su vez se suman a ésta. Es modelado por una variable aleatoria con distribución Rayleigh [20].

Desvanecimiento por pérdidas por trayectoria (ℓ) Son las pérdidas por el entorno y el relieve del piso. Es modelado mediante una variable log-normal ($10^{\zeta/10}$). A su vez, la log-normal está determinada por una variable aleatoria ζ con distribución Normal [19].

Interferencia Co-canal (CCI, Co-Channel Interference). Está formada por las posibles señales transmitidas por otros equipos que utilicen la misma frecuencia de operación y se suma a la señal transmitida [21].

La Figura 3.10 ilustra un esquema general de transmisión inalámbrica de enlace descendente formado por un transmisor y un receptor. La señal transmitida se designa como S_{tx} , la cual contiene la información que se desea transportar.

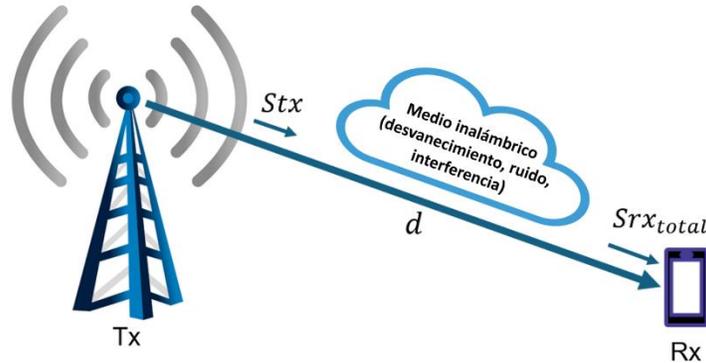


Figura 3.10. Ilustración de un esquema de transmisión-recepción inalámbrica.

El transmisor está separado del receptor por una distancia d . Los desvanecimientos afectan a la señal transmitida, que con las pérdidas está definida por [22-23]

$$S_{rx} = \frac{S_{tx} h \ell}{d^\mu} \quad (3.13)$$

en donde S_{rx} es la señal transmitida con pérdidas y μ es el exponente de pérdidas por propagación con valores entre 2.5 y 6, o incluso superiores, dependiendo del tipo de entorno [24] (por ejemplo, si se considerara un entorno exterior urbano, $\mu = 4$).

La CCI se determina por [21]

$$CCI = \sum_{j=1}^m S_{rx_j} = \sum_{j=1}^m \frac{S_{tx_j} h_j \ell_j}{(d_j)^\mu} \quad (3.14)$$

donde $j = 1, \dots, m$ es el número de cada transmisor interferente cercano y S_{rx_j} es la señal recibida correspondiente a cada uno.

La señal total que llega al receptor está dada por [19-23]

$$S_{rx_{total}} = S_{rx} + (z_i) + CCI \quad (3.15)$$

El rendimiento del enlace directo del sistema inalámbrico se evalúa en términos de la Relación Señal-Interferencia más Ruido (SINR, Signal-to-Interference plus Noise Ratio), dada por [19-23]

$$SINR = \frac{Srx}{z_i + CCI} \quad (3.16)$$

Para el esquema de acceso NOMA, la Figura 3.11 ilustra el enlace de transmisión de enlace descendente formado por una estación base (Base Station, BS) transmisora y dos receptores. La señal transmitida Stx_{NOMA} está definida por

$$Stx_{NOMA} = \sum_{k=1}^n \alpha_k Stx_{k,i} \quad (3.17)$$

en donde n es el número total de usuarios receptores, k es cada k -ésimo usuario receptor, α_k es el factor de asignación de potencia correspondiente a cada usuario, y $Stx_{k,i}$ denota el i -ésimo símbolo de modulación transmitido que contiene la información destinada a cada receptor.

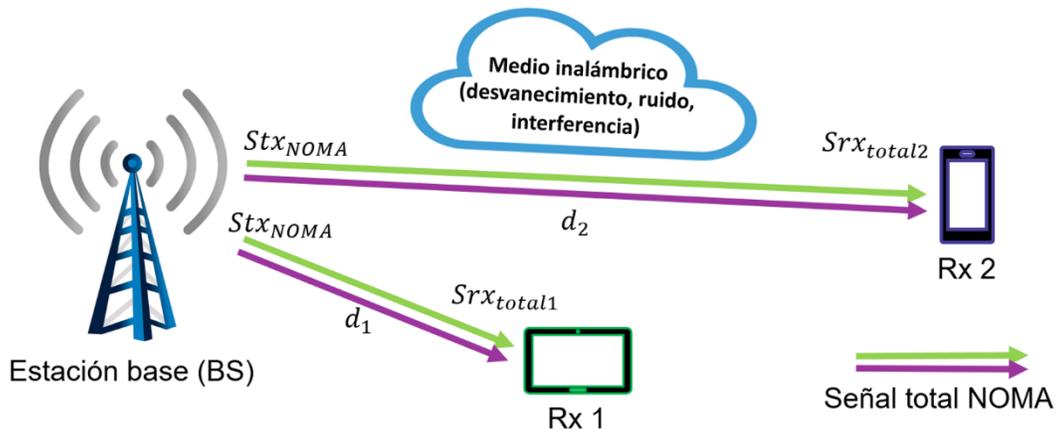


Figura 3.11. Ilustración de un esquema de transmisión-recepción inalámbrica de enlace descendente para dos receptores con esquema de acceso NOMA.

La estación base está separada de los receptores por las distancias d_k . En la Figura 3.11, $k = 1, 2$.

La señal transmitida afectada por las pérdidas correspondientes a cada k -ésimo usuario está dada por

$$Srx_k = \frac{Stx_{NOMA} h_k \ell_k}{d_k^\mu} \quad (3.18)$$

La *CCI* para cada receptor se determina por

$$CCI_k = \sum_{j=1}^m Srx_{j_k} = \sum_{j=1}^m \frac{Stx_j h_j \ell_j}{(d_{j,k})^\mu} \quad (3.19)$$

La señal total que llega a cada receptor está dada por

$$Srx_{totalk} = Srx_k + (z_i) + CCI_k \quad (3.20)$$

El rendimiento del enlace para cada receptor se evalúa también en términos de su SINR, y está dado por

$$SINR_k = \frac{Srx_k}{z_{i_k} + CCI_k} \quad (3.21)$$

3.4. Antenas

De acuerdo con el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers), una antena es un dispositivo que forma parte de un sistema transmisor o receptor, diseñado específicamente para emitir o captar ondas electromagnéticas [25] para su uso en radiocomunicaciones, y puede estar formada simplemente por una varilla metálica o ser un elemento más complejo donde se incluyen elementos reflectores de las ondas [26]. Una misma antena puede ser utilizada para transmitir o para recibir.

Aunque las antenas presentan formas muy diversas, todas se caracterizan por ser elementos de transición de una onda guiada por un medio físico a una onda radiada al entorno, o viceversa. Algunos ejemplos de antenas se muestran en la Figura 3.12. Las diferentes formas de las antenas obedecen a la necesidad específica de uso para cada una.

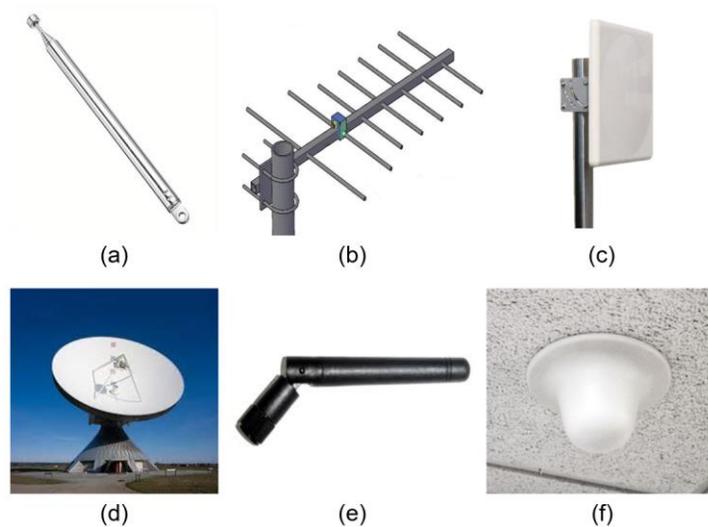


Figura 3.12. Algunos tipos de antenas: (a) antena telescópica, (b) antena Yagi, (c) antena de panel, (d) antena parabólica, (e) antena corta, y (f) antena de techo.

3.4.1 Parámetros de las antenas

Algunos de los principales parámetros de una antena son el *Patrón de Radiación*, la *Ganancia* y el *Ancho de Banda*, los cuales se describen a continuación.

a) Patrón de Radiación. Es la distribución espacial de una cantidad que caracteriza el campo electromagnético generado por una antena [25]. Es posible representarlo con una gráfica en dos o en tres dimensiones con la que se indica el campo electromagnético radiado por la antena en función de las distintas direcciones del espacio. También representa el campo de recepción en el cual la antena es sensible. En la Figura 3.13 se ilustra, como ejemplo, el patrón de radiación de una antena corta. Esta antena es utilizada por lo general en aplicaciones de Wi Fi. En la representación gráfica del patrón de radiación se considera la ubicación de la antena en el centro del plano.

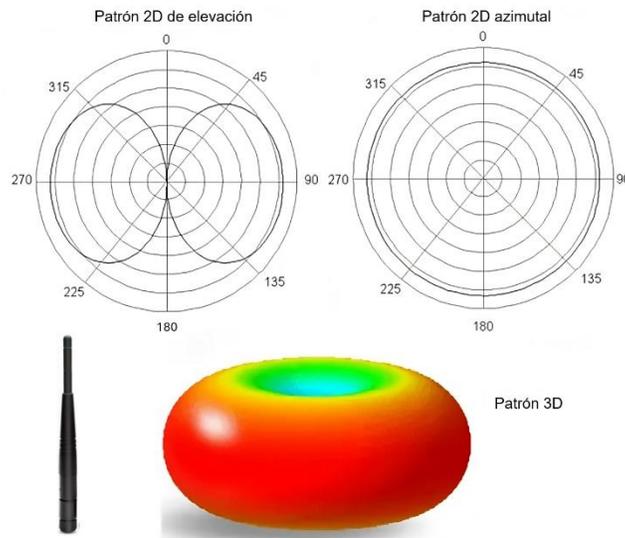


Figura 3.13. Patrón de radiación de una antena corta utilizada para aplicaciones de Wi Fi [27].

En la parte superior de la Figura 3.13 se representa el patrón de radiación en dos dimensiones visto desde una perspectiva horizontal (patrón 2D de elevación) y desde una perspectiva vertical (patrón 2D azimutal). En la parte inferior se representa el patrón de radiación en tres dimensiones. Con lo anterior se representa la forma y el alcance del campo electromagnético radiado por la antena. El patrón de radiación se da en función del tipo de antena, de sus propiedades eléctricas y de su construcción física. En la Figura 3.14 se muestra el patrón en 2D azimutal de una antena omnidireccional y de algunos tipos de antenas direccionales, como la antena de Parche, la antena Yagi o la antena Parabólica.

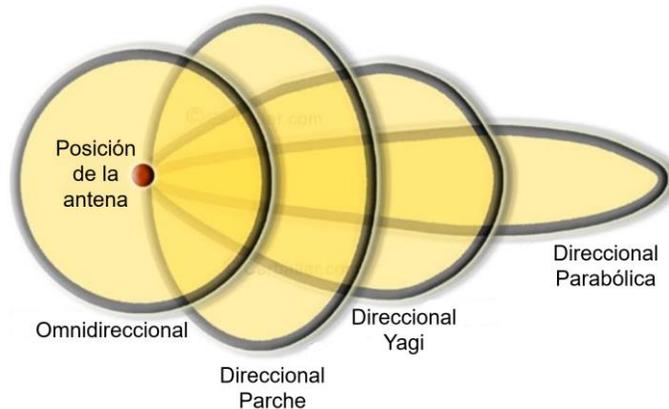


Figura 3.14. Patrones de algunos tipos de antenas [26].

b) *Ganancia*. La ganancia está expresada en *dBi* (Decibel isotrópico), y representa la relación entre la intensidad de campo que produce la antena en un punto determinado y la intensidad de campo que produce una antena isotrópica [25], en el mismo punto y en las mismas condiciones.

c) *Ancho de banda*. El ancho de banda se define como la diferencia entre las frecuencias límite dentro de las cuales el rendimiento de un dispositivo, con respecto a alguna característica, cae dentro de límites especificados [28]. Todas las antenas están limitadas, debido a su geometría finita, a operar en una banda definida de frecuencias. El ancho de banda se determina o se calcula en función de factores como la forma de la antena, su área física o el tipo de conexión, de acuerdo con la aplicación que tendrá, por lo que cada diseño tiene un método particular [29].

3.4.2 Principales tipos de antenas según su patrón de radiación.

En relación con el patrón de radiación, los tres tipos principales de antenas utilizadas en las radiocomunicaciones son la *Antena Isotrópica*, la *Antena Direccional* y la *Antena Omnidireccional* [18]. Aunque existen otros criterios de clasificación, el patrón de radiación es uno de los principales factores para determinar si una antena dada es aplicable al uso que se le va a dar, o para llevar a cabo el diseño de la antena con base en una necesidad específica.

a) *Antena Isotrópica*. También llamada *Radiador isotrópico*, es una antena hipotética sin pérdidas que tiene la misma intensidad de radiación en todas las direcciones [25], por lo que tiene un patrón de radiación esférico ilustrado en la Figura 3.15. Tiene ganancia 1 (0 *dB*). Aunque en la práctica no existe una antena con esas características, su concepto se utiliza como referencia para evaluar el desempeño de las antenas reales.

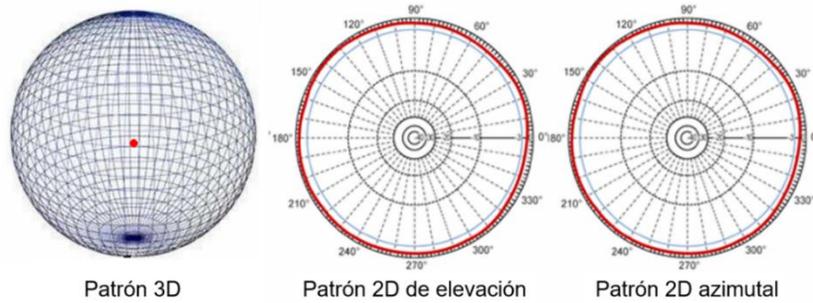


Figura 3.15. Patrón de radiación de una antena isotrópica [30].

b) *Antena direccional*. Ésta tiene la propiedad de radiar o recibir las ondas electromagnéticas de manera efectiva más en algunas direcciones que en otras [25]. Tiene un mayor alcance y ganancia. Cuanto más direccional es una antena, mayor es su alcance. Un ejemplo es la antena parabólica, ilustrada en la Figura 3.16.

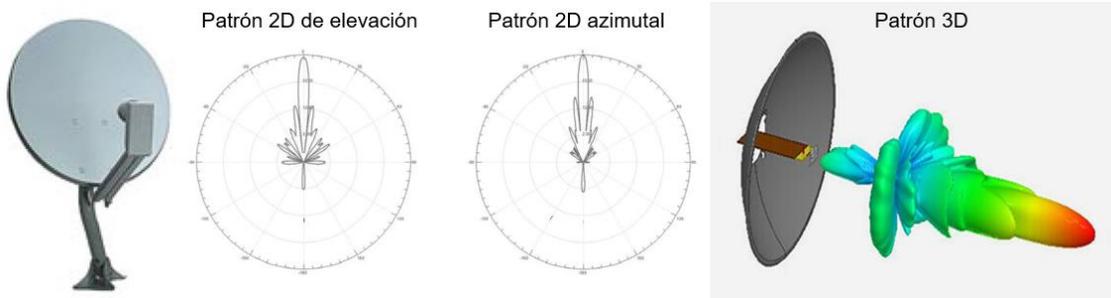


Figura 3.16. Ilustración de una antena parabólica, mostrando su patrón de radiación en 2D y 3D [31].

c) *Antena omnidireccional*. Ésta radia uniformemente en un plano. Su patrón de radiación tiene forma toroidal con la antena ubicada en el centro [18]. En la Figura 3.17 se muestra como ejemplo una antena omnidireccional de techo y su patrón de radiación.

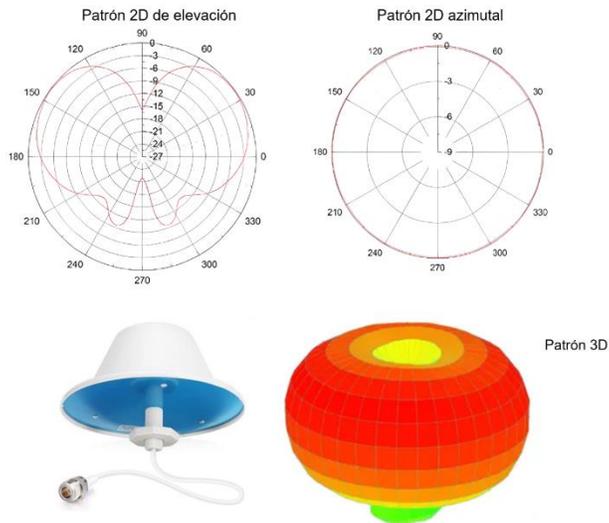


Figura 3.17. Ilustración de la antena omnidireccional de techo, mostrando su patrón de radiación en 2D y 3D [27].

Es frecuente usar las antenas omnidireccionales para interiores y las direccionales para exteriores, aunque esto depende de los requerimientos de cobertura. En la práctica, ambos tipos de antenas pueden utilizarse en cualquiera de los entornos. Aunque hay distintos tipos de antenas omnidireccionales, la más común está formada por una varilla metálica de una longitud proporcional a la longitud de onda de la frecuencia en la que se pretende emitir y recibir, como la antena Corta para Wi Fi o la antena de FM. En cuanto a las antenas direccionales, existe una mayor variedad de modelos, entre los que destacan la antena Yagi, la antena de Panel y la antena Parabólica [26].

3.5 Sumario

Se describieron los principales dispositivos utilizados en los esquemas Fibra-Radio: Fibra óptica, Modulador electroóptico, y Antenas, así como el concepto de Transmisiones inalámbricas. Se explicó la forma en que los fenómenos de *Atenuación* y *Dispersión cromática* influyen en el desempeño de la fibra óptica. Se describió el funcionamiento del MZ-IM basado en el modulador de fase y el interferómetro MZ. Las Transmisiones Inalámbricas fueron descritas, y se explicaron algunos de los factores que se deben considerar al trabajar con ellas, los cuales también se señalaron para el esquema de acceso NOMA. Finalmente, se describió

de manera general a las antenas, señalando algunos de sus tipos y características. En el próximo capítulo se muestran los resultados de las simulaciones enfocadas a los esquemas Fibra-radio.

Referencias

- [1] "IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation," *IEEE Std 211-2018 (Revision of IEEE Std 211-1997)*, 2019, p. 42. doi: <https://www.doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8657413>
- [2] J. Capmany, F. J. Fraile-Peláez & J Martí, "Propagación en Fibras Ópticas," *Fundamentos de Comunicaciones ópticas*, 2da Edición, Editorial Síntesis, S. A., 2001, pp. 44-45.
- [3] J. Capmany, F. J. Fraile-Peláez & J Martí, "Atenuación en Fibras Ópticas," *Fundamentos de Comunicaciones ópticas*, 2da Edición, Editorial Síntesis, S. A., 2001, pp. 114-122.
- [4] S.O. Kasap, W.C. Tan, Jai Singh, & A. K. Ray, "*Fundamental Optical Properties of Materials I*," *Optical Properties of Materials and Their Applications* , Wiley, 2020, p. 8. doi: <https://www.doi.org/10.1002/9781119506003.ch1>
- [5] I. H. Maltison , "Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 55, no. 10, 1965, pp. 1205-1209. doi: <https://opg.optica.org/josa/fulltext.cfm?uri=josa-55-10-1205&id=52806>
- [6] What is Fiber characterization? (en línea). Disponible en <https://www.slideserve.com/viveca/what-is-fiber-characterization>
- [7] J. M. Senior, "*Optical fiber waveguides*," *Optical Fiber Communications, Principles and Practice*, 3rd Edition, Prentice Hall, 2009, p. 29.
- [8] J. M. Senior, "*Transmission characteristics of optical fibers*," *Optical Fiber Communications, Principles and Practice*, 3rd Edition, Prentice Hall, 2009, pp. 110-111.
- [9] J. Capmany, F. J. Fraile-Peláez & J Martí, "*Introducción a las comunicaciones Ópticas*," *Fundamentos de Comunicaciones ópticas*, 2da Edición, Editorial Síntesis, S. A., 2001, p. 22.

- [10] G. Keiser, "*Attenuation and Dispersion*," Optical Fiber Communications, 4th Edition, McGraw Hill, 2000, pp.133-135.
- [11] B. E. A. Saleh, & M. C. Teich, "*Electro-optics*," Optical Fiber Communications, 4th Edition, McGraw Hill, 2000, pp. 976-982.
- [12] Guzmán Hernández, A. M., "*Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz*," Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales, vol. 46, no. 181, 2022, pp. 920–938. doi: <https://www.doi.org/10.18257/raccefyn.1748>
- [13] A. Tudi, S. Han, Z. Yang, & S. Pan, "*Potential optical functional crystals with large birefringence: Recent advances and future prospects*," Coordination Chemistry Reviews, vol. 459, 2022. doi: <https://www.doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214380>
- [14] E. Hecht, "Interference," Optics, 5th Edition, Pearson Education Limited, 2017, pp. 976-982.
- [15] J. Luque Ordóñez, "*Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*," Manual formativo de ACTA, ISSN 1888-6051, no. 62, 2012, pp.17-31. https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- [16] International Radio Conference (Atlantic City, 1947) (en línea). Disponible en: <https://www.itu.int/en/history/Pages/RadioConferences.aspx?conf=4.62>
- [17] Reglamento de Radiocomunicaciones de la ITU 2020 (en línea). Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR/es>
- [18] Luna Castellanos, A. "*Antenas*" (en línea) Disponible en: <https://www.inaoep.mx/~aluna/Antenas.pdf>
- [19] Y. Zhou, V. W. S. Wong, & R. Schober, "*Performance Analysis of Cooperative NOMA with Dynamic Decode-and-Forward Relaying*", GLOBECOM 2017 – 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017, p. 2, 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254925>
- [20] D. M. Angel Del Valle, R. Enríquez Caldera, J. M. Ramírez Cortés, & J. Martínez Carballido "*Modelado de canal inalámbrico OFDM, hacia las comunicaciones 4G*," pp. 1-2, 2009. <https://www->

elec.inaoep.mx/~jmram/cvjmr/Modelado%20de%20canal%20inalambrico%20009.pdf

- [21] J. Castañeda-Camacho, & D. Lara-Rodríguez, “*Teletraffic analysis of an overlaid system using CDMA and TDMA with cell coverage area restriction,*” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 57, no.2, pp. 828–846, 2008. doi: <https://www.doi.org/10.1109/TVT.2007.905616>
- [22] J. Castañeda-Camacho, G. Mino-Aguilar, L. Cortez, J. E. M. Gutiérrez-Arias, J. F. Guerrero-Castellanos, & G. A. Muñoz Hernández, “*Montecarlo Simulation Applied to Measurement of the Impact of the Smart Antenna Technology in Digital Cellular Systems,*” Ingeniería, Investigación y Tecnología, pp. 207–212, 2015. doi: <https://www.doi.org/10.1016/j.riit.2015.03.005>
- [23] J. Castañeda-Camacho, & D. Lara-Rodríguez, “*Ordered Hunt Schemes for Overlaid CDMA Cellular Systems,*” Ingeniería, Investigación y Tecnología, vol. 11, no. 3, pp. 349-365 2010. doi: <https://www.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2010.11n3.030>
- [24] T. S. Rappaport, “*Mobile Radio Propagation: Large-Scale Path Loss,*” Wireless Communications: Principles and Practice, Second Edition, Prentice Hall, 2002. p. 104.
- [25] “*IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas,*” IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993) , pp. 1-50, 2014, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6758443>
- [26] Antenas Wi Fi, lo que hay que saber (en línea). Disponible en: <https://carballar.com/antenas-wi-fi-lo-que-hay-que-saber>
- [27] Omnidirectional Antenna Radiation Patterns Explained (en línea). Disponible en: <https://www.mpantenna.com/omnidirectional-antenna-radiation-patterns>
- [28] “*American National Standard Dictionary of Electromagnetic Compatibility (EMC) including Electromagnetic Environmental Effects (E3),*” ANSI C63.14-2014 (Revision of ANSI C63.14-2009), pp.1-76, 2014. doi: <https://www.doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6974973>
- [29] A. García Domínguez, “*Formulario,*” Cálculo de antenas, 4ta Edición, Alfaomega Grupo editor, 2012. pp. 35-56.

- [30] What is an Isotropic Antenna? (en línea). Disponible en:
<https://www.everythingrf.com/community/what-is-an-isotropic-antenna>
- [31] Intestazione parabolic Antenna radiation pattern (en línea). Disponible en
<http://www.r11motopecas.com.br>

CAPÍTULO 4: SIMULACIONES FIBRA-RADIO

Introducción

Una vez conocidos los principales elementos que se utilizan en el presente trabajo, así como el concepto de las transmisiones inalámbricas y del esquema de acceso NOMA descritos anteriormente, en este capítulo se presentan simulaciones computacionales de esquemas Fibra-Radio. Consta de tres secciones. La primera describe la simulación de un enlace Fibra-Radio de un solo canal de transmisión punto a punto para una señal digital. La segunda sección muestra dos simulaciones Fibra-Radio, cada una para dos señales digitales; en la primera se destaca el uso de un esquema de Multiplexado por División de Longitud de onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing) para la parte óptica, mientras que, para la segunda, en la parte óptica se utiliza un Acoplador Óptico (OC, Optical Coupler), siendo recuperadas una a una al final del enlace mediante un Filtro Óptico de Banda de Paso (OBPF, Optical Band Pass Filter) sintonizable. Al final de la segunda sección se muestra el esquema de acceso NOMA realizado en MATLAB para la parte inalámbrica de ambas simulaciones, y se muestra la evaluación de su rendimiento y funcionalidad. Finalmente, en la tercera sección se presenta el sumario.

4.1 Simulación de un enlace Fibra-Radio para transmisión de datos por un canal

En esta sección se describe la simulación de un esquema Fibra-Radio de un canal de transmisión de una señal digital. La etapa óptica se simula mediante el software VPI Photonics [1], mientras que para la etapa inalámbrica se lleva a cabo una evaluación numérica en MATLAB. La Figura 4.1 muestra el diagrama a bloques del esquema Fibra-Radio simulado. El recuadro punteado azul corresponde al arreglo electroóptico simulado en VPI Photonics.

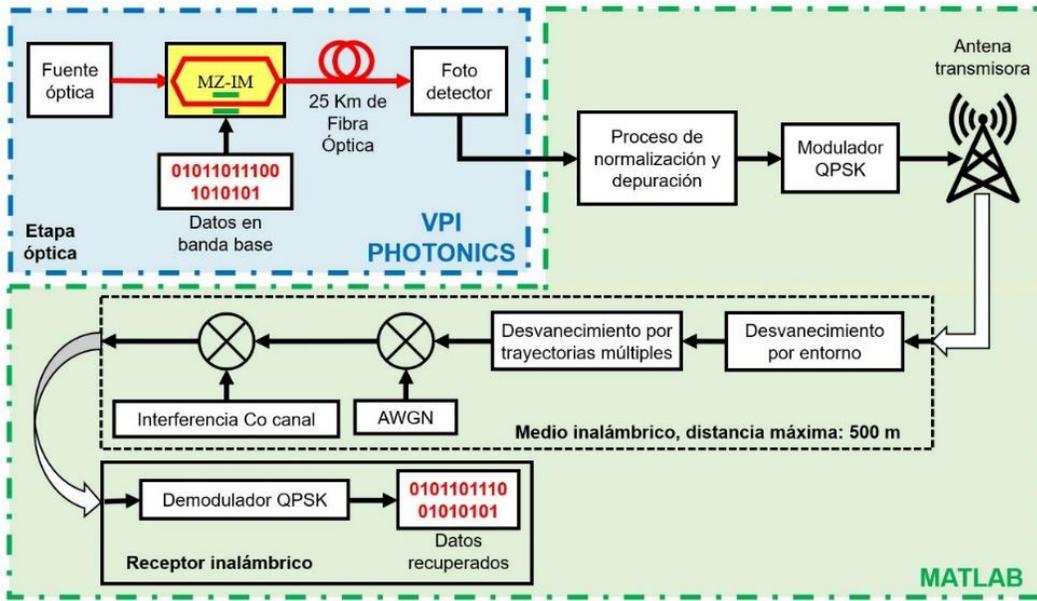


Fig. 4.1. Esquema Fibra-Radio de un canal de transmisión.

Las condiciones de simulación son: una secuencia de bits a una tasa de 2.4 Gbps (utilizada comercialmente de acuerdo a los estándares de comunicación óptica) [2], una fuente óptica monomodo (DFB, Distributed Feedback) [3] que emite a 1550 nm (longitud de onda utilizada en sistemas de comunicación óptica estándar) a una potencia óptica de 2 dBm, un MZ-IM, 25 km (longitud comúnmente utilizada en un enlace de transmisión óptica urbana) [4] de Fibra Óptica Estándar Monomodo (SM-SF, Single Mode Standard Fiber) cuyos parámetros de dispersión cromática (D) y de atenuación α a 1550 nm son 16.75 ps/nm·km y 0.2 dB/Km, respectivamente, y un Fotodetector (PD, Photo Detector) [5] que recupera la señal óptica modulada, entregando la señal eléctrica que corresponde a los bits transmitidos. La Figura 4.2 muestra el diagrama correspondiente al arreglo electroóptico simulado en VPI Photonics. La interfaz de este software permite la visualización de los resultados de forma gráfica y su exportación a un archivo con extensión .txt o .csv.

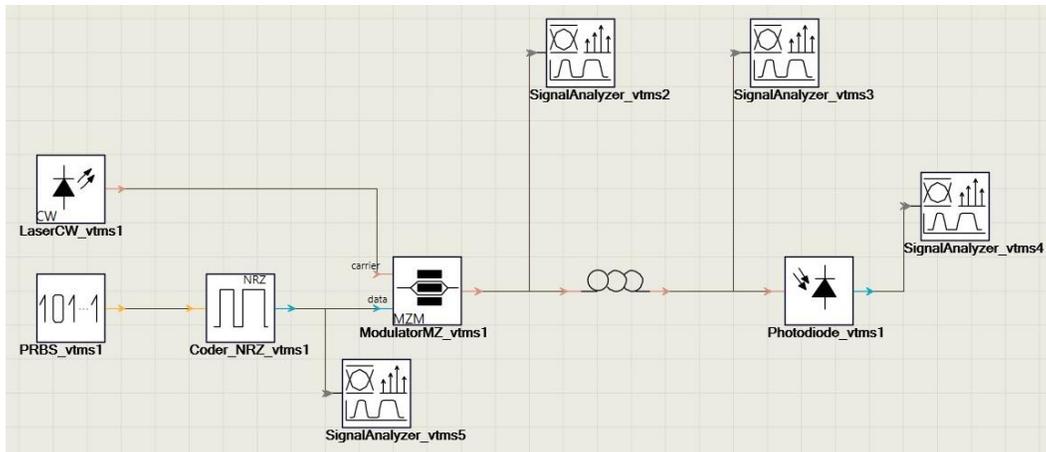


Fig. 4.2. Enlace de comunicación vía fibra óptica, en el ambiente de VPI Photonics.

En la Figura 4.3 (a) se observa gráficamente la secuencia de bits propuesta en la simulación para ser transmitida (010110111001010101). Para evitar pérdidas de bits, se agrega inicialmente un espacio de valores “0”, un bit de inicio, y un “0” adicional para mantener la integridad de la secuencia. Esta señal eléctrica modula a la señal óptica por medio del MZ-IM, y ésta última es transmitida a través de la fibra óptica. En ella, la señal óptica está sujeta a atenuación y dispersión cromática. Al final del enlace, el PD recupera la señal óptica y entrega la señal eléctrica correspondiente que se muestra en la Figura 4.3 (b).

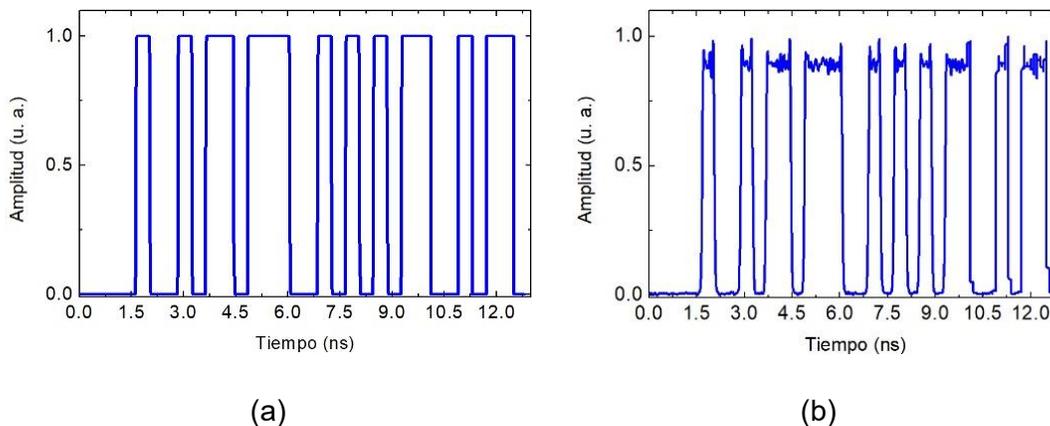


Fig. 4.3. (a) Secuencia de bits generada para ser transmitida. (b) Señal entregada por el fotodetector.

La parte de transmisión inalámbrica se muestra dentro del recuadro punteado verde (realizada en MATLAB) de la Figura 4.1, y es alimentada con los datos obtenidos

previamente del sistema electroóptico. Se realiza un proceso de normalización y depuración de la señal para remover el espacio inicial y el bit de inicio, recuperar la amplitud de los pulsos digitales, y eliminar los picos espurios y las repeticiones de la secuencia (Apéndice A). Posteriormente se modula en formato QPSK, el cual se elige por su robustez y porque actualmente se utiliza en tecnologías 4.5G y 5G [6]. La señal modulada resultante emula la señal radiada desde la antena hacia el aire. Las señales electromagnéticas que se propagan a través de este medio están sujetas a fenómenos inherentes; en este trabajo se consideran cuatro principales: el desvanecimiento por entorno y por trayectoria múltiple, el ruido AWGN, y la interferencia co-canal. El cuadro punteado negro emula la atmósfera por la que viaja la señal radiada y en la que se incluyen los efectos mencionados. La distancia máxima considerada entre la antena y el receptor es de 500 m. Finalmente, la señal recibida se demodula para recuperar la señal original de datos y se muestra gráficamente.

Además de la normalización y la depuración de la señal, antes de la modulación QPSK se realiza una corrección de Tasa de transmisión de Bits (BR, Bit Rate) (Figura 4.4). La secuencia de bits resultante se introduce en el modulador QPSK para emular la transmisión inalámbrica.

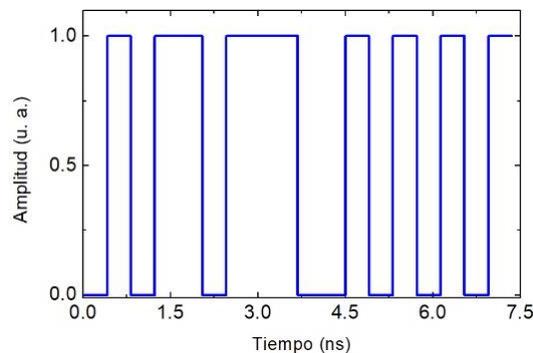


Fig. 4.4. Datos digitales después del proceso de normalización y depuración.

La señal modulada se muestra en la Figura 4.5, que es la que se radia por la antena.

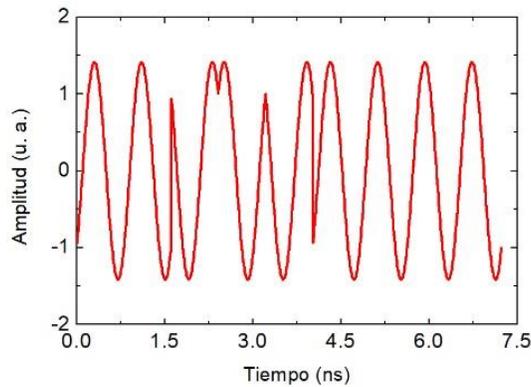


Fig. 4.5 (a) Señal QPSK transmitida.

En la etapa inalámbrica se establece que el área o celda de cobertura para un usuario móvil posee una forma hexagonal, debido a que proporciona un arreglo equidistante de antenas, es simétrica y brinda cobertura completa. Para el hexágono se considera un radio de 500 m. Se analiza un caso particular en el que se sitúa un receptor inalámbrico móvil U1 dentro de uno de los tres sectores en la celda de la Estación Base central (BS, Base Station) BS0, como se muestra en la Figura 4.6. La posición del usuario se determina mediante la función *randi*, disponible en MATLAB. La celda central está rodeada por seis celdas correspondientes a estaciones base cercanas (BS1 a BS6) [7].

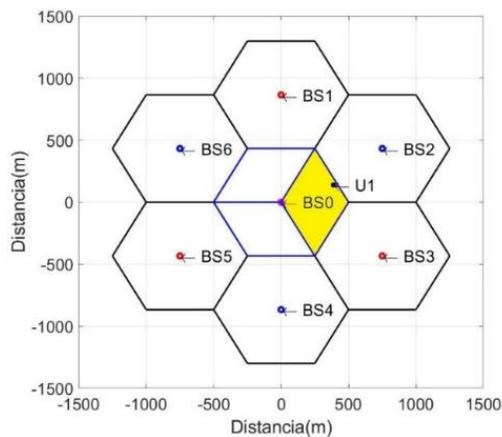


Fig. 4.6. Ilustración del área de cobertura del usuario móvil.

La Figura 4.7 corresponde a la señal recibida por U1, afectada por los desvanecimientos por entorno y múltiples trayectorias, AWGN, y CCI.

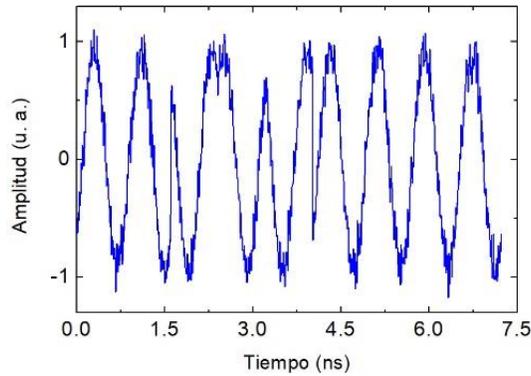


Fig. 4.7 Señal QPSK recibida.

Finalmente, después de un proceso de demodulación QPSK, se recuperan los datos digitales originales (Figura 4.8). Nótese la similitud de este gráfico con los resultados mostrados en la Figura 4.4.

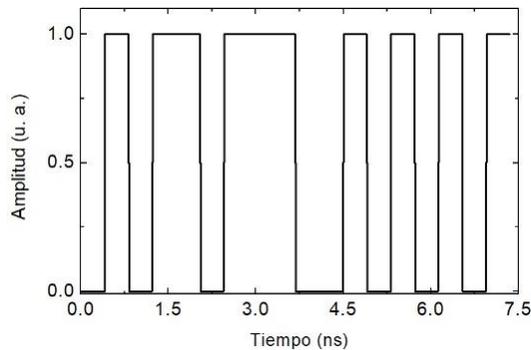


Fig. 4.8. Señal demodulada.

Debido a que el AWGN, la CCI y los desvanecimientos son factores que provocan pérdida de información, sus niveles deben tenerse en cuenta para evaluar una recepción inalámbrica adecuada. Por tal motivo se realizan pruebas estadísticas para verificar el desempeño de la etapa inalámbrica. Se lleva a cabo, también en MATLAB, una simulación Monte Carlo de eventos discretos para evaluar el desempeño del enlace al ubicar al usuario móvil U1 dentro del sector del área de cobertura. Los parámetros considerados para este propósito se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 4.1. Parámetros de simulación considerados para una zona exterior urbana [8,9].

Parámetros de simulación	
Factor μ	4
Media de ζ para desvanecimiento por entorno	0
Desviación Estándar ζ para desvanecimiento por entorno	8
Media de desvanecimiento por trayectorias múltiples	0
Desviación Estándar de desvanecimiento por trayectorias múltiples	8

La distancia de U1 a BS0 varía en un rango de 1 a 500 m dentro del sector correspondiente, y su posición determina la afectación de la interferencia co-canal. Los niveles de los desvanecimientos, del ruido y de la interferencia se modelan en función de los valores de desviación estándar de las variables aleatorias que los determinan para la simulación. Esta forma de modelado permite proponer diferentes niveles de ruido, que es el factor con la mayor variación posible [8,9]. Dado que la interferencia co-canal y los desvanecimientos se modelan mediante variables aleatorias, y considerando que U1 se mueve dentro de su sector correspondiente, el resultado de la simulación se promedia en términos de SINR y el porcentaje de la Tasa de Error de Bits (BER, Bit Error Rate) para diferentes niveles de ruido. Con el propósito de establecer el intervalo de confianza adecuado a la simulación de la etapa inalámbrica para obtener datos estadísticos fiables, se realizan 1,000, 10,000, 30,000, 60,000 y 100,000 repeticiones del código de MATLAB y se obtiene un promedio de los valores obtenidos. Se observa que, dentro del intervalo de 60,000 a 100,000 veces, la diferencia entre los promedios es despreciable. Así, se establecen 60,000 repeticiones como intervalo de confianza.

La Figura 4.9 ilustra gráficamente cómo el nivel de ruido influye en el porcentaje de BER con el procedimiento realizado. Se observa que con una desviación estándar de AWGN de 1×10^{-11} , y variándola a valores menores, prácticamente toda la información se logra recuperar. Esto indica que el sistema es funcional en niveles de ruido iguales o menores a este valor. La Figura 4.10 muestra la SINR (dB) resultante de los mismos valores de desviación estándar de AWGN. En la medida en que el parámetro AWGN disminuye, el parámetro SINR aumenta. Finalmente, la

Figura 4.11 muestra que los valores más altos de SINR provocan valores más bajos de BER.

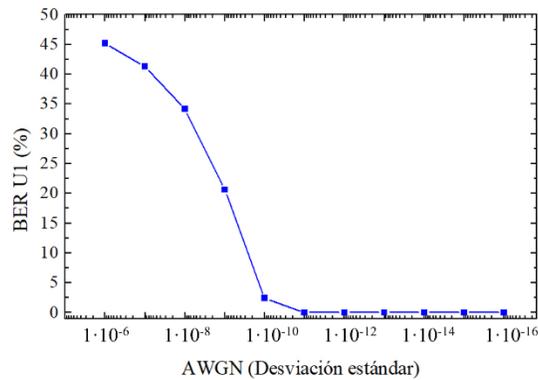


Fig. 4.9. Porcentaje de BER vs desviación estándar de AWGN

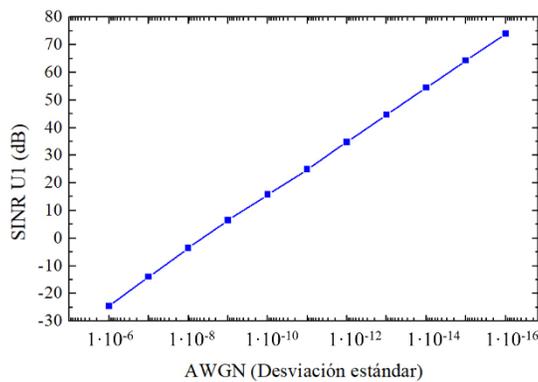


Fig. 4.10. SINR (dB) vs desviación estándar de AWGN

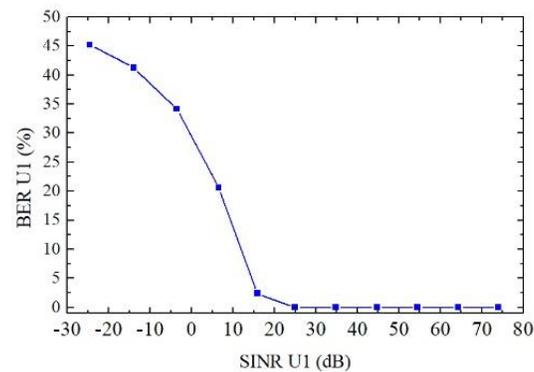


Fig. 4.11. Relación entre SINR y el porcentaje de BER

Conclusión de la simulación. Mediante un conjunto de simulaciones numéricas, se evaluó con éxito el desempeño de transmisión de datos digitales para un sistema

Fibra-Radio de un canal. Todos los parámetros considerados en las simulaciones numéricas corresponden a valores estándar utilizados en sistemas comerciales ópticos e inalámbricos. Se utilizó el software VPI Photonics para simular la transmisión de una señal digital a una tasa de bits de 2.4 Gbps a través de un enlace óptico de 25 km de SM-SF. Se utilizó el software MATLAB para emular un canal inalámbrico considerando cuatro fenómenos principales inherentes a este medio, como son los desvanecimientos por múltiples trayectorias y por entorno, el AWGN, y la CCI. En este modelado se consideró un usuario en movimiento dentro de su celda de área de cobertura. Se utilizaron pruebas estadísticas midiendo la BER y la SINR para evaluar el desempeño. Los resultados demostraron una buena robustez del sistema, que sigue siendo funcional incluso en presencia de ruido. Además, se consideraron múltiples posiciones del usuario receptor dentro del área de cobertura. La modulación QPSK proporciona un buen desempeño de la transmisión inalámbrica. Esta simulación numérica encuentra aplicaciones potenciales en la evaluación de sistemas Fibra-Radio, en particular, telefonía celular, IoT o cualquier otro sistema móvil. **Los resultados de este análisis están publicados en [10].**

4.2 Simulaciones de esquemas Fibra-Radio para transmisión de dos señales de datos compartiendo un mismo enlace óptico

En las siguientes simulaciones de esquemas Fibra-Radio para dos señales digitales compartiendo un enlace óptico se describe primero la parte óptica de cada una. Posteriormente se muestra y se explica a detalle la etapa del esquema de acceso NOMA evaluado en MATLAB que fue utilizado en ambas, así como la transmisión inalámbrica y la recuperación de datos. Los usuarios receptores son designados como U1 y U2.

4.2.1 Simulación de un enlace Fibra-Radio por WDM

En esta sección se describe la simulación de un sistema de transmisión Fibra-Radio para dos señales digitales que comparten un mismo enlace óptico. La etapa óptica se simula mediante el software Optisystem [11]. Para llevar a cabo el uso de un enlace óptico para dos usuarios se utiliza la técnica de multiplexado óptico conocida como WDM [12]. El diagrama a bloques se muestra en la Figura 4.12.

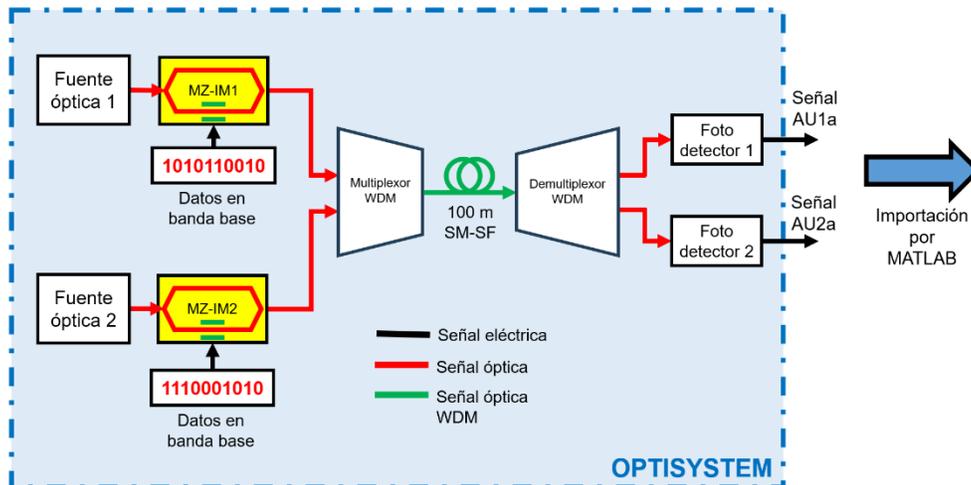


Fig. 4.12. Esquema Fibra-Radio de dos canales con WDM.

Se muestra la etapa electro-óptica simulada en Optisystem. Las características de esta simulación son: dos secuencias de bits, cada una a una tasa de 2.4 Gbps, dos fuentes de luz DFB que emiten a longitudes de onda $\lambda_1 = 1548.26$ nm y $\lambda_2 = 1550.22$ nm, a una potencia óptica de 0 dBm (1 mW), dos MZ-IM, un multiplexor óptico WDM, 100 m (longitud comúnmente utilizada en un enlace de transmisión óptica de corto alcance) [4], de SM-SF, cuyos parámetros de dispersión cromática (D) y de atenuación α a 1550 nm son de 16.75 ps/nm·km y 0.2 dB/Km, respectivamente, un demultiplexor óptico WDM, y dos PD que recuperan las señales ópticas moduladas y entregan las señales eléctricas con los valores de los bits transmitidos (señales AU1a y AU2a). La Figura 4.13 muestra el diagrama correspondiente al arreglo electroóptico simulado en Optisystem.

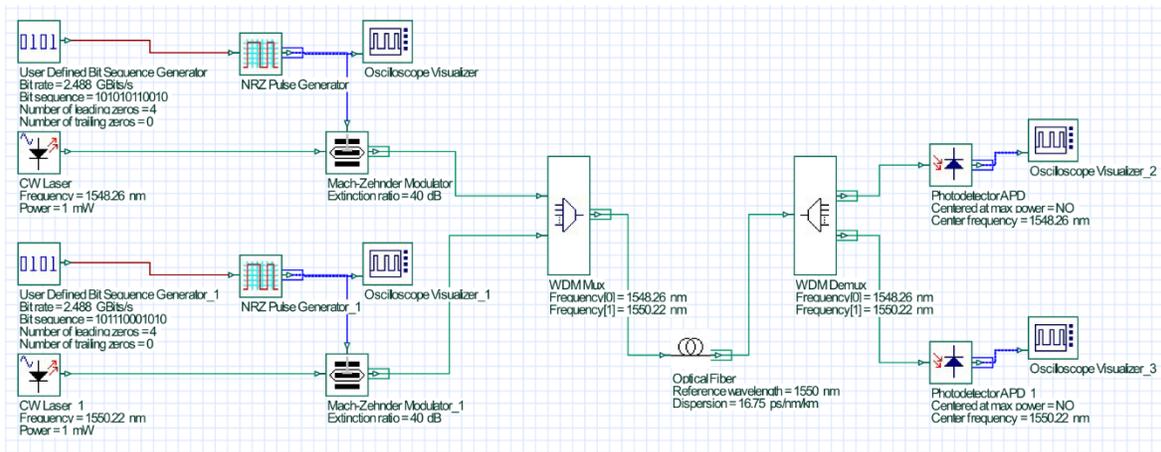


Fig. 4.13. Enlace de comunicación de dos señales digitales vía fibra óptica por WDM, en el ambiente Optisystem.

Este software permite la visualización de las señales de manera gráfica y su correspondiente exportación a archivos con extensión .txt o .csv. En la Figura 4.14 (a) y (b) se observan gráficamente las secuencias de bits para U1 y U2 propuestas en la simulación para ser transmitidas (1010110010 y 1110001010, respectivamente).

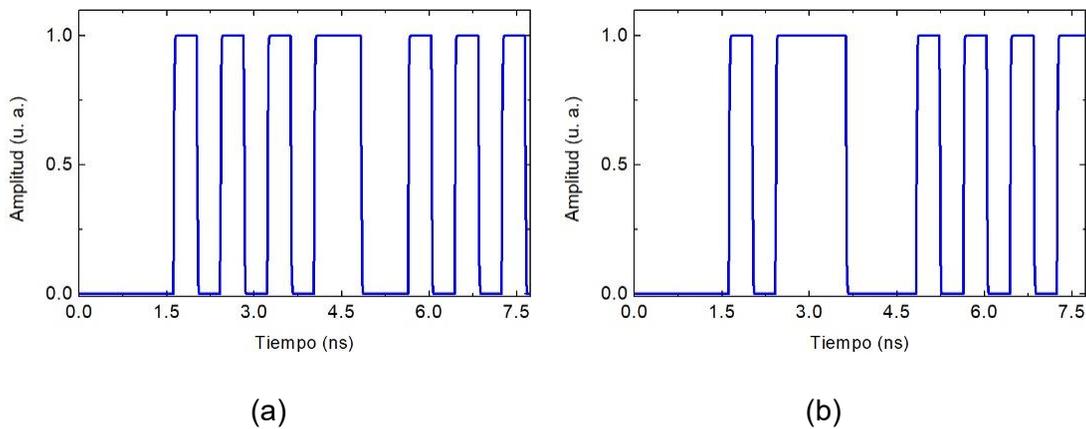


Fig. 4.14. Secuencias de bits para U1 (a) y U2 (b), generadas para ser transmitidas.

Se plantean estas secuencias porque gráficamente permiten observar los efectos y las posibles anomalías en las señales a lo largo de la transmisión, tales como ensanchamientos o inversiones. Estas señales digitales son generadas y visualizadas por el generador virtual y el osciloscopio de la interfaz. También se

agrega al principio de cada secuencia un espacio de valores “0”, un bit de inicio, y un “0” adicional con el propósito de mantener la integridad de los datos transmitidos. Cada una de las señales de datos modula, mediante su respectivo MZ-IM, un haz de luz proveniente de su correspondiente fuente óptica DFB virtual. Los haces modulados son acoplados en el multiplexor WDM y transmitidos en uno solo a través de la fibra óptica. Al final de la fibra, la señal óptica se entrega al demultiplexor WDM, el cual separa las señales, y éstas se entregan a los PD virtuales. Cada uno de ellos entrega las señales AU1a y AU2a que se muestran en las Figuras 4.15 (a) y (b), respectivamente. Sus datos se visualizan en el osciloscopio virtual y se almacenan en archivos .csv.

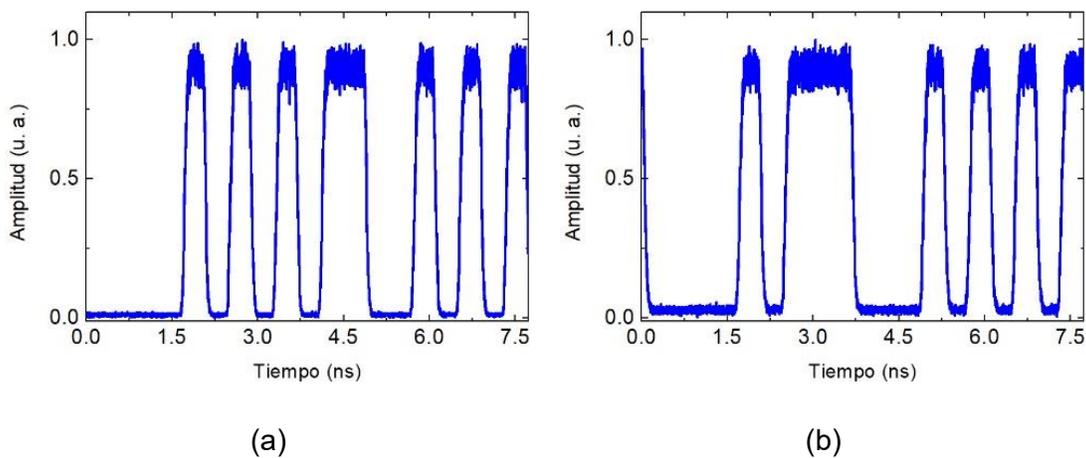


Fig. 4.15. Señales AU1a (a) y AU2a (b), entregadas por los PDs.

Estas señales son importadas por MATLAB para su tratamiento y transmisión inalámbrica con esquema NOMA. Este proceso se describe en la sección 4.2.3, en la que además se evalúa el rendimiento del esquema en términos de la SINR y la BER para cada receptor.

4.2.2 Simulación de un enlace Fibra-Radio utilizando un OBPF

Esta sección describe la simulación de un sistema de transmisión Fibra-Radio de dos señales digitales que comparten un mismo enlace óptico. La etapa correspondiente al enlace óptico se simula en Optisystem. La diferencia de este esquema con el descrito en la sección anterior radica en la manera en que se integran las dos señales para el uso de un solo enlace óptico, lo cual se lleva a cabo

mediante el uso de un OC. Posteriormente las señales son seleccionadas una a una mediante el uso de un OBPF Sintonizable. El filtro permite el paso de una sola longitud de onda, mientras bloquea el resto. La señal óptica seleccionada es la que se inyecta a la fibra, y después al PD. Así, las señales son capturadas una a una y exportadas a MATLAB. El diagrama a bloques correspondiente se muestra en la Figura 4.17.

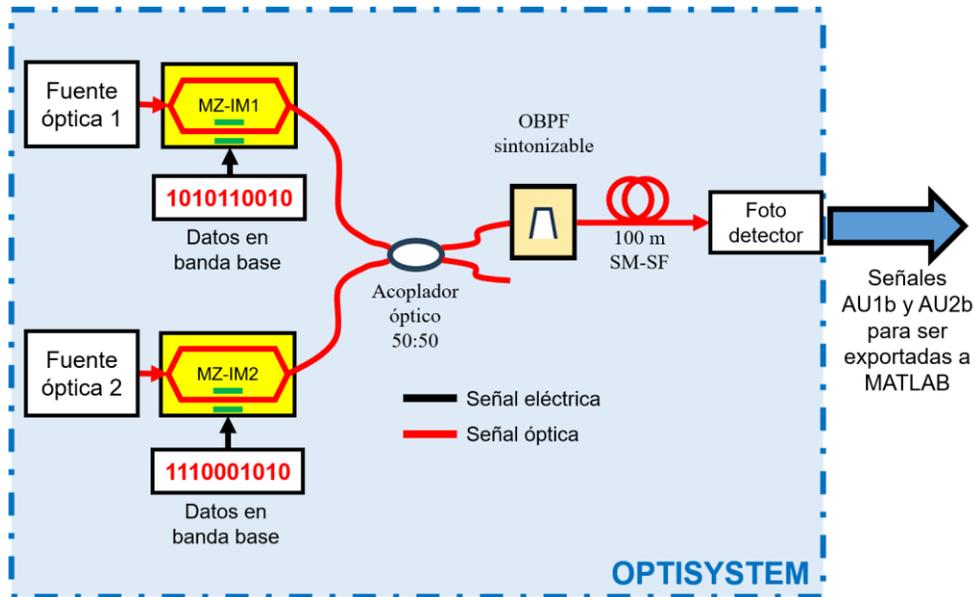


Fig. 4.17. Esquema Fibra-Radio de dos canales con OC y OBPF.

Las características de esta simulación son: dos secuencias de bits, cada una a una tasa de 2.4 Gbps, dos DFB que emiten a las longitudes de onda $\lambda_1 = 1548.26$ nm y $\lambda_2 = 1550.22$ nm, a una potencia óptica de 0 dBm (1 mW), dos MZ-IM, un acoplador óptico OC, el OBPF sintonizable, 100 m de SM-SF, cuyos parámetros de dispersión cromática (D) y de atenuación α a 1550 nm es de 16.75 ps/nm·km y 0.2 dB/Km, respectivamente, y un PD que recupera una a una las señales ópticas moduladas y entrega por separado cada señal eléctrica que corresponde a los bits transmitidos (AU1b y AU2b). La Figura 4.18 muestra el diagrama correspondiente al arreglo electroóptico simulado en Optisystem, con el OBPF ajustado a la longitud de onda $\lambda_1 = 1548.26$ nm.

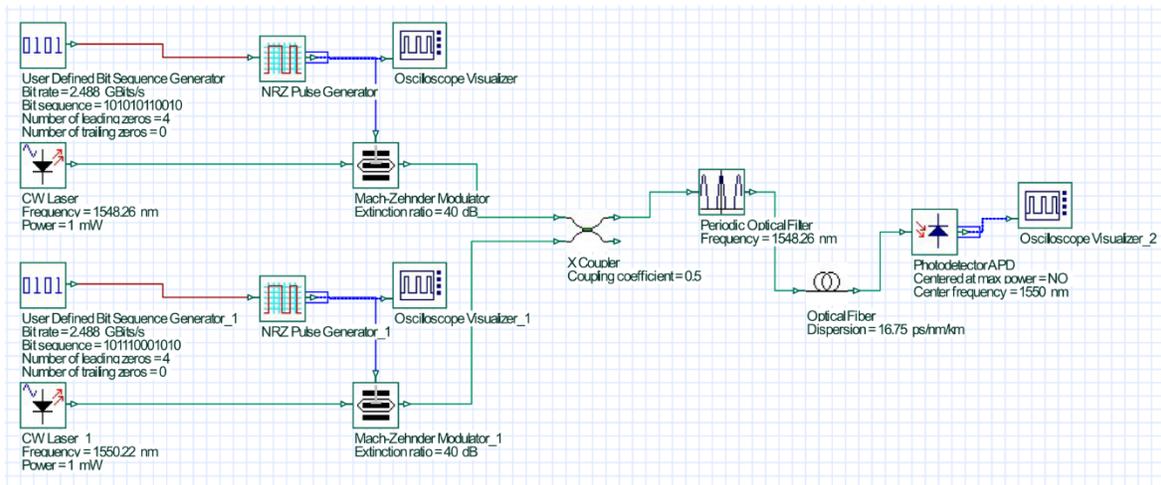


Fig. 4.18. Enlace de comunicación de dos señales digitales vía fibra óptica por OC y OBPF, en el ambiente Optisystem.

Utilizando la característica de Optisystem que permite la visualización de las señales de manera gráfica y su correspondiente exportación a archivos con extensión .txt o .csv, en la Figura 4.19 (a) y (b) se muestran gráficamente las secuencias de bits del U1 y de U2 para ser transmitidas (1010110010 y 1110001010).

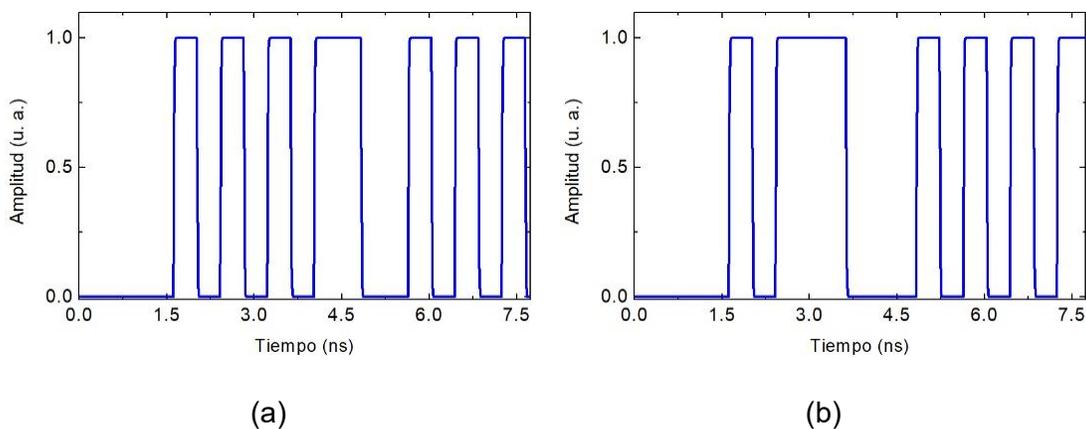


Fig. 4.19. Secuencias de bits para U1 (a) y U2 (b), generadas para ser transmitidas.

También se muestra el espacio de valores “0”, el bit de inicio, y el “0” adicional para mantener la integridad de los datos transmitidos. Cada señal eléctrica de datos modula, mediante su respectivo MZ-IM, el haz de luz proveniente de su correspondiente fuente óptica virtual. Los haces ópticos modulados se combinan mediante el OC y se inyectan ya combinados en el OBPF sintonizable. Para

seleccionar la señal óptica deseada, el OBPF se selecciona directamente a la longitud de onda correspondiente a cada DFB, esto es, $\lambda_1 = 1548.26$ nm o $\lambda_2 = 1550.22$ nm. La señal óptica modulada seleccionada (λ_1 o λ_2) es aplicada a la entrada de la SM-SF. A la salida de ésta, el haz de luz es dirigido al PD el cual proporciona una a una las correspondientes señales eléctricas de U1 o de U2. Así, al ajustar el filtro OBPF en el valor de λ_1 se recupera la señal digital correspondiente a U1, y al reajustarlo en el valor de λ_2 se recupera la señal de U2. Cada una es capturada por separado en el osciloscopio virtual, y sus valores son almacenados para ser exportados a MATLAB. Estas señales, AU1b y AU2b, se muestran en las Figuras 4.20 (a) y (b), respectivamente.

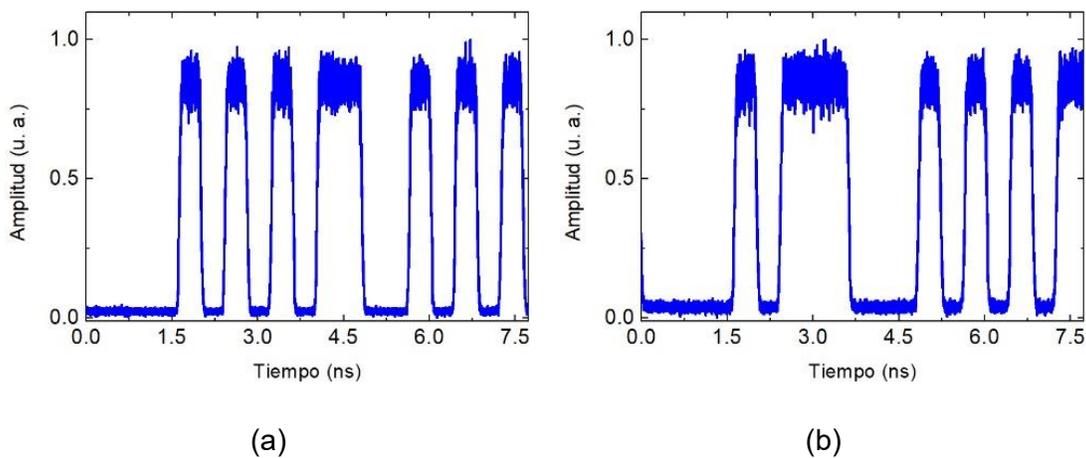


Fig. 4.20. Señales entregadas AU1b (a) y AU2b (b).

Estas señales son importadas por MATLAB para su tratamiento y transmisión inalámbrica con esquema NOMA. Este proceso se describe en la siguiente sección, en la que además se evalúa el rendimiento del esquema en términos de la SINR y la BER para cada receptor.

4.2.3 Evaluación en MATLAB del esquema de acceso NOMA

Las señales obtenidas de los esquemas simulados de comunicación óptica, ilustradas en las Figuras 4.15 (AU1a y AU2a) y 4.20 (AU1b y AU2b), son importadas por MATLAB para su tratamiento (Apéndice A). Éste consiste en la normalización, depuración y corrección de BR de las señales digitales. También se realiza la cancelación de las repeticiones de la secuencia y del espacio inicial. Esto se ilustra

en la Figura 4.21, dentro del recuadro punteado verde. En las Figuras subsecuentes, este recuadro indica proceso realizado en MATLAB.

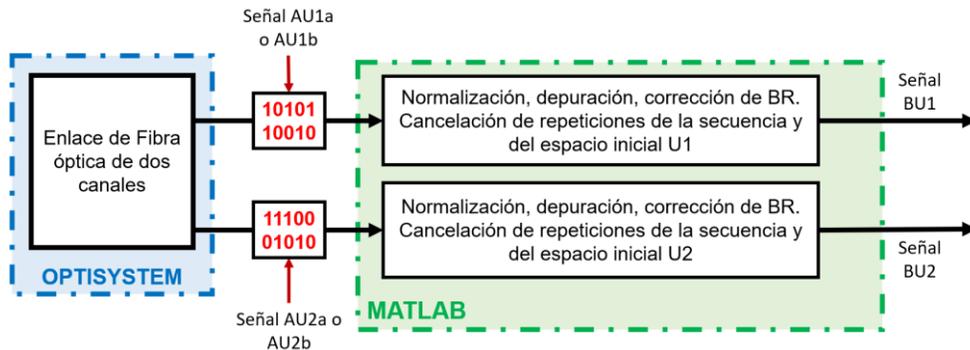


Fig. 4.21. Importación de las señales AU1 y AU2 para su procesamiento en MATLAB

Después de este proceso, MATLAB entrega las señales mostradas en las Figuras 4.22 (a) y (b), denominadas respectivamente como BU1 y BU2.

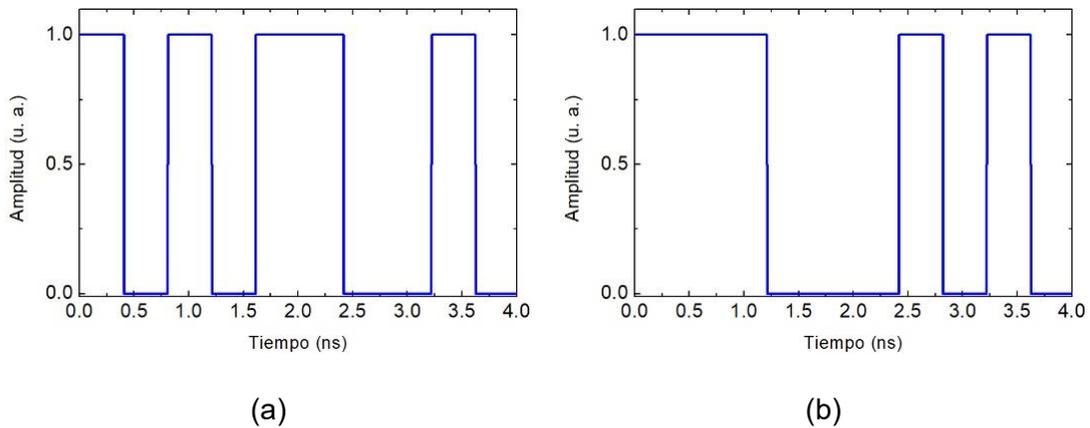


Fig. 4.22. Datos digitales depurados y normalizados BU1 (a) y BU2 (b).

Estas señales se aplican al esquema NOMA, cuyo detalle se ilustra en la Figura 4.23.

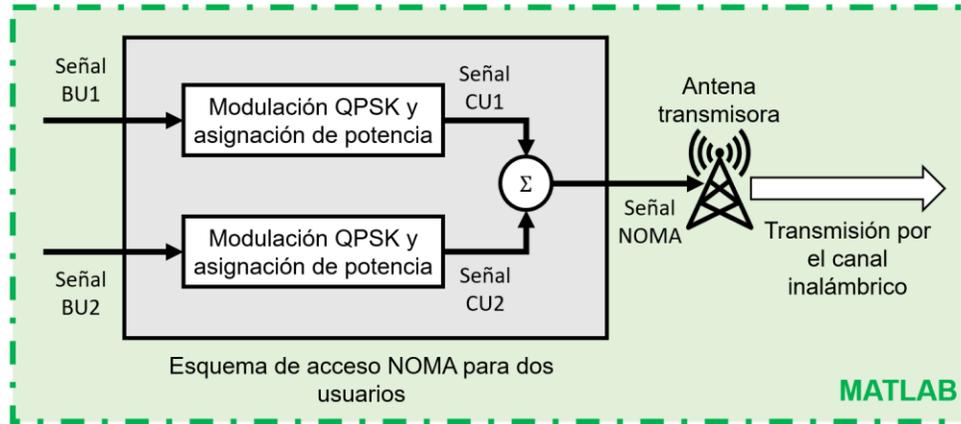


Fig. 4.23. Detalle del esquema de acceso NOMA.

En el esquema NOMA, el procesamiento se lleva a cabo en dos etapas: primero se modulan las señales en formato QPSK, y a cada señal se le asigna un nivel de potencia (Figura 4.24 (a) y (b)). Con esto se obtienen las señales CU1 y CU2, que en la segunda etapa son sumadas. La resultante de esta suma corresponde a la señal NOMA, ilustrada en la Figura 4.25.

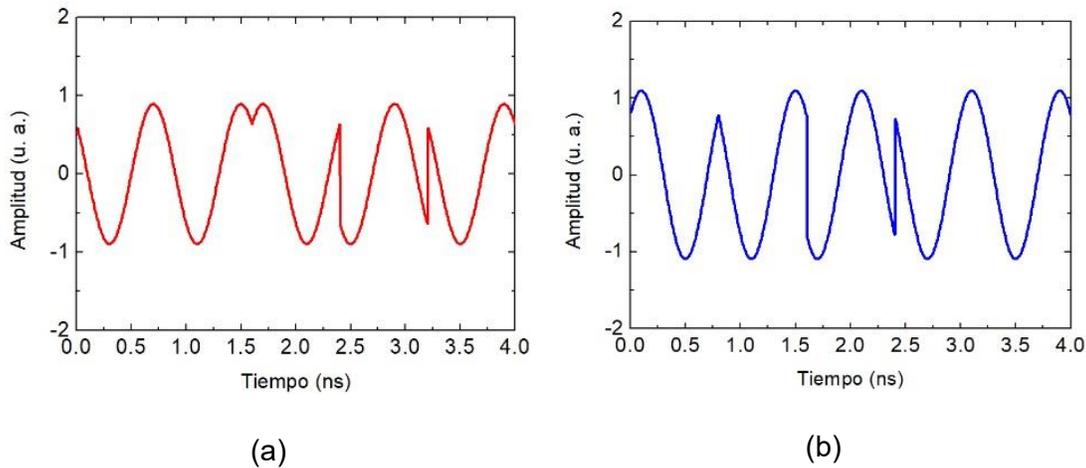


Fig. 4.24. Señales QPSK CU1 (a) y CU2 (b) como parte del esquema NOMA.

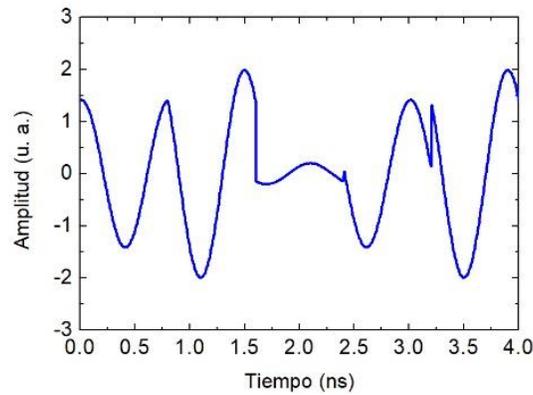


Fig. 4.25. Señal entregada por el esquema de acceso NOMA a la antena transmisora.

Para la transmisión inalámbrica se ubica a la antena virtual en BS0, al igual que en la simulación descrita en la sección 4.1, y se le considera en su celda hexagonal de cobertura con radio de 500 m. U1 y U2 se mueven dentro del sector de la celda, y están ilustrados en la Figura 4.26. Sus posiciones se determinan mediante la función *randi*, disponible en MATLAB. También se consideran las seis celdas que rodean a la central, correspondientes a las estaciones base cercanas (BS1 a BS6).

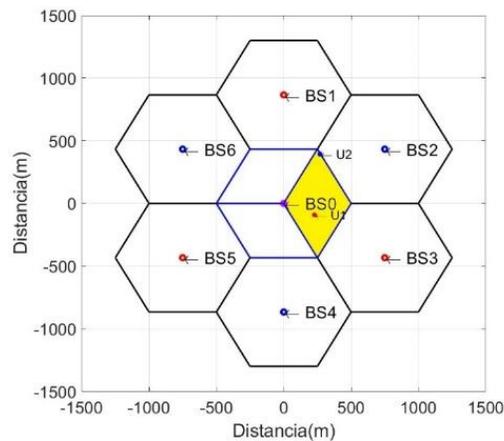


Fig. 4.26. Ilustración del área de cobertura con U1 y U2.

Los desvanecimientos por entorno y por múltiples trayectorias, así como el ruido AWGN y la CCI, y influyen en la recepción de manera particular y diferente en U1 y U2 porque éstos no se encuentran a la misma distancia de BS0 ni en la misma posición dentro del sector. Además, dentro del proceso evaluado en MATLAB, los factores están modelados por variables aleatorias de manera individual para cada

receptor, haciendo mínima la posibilidad de que sus valores coincidan. El canal de transmisión inalámbrica está representado en la Figura 4.27 (a) y (b) para U1 y U2, respectivamente, ilustrando las afectaciones a las señales en cada cuadro punteado negro.

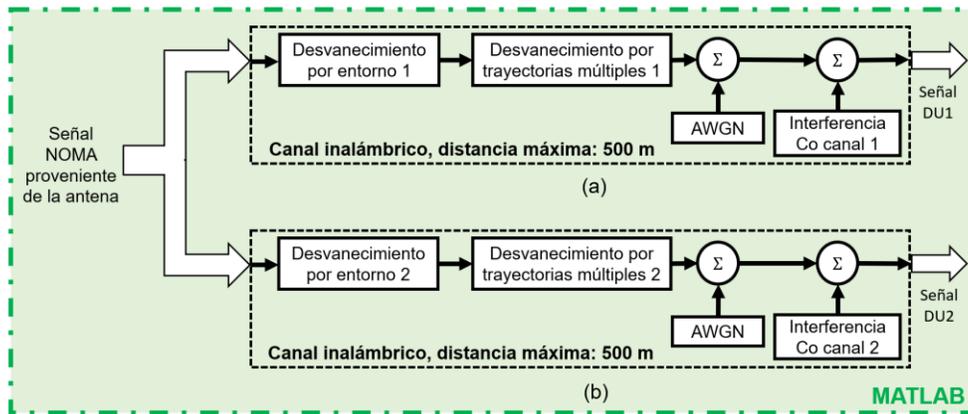


Fig. 4.27. Modelado del canal inalámbrico para el usuario 1 (a) y el usuario 2 (b)

Las señales DU1 y DU2, recibidas por los U1 y U2, se ilustran en las Figuras 4.28 (a) y (b), respectivamente.

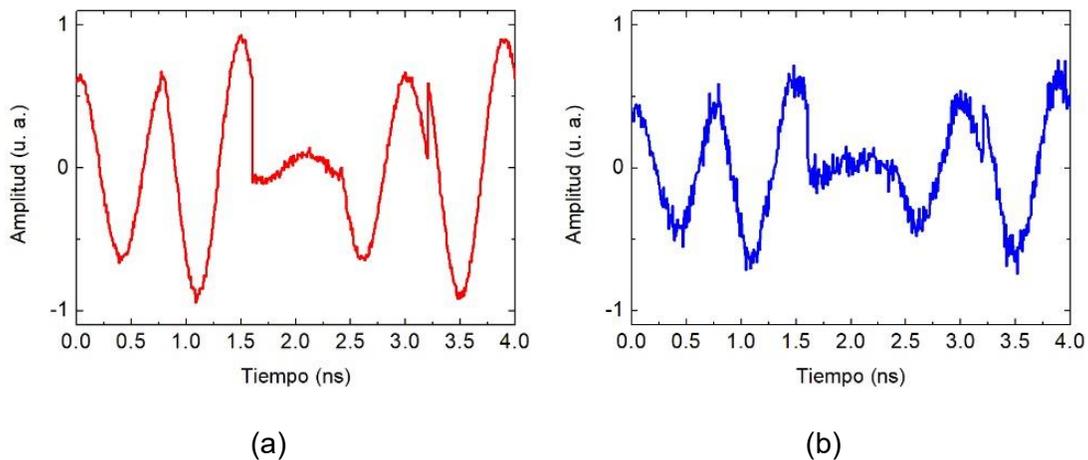


Fig. 4.28. Señal recibida por U1 (a) y por U2 (b).

La Figura 4.29 muestra los receptores virtuales que decodifican la señal inalámbrica. El proceso de recuperación de la información se describe a continuación.

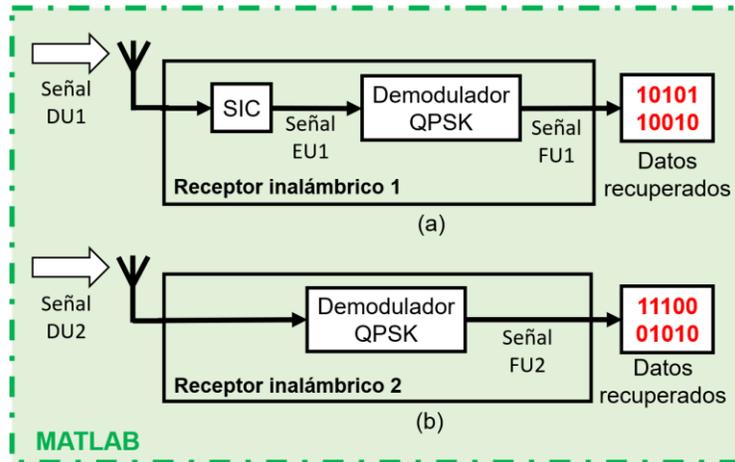


Fig. 4.29. Receptores inalámbricos de U1 (a) y U2 (b).

Al receptor correspondiente a U1 se le asignó un valor de potencia menor, por lo es necesario realizar un proceso de SIC para recuperar la parte de señal que le corresponde, designada como EU1 (Figura 4.30). Al final, esta señal es demodulada, obteniendo la señal FU1. Dado que la asignación de potencia es mayor para el usuario U2, esta señal es directamente demodulada, generando la señal FU2.

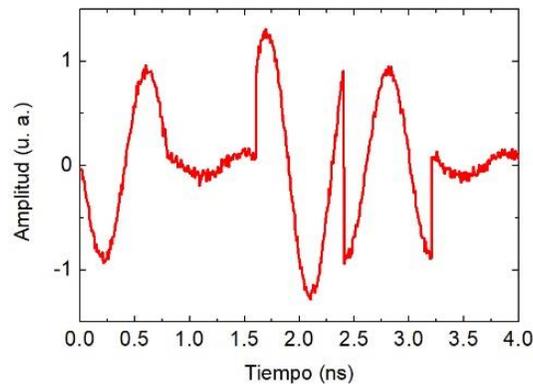


Fig. 4.30. Señal EU1, correspondiente a U1.

Las señales mostradas en la Figura 4.31 (a) y (b) corresponden a FU1 y FU2, obtenidas de las demodulaciones correspondientes, que son los datos digitales proporcionados por los generadores virtuales en las simulaciones de Optisystem (10101100 y 1110001010). Nótese la buena similitud con la gráfica 4.22 (a) y (b), respectivamente.

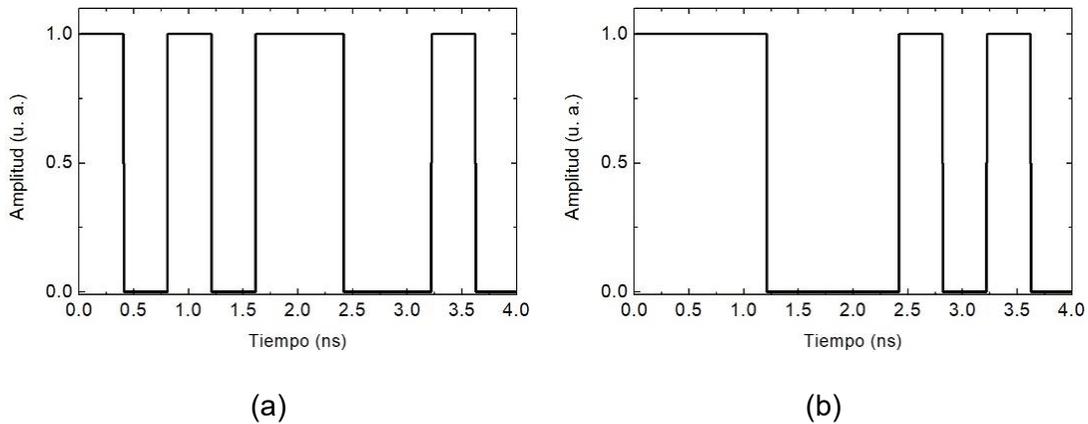


Fig. 4.29. Valores de bits recuperados al final del enlace.

Para establecer a qué usuario se debe asignar un nivel mayor de potencia se lleva a cabo el proceso que se describe a continuación. De inicio en NOMA, después de la modulación QPSK para cada usuario, se asigna a U2 una potencia mayor. Posteriormente, después de sumar las señales y transmitir las se determinan los valores numéricos para los desvanecimientos, el ruido AWGN y la interferencia mediante variables aleatorias, así como las posiciones de los usuarios dentro del sector. En la recepción se hallan las condiciones de canal midiendo la SINR y el nivel de interferencia para cada usuario. Si el usuario 1 tiene mejores condiciones de canal que el usuario 2, se conserva la asignación de niveles de potencia, es decir, al usuario con mejor condición de canal se le asigna la potencia menor. Por el contrario, si se hallan mejores condiciones de canal para el usuario 2, la asignación de niveles de potencia se invierte, permitiendo al usuario 1 tener un nivel mayor. Con esto se logra que cada usuario tenga un nivel de potencia acorde a su condición de canal en cada ejecución de la evaluación en MATLAB.

En este caso también se lleva a cabo una simulación Monte Carlo de eventos discretos para evaluar la funcionalidad del esquema NOMA planteado. Los parámetros considerados para esta simulación se presentan en la Tabla 4.2. La evaluación del desempeño de la transmisión inalámbrica se realiza en términos de la SINR y la BER de manera individual para cada receptor.

Tabla 4.2. Parámetros de simulación considerados para una zona exterior urbana.

Parámetros de simulación	U1	U2
Factor μ	4	4
Media de ζ para desvanecimiento por entorno	0	0
Desviación Estándar ζ para desvanecimiento por entorno	1	1
Media de desvanecimiento por trayectorias múltiples	0	0
Desviación Estándar de desvanecimiento por trayectorias múltiples	8	8

La Figura 4.30 muestra de manera gráfica cómo el nivel de ruido influye en el porcentaje de BER para cada usuario. En ambos trazos se observa que con una desviación estándar de AWGN de 1×10^{-12} y valores menores, la información se logra recuperar; este sistema es entonces funcional en niveles de ruido iguales o menores a este valor. La Figura 4.31 (a) muestra la SINR (dB) resultante de los mismos niveles de desviación estándar de AWGN para el usuario 1, mientras que la Figura 4.31 (b) indica lo propio para el usuario 2. En la medida en que el parámetro AWGN disminuye, el parámetro SINR aumenta, llegando a estabilizarse a partir de una desviación estándar de AWGN de 1×10^{-14} . Finalmente, en la Figura 4.32 (a) se observa, para el usuario 1, que los valores más altos de SINR provocan valores más bajos de BER; en la Figura 4.32 (b) se muestra la misma situación para el usuario 2.

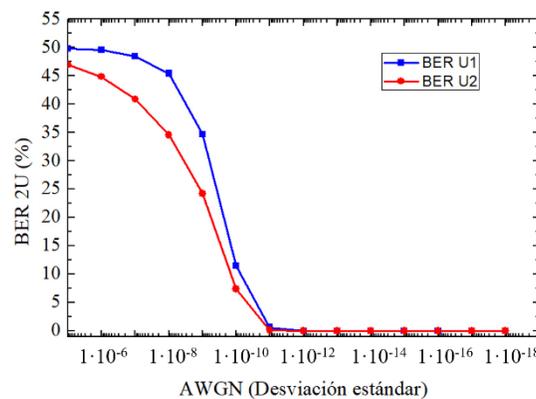
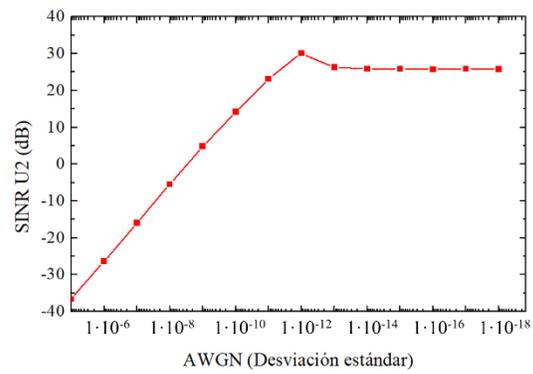
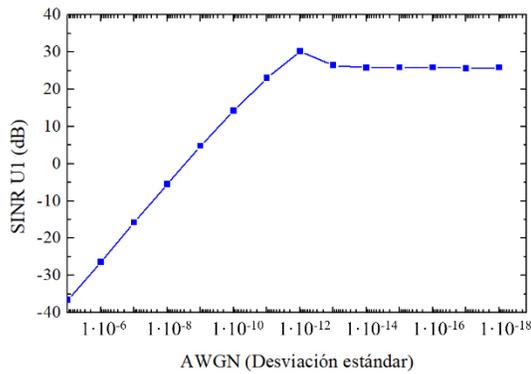


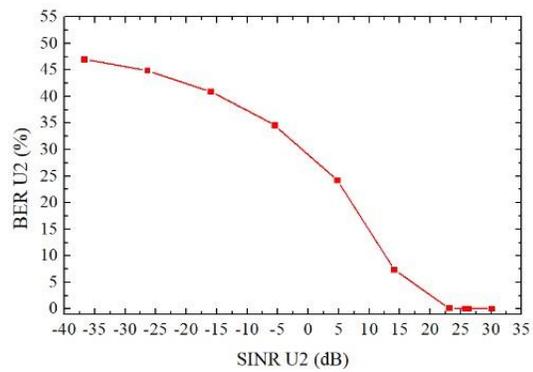
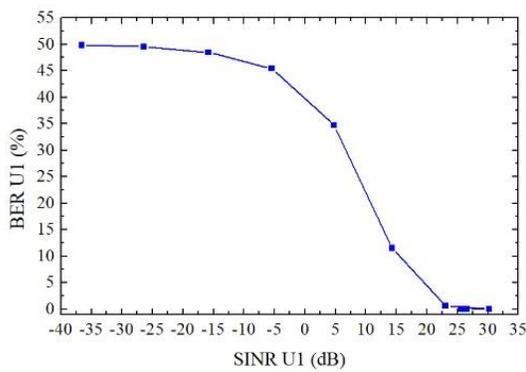
Fig. 4.30. Porcentaje de BER vs desviación estándar de AWGN para U1 (trazo azul) y para U2 (trazo rojo)



(a)

(b)

Fig. 4.31. SINR vs desviación estándar de AWGN para U1 (a) y para U2 (b).



(a)

(b)

Fig. 4.32. Relación entre el porcentaje de BER y SINR para U1 (a) y para U2 (b).

Conclusión de las simulaciones. Esta serie de simulaciones permitió evaluar el desempeño de la transmisión de datos digitales para dos sistemas Fibra-Radio de dos canales. Para la etapa de transmisión óptica de estas simulaciones se empleó el software Optisystem representando la transmisión de dos señales digitales a una tasa de bits de 2.4 GBps a través de un enlace óptico de 100 m de SM SF. De la misma manera que en la primera simulación, el efecto de la dispersión cromática no influyó significativamente en la transmisión a través de la fibra óptica. En la simulación por WDM se recuperaron simultáneamente las secuencias de bits de ambos canales, mientras que en la llevada a cabo por OC y OBPF se recuperaron

una a una. Con ambos métodos se obtuvieron resultados satisfactorios, permitiendo la recuperación íntegra de las señales generadas originalmente. Para la depuración y transmisión inalámbrica de las señales se utilizó el software MATLAB, emulando un enlace de dos canales mediante el esquema de acceso NOMA, considerando también los cuatro fenómenos principales que presenta este medio (desvanecimientos por múltiples trayectorias y por entorno, ruido AWGN, y CCI). Se consideraron dos usuarios en movimiento dentro de la celda del área de cobertura. Para cada canal se realizaron también pruebas estadísticas midiendo la BER y la SINR para evaluar el desempeño. Además, en el esquema NOMA se determinó el nivel de potencia para cada usuario midiendo las condiciones de canal de cada uno, asignándolos de forma adaptable en cada ejecución de la evaluación en MATLAB. Se mostró la funcionalidad del sistema en presencia de ruido. Se consideraron también múltiples posiciones de ambos usuarios receptores dentro del área de cobertura. La modulación QPSK se consideró como la más adecuada para el esquema NOMA, ya que no modifica la amplitud ni la frecuencia de la señal portadora, lo que permite ajustar los niveles de potencia de acuerdo con la funcionalidad de este esquema de acceso; además proporciona gran robustez para el sistema. Estas simulaciones tienen aplicaciones potenciales en sistemas Fibra-radio para ambientes exteriores, dado que se mostró su operación satisfactoria en distancias de hasta 500 m de la estación transmisora.

4.3 Sumario

Se presentaron tres simulaciones de esquemas Fibra-Radio; la primera fue para un canal de transmisión y las dos siguientes para dos canales, mostrando dos métodos para integrar y separar las señales ópticas (WDM y OC con OBPF), aplicando a su vez a cada uno el esquema de acceso NOMA para la etapa inalámbrica. En las tres simulaciones se demostró la funcionalidad de los sistemas descritos, recuperando satisfactoriamente los datos transmitidos en las condiciones adecuadas tanto en la parte óptica como en la parte inalámbrica de cada uno. Se realizaron pruebas estadísticas para evaluar el desempeño de cada una de las etapas inalámbricas, tomando en cuenta cuatro de los principales factores que afectan a una transmisión

inalámbrica, con lo que se demostró la robustez de los sistemas. En el siguiente capítulo se describen los experimentos realizados en laboratorio, y se describen y evalúan sus resultados.

Referencias

- [1] VPI Photonics Design Suite (en línea). Disponible en: <https://www.vpiphotonics.com/Tools/DesignSuite>
- [2] Redes ópticas (en línea) Disponible en: <https://electroagenda.com/es/redes-opticas/>
- [3] G. Morthier & P. Vankwikelberge, "Handbook of Distributed Feedback Laser Diodes," Second Edition, Artech, 2013.
- [4] K. Zhong, X. Zhou, J. Huo, C. Yu, C. Lu, & A. P. T. Lau, "*Digital Signal Processing for Short-Reach Optical Communications: A Review of Current Technologies and Future Trends*," Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 2, pp. 377-400, 2018. doi: <https://www.doi.org/10.1109/JLT.2018.2793881>
- [5] B. E. A. Saleh, & M. C. Teich, "*Photodetectors*," Fundamentals of Photonics, 3rd Edition, Wiley, 2019, pp. 871-942.
- [6] A. S. Bahuguna, K. Kumar, Y. P. Pundir, & A. V. Bijalwan, "*A Review of Various Digital Modulation Schemes Used in Wireless Communications*," Proceedings of Integrated Intelligence Enable Networks and Computing. Algorithms for Intelligent Systems, Springer, Singapore, pp. 561-570, 2021. doi: https://www.doi.org/10.1007/978-981-33-6307-6_56
- [7] J. Castañeda-Camacho, & D. Lara-Rodríguez, "*Teletraffic analysis of an overlaid system using CDMA and TDMA with cell coverage area restriction*," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, vol. 57, cap. 2, pp. 828–846. doi: <https://www.doi.org/10.1109/TVT.2007.905616>
- [8] J. Castañeda-Camacho, G. Mino-Aguilar, L. Cortez, J. E. M. Gutiérrez-Arias, J. F. Guerrero-Castellanos, & G. A. Muñoz Hernández, "*Montecarlo Simulation Applied to Measurement of the Impact of the Smart Antenna Technology in Digital Cellular Systems*," Ingeniería, Investigación y Tecnología, 2015, pp. 207–212. doi: <https://www.doi.org/10.1016/j.riit.2015.03.005J>

- [9] J. Castañeda-Camacho, & D. Lara-Rodríguez, “*Ordered Hunt Schemes for Overlaid CDMA Cellular Systems*,” Ingeniería, Investigación y Tecnología, 2010, Vol. 11, pp. 349-365. doi: <https://www.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2010.11n3.030>
- [10] **R. Cuevas-Terrones**, J. Castañeda-Camacho, G. A. Muñoz-Hernández, & Ignacio Enrique Zaldívar-Huerta, “*Evaluation of the Digital Data Performance Transmission on a Fiber-Radio System*,” Electronics, 2023, vol. 12, no. 2: 378. doi: <https://www.doi.org/10.3390/electronics12020378>
- [11] Optisystem overview (en línea). Disponible en <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [12] F. El-Nahal, & N. Hanik, “*Technologies for future wavelength division multiplexing passive optical networks*,” IET optoelectronics, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 53-57. Disponible en <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-opt.2018.5056>

CAPÍTULO 5: EXPERIMENTOS.

Introducción

Este capítulo consta de seis secciones que describen una serie de experimentos basados en las simulaciones presentadas en el capítulo 4. En la primera sección, se describe un sistema de transmisión óptico a espacio libre (FSO, Free Space Optical). La segunda sección describe un sistema de comunicación óptico a través de un enlace de fibra óptica a modulación externa. En ambos casos, los datos transmitidos son procesados utilizando un FPGA (Field Programmable Gate Array). La tercera sección muestra la caracterización de un sistema Fibra-Radio operando en las bandas S y C de radio frecuencia. La cuarta sección presenta la transmisión de dos señales de microondas a través de un enlace Fibra-Radio utilizando un OBPF sintonizable. La quinta sección muestra un sistema de dos canales de transmisión a través de un enlace óptico utilizando también el OBPF; aquí, los datos recuperados son aplicados a un esquema de NOMA para simular su transmisión inalámbrica. Finalmente, la sexta sección describe un resumen.

5.1 Transmisión de datos generados por un FPGA a través de un enlace FSO

Objetivo: Realizar la transmisión de datos por medio de un enlace de comunicación FSO [1], en ambiente interior modulando una fuente óptica en formato On-Off Keying (OOK) [2]. El montaje utilizado se muestra en la Figura 5.1.

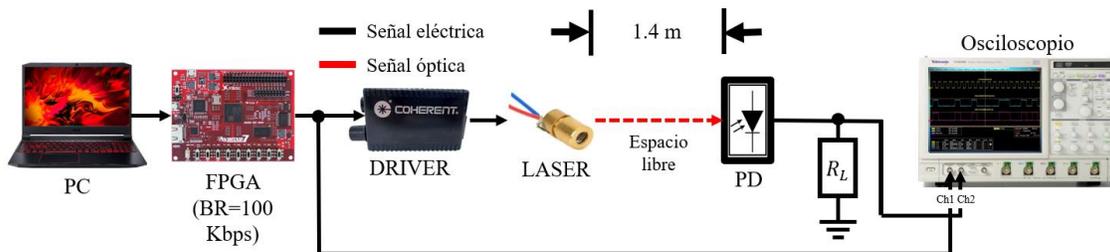


Fig. 5.1. Configuración experimental para el esquema de comunicación FSO.

Descripción: Inicialmente se configura el FPGA (Xilinx Artix 7 100T, Intesc Avance 7) como generador de datos a transmitir (en particular, texto escrito). Se utiliza una plataforma de conversión disponible en Internet [3], la cual convierte texto a valores

binarios en código ASCII (American Standard Code for Information Interchange). La Figura 5.2 corresponde a una captura de pantalla de la plataforma, que muestra la frase “Hello world” y sus correspondientes valores binarios. Estos datos se almacenan en un archivo de texto.

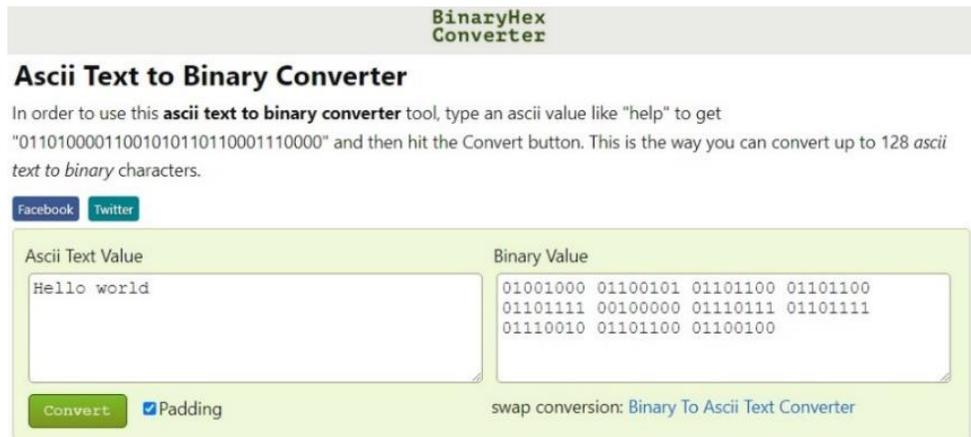


Fig. 5.2. Frase “Hola mundo” y sus caracteres binarios correspondientes [3].

Así, “Hello World” es: 01001000 01100101 01101100 01101100 01101111 00100000 01110111 01101111 01110010 01101100 01100100. Este código se escribe a lenguaje VHDL [4], generando un archivo fuente el cual se transfiere al FPGA a través del puerto USB de la computadora. El FPGA entrega pulsos eléctricos que corresponden a los datos de la frase, a una tasa de bits establecida (BR, Bit Rate). El FPGA es programado a $f_{clock}=100$ KHz (BR=100 Kbps). La Figura 5.3 muestra el proceso anteriormente descrito.

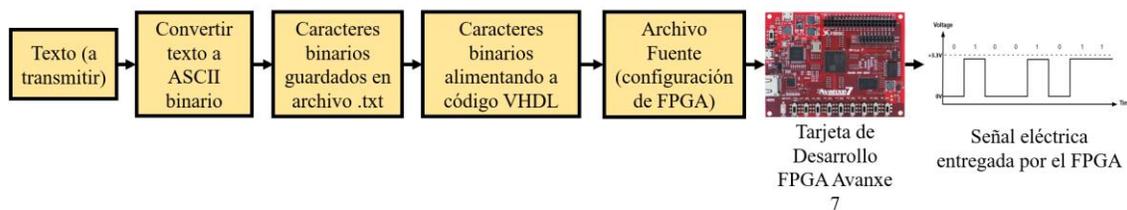


Fig. 5.3. Diagrama indicando la secuencia para generar la señal digital en el FPGA.

Como se muestra en la Figura 5.1, la señal eléctrica generada por el FPGA es aplicada al Driver (Coherent, modelo 31-1050) para modular la fuente láser (Coherent, modelo 1014954, $\lambda_{central} = 830$ nm, P=50 mW). Mediante un buen alineamiento entre el láser y el fotodetector, el haz de luz modulado se recupera a

una distancia de 1.4 m por un fotodetector PD PIN (Thorlabs, DET 110, $\mathcal{R} = 0.54$ A/W, 350-1100 nm). La señal eléctrica generada por el PD, que corresponde a la señal recuperada, se visualiza en el osciloscopio (Tektronix, DPO7104, BW=1 GHz). La Figura 5.4 muestra las señales de reloj, la transmitida y la recuperada.



Fig. 5.4. Trazas en el osciloscopio correspondientes a las señales de reloj, transmitida y recuperada.

La Figura 5.5 es una fotografía del arreglo experimental donde se indican los componentes y equipo utilizados.



Fig. 5.5. Fotografía del arreglo experimental del enlace de transmisión FSO.

La evaluación del sistema se realiza utilizando herramientas estadísticas para el análisis de las señales transmitidas y recuperadas. Las señales visualizadas en el osciloscopio (Figura 5.4), son exportadas a un archivo con extensión .csv para ser

procesadas en MATLAB. Mediante la función *xcorr*, disponible en la biblioteca de este software, se obtiene la correlación r entre ambas señales. Una vez determinado este vector de valores, se calcula el Error Cuadrático Mínimo (MSE, Minimum Square Error) medio por medio de la relación [5].

$$\zeta = 2 - \frac{2r}{\sqrt{E_{tx}E_{rx}}} \quad (5.1)$$

donde r es la correlación previamente calculada, y E_{tx} y E_{rx} son los valores de energía correspondientes a las señales transmitida y recuperada, respectivamente. La Ecuación (5.1) se evalúa numéricamente en MATLAB, y el resultado de este proceso se ilustra en la gráfica de la Figura 5.6.

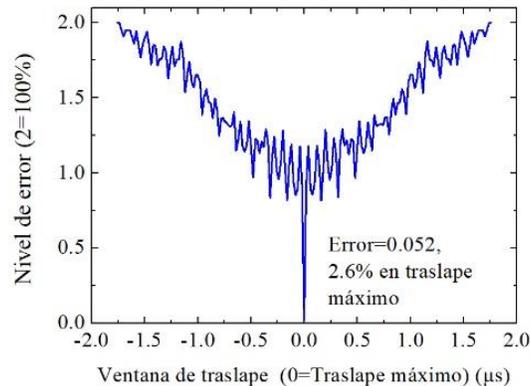


Fig. 5.6. Resultado de la evaluación del MSE para las señales transmitida y recuperada.

El MSE se calcula considerando la media de los errores al cuadrado de los datos en relación con una función, por lo que, un valor MSE grande indica que los puntos de datos están dispersos alrededor de su media; mientras que, un valor MSE pequeño indica lo contrario. De la Figura 5.6, se observa un MSE=0.052, lo que garantiza que los datos transmitidos se recuperaron de manera satisfactoria.

Conclusión: Se evaluó un enlace de comunicación FSO en ambiente interior usando modulación OOK. La información eléctrica fue generada por un FPGA. La técnica de modulación óptica directa lo hace ideal para dispositivos que operan a bajas tasas de transmisión. La estimación de la precisión para el sistema se realizó obteniendo el MSE entre las señales transmitidas y recuperadas mediante herramientas estadísticas. El valor MSE=0.052 obtenido, garantiza que

prácticamente todos los datos transmitidos se recuperaron de manera aceptable. Esta configuración también se puede utilizar para transmitir datos digitalizados como voz e imágenes, además, encuentra aplicaciones en las que se requiere evitar el cableado en instalaciones interiores. **Los resultados de este experimento fueron publicados en [6].**

5.2. Transmisión de datos generados por un FPGA a través de un enlace óptico a modulación externa.

Objetivo: Realizar la transmisión de datos digitales usando un sistema de comunicación óptico a modulación externa. Este experimento se basa en el montaje de la Figura 5.7.

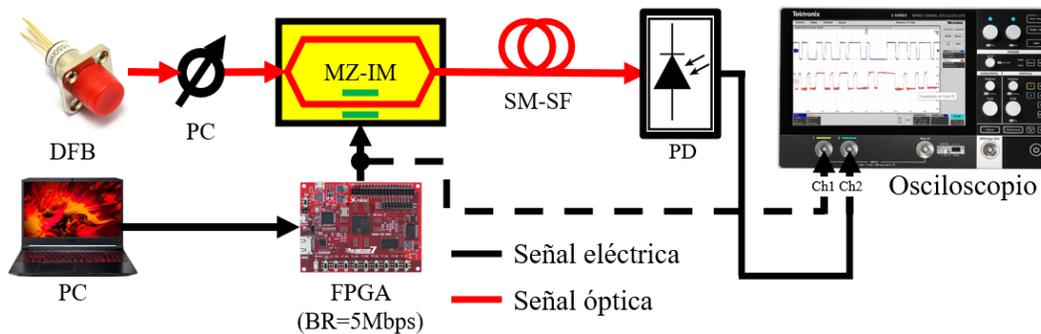
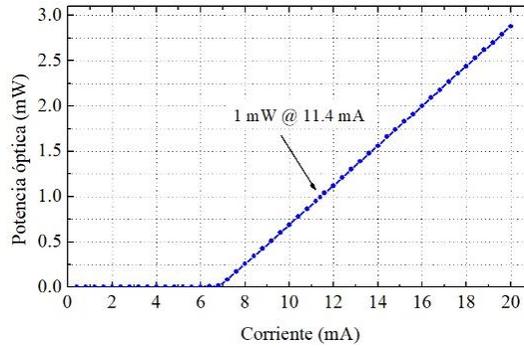


Fig. 5.7. Esquema experimental del sistema de comunicación óptico a modulación externa.

Descripción: Nuevamente se utiliza la secuencia digital obtenida en el experimento anterior, con la diferencia que ahora para el FPGA, $f_{clock}=5$ MHz (BR=5 Mbps). La señal óptica modulada se transmite a través de 100 m de fibra SM-SF. La fuente óptica es un DFB (LP1550-SAD2). Inicialmente se obtiene la curva corriente-potencia para este dispositivo (Figura 5.8), donde se observa que a una corriente de 11.4 mA corresponde la potencia de 1 mW.



Fi 5.8 Curva Corriente-Potencia del DFB LP1550-SAD2.

La Figura 5.9 corresponde al espectro del DFB registrado por medio del analizador de espectros ópticos (OSA, Optical Spectrum Analyzer, Anritsu, modelo MS9740A), observando que $\lambda_{central} = 1550.48 \text{ nm}$ a 11.4 mA.

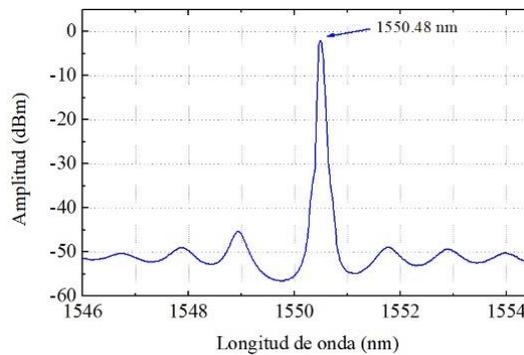


Fig. 5.9 Espectro óptico del DFB LP1550-SAD2.

Como se muestra en la Figura 5.7, el haz óptico del DFB pasa por un controlador de polarización (PC, Polarization Controller) y posteriormente se inyecta al MZ-IM. Los datos a transmitir provenientes del FPGA se aplican al puerto de RF del MZ-IM así como al canal 1 del osciloscopio (Tektronix, Serie 2 MSO, BW=500 MHz). La señal óptica modulada a la salida del MZ-IM es inyectada a 100 m de SM-SF, ($\alpha=0.2 \text{ dB/km}$, $D=16.75 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}@1550 \text{ nm}$). Al extremo de la fibra, el PD (APD, Miteq BW=13GHz, $\mathcal{R} = 0.9 \text{ A/W}$), recupera la señal óptica y entrega una señal eléctrica la cual se conecta al canal 2 del osciloscopio. Las Figuras 5.10 (a) y (b) corresponden a las señales desplegadas en el osciloscopio: transmitida (canal 1), y recuperada (canal 2). Estas señales se exportan en archivos .csv para su análisis.

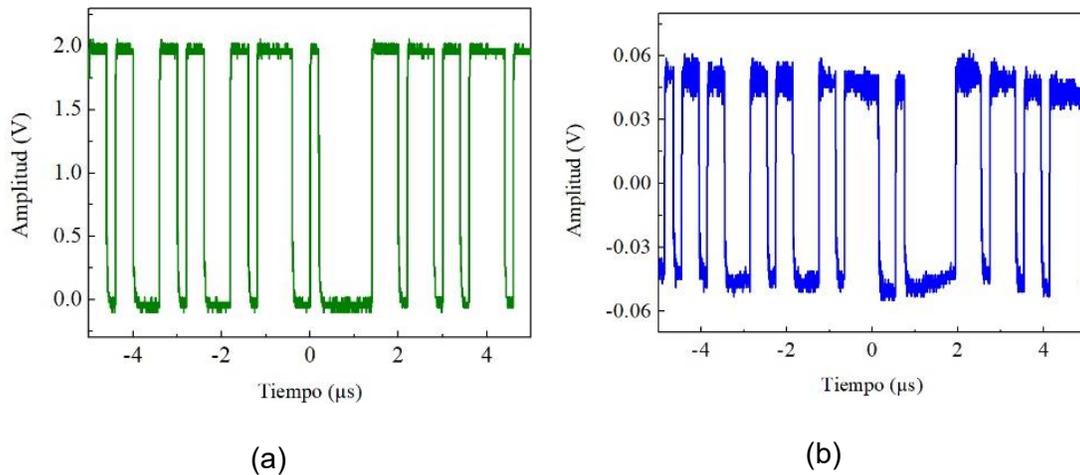


Fig. 5.10. Trazos correspondientes a: (a) la señal transmitida y, (b) la señal recuperada.

La Figura 5.11 muestra la fotografía del arreglo experimental indicando los componentes y equipo utilizado.

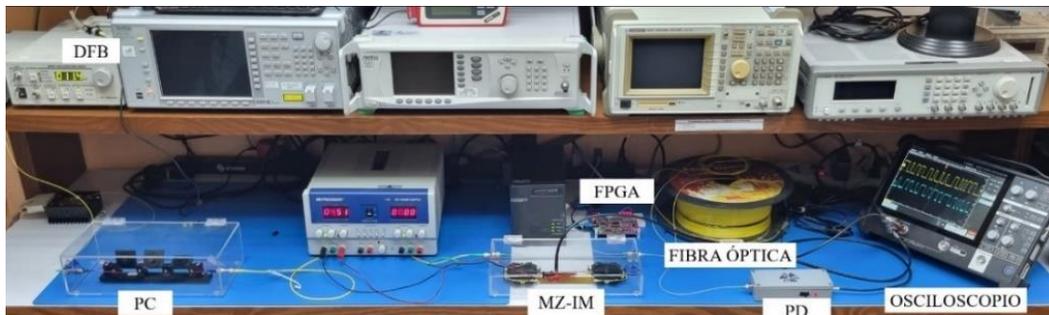


Fig. 5.11 Fotografía del arreglo experimental del sistema de comunicación óptico a modulación externa.

La calidad de la señal recuperada se determina obteniendo la correlación entre la señal transmitida y la recuperada, mediante la función *xcorr* de MATLAB, y, posteriormente usando la ecuación (5.1) se obtiene un $MSE=0.085$, lo cual indica un buen grado de confiabilidad de la señal recuperada. Este valor se muestra gráficamente en la Figura 5.12.

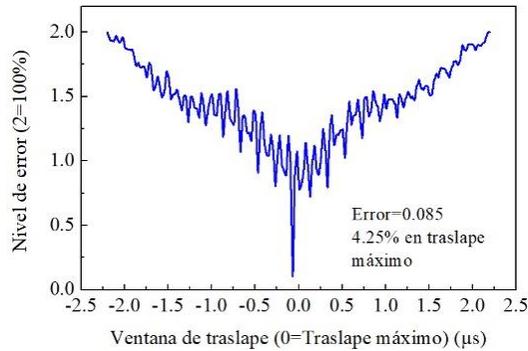


Fig. 5.12 Resultado de la evaluación del MSE entre las señales transmitida y recuperada.

Conclusión: Se demostró la transmisión de datos digitales a través de un enlace óptico de 100 m a modulación externa, utilizando como generador de datos una tarjeta de desarrollo FPGA. El valor MSE=0.085 obtenido, indica un buen grado de confiabilidad de la señal recuperada. Esta propuesta tiene aplicaciones potenciales para conectar enlaces cortos en centros de datos que requieren altas tasas de transmisión. **Los resultados de este experimento están publicados en [7].**

5.3. Emulación de un sistema Fibra-Radio operando en las bandas S y C de radio frecuencia.

Objetivo: Emular un escenario de transmisión Fibra-Radio operando en las bandas S (2-4 GHz) y C (4-8 GHz) entre un centro de datos y una unidad de antena remota para su distribución de manera inalámbrica. El arreglo utilizado se muestra en la Figura 5.13.

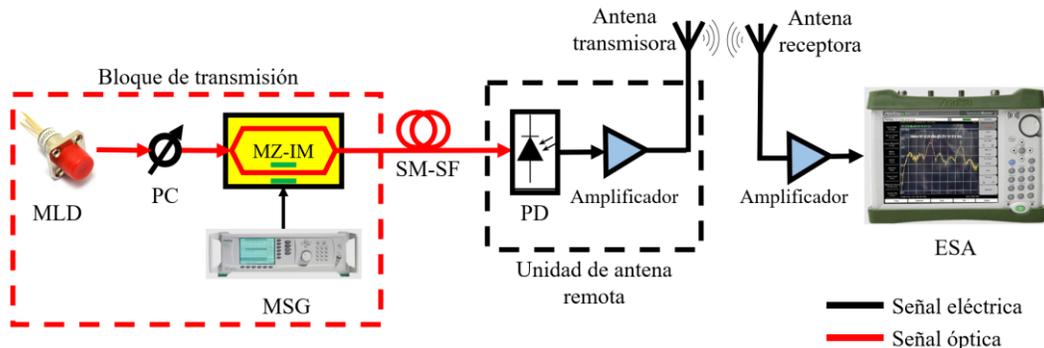


Fig. 5.13 Esquema experimental del sistema de transmisión Fibra-Radio con MLD.

Descripción: El bloque de transmisión (cuadro punteado rojo) consta de: un diodo láser multimodo (MLD, Multimode Laser Diode), un PC, un MZ-IM, y un generador de microondas (MSG, Microwave Signal Generator, Anritsu modelo MG3692C). Posteriormente, un enlace de 25 Km de SM-SF ($\alpha=0.2$ dB/km, y $D=15.81$ ps/nm·km @ 1550 nm) conecta el bloque transmisor con la unidad de antena remota (cuadro punteado negro). Esta unidad consta de un PD, un amplificador eléctrico y una antena que radia la señal recuperada. Finalmente, otra antena detecta la señal radiada y se conecta a un Analizador de Espectros Eléctricos (ESA, Electrical Signal Analyzer, Anritsu MS2713E, BW=9kHz-6GHz) para visualizar la señal recuperada.

Inicialmente, las características del MLD, operando a una potencia de 1 mW, se verifican en el OSA. El espectro obtenido, (Figura 5.14), muestra una $\lambda_{central} = 1532.34$ nm, y una separación intermodal $\delta\lambda = 1.1$ nm.

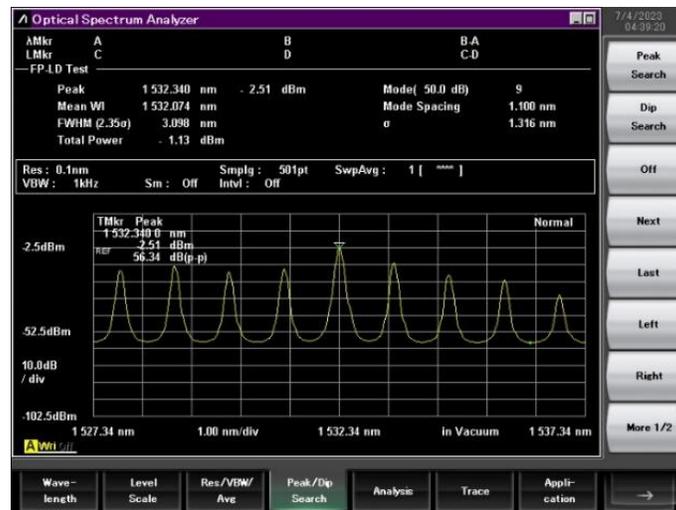


Fig. 5.14 Espectro óptico del MLD S1FC1550.

Es importante indicar que el uso de un MLD emitiendo a $\lambda=1532.34$ nm, asociada a una SM-SF, provoca que el factor de dispersión cromática (D) de la fibra sea considerable [8]. La asociación de los parámetros L , D y $\delta\lambda$, provoca que el sistema se comporte como un filtro fotónico del tipo pasa-bandas [9]. El conocer el valor preciso de $\delta\lambda$, juega un papel decisivo en la determinación de las frecuencias centrales de las bandas de paso filtradas, cuyos valores se calculan por [9]

$$f_i = \frac{i}{DL\delta\lambda} \quad (5.2)$$

Donde i es un número positivo, $i = 1, 2, \dots$

Sustituyendo en la ecuación (5.4) $L=25.28$ km, $D=15.81$ ps/nm·km, y $\delta\lambda=1.1$ nm, y evaluando para $i=1$ e $i=2$ se obtienen: $f_1=2.27$ GHz, y $f_2=4.54$ GHz.

El software de simulación VPIPhotonics se utiliza para determinar la respuesta en frecuencia de este MPF particular. La Figura 5.15 ilustra el arreglo de simulación utilizado. La fuente óptica MLD fue implementada como se describe en [10].

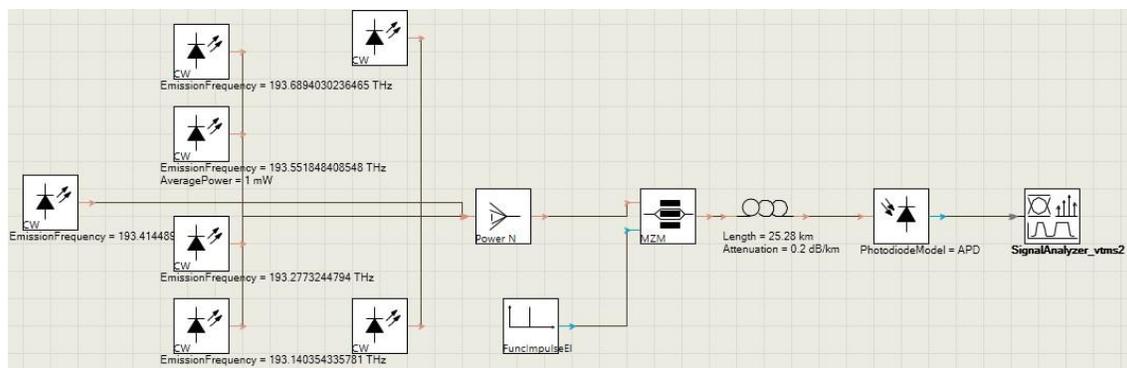


Fig. 5.15 Esquema de simulación del MPF en el software VPIPhotonics.

Los parámetros de simulación son: un MLD con una $\lambda_{central} = 1532.34$ nm, y $\delta\lambda=1.1$ nm; una fibra óptica con las características: $L=25.28$ km, $D=15.81$ ps/nm·km y $\alpha=0.2$ dB/km. El generador de microondas realiza un barrido en frecuencia en el rango de 0 a 6 GHz cuya señal se aplica al modulador MZM. Al extremo de la fibra óptica, el PD recupera la señal óptica y entrega a su vez la señal eléctrica que corresponde a la respuesta en frecuencia la cual se visualiza en el ESA. La Figura 5.16 corresponde a la respuesta en frecuencia donde se observan dos ventanas pasa banda bien definidas a $f_1 = 2.26$ GHz y $f_2 = 4.59$ GHz. Estos resultados concuerdan muy bien con los obtenidos numéricamente por el uso de la ecuación (5.2).

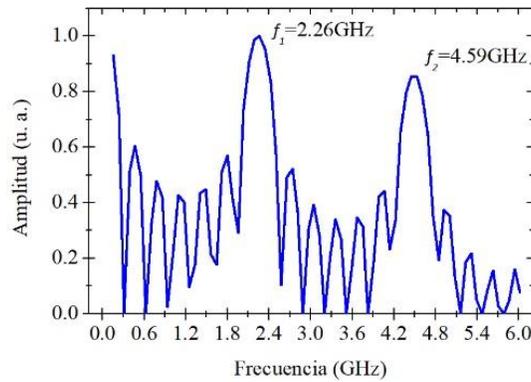


Fig. 5.16. Respuesta en frecuencia del MPF obtenida por simulación.

Para simular la transmisión de señales codificadas en las ventanas de banda de paso generadas, se aplican señales con valores de frecuencia fijos a $f_1 = 2.26$ GHz, y $f_2 = 4.59$ GHz. El resultado de esta simulación se muestra en las Figuras 5.17 (a) y (b).

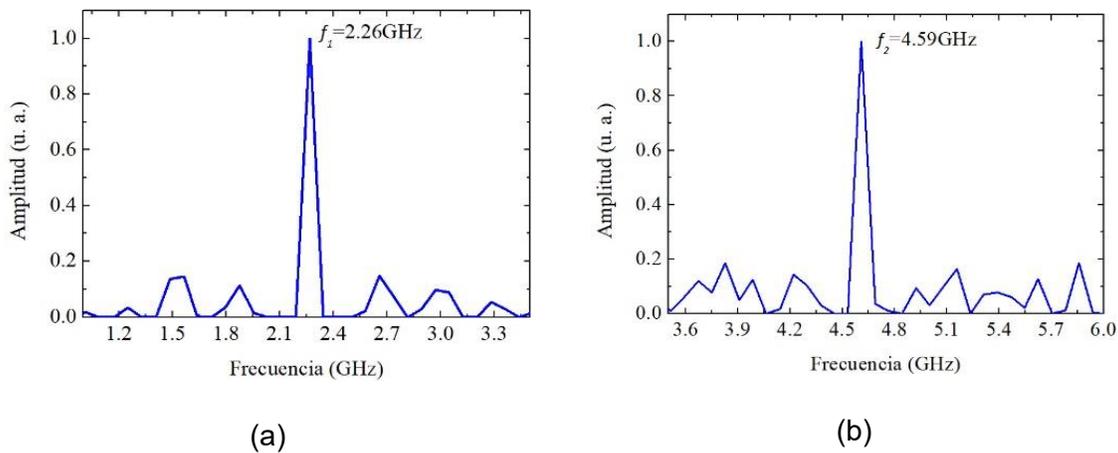


Fig.5.17. Resultados de simulación de la transmisión de señales codificadas a: (a) $f_1 = 2.26$ GHz, y (b) $f_2 = 4.59$ GHz.

La descripción experimental del montaje de la Figura 5.13 es el siguiente: El haz óptico del MLD pasa a través de un PC y se inyecta al MZ-IM. El MSG realiza un barrido en frecuencia en el intervalo de 0 a 6 GHz a una potencia de 15 dBm cuya señal eléctrica se aplica al MZ-IM. La luz modulada se inserta a 25.28 km de SM-SF. Al final del enlace óptico, el haz óptico es recuperado por el PD (Miteq $\mathcal{R} = 0.9$ A/W, BW=13 GHz), entregando a su vez una señal eléctrica que es amplificada (ZVA-183- S+, 700-18000 MHz y G=26 dB). Esta señal eléctrica se conecta al ESA para registrar y almacenar los datos. La Figura 5.18 muestra la respuesta en

frecuencia compuesta por dos ventanas de banda de paso centradas en $f_1 = 2.37$ GHz y $f_2 = 4.59$ GHz. En el recuadro de esta Figura se muestra la ampliación de una de las ventanas de banda de paso en donde se indica el ancho de banda eléctrico. La ausencia de señal al inicio de la curva se debe a las características del amplificador eléctrico utilizado, cuya respuesta inicia en 700 MHz. Nótese que esta curva está en excelente concordancia con la de la Figura 5.16, así como con los valores numéricos previamente obtenidos por la ecuación (5.4). En promedio, el ancho de banda eléctrico a -3 dB para estas ventanas de banda de paso es de 399.0 MHz.

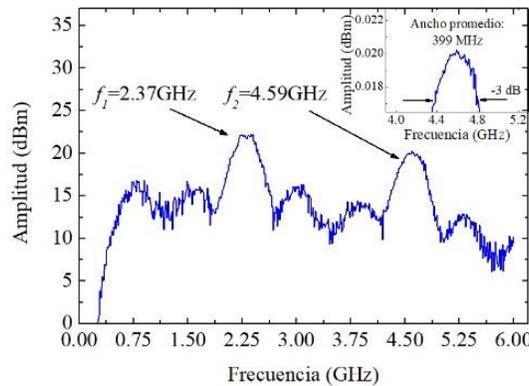


Fig. 5.18. Respuesta en frecuencia experimental correspondiente al MPF.

Una vez conocidas las ubicaciones de las ventanas de banda de paso, éstas son utilizadas como portadoras eléctricas donde se codifican las señales $f_1 = 2.37$ GHz y $f_2 = 4.59$ GHz, y, posteriormente su transmisión de manera inalámbrica. A continuación se explica el proceso para la transmisión de la señal de 2.37 GHz. Con referencia a la Figura 5.13, el MSG proporciona la señal de 2.37 GHz, a una potencia de 15 dBm, esta señal se aplica al puerto RF del MZ-IM para modular el haz óptico. La señal óptica modulada se inyecta a 25.28 km de SM-SF y al final del enlace es recuperada por el PD (Miteq $\mathcal{R} = 0.9$ A/W, BW=13 GHz), entregando una señal eléctrica, la cual es amplificada (ZVA-183-S+) y conectada a una antena omnidireccional (Kathrein, Tipo 800 10430, 1710-6000 Polarización Vertical V). Otra antena omnidireccional con las mismas características que la anterior recibe la señal radiada. La señal eléctrica recuperada por esta segunda antena es amplificada (ZVA-183-S+) y conectada al ESA donde es visualizada y registrada. La

transmisión de la señal de 4.59 GHz se lleva a cabo de manera similar al descrito anteriormente. Las Figuras 5.19 (a) y (b) muestran las señales recuperadas $f_1 = 2.37$ GHz y $f_2 = 4.59$ GHz, respectivamente.

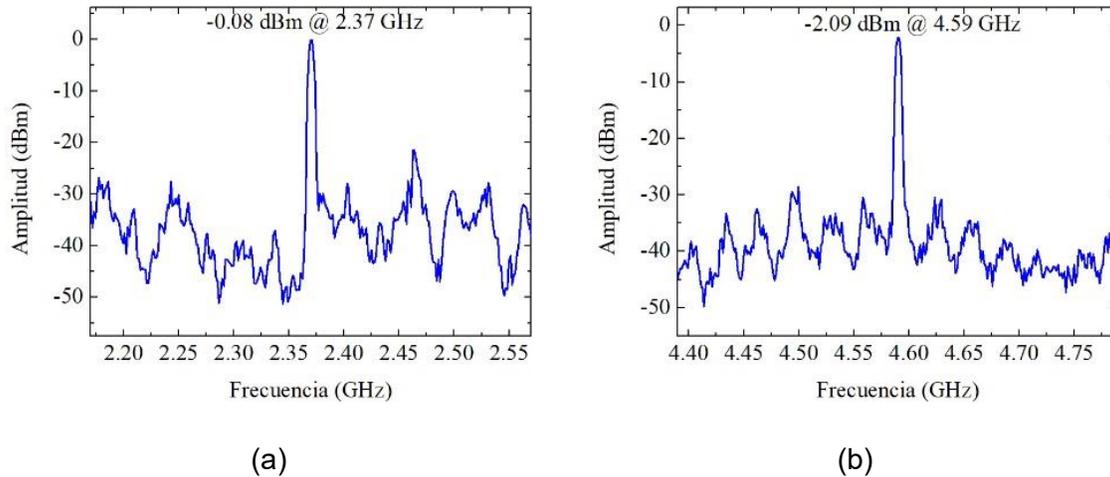


Fig. 5.19. Resultados experimentales de la transmisión de señales codificadas a: (a) $f_1 = 2.26$ GHz, y (b) $f_2 = 4.59$ GHz.

La métrica utilizada para evaluar la calidad de las señales recuperadas es midiendo el valor de SNR, obteniendo para $f_1 = 2.37$ GHz y $f_2 = 4.59$ GHz una SNR de 26.12 dB y 28.80 dB, respectivamente. Estos valores aseguran un buen aislamiento del piso de ruido, y por tanto una buena calidad. El promedio el valor de SNR es de 27.46 dB.

Conclusión: Se emuló y validó un sistema Fibra-radio que opera en las bandas S y C de radio frecuencia. El sistema propuesto se apoyó en el uso de un MPF de paso de banda múltiple cuyas frecuencias centrales lo determinan los parámetros L , D y $\delta\lambda$. Señales analógicas de microondas se codificaron en las bandas de paso centradas a las frecuencias $f_1 = 2.37$ GHz y $f_2 = 4.59$ GHz y transportadas a través de 25.28 km de SM-SF. Los resultados experimentales se apoyaron en resultados de simulación obtenidos por el uso del software VPIphotonics. Experimentalmente, las señales fueron radiadas y recuperadas por medio de antenas omnidireccionales. La métrica para evaluar la calidad de las señales recuperadas fue mediante la medición del parámetro SNR, obteniendo en promedio 27.46 dB. Esta propuesta

encuentra aplicaciones para la transmisión de señales analógicas o digitales utilizando las señales pasa-bandas como portadoras eléctricas.

5.4. Transmisión de dos señales de microondas compartiendo un mismo enlace óptico.

Objetivo: Realizar la transmisión de dos señales de microondas compartiendo un mismo enlace óptico, y posteriormente su transmisión inalámbrica en ambiente interior. Para este objetivo se utiliza el esquema mostrado en la Figura 5.20.

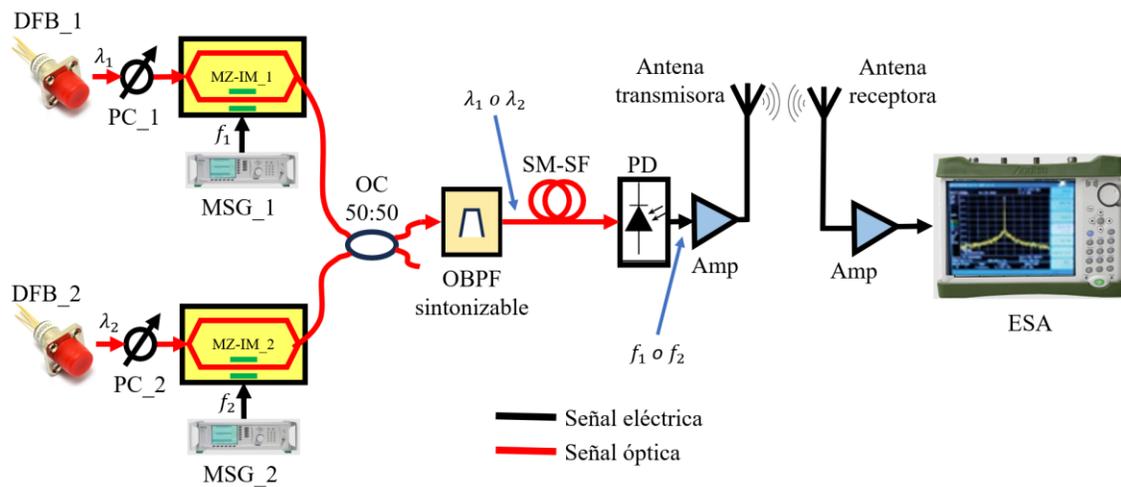


Fig. 5.20. Arreglo experimental para el transporte de dos señales compartiendo un mismo enlace óptico.

Descripción: Inicialmente, se caracterizan los DFBs utilizados, esto es: DFB_1 (LP1550-SAD2-230109-19, $\lambda_1 = 1548.26$ nm), y DFB_2 (LP1550-SAD2-181115-11, $\lambda_2 = 1550.22$ nm). Se establece una corriente de polarización eléctrica de 11.1 mA y 11.8 mA, asegurando de esta manera una potencia óptica de 1 mW en cada DFB, respectivamente. Sus correspondientes curvas corriente-potencia y sus espectros, registrados por el OSA, se muestran en las Figuras 5.21 y 5.22.

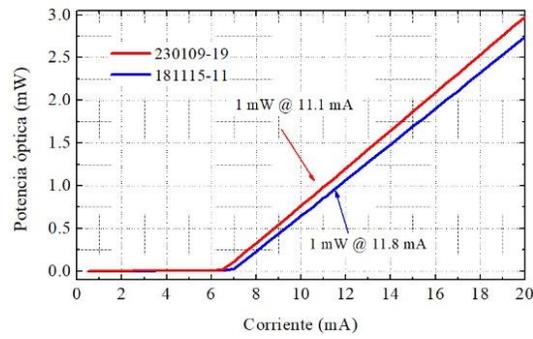


Fig. 5.21. Curvas corriente-potencia óptica para DFB_1 (color rojo) y DFB_2 (color azul).

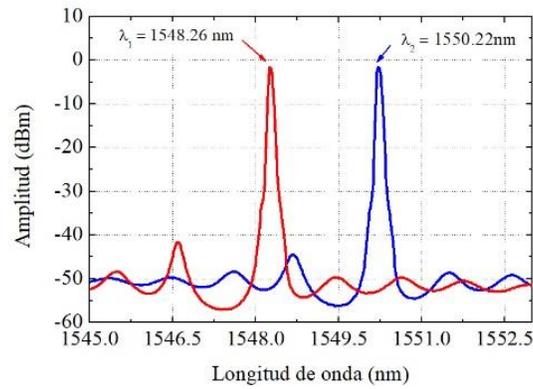


Fig. 5.22. Espectros ópticos para DFB_1 (color rojo), y DFB_2 (color azul).

La Figura 5.23 muestra el OBPF (Dicon, TF-1550-0.8-9/9LT-FC/APC-1) [13], cuya sintonía manual es realizada por medio del tornillo micrométrico. Su rango de sintonía es de 1535 a 1565nm (banda C óptica), por lo que su ancho de banda óptico es de 30nm.



Fig. 5.23. OBPF de sintonización manual [11].

Una vez conocidas las características de las fuentes ópticas y del filtro óptico, la descripción del experimento de la Figura 5.20, es la siguiente: Las fuentes ópticas DFB_1 y DFB_2 se conectan a los respectivos PC_1 y PC_2. A su salida, cada haz de luz es modulado por su correspondiente MZ-IM_1 y MZ-IM_2. Los generadores de señales, MSG_1 y MSG_2, suministran las señales de frecuencias $f_1 = 2.37$ GHz y $f_2 = 2.50$ GHz, respectivamente, a una potencia eléctrica de 20 dBm. Estas señales se aplican a los puertos RF de los MZ-IM. Los haces ópticos modulados son acoplados en el OC 50:50, el haz resultante se inyecta al OBPF sintonizable. Una manipulación cuidadosa del tornillo micrométrico del OBPF deja pasar la longitud de onda $\lambda_1 = 1548.26$ nm o $\lambda_2 = 1550.22$ nm e inyectada a 25 km de SM-SF, ($\alpha = 0.2$ dB/km, y $D = 16.75$ ps/nm·km @ 1550 nm). Al otro extremo de la fibra, el haz de luz es aplicado al PD (Miteq, modelo: DR-125G, BW=13 GHz, $\mathcal{R} = 0.9$ A/W), su correspondiente señal eléctrica es amplificada (ZVA-183-S+, 700-18000 MHz, G=26 dB) y conectada a una antena de parche direccional para interiores (WiMo HIF-2400 WaveLAN Antenna, frecuencia central de 2.4 GHz, BW=100 MHz y G=8.5 dBi) [12] para la transmisión inalámbrica. Otra antena de características similares a la anterior recupera la señal radiada, la cual también se amplifica (ZVA-183-S+), y se conecta al ESA (Agilent Technologies N9344C) para ser registrada. La distancia entre las dos antenas es de 2 metros. La Figura 5.24 es una fotografía de la configuración experimental donde se indican los dispositivos y equipos utilizados.



Fig. 5.24. Fotografía del arreglo experimental.

La Figura 5.25 muestra las señales registradas $f_1=2.37$ GHz y $f_2=2.50$ GHz, recuperadas que corresponden a $\lambda_1=1548.26$ nm y $\lambda_2=1550.22$ nm, respectivamente.

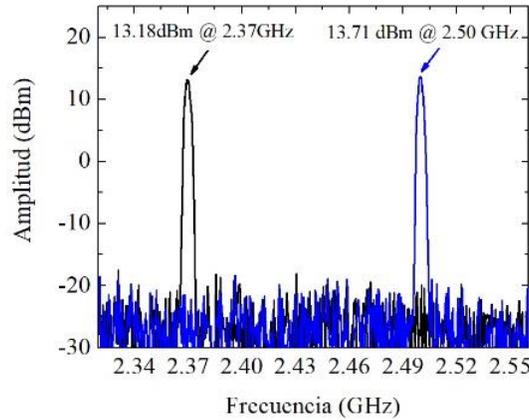


Figura 5.25. Señales registradas: $f_1=2.37$ GHz (trazo negro), y $f_2=2.50$ GHz (trazo azul).

La Tabla 5.1 resume los correspondientes valores de amplitud y SNR medidos.

Tabla 5.1. Amplitud medida y valores de SNR correspondientes a cada longitud de onda.

λ (nm)	$f_1 = 2.37$ GHz		$f_2 = 2.50$ GHz	
	Amplitud (dBm)	SNR (dB)	Amplitud (dBm)	SNR (dB)
$\lambda_1 = 1548.26$	13.18	37.45		
$\lambda_2 = 1550.22$			13.71	36.46

Conclusión: Se llevó a cabo la demostración del enrutamiento de dos señales ópticas compartiendo un mismo enlace, así como su transmisión inalámbrica. La selección de las señales se realizó por medio de un OBPF de sintonización manual. El uso del OBPF sintonizable es una alternativa para otras técnicas tradicionales de multiplexado óptico como WDM. El criterio utilizado para validar el desempeño de esta propuesta fue la medición del valor de la SNR para cada señal de microondas. En promedio, se obtuvo una SNR=37.01 dB. En lo que respecta a la transmisión inalámbrica, las señales no se vieron afectadas a ruido, interferencias, reflexiones en paredes, muebles, personas, etc. Estas señales de microondas pueden ser utilizadas como portadoras eléctricas para la transmisión de datos análogos o digitales. **Los resultados de este experimento están publicados en [13].**

5.5 Transmisión de dos señales digitales compartiendo un mismo enlace óptico

Objetivo: Realizar la transmisión de dos señales digitales compartiendo un mismo enlace óptico. Posteriormente, emular la transmisión inalámbrica de ambas señales simultáneamente mediante un esquema de acceso NOMA evaluado en MATLAB, considerando dos usuarios (U1 y U2) receptores virtuales. La Figura 5.26 muestra el montaje de comunicación electroóptico.

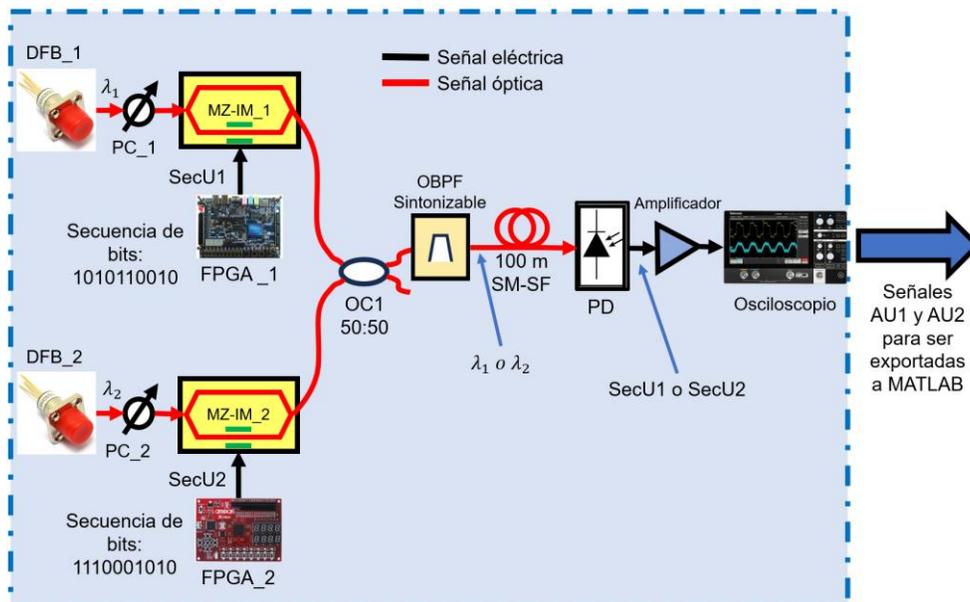


Figura 5.26. Arreglo experimental para la transmisión de dos señales digitales que comparten un mismo enlace óptico.

Descripción: Inicialmente se programan las tarjetas FPGA_1 (Altera Cyclone V CGXFC5C6, Terasic CV GX Kit), y FPGA_2 (Xilinx Spartan 6 XC6SLX9, Intesc Amiba 2), a secuencias de bits 1010110010 (SecU1) y 1110001010 (SecU2), respectivamente (BR=8 Mbps). Estas señales son visualizadas en el osciloscopio (Agilent, DSO6012A, BW=100 MHz) y almacenadas en un archivo .csv. Las Figuras 5.27 (a), y (b) las muestran gráficamente. En estas gráficas se observa el espacio de valores "0", el "1", y el "0" adicional que son colocados al inicio de cada secuencia para mantener la integridad de los datos transmitidos.

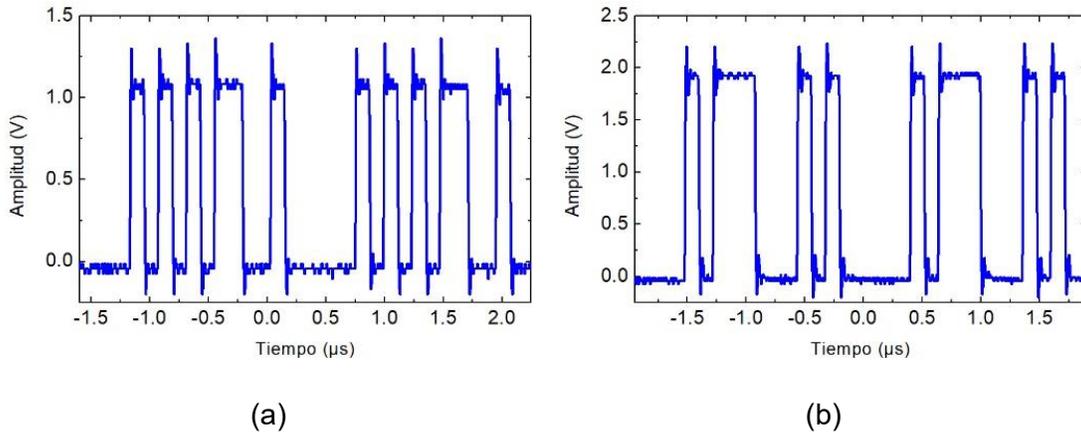


Fig.5.27. Secuencias generadas por FPGA_1 (a) y por FPGA_2 (b)

Las fuentes ópticas DFB_1 y DFB_2 se conectan a sus respectivos PC_1 y PC_2. A su salida, cada haz de luz es modulado en su correspondiente MZ-IM_1 y MZ-IM_2 con las señales de los FPGA_1 y FPGA_2, respectivamente. Los haces ópticos modulados son acoplados en el OC 50:50; y el haz resultante se inyecta al OBPF sintonizable. Manipulando el OBPF, se deja pasar ya sea $\lambda_1=1548.26$ nm o $\lambda_2=1550.22$ nm. La señal óptica seleccionada se inyecta a 100 m de SM-SF, ($\alpha=0.2$ dB/km, y $D=16.75$ ps/nm·km @ 1550 nm). Al otro extremo de la fibra, el haz de luz es detectado por el PD (Miteq, DR-125G, BW=13 GHz, $\mathcal{R}=0.9$ A/W), entregando una señal eléctrica, la cual es amplificada (ZX60-14012L-S+, BW=300 KHz-14 GHz, G=10 dBm), y visualizada en el osciloscopio. La Figura 5.28 (a) y (b) muestra las señales correspondientes para U1 y U2, respectivamente. Estos datos se almacenan en archivos .csv.

La Figura 5.29 muestra una fotografía de la configuración experimental indicando los equipos y componentes utilizados.

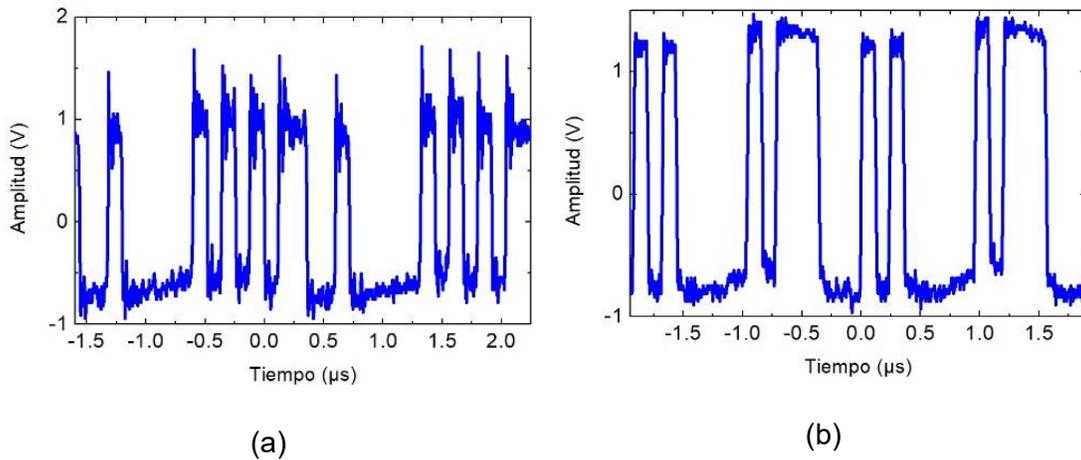


Fig.5.28. Secuencias visualizadas en el osciloscopio AU1 (a) y AU2 (b) del esquema electroóptico.



Fig. 5.29. Fotografía del arreglo experimental.

Las señales experimentales obtenidas del esquema de comunicación óptico ilustradas en la Figura 5.26 (AU1 y AU2), son procesadas en MATLAB para su normalización, depuración, corrección de BR, así como la cancelación de las repeticiones de la secuencia y del espacio inicial de estas señales. Lo anterior se ilustra en la Figura 5.30, que corresponde al recuadro punteado verde.

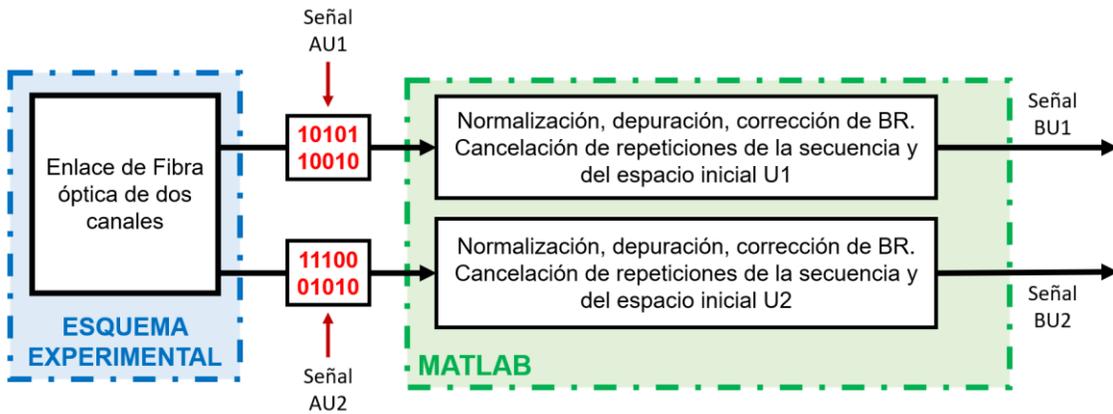


Fig. 5.30. Importación de las señales AU1 y AU2 para su procesamiento en MATLAB

El programa de MATLAB entrega las señales que se ilustran en las Figuras 5.31 (a) y (b) denominadas como BU1 y BU2, respectivamente.

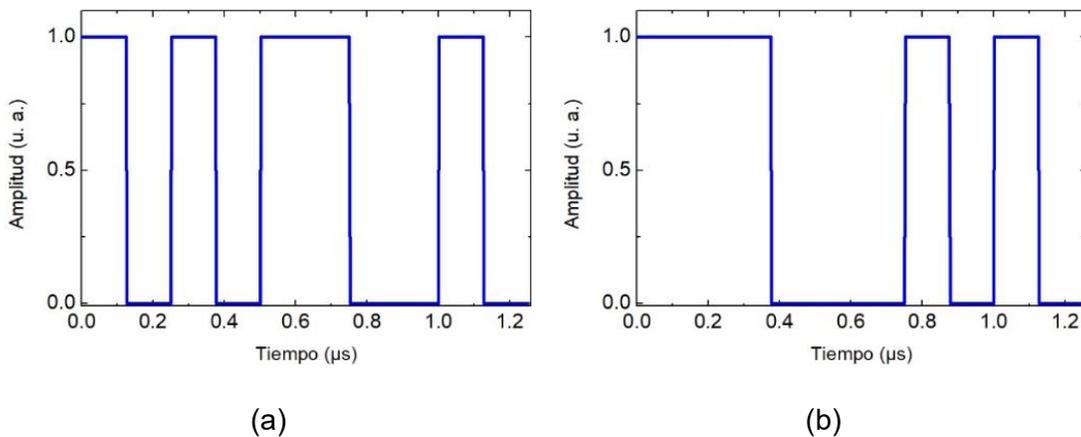


Fig. 5.31. Datos digitales depurados y normalizados BU1 (a) y BU2 (b).

El siguiente paso es introducir estas señales al esquema NOMA, cuyo detalle se ilustra en la Figura 5.32.

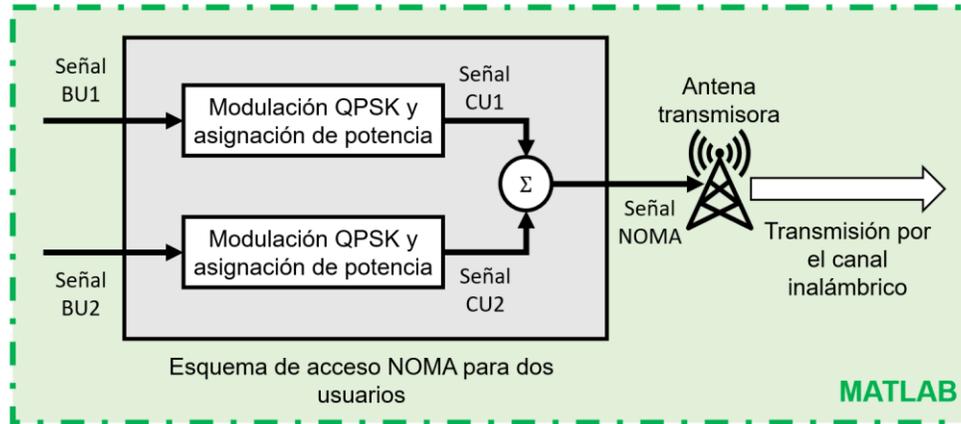


Fig. 5.32. Detalle del esquema de acceso NOMA.

El procesamiento dentro del esquema NOMA consiste en dos etapas, la primera etapa radica en modular las señales en formato QPSK y asignarles un nivel de potencia a cada una de éstas (Figura 5.33 (a) y (b)). El resultado de este proceso genera las señales CU1 y CU2, las cuales pasan a la segunda etapa que consiste en sumarlas. La suma de éstas corresponde a la señal NOMA, ilustrada en la Figura 5.34.

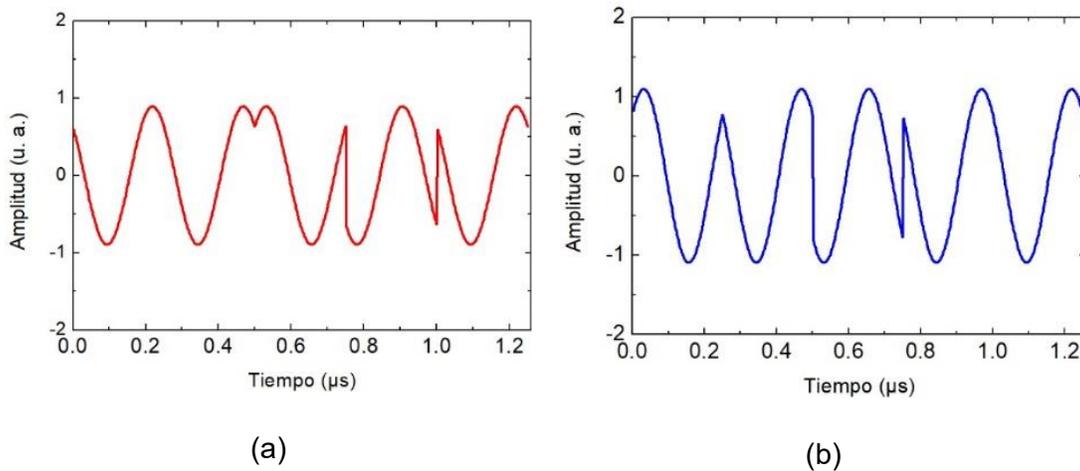


Fig. 5.33. Señales QPSK CU1 (a) y CU2 (b) como parte del esquema NOMA.

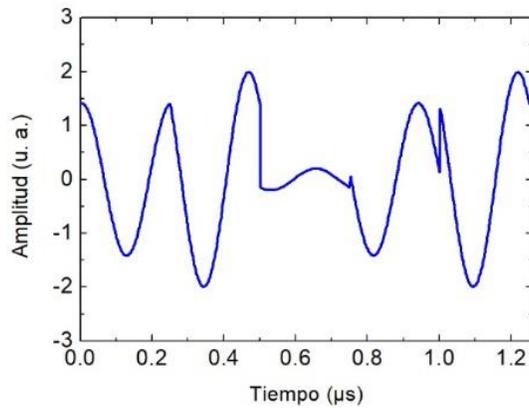


Fig. 5.34. Señal NOMA entregada a la antena transmisora.

La Figura 5.35 muestra la celda de cobertura inalámbrica que corresponde a la estación base BS0, considerando un radio de 500 m, así como las seis celdas (BS1 a BS6) que la rodean.

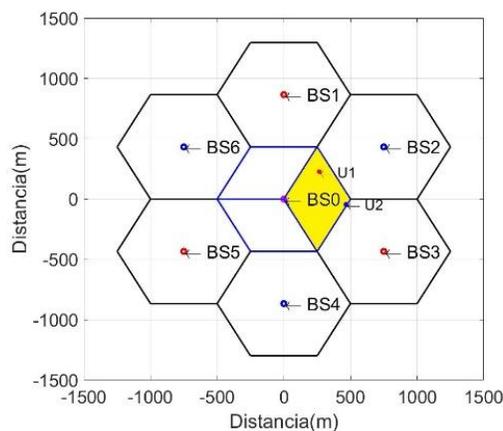


Fig. 5.35. Ilustración del área de cobertura con los dos usuarios móviles en la distribución de celdas hexagonales.

En esta Figura se muestran las posiciones de los usuarios móviles dentro del sector correspondiente. Las posiciones de los usuarios se determinan mediante la función *randi*, disponible en MATLAB. La antena virtual se encuentra ubicada en BS0, la cual radia la señal NOMA. La Figura 5.36 representa el canal inalámbrico implementado en MATLAB, considerando efectos de desvanecimientos, ruido e interferencia de manera individual para cada usuario, en función de su posición y de su distancia a BS0.

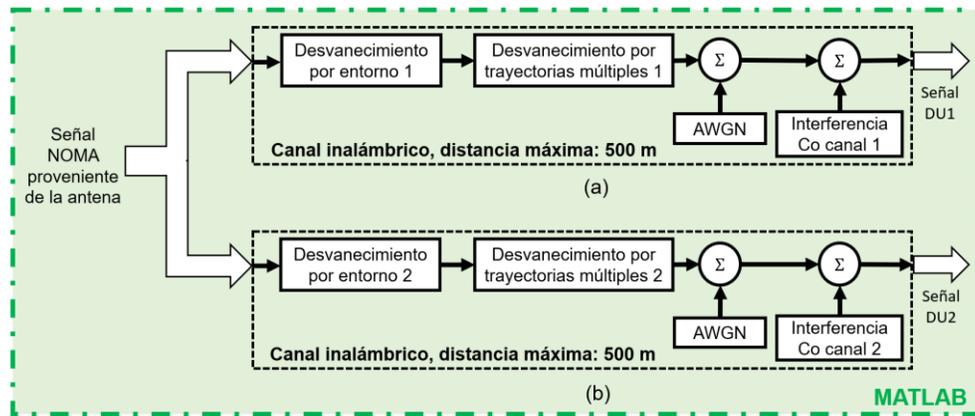


Fig. 5.36. Modelado del canal inalámbrico para U1 (a) y U2 (b)

El resultado de este proceso computacional produce las señales DU1 y DU2, las cuales se muestran en la Figura 5.37 (a) y (b), respectivamente.

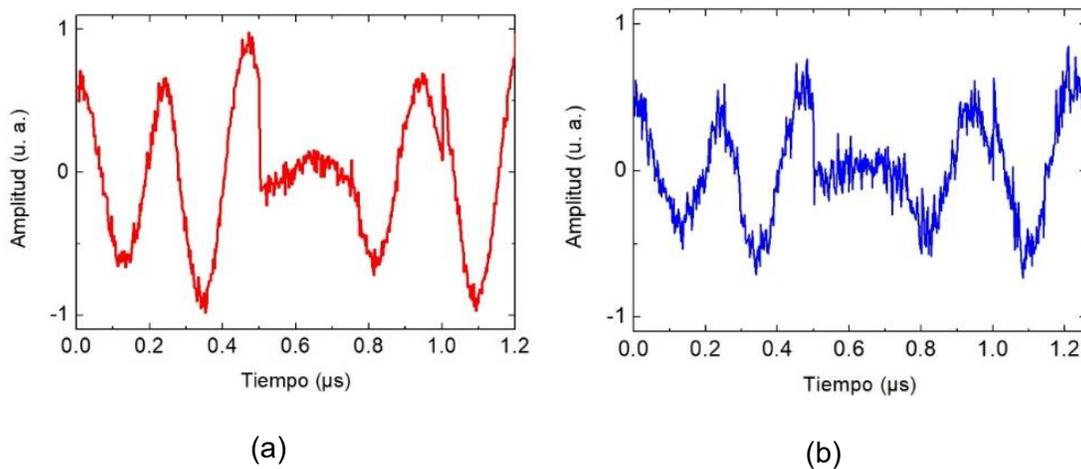


Fig. 5.37. Señales DU1 (a) y DU2, (b) captadas por los dispositivos receptores.

La Figura 5.38 emula los dispositivos virtuales que reciben la señal inalámbrica. A continuación, se describe a detalle el proceso que permite la recuperación de la información.

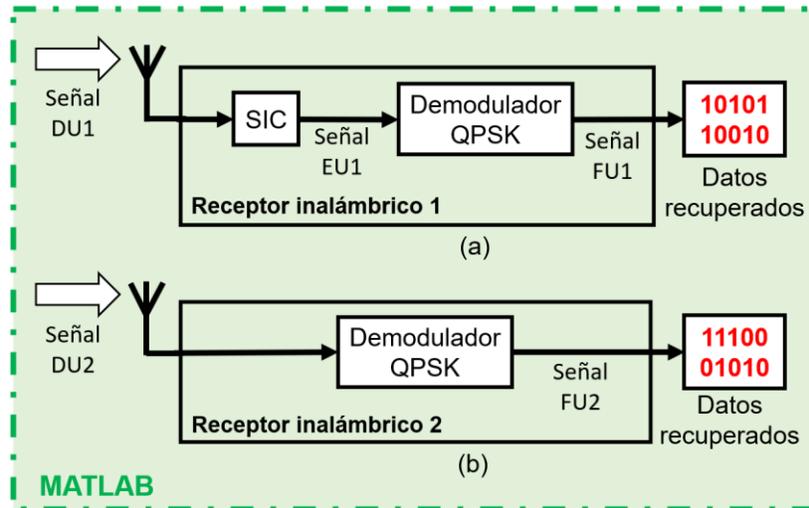


Fig. 5.38. Receptores inalámbricos de U1 (a) y U2 (b).

Dado que al receptor 1 se le asignó un valor de potencia menor, se debe realizar un proceso de SIC para recuperar la parte de señal que le corresponde, denominada EU1 (Figura 5.39). Finalmente, esta señal pasa por una etapa de demodulación, generando la señal FU1. Debido a que la asignación de potencia es mayor para el usuario U2, esta señal solamente pasa por la etapa de demodulación obteniendo la señal FU2.

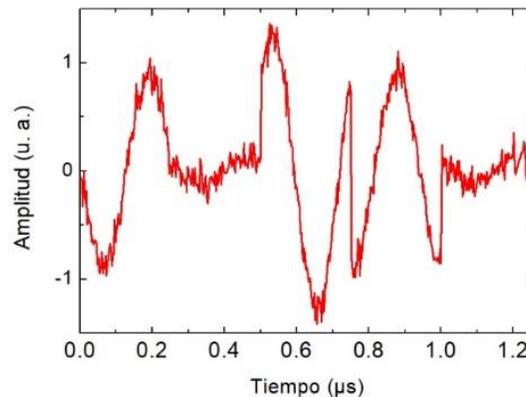


Fig. 5.39. Señal EU1, correspondiente a U1.

La Figura 5.40 corresponde a las señales ya demoduladas FU1 y FU2, que son los datos digitales generados por los FPGAs (10101100 y 1110001010). Nótese la buena similitud con la gráfica 5.31 (a) y (b), respectivamente.

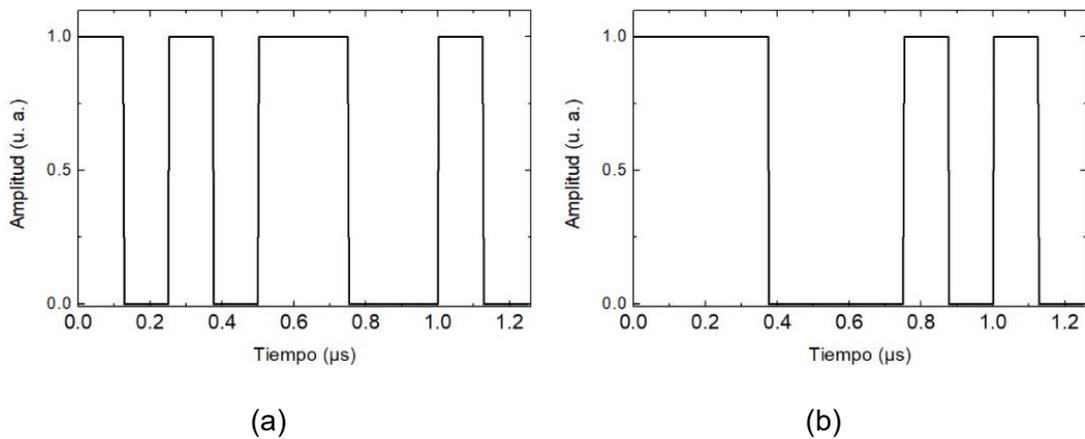


Fig. 5.40. Señales FU1 y FU2, correspondientes a los valores de bits recuperados.

Conclusión: Se llevó a cabo la transmisión y recuperación de dos señales digitales generadas por dos tarjetas de desarrollo FPGA a un BR de 8 Mbps en un esquema Fibra-Radio de dos canales. La transmisión por fibra óptica fue realizada de manera experimental y las señales digitales recuperadas fueron utilizadas para emular su transmisión inalámbrica en un esquema de acceso NOMA mediante una simulación numérica usando MATLAB. El esquema NOMA consideró factores como desvanecimientos, ruido e interferencias, y emuló a dos usuarios receptores en movimiento dentro del sector del área de cobertura correspondiente.

5.5 Sumario

Los experimentos 1, 2 y 5 demostraron la transmisión de señales digitales las cuales fueron generadas por FPGAs. El uso de los FPGA como generadores de datos permite procesar de manera rápida la información a ser transmitida; los datos binarios se convierten fácilmente a su correspondiente señal eléctrica. Ésta es una de las características más relevantes de los arreglos antes descritos. Además, cualquier cambio en los parámetros de la señal se obtiene modificando líneas de código sin necesidad de añadir hardware. En los experimentos 3 y 4, se demostró la capacidad de los enlaces Fibra-Radio para transmitir señales de microondas que pueden ser usadas como portadoras eléctricas, tanto para señales digitales como analógicas. En la etapa electro-óptica de los experimentos 4 y 5 se demostró el enrutamiento de dos señales ópticas compartiendo un mismo enlace, así como su transmisión inalámbrica. En particular, el experimento 5 aportó resultados

experimentales y por simulación numérica, los resultados experimentales se utilizaron para la simulación de un esquema NOMA.

Referencias

- [1] S. A. Al-Gailani et al., “A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks,” in IEEE Access, vol. 9, pp. 7353-7373, 2021, doi: <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048049>
- [2] A. Aliaberi, P. C. Sofotasios & S. Muhaidat, “Modulation Schemes for Visible Light Communications,” 2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), Rabat, Morocco, pp. 1-10, 2019. doi: <https://www.doi.org/10.1109/COMMNET.2019.8742376>
- [3] Ascii Text to Binary Converter (en línea). Disponible en: <https://www.binaryhexconverter.com/ascii-text-to-binary-converter>
- [4] I. Grout, “Design languages”, Digital System Design with FPGAs, Newnes, Elsevier, 2008, pp. 194-199.
- [5] J. G. Proakis, & D. G. Manolakis, Digital signal processing, Fourth Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006.
- [6] **R. Cuevas-Terrones**, B. Tshibangu-Mbuebue, E. E. Mayesfer-Azcárraga, J. Castañeda-Camacho, A. García-Juárez & I. E. Zaldívar-Huerta, “Implementation of an Indoor Free-Space Optical Communication Link Using On-Off Keying Optical Modulation, a Useful Didactic Tool for Optoelectronic Engineering Students,” 2023 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV), Boca del Río, Veracruz, Mexico, 2023, pp. 1-4, doi: <https://www.doi.org/10.1109/ICEV59168.2023.10329697>
- [7] **R. Cuevas-Terrones**, B. Tshibangu-Mbuebue, I. S. Castillo-García, J. Castañeda-Camacho & I. E. Zaldívar-Huerta, “Digital Signal Transmission Through a Short-Reach Optical Link Using an FPGA Card,” 2023 20th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico City, Mexico, 2023, pp. 1-6. doi: <https://www.doi.org/10.1109/CCE60043.2023.10332811>
- [8] G. Keiser, “Optical Fiber Communications,” 4th Edition, McGraw Hill, 2000.

- [9] L.A. González-Mondragón, L.J. Quintero-Rodríguez, A. García-Juárez, A. Vera-Marquina, & I.E. Zaldívar-Huerta, “*Multiple passband microwave photonic filter with adjustable bandwidth*,” *Optics & Laser Technol*, p. 126, 2020. doi: <http://www.doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106133>
- [10] B. Tshibangu-Mbuebue, **R. Cuevas-Terrones**, M. W. Lee, A. García-Juárez, and I. E. Zaldívar-Huerta, “*Implementation of a Multimode Optical Source in the VPIphotonics Software*,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 26 September, vol. 2024, Article ID 8819200. doi: <https://www.doi.org/10.1155/2024/8819200>
- [11] Dicon FiberOptics, Fiber Optics Solutions (en línea). Disponible en: <https://www.diconfiberoptics.com/products/scd0124/SCD-0124C.pdf>
- [12] Manualzz. Manuals and Solutions (en línea) Disponible en: <https://manualzz.com/doc/9696487/hif-2400-datasheet>
- [13] **R. Cuevas-Terrones**, I. S. Castillo-García, B. Tshibangu-Mbuebue, J. Castañeda-Camacho, A. García-Juárez, & I. E. Zaldívar-Huerta, “*Experimental Demonstration of Channel Routing of Microwave Signals Sharing an Optical Link by Using a Tunable Optical Band-Pass Filter*,” *Engineering Journal*, vol. 28, no. 9, pp. 25-32, 2024. doi: <https://www.doi.org/10.4186/ej.2024.28.9.25>

CAPÍTULO 6: CONCLUSIÓN GENERAL

Los sistemas Fibra-Radio, así como los esquemas de acceso para transmisiones inalámbricas, en especial NOMA, se presentan como excelentes alternativas tecnológicas para las redes de telecomunicaciones actuales y a futuro. Se investigó el estado del arte acerca de estas tecnologías; la investigación no encontró un trabajo en el que se implemente NOMA en un enlace Fibra-Radio.

Para evaluar el comportamiento de los sistemas Fibra-Radio, se llevaron a cabo tres simulaciones computacionales para la transmisión de señales digitales. La primera se realizó para un canal de transmisión, simulando la parte electro-óptica utilizando el software VPIPhotonics, mientras que, la parte inalámbrica se evaluó en MATLAB donde se representó a un usuario receptor desplazándose dentro de un sector del área de cobertura de la antena virtual transmisora. Las dos siguientes simulaciones se llevaron en el software Optisystem, considerando dos fuentes de información digitales compartiendo un mismo enlace óptico WDM y enrutamiento mediante el uso de un OBPF. A su vez, cada uno utilizó el esquema de acceso NOMA evaluado en MATLAB para la etapa inalámbrica. En éste, se consideró a dos receptores móviles dentro de un sector del área de cobertura de la antena virtual transmisora. El desempeño de las etapas inalámbricas se evaluó mediante pruebas estadísticas, considerando cuatro factores de afectación como son el desvanecimiento por entorno y por múltiples trayectorias, ruido AWGN, e interferencia.

Se realizaron cinco experimentos en el Laboratorio de Comunicaciones Ópticas del INAOE. En el primero, se implementó un sistema de comunicación FSO a modulación directa para la transmisión de datos digitales generados por un FPGA. En el segundo, se utilizó nuevamente un FPGA para la generación de los datos a transmitir en un sistema de comunicación óptico a modulación externa. Con pruebas estadísticas se demostró la funcionalidad de estos sistemas. En el tercer experimento se emuló un sistema Fibra-Radio que opera en las bandas S y C de radio frecuencia. Para esto, se usó un esquema electroóptico a modulación externa que bajo ciertas condiciones actúa como un filtro pasabandas cuyas frecuencias centrales se determinaron por los parámetros de la fuente láser y la fibra óptica. La

transmisión de señales se realizó usando las ventanas de paso de banda para posteriormente ser radiadas y recuperadas por medio de antenas omnidireccionales. Esta implementación se validó midiendo la SNR de las señales recuperadas. El cuarto experimento demostró el enrutamiento de dos señales de microondas compartiendo un mismo enlace óptico mediante el OBPF, llevando a cabo su posterior transmisión inalámbrica. También, se validaron los resultados midiendo la SNR de las señales recuperadas. En el quinto experimento se llevó a cabo la transmisión por un enlace óptico de dos señales digitales generadas por FPGAs, siendo seleccionadas por el OBPF y guardando sus datos con un osciloscopio, para posteriormente emular su transmisión inalámbrica mediante el esquema NOMA evaluado en MATLAB. Los datos digitales fueron íntegramente recuperados, con lo que se validó el desempeño de este sistema. Los experimentos en los que se utilizaron FPGAs como generadores de datos mostraron la conveniencia de utilizar estos dispositivos, dado que es posible convertir valores binarios a una señal eléctrica digital de manera sencilla, y cualquier eventual cambio se logra modificando líneas de código sin alterar el hardware.

Con este trabajo se dispone de una muy buena alternativa para atender un número cada vez mayor de usuarios de los sistemas de telecomunicaciones. Un esquema de acceso inalámbrico multiusuario NOMA integrado en un sistema híbrido Fibras-Radio permite combinar las ventajas de ambos sistemas. El principal aporte de este trabajo es establecer una potencial técnica para poder multiplicar el número de usuarios que soporta un sistema de comunicaciones.

APÉNDICE A: Tratamiento de las señales digitales en MATLAB

En este apéndice se muestra el código de MATLAB en el que se deben colocar los valores importados de las señales digitales entregadas por los respectivos sistemas electroópticos descritos en las secciones 4 y 5. Con este código, las señales reciben el tratamiento correspondiente a la depuración, normalización y corrección de BR, así como la cancelación de los bits de inicio y de las repeticiones de secuencia.

```
close all; clear all; clc;
RES=50; % Resolución de las gráficas para ilustrar las señales digitales
% Recuperación de valores de bit de Usuario 1
% Fotodetector APD
% En los siguientes espacios, insertar el vector de valores de tiempo en "time1" e insertar el vector de valores
% de amplitud en "Fib1" importados del osciloscopio
time1=[];
Fib1=[];
figure
plot(time1,Fib1,'linewidth',2), grid on;
title('Señal entregada por el detector óptico','FontSize',16);
xlabel('Tiempo(s)');
ylabel('Amplitud (V)','FontSize',16);
time1=1:length(time1);
time1(---:end)=[]; % Localizar e insertar en --- el valor en el que finaliza la secuencia de bits y
% comienza la repetición en tiempo (eje horizontal)
Fib1(---:end)=[]; % Localizar e insertar en --- el valor en el que finaliza la secuencia de bits y
% comienza la repetición en amplitud (eje vertical)
time1(1:---)=[]; % Localizar e insertar en --- el valor en el que finalizan los espacios '0' y el bit
% adicional de inicio, y comienza la secuencia de bits en tiempo (eje horizontal)
Fib1(1:---)=[]; % Localizar e insertar en --- el valor en el que finalizan los espacios '0' y el bit
% adicional de inicio, y comienza la secuencia de bits en amplitud (eje vertical)
figure
plot(time1,Fib1,'linewidth',2), grid on;
title('Cancelación de las repeticiones de secuencia','FontSize',16);
ylabel('Amplitud (V)','FontSize',16);
DataU1=[];
for i=1:1:length(time1)
    if Fib1(i)>0
        DataU1(i)=1;
    elseif Fib1(i)<0
        DataU1(i)=0;
    end
end
figure%('position',[sizefig(1) sizefig(2) sizefig(3) sizefig(4)]);
plot(time1,DataU1,'linewidth',2), grid on;
title('Señal depurada y normalizada','FontSize',15);
ylabel('Amplitud (u. a.)');
ylim([-0.2 1.2]);
A = findchangepts(DataU1);
A = cumsum(DataU1);
time1(1:A)=[];
DataU1(1:A)=[];
time1=1:length(time1);
figure%('position',[sizefig(1) sizefig(2) sizefig(3) sizefig(4)]);
plot(time1,DataU1,'linewidth',2), grid on;
title('Eliminación del espacio inicial','FontSize',15);
ylabel('Amplitud (u. a.)');
ylim([-0.2 1.2]);
NumBit=12;
Tbit=(length(DataU1)/Numbit);
nbits=length(time1)/Tbit;
nbits=fix(nbits);
data=[];
datarecup=[];
b_ini=1;
for h=1:nbits-1
    datarecup=mean(DataU1(((h)*Tbit):((h+1)*Tbit)));
    data=[data datarecup];
end
%Initiations
N = length(data);
b = [];
%Creating input waveform on Bit Sequence
for i = 1 : N
```

```

        bx = data(i) * ones(1, RES);
        b = [b bx];
    end
    figure
    plot(b,'linewidth',2);%,'linewidth',1.5);
    grid on;
    axis([0 (N*RES) -0.2 1.2]);
    ylabel('Amplitude (a. u.)');
    title('Corrección de BR','FontSize',15);
    for o=1:1:length(data)
        if data(o)>(max(data)/2)
            data(o)=1;
        elseif data(o)<(max(data)/2)
            data(o)=0;
        end
    end
    end
    data(1)=[]
    % Valores de bit de Usuario 1
    %Initiations
    N = length(data);
    b = [];
    %Creating input waveform on Bit Sequence
    for i = 1 : N
        bx = data(i) * ones(1, RES);
        b = [b bx];
    end
    figure
    plot(b,'linewidth',2);%,'linewidth',1.5);
    grid on;
    axis([0 (N*RES) -0.2 1.2]);
    ylabel('Amplitude (a. u.)','FontSize',16);
    title('Normalización y cancelación de bit de inicio','FontSize',16);
    RES=50;
    % Valores de bit de Usuario 1
    BRDig=8e6;
    DurBit=1/BRDig;
    ResBit=DurBit/RES;
    %Vector1Bit=ResBit:ResBit:DurBit;
    Vectorb=ResBit:ResBit:DurBit*length(data);
    %Initiations
    N = length(data);
    b = [];
    %Creating input waveform on Bit Sequence
    for i = 1 : N
        bx = data(i) * ones(1, RES);
        b = [b bx];
    end
    end
    figure
    plot(Vectorb, b, 'linewidth',3);
    grid on;
    xlabel('Tiempo(s)');%,'FontSize',30);
    ylabel('Amplitud (u. a.)');%,'FontSize',30);
    title('Bits recuperados','FontSize',16);
    ylim([-0.2 1.2]);

```

APÉNDICE B: Producción académica

Artículos de revista:

1. **R. Cuevas-Terrones**, J. Castañeda-Camacho, G. A. Muñoz-Hernández, & I. E. Zaldívar-Huerta, “*Evaluation of the Digital Data Performance Transmission on a Fiber-Radio System*,” *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 2: 378. doi: <https://www.doi.org/10.3390/electronics12020378>

Citado por:

Grace Bunmi Akintola, Polra Victor Falade, “Evaluating the Performances of Digital Data Transmission Links on a Client Server Network Model”, *International Journal of Scientific Research in Computer Science and Engineering* Vol.12, Issue.2, pp.53-66, April 2024, E-ISSN: 2320 7639, www.isroset.org

2. **R. Cuevas-Terrones**, I. S. Castillo-García, B. Tshibangu-Mbuebue, J. Castañeda-Camacho, A. García-Juárez, & I. E. Zaldívar-Huerta, “*Experimental Demonstration of Channel Routing of Microwave Signals Sharing an Optical Link by Using a Tunable Optical Band-Pass Filter*,” *Engineering Journal*, vol. 28, no. 9, pp. 25-32, 2024. doi: <https://www.doi.org/10.4186/ej.2024.28.9.25>

Artículos de conferencia:

1. **R. Cuevas-Terrones**, B. Tshibangu-Mbuebue, E. E. Mayesfer-Azcárraga, J. Castañeda-Camacho, A. García-Juárez & I. E. Zaldívar-Huerta, “*Implementation of an Indoor Free-Space Optical Communication Link Using On-Off Keying Optical Modulation, a Useful Didactic Tool for Optoelectronic Engineering Students*,” 2023 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV), Boca del Río, Veracruz, Mexico, 2023, pp. 1-4, doi: <https://www.doi.org/10.1109/ICEV59168.2023.10329697>

Citado por:

Nada Adnan Kadhim Al-Tememy, Faris Mohammed Ali Al-Jaifari; *Modulation techniques in DWDM systems: A comprehensive review of current challenges and future directions*. AIP Conf. Proc. 11 October 2024; 3232 (1): 020019. <https://www.doi.org/10.1063/5.0236224>

2. **R. Cuevas-Terrones**, B. Tshibangu-Mbuebue, I. S. Castillo-García, J. Castañeda-Camacho & I. E. Zaldívar-Huerta, “*Digital Signal Transmission Through a Short-Reach Optical Link Using an FPGA Card*,” 2023 20th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico City, Mexico, 2023, pp. 1-6. doi: <https://www.doi.org/10.1109/CCE60043.2023.10332811>

Article

Evaluation of the Digital Data Performance Transmission on a Fiber-Radio System

Rodrigo Cuevas-Terrones ¹, Josefina Castañeda-Camacho ², Germán Ardul Muñoz-Hernández ² 
and Ignacio Enrique Zaldívar-Huerta ^{1,*} 

¹ Departamento de Electrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Calle Luis Enrique Erro No.1, Tonantzintla, Puebla 72840, Mexico

² Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Avenida San Claudio y 18 Sur, Colonia San Manuel, Puebla 72570, Mexico

* Correspondence: zaldivar@inaoep.mx

Abstract: This work shows a set of numerical simulations to evaluate the digital data performance transmission for a fiber-radio system. For this goal, VPI Photonics software is used to simulate the transmission of a digital signal at a bit rate of 2.4 GHz through an optical link of 25 km of single-mode standard fiber (SM-SF). Whereas MATLAB software is utilized to emulate a wireless channel considering four main phenomena inherent to this channel, such as multipath and slow fading, co-channel interference, and additive white Gaussian noise (AWGN). The modeling carried out in MATLAB considers a user in movement within its coverage area cell. The constellation diagram, bit error rate (BER), and signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) statistical tests are used to evaluate the performance of this approach. This proposal finds potential applications in the field of cellular telephony, the Internet of Things (IoT), or any other communication system to evaluate the quality of the delivered signal to a user in motion within a particular coverage cell.

Keywords: fiber-radio system; wireless transmission; numerical simulations; digital signal



Citation: Cuevas-Terrones, R.; Castañeda-Camacho, J.; Muñoz-Hernández, G.A.; Zaldívar-Huerta, I.E. Evaluation of the Digital Data Performance Transmission on a Fiber-Radio System. *Electronics* **2023**, *12*, 378. <https://doi.org/10.3390/electronics12020378>

Received: 6 November 2022

Revised: 23 December 2022

Accepted: 9 January 2023

Published: 11 January 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Advances in communication technologies have revolutionized the distribution and transmission of several services such as radio, HDTV, telephony, and the Internet, in an ever faster and more efficient way. Furthermore, a combination of technologies such as optical and wireless allows users to exploit the inherent advantages of each one of these technologies. In particular, fiber-radio technology uses optical fiber to transport signals to be radiated to multiple users using antennas [1]. On the one hand, the large bandwidth, immunity to electromagnetic interference (EMI), and low attenuation of the optical fiber are used in an advantageous manner [2]. On the other hand, the wireless transmission provides absolute mobility to users without the need for a connection terminal [3]. Figure 1 shows a basic fiber-radio scheme where the data are transmitted from a central site (CS) through an optical link to the remote radio unit (RRU). The wireless medium (atmosphere) is mainly affected by fading channels, AWGN [4], and co-channel interference [5], among other impairments.

Several applications of fiber-radio schemes are reported in the literature. For instance, in [6], an all-optical link with double spectral-efficient transmission and compensation of chromatic dispersion-induced power fading is proposed and demonstrated experimentally. In [7], a system for the transmission of energy through an optical fiber is proposed. In [8], the functionality of a fiber-radio scheme with different simultaneous transmission frequencies using a digital multiplexer for the selection of frequencies and channels is demonstrated. In [9], a fiber-radio scheme is characterized where a microwave signal provided by a receiving antenna is supplied to an optical modulator. In [10], a hybrid scheme with a fiber-to-the-home (FTTH) system combined with a mobile wireless application system using

a double optical modulator and two different signals (in RF and baseband) is proposed. Finally, in [11], a fiber-radio scheme is used for the transmission of an analog TV signal through an optical link using a radiating cable for its wireless emission.

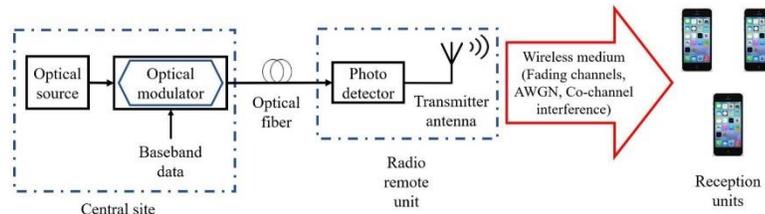


Figure 1. Basic fiber-radio scheme.

From the paragraphs above, the goal of this work is to evaluate the digital data performance transmission for a fiber-radio system. This evaluation is supported by a set of numerical simulations. For this task, the VPI Photonics software [12] takes the following into account: 1. a transmission of a digital signal at a bit rate of 2.4 GHz through an optical link of 25 km of SM-SF; 2. an optical external modulation scheme, and; 3. a dispersive channel. Whereas MATLAB software is utilized to emulate a wireless environment taking into account: 1. an urban scenario; 2. a user in movement displacing within a coverage cell of 500 m radius that corresponds to the maximum distance from the wireless receiver to the base station (BS), and; 3. a QPSK strategy format as well as four effects such as multipath and slow fading, co-channel interference, and AWGN. The performance evaluation of this proposal is evaluated taking account of the parameters of SINR and BER statistical tests. In summary, the main novelty of this work lies in the evaluation of fiber-radio systems at simulation level, finding potential applications in cellular telephony, the IoT, or any other mobile system. The rest of this document is organized as follows: Section 2 describes in detail the main concepts for the optical and wireless transmission arrangements; Section 3 shows the results of the numerical simulations carried out for the optical and wireless schemes; and finally, Section 4 summarizes the main conclusions of this work.

2. Optical and Wireless Transmission Schemes

Figure 2 depicts the block diagram of the fiber-radio scheme proposed in this work. The blue dotted box corresponds to the electro-optic arrangement simulated by the use of the VPI Photonics software. The simulation conditions are a sequence of bits at a BR of 2.4 GHz (sequence used commercially according to the optical communication standards), a distributed feedback (DFB) laser as an optical source emitting at 1550 nm (wavelength used in standard optical communication systems) at an optical power of 2 dBm, a Mach-Zehnder intensity modulator (MZ-IM), 25 km (length commonly used in an urban optical transmission link) of SM-SF whose chromatic dispersion parameter (D) at 1550 nm is 16.75 ps/nm·km. A photodetector (PD) recovers the modulated optical signal delivering an electrical signal (transmitted bits). From the library of this software, the Laser_vtms, ModulatorMZ_vtms, FiberNLS_vtm, and Photodiode_vtms modules are selected to simulate the DFB (linewidth of 10 MHz), the MZ-IM, the SM-SF (attenuation of 0.2 dB/km, chromatic dispersion parameter of 16.75 ps/nm·km), and the PD acting as an APD (avalanche photodiode with a responsivity of 0.9 A/W), respectively. The modules PRBS_vtms_1 and Coder_NRZ_vtms1 are used to generate the electrical sequence to be sent. Whereas the SignalAnalyzer modules are used as optical and electrical analyzers to monitor the corresponding signals step by step. Figure 3 shows the diagram corresponding to the electro-optic arrangement simulated in the VPI photonics software. The interface of this software allows the visualization of the results in a graphical manner and export to a file with a .txt extension.

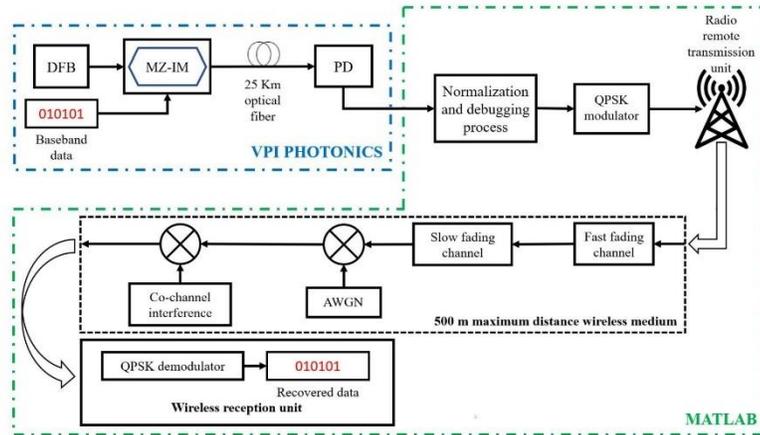


Figure 2. Block diagram of the optical and wireless transmission stages.

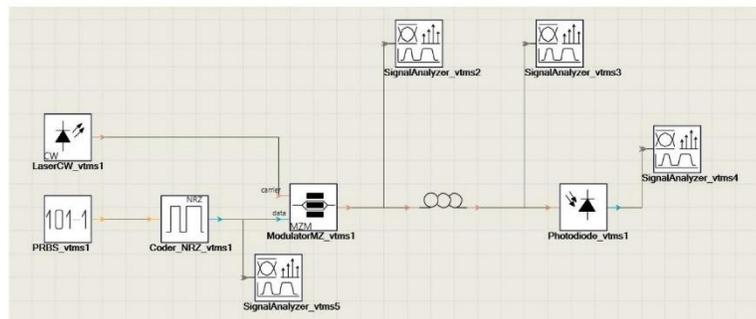


Figure 3. The layout diagram corresponding to the electro-optic arrangement in the VPI photonics software.

The green dotted box in Figure 2 corresponds to the block implemented in MATLAB. This block is fed with the data previously obtained from the electro-optical system. Initially, a normalization and debugging process for these data is carried out and subsequently modulated in QPSK format with a 5 GHz carrier signal to satisfy the Nyquist theorem. This format is chosen due to its robustness and because it is currently used in 4.5G and 5G technologies. The resulting modulated signal emulates the signal radiated from the antenna to the environment. Knowing that any propagated electromagnetic signal is subjected to several inherent phenomena typical of this environment, this work considers four main phenomena such as multipath and slow fading, co-channel interference [5], and AWGN [4]. The black dotted box emulates the environment through which the radiated signal travels and where the effects previously mentioned are included. The maximum distance considered between the antenna and the receiver is 500 m. Finally, the resulting electrical signal is demodulated to recover the original data digital signal and displayed graphically.

In wireless networks, the coverage area for a mobile user consists of a hexagonal distribution because it provides an equidistant array of antennas, is symmetrical, and supplies full coverage. In this work, a particular case is analyzed involving a wireless

receiver U1 situated within one of the three sectors in the central base station (BS0) cell as is depicted in Figure 4.

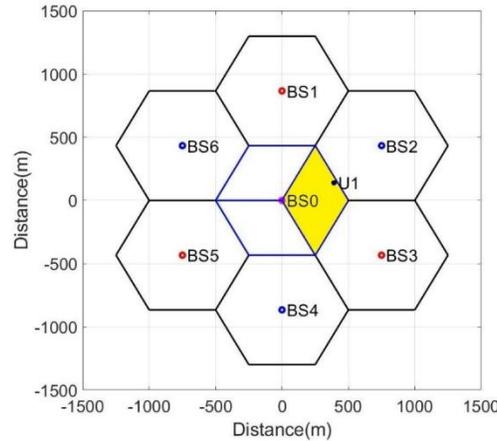


Figure 4. Layout of the coverage area of a mobile user in a hexagonal cell distribution.

An discrete-event Monte Carlo simulation is carried out to evaluate the performance of the U1 user inside the coverage area. The central cell is surrounded by the nearest co-channel interfering bases (BS1 to BS6) [5]. Mathematically, the modulated signal is treated as follows [13,14]

$$Prx = \frac{yh\ell}{d^\mu} = \frac{y h(10^{\frac{\zeta}{10}})}{d^\mu} \tag{1}$$

where

Prx is the received power for U1.

y is the total signal emitted by BS0.

d is the distance between BS0 and U1 (the user position is uniformly distributed inside the coverage area).

μ is the propagation loss exponent with values between 2.5 and 6, or even higher, depending on the type of environment. As an urban environment is being considered, then $\mu = 4$ [15].

h is a Rayleigh random variable whose models caused fading by multiple signal paths (fast fading) with standard deviation Δ [4].

ℓ is a log-normal random variable ($10^{\frac{\zeta}{10}}$) that represents shadowing losses (slow fading). It is defined as a function of the Gaussian random variable ζ , with mean 0 and standard deviation σ [13,14].

The performance of the forward link of the RF system is evaluated in terms of the SINR [13,14]

$$SINR = \frac{Prx}{z_i + CCI} \tag{2}$$

where z_i is defined as the AWGN signal [4] with a standard deviation σ , and CCI is the additive co-channel interference signal [5]. Thus, CCI is modeled as

$$CCI = \sum_{j=1}^6 Prx_j = \sum_{j=1}^6 \frac{y_j h_j \ell_j}{d_j^\mu} = \sum_{j=1}^6 \frac{y_j h_j (10^{\frac{\zeta_j}{10}})}{d_j^\mu} \tag{3}$$

where $j = 1, \dots, 6$ is the number of each neighbor base station.

Thus, the total signal x received by U1 is given by [4,5]

$$x = Prx + (z_i) + CCI \quad (4)$$

The $SINR$, expressed in decibels, is given by [13,14]

$$SINR [dB] = 10\log(SINR) \quad (5)$$

The parameters considered for the performance evaluation in terms of the $SINR$ using the Monte Carlo simulation are listed in Table 1.

Table 1. Simulation parameters considered for an urban zone [13–15].

Simulation Parameters	
μ factor	4 (adimensional value)
Slow fading ζ mean	0 dB
Slow fading σ	8 dB
Fast fading mean	0 dB
Fast fading Δ	8 dB

3. Simulation Results

This section is subdivided into two sections; initially, the results corresponding to the optical transmission using the VPI Photonics software, and subsequently, the wireless transmission results obtained using MATLAB.

3.1. Optical Transmission Results

These results correspond to the electro-optic arrangement of Figure 3. Figure 5a shows an example of a proposed sequence to validate our proposal (010110111001010101). This digital waveform is generated and visualized on the virtual generator and oscilloscope of the VPI Photonics software interface, respectively. To avoid bit losses, a space of three “0” values and a start value of “1” bit are added at the beginning of the sequence to maintain its integrity. This signal is optically modulated by the MZ-IM and transmitted through the optical fiber. Finally, the PD delivers the corresponding electrical signal shown in Figure 5b where the presence of some spurious peaks attributed to the high frequency at which the system operates is observable. The procedure to cancel these peaks is discussed in Section 3.2.

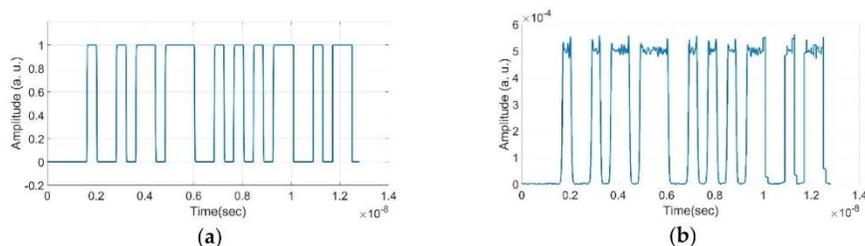


Figure 5. (a) The waveform of the transmitted bits. (b) Electrical data delivered by the photodetector.

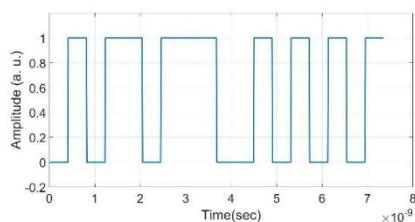
Table 2 tabulates the width values of the pulses sent and recovered to quantify the widening that occurs as a consequence of the influence of the chromatic dispersion exhibited by the SM-SF. As was previously mentioned, these data are exported in a file with a .txt extension.

Table 2. Width of pulses sent and recovered.

No. of Pulse	Sent (Seconds)	Recovered (Seconds)	Widening (Seconds)
1	0.320×10^{-9}	0.390×10^{-9}	0.07×10^{-9}
2	0.310×10^{-9}	0.380×10^{-9}	0.07×10^{-9}
3	0.730×10^{-9}	0.800×10^{-9}	0.07×10^{-9}
4	1.14×10^{-9}	1.190×10^{-9}	0.05×10^{-9}
5	0.330×10^{-9}	0.390×10^{-9}	0.06×10^{-9}
6	0.320×10^{-9}	0.400×10^{-9}	0.08×10^{-9}
7	0.330×10^{-9}	0.390×10^{-9}	0.06×10^{-9}
8	0.790×10^{-9}	0.780×10^{-9}	0.01×10^{-9}
9	0.400×10^{-9}	0.400×10^{-9}	0.00×10^{-9}
10	1.13×10^{-9}	0.800×10^{-9}	0.33×10^{-9}

3.2. Wireless Transmission Results

The saved data of the optical transmission stage are used to validate the wireless transmission. This data undergoes a debugging and normalization process to remove spurious peaks; in this process, the first three “0” bits and the “1” bit are removed. To eliminate the spurious peaks, the signal is subjected to a zero-crossing function, in which the mean value of the received signal is taken as the threshold normalizing the signal. Before modulation and transmission, a BR correction is also carried out, and this result is shown in Figure 6.

**Figure 6.** Digital data after the debugging and normalization process.

This sequence of bits is modulated in QPSK format with a 5 GHz carrier signal. The modulated signal is shown in Figure 7a, whereas Figure 7b corresponds to the recovered transmitted signal affected by fast and slow fading, AWGN, propagation losses, and co-channel interference.

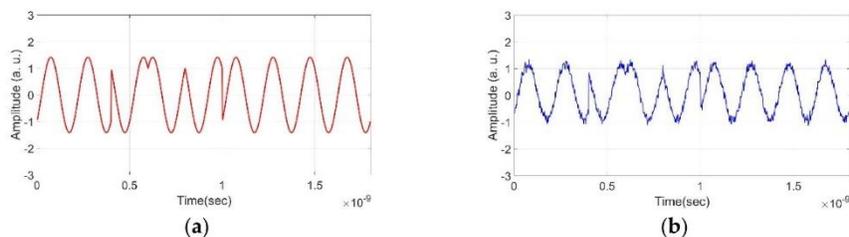
**Figure 7.** (a) Transmitted QPSK signal. (b) Recovered QPSK signal.

Figure 8a,b show the constellation diagrams corresponding to the transmitted and received signal, respectively.

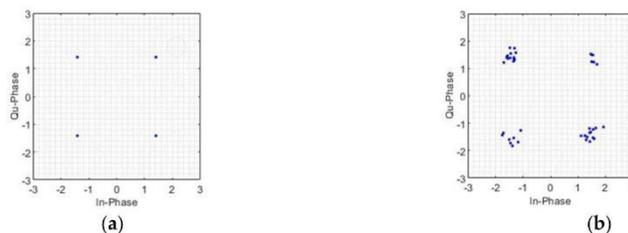


Figure 8. Constellation diagrams. (a) Transmitted QPSK signal. (b) Received QPSK signal.

Figure 9 corresponds to the demodulated QPSK signal. Note the similitude of this graph with the results shown in Figure 5a.

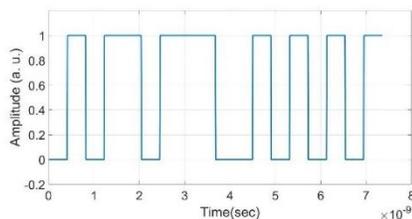


Figure 9. Demodulated signal.

Because noise, co-channel interference, and fading impairments are factors that cause loss of information, their levels must be considered to evaluate adequate wireless reception. For this reason, statistical tests are carried out to verify the performance of the wireless stage. The distance from U1 to BS0 varies within a range from 1 to 500 m within the corresponding sector and its position determines the affectation of the co-channel interference. The noise, interference, and fading levels are modeled as a function of the standard deviation values of the random variables that determine them. This way of modeling allows different noise levels to be proposed, which is the factor with the greatest possible variation [13,14]. Considering that co-channel interference and attenuation are modeled by random variables, and assuming that the U1 user is moving within its corresponding sector, the result of the simulation is averaged in terms of SINR and BER for different noise levels. To establish the appropriate confidence interval of the wireless simulation to obtain reliable statistical data, 1000, 10,000, 30,000, 60,000, and 100,000 repetitions are performed. Therefore, the observation was made that within the interval of 60,000 to 100,000 times, the difference between the results is negligible. Thus, 60,000 repetitions is established as the confidence interval.

Figure 10 illustrates graphically how the noise level influences the BER percentage within the procedure carried out. One can observe that from an AWGN standard deviation of 1×10^{-11} practically all the information is recovered; this means that the system is functional with noise levels equal to or less than this value. Figure 11 shows the SINR (dB) resulting from the same AWGN standard deviation levels. At the measure that the AWGN parameter is decreased, the SINR parameter is increased. Finally, in Figure 12 we observe that the highest values of SINR cause lower values of BER.

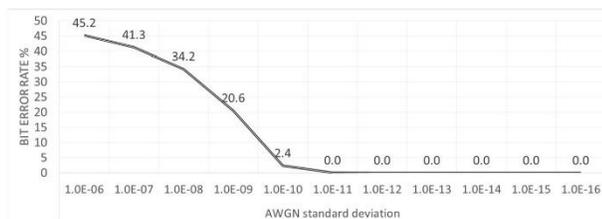


Figure 10. BER percentage vs. AWGN standard deviation.

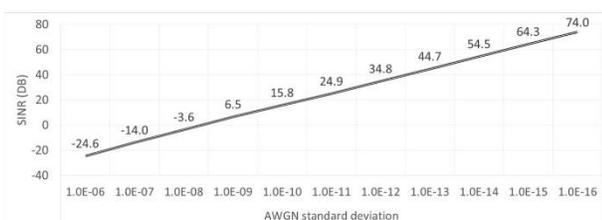


Figure 11. SINR (dB) vs. AWGN standard deviation.

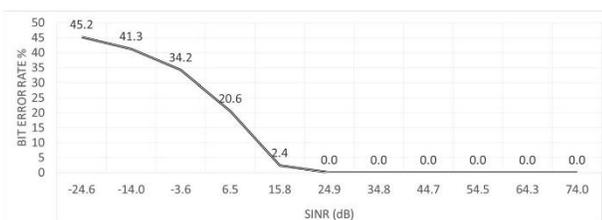


Figure 12. BER percentage and SINR (dB) relationship.

4. Conclusions

Using a set of numerical simulations, the digital data performance transmission for a fiber-radio system was successfully evaluated. All the parameters considered in the numerical simulations correspond to standard values used in optical and wireless commercial systems. VPI Photonics software was used to simulate the transmission of a digital signal at a bit rate of 2.4 GHz through an optical link of 25 km of SM-SF. At this point, it is very important to remark that the effect of the chromatic dispersion was not a significant influence on the transmission through the optical fiber. MATLAB software was utilized to emulate a wireless channel considering four main phenomena inherent to this channel, such as multipath and slow fading, co-channel interference, and AWGN. Moreover, this modeling considered a user in movement within its coverage area cell. The constellation diagram and BER and SINR statistical tests were used to evaluate the performance of this approach. Results demonstrated good robustness of the system, which remains functional even in the presence of noise. In addition, all possible positions of the reference user inside the coverage area were considered. The chosen QPSK format provided good robustness for the wireless transmission. In summary, this numerical simulation finds potential applications in the evaluation of fiber-radio systems, in particular, cellular telephony, the IoT, or any other mobile system.

Author Contributions: Conceptualization, investigation, methodology and writing - original draft, R.C.-T., J.C.-C. and I.E.Z.-H.; resources, writing-review & editing, R.C.-T., J.C.-C., I.E.Z.-H. and G.A.M.-H.; formal analysis, J.C.-C., I.E.Z.-H. and G.A.M.-H.; supervision, J.C.-C. and I.E.Z.-H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: One of the authors, R. Cuevas-Terrones would like to thank the CONACyT for the student scholarship number 679055.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Hadi, M.U.; Jung, H.; Ghaffar, S.; Traverso, P.A.; Tartarini, G. Optimized digital radio over fiber system for medium range communication. *Opt. Commun.* **2019**, *443*, 177–185. [CrossRef]
2. Keiser, G.E. *Optical Fiber Communications*, 4th ed.; McGraw Hill: New York, NY, USA, 2000.
3. Advantages of Wireless Communications. Available online: <https://www.ecstuff4u.com/2017/11/advantages-of-wireless-communication.html> (accessed on 3 November 2022).
4. Zhou, Y.; Wong, V.W.S.; Schober, R. Performance Analysis of Cooperative NOMA with Dynamic Decode-and-Forward Relaying. In Proceedings of the GLOBECOM 2017–2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 4–8 December 2017; p. 2. [CrossRef]
5. Castañeda-Camacho, J.; Lara-Rodríguez, D. Teletraffic analysis of an overlaid system using CDMA and TDMA with cell coverage area restriction. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2008**, *57*, 828–846. [CrossRef]
6. Shan, D.; Wen, A.; Zhai, W.; Tan, M. All-Optical Double Spectral-Efficient RoF Link with Compensation of Dispersion-Induced Power Fading. *IEEE Photonics J.* **2021**, *13*, 5500207. [CrossRef]
7. De Souza, L.C.; Lima, E.S.; Junior, A.C.S. Implementation of a Full Optically-Powered 5G NR Fiber-Wireless System. *IEEE Photonics J.* **2022**, *14*, 5511708. [CrossRef]
8. Kao, H.Y.; Ishimura, S.; Tanaka, K.; Nishimura, K.; Inohara, R. End-to-End Demonstration of Fiber-Wireless Fronthaul Networks Using a Hybrid Multi-IF-Over-Fiber and Radio-Over-Fiber System. *IEEE Photonics J.* **2021**, *13*, 7301106. [CrossRef]
9. Haas, B.M.; McKinney, J.D. Characterization of a downconverting, phase-modulated rf-over-fiber link with a single modulator. *IEEE Photonics J.* **2018**, *10*, 5501307. [CrossRef]
10. Lin, C.T.; Chen, J.; Peng, P.C.; Peng, C.F.; Peng, W.R.; Chiou, B.S.; Chi, S. Hybrid optical access network integrating fiber-to-the-home and radio-over-fiber systems. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2007**, *19*, 610–612. [CrossRef]
11. Correa-Mena, A.G.; Seseña-Osorio, J.A.; Diago-Mosquera, M.E.; Aragón-Zavala, A.; Zaldívar-Huerta, I.E. Optical transmission of an analog TV signal coded at 2.24 GHz and its distribution by using a radiating cable. *Electronics* **2020**, *9*, 917. [CrossRef]
12. VPI Photonics Design Suite. Available online: <https://www.vpiphotonics.com/Tools/DesignSuite> (accessed on 3 November 2022).
13. Castañeda-Camacho, J.; Mino-Aguilar, G.; Cortez, L.; Gutiérrez-Arias, J.E.M.; Guerrero-Castellanos, J.F.; Muñoz Hernández, G.A. Monte Carlo Simulation Applied to Measurement of the Impact of the Smart Antenna Technology in Digital Cellular Systems. *Ing. Investig. Tecnol.* **2015**, *16*, 207–212. [CrossRef]
14. Castañeda-Camacho, J.; Lara-Rodríguez, D. Ordered Hunt Schemes for Overlaid CDMA Cellular Systems. *Ing. Investig. Tecnol.* **2010**, *11*, 349–365. [CrossRef]
15. Rappaport, T.S. *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed.; Prentice Hall: Newark, NJ, USA, 2002.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Article

Experimental Demonstration of Channel Routing of Microwave Signals Sharing an Optical Link by Using a Tunable Optical Band-Pass Filter

Rodrigo Cuevas-Terrones^{1,a}, Itzel Sinaí Castillo-García^{1,b}, Blaise Tshibangu-Mbuebue^{1,c}, Josefina Castañeda-Camacho^{2,d}, Alejandro García-Juárez^{3,e}, and Ignacio Enrique Zaldívar-Huerta^{1,f,*}

¹ Departamento de Electrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla, 72840, México

² Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, 72000, México

³ Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83000, México
E-mail: ^arodrigo.cuevas@inaoep.mx, ^bitzelcastillo@inaoep.mx, ^coxygeneblaise@gmail.com,

^djosefinacastaneda@correo.buap.mx, ^ealejandro.garcia@unison.mx, ^fzaldivar@inaoep.mx (Corresponding author)

Abstract. The imperative need to share an optical link to optimize its use among multiple users for data distribution continues to be a topic of technological challenge. In this regard, it is well known that one of the most common techniques is the WDM technology. However, this paper describes a technical alternative that enables channel routing for data sharing over an optical link between two users using a tunable Optical Band-Pass (OBP) filter. This proposal is experimentally validated. To demonstrate the viability of this approach, microwave signals are used as data. The selected microwave signal is wirelessly transmitted at the end of the optical link. The signal-to-noise ratio (SNR) parameter measure is adopted to evaluate the quality of each microwave signal, achieving an average SNR of 37.01dB. This proposal is validated for microwave signals within the S-band (2 to 4 GHz), however, this frequency interval can be expanded. Potentially, this approach allows the sharing of optical fiber among multiple users to deliver services via wireless links in indoor environments.

Keywords: Tunable optical band-pass filter, optical fibers, microwave signals, wireless links.

ENGINEERING JOURNAL Volume 28 Issue 9

Received 8 May 2024

Accepted 9 September 2024

Published 30 September 2024

Online at <https://engj.org/>

DOI:10.4186/ej.2024.28.9.25

1. Introduction

Currently, optical communications systems are utilized to deliver data at high speeds and frequencies. In this regard, optical links supply a high bandwidth, and optical fibers are the only medium capable of transporting these tremendous amounts of data through long distances [1]. Due to its great performance, optical fibers are not only used in optical communications. Its field of applications is extensive, for example, in [2], optical fiber is used as a biosensor. To maximize the utilization of an optical link between multiple users [3], several approaches are used, such as Wavelength Division Multiplexing (WDM) [4, 5, 6, 7, 8], Optical Time Division Multiplexing (OTDM) [9, 10, 11], Polarization Multiplexing (POL-MUX) technique [12, 13, 14, 15], and Spatial Division Multiplexing (SDM) [16, 17, 18, 19, 20], among others. On the other hand, wireless technology is more flexible and adaptable than wired networks. This technology provides high mobility for users, which is one of the main reasons for its preference over wired networks [21]. Thus, the coalition of optical and wireless techniques allows to delivery services such as the Internet, TV on-demand, and telephony in a hybrid way [22]. In this regard, numerous works have been published in the last few years, for instance, in [23] an experimental investigation of mobile networks using optical fibers is carried out. In [24], the experimental results of an optical fiber and wireless link deployment within a 5G Radio Access Network (RAN) are described. In [25], a system architecture and hardware development status for a High-Speed Train Radio Communication system, using an optical-wireless transmission in the W-band is presented. In [26], a bidirectional hybrid OFDM-based Wireless-over-fiber architecture has been investigated and demonstrated for uplink and downlink transmissions. In [27], the authors present a study for the design and simulation of a Radio over Fiber (RoF) system operating at 64 GHz. In [28], a hybrid digital and analog system is proposed. Finally, in [29] an indoor Digital Optical-Radio transmission system for both Cellular and IoT services is described.

In light of the previously described context, knowing that an Optical Band-Pass (OBP) filter allows specific

wavelengths of light to pass through while blocking others, these devices find a wide variety of applications, including spectroscopy, fluorescence microscopy, and telecommunications. Thus, the motivation of this work is to propose the use of a tunable OBP filter as a key device for channel routing the data that is shared in a single optical link. This proposal is validated for the case of two users sharing an optical link and using microwave signals (MW) as data [30]. Thus, thanks to the use of the tunable OBP filter it is possible to select one or another MW signal. Another challenge, but not least, is that the selected MW signal is wirelessly transmitted in an indoor environment. Therefore, the main contribution of this proposal is the practical demonstration of the use of an OBP filter for the channel routing of microwave signals sharing an optical link avoiding the use of multiplexers and demultiplexer devices.

The remaining parts of this paper are structured as follows: The experimental setup and its operating principle are described in Section 2. Section 3 presents a discussion of the results. Finally, the manuscript ends with the conclusions presented in Section 4.

2. Experimental Setup

The experimental setup is represented in Fig. 1. Its operation is described below; however, before discussing the operation of the setup. Firstly, the main characteristics of the optical sources, OBP filter, and antennas are presented.

2.1. Optical Sources

The Distributed Feedback lasers DFB_1 (LP1550-SAD2-230109-19, $\lambda_1 = 1548.26$ nm) and DFB_2 (LP1550-SAD2-181115-11, $\lambda_2 = 1550.22$ nm) are characterized. These DFBs are driven by controllers at a polarization current of 11.1 and 11.8 mA, respectively, ensuring a stable optical power of 1 mW for each one. Their respective current-power and optical spectra curves registered by an Optical Spectrum Analyzer (Anritsu MS9740A) are shown in Fig. 2 and Fig. 3, respectively.

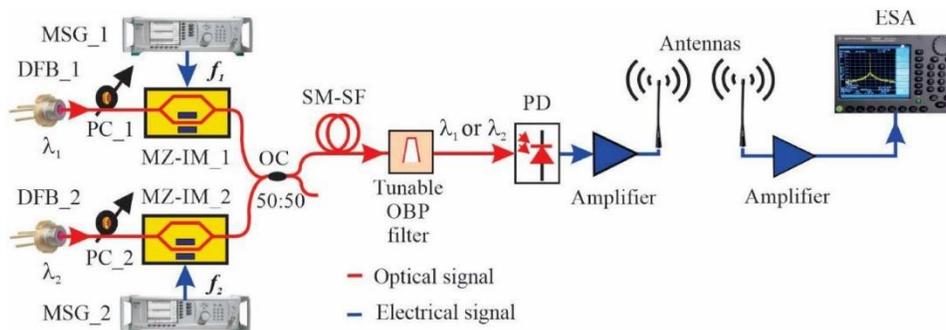


Fig. 1. Experimental arrangement to recover two microwave signals sharing an optical link using a tunable OBP filter.

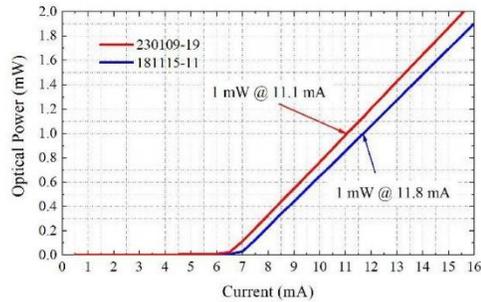


Fig. 2. Current-power curve for the DFB_1 and DFB_2.

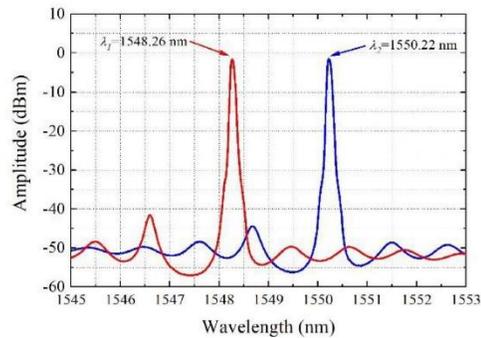


Fig. 3. Optical spectrum for the DFB_1 and the DFB_2.

2.2. Optical Bandpass Filter

The key device of the experimental setup shown in Fig. 1 is the tunable OBP filter (TF-1550-0.8-9/9LT-FC/APC-1) [31]. An OBP filter is a device that allows a specified range of wavelengths to pass through with high transmittance while blocking all others. According to the manufacturer's datasheet for the Optical Bandpass Filter [31], the tuning range of this device is 1535 to 1565 nm

(C-band), therefore, $1565 - 1535 = 30$ nm. This means that at least 30 different wavelengths around 1550 nm can pass through this optical filter.

2.3. Antennas

Two Indoor Directional Patch antennas (WiMo HIF-2400 WaveLAN Antenna, with a central frequency of 2.4 GHz, a bandwidth of 100 MHz, and a Gain of 8.5dBi) [32] are used for the wireless transmission of the recovered microwave signals. Once the optical and electrical characteristics of the aforementioned devices have been established, the next step is to describe in detail the experiment.

2.4. Description of the Experiment

As previously mentioned, the experiment is based on the setup shown in Fig. 1. Thus, the optical sources DFB_1 and DFB_2 are connected to their respective Polarization Controllers PC_1, and PC_2. These controllers maximize the modulator output optical power. Each light beam is modulated by its respective LiNbO₃ Mach-Zehnder-Intensity Modulator MZ-IM_1 and MZ-IM_2. The Microwave Signal Generators MSG_1, and MSG_2 supply frequency signals $f_1 = 2.37$ GHz and $f_2 = 2.50$ GHz, respectively, at an electrical power of 20 dBm. These signals are applied to the respective electro-optical modulator to modulate the laser light. The modulated optical beams coming from the Mach-Zehnder-Intensity Modulators are combined via an Optical Coupler (OC) 50:50 and injected into a reel of 25 km of Single Mode-Standard Fiber (SM-SF), whose characteristics are $\alpha = 0.2$ dB/km and $D = 16.75$ ps/nm·km @ 1550 nm. At the output of the SM-SF, the light beam is inserted into the tunable OBP filter (Dicon, model TF-1550-0.8-9/9LT-FC/APC-1, Bandwidth: 1535 to 1565 nm). To select the desired optical signal, the OBP is directly tuned to the corresponding wavelength of each DFB, this is, $\lambda_1 = 1548.26$ nm or $\lambda_2 = 1550.22$ nm. Thus, when the OBP filter is adjusted to the λ_f value, the signal

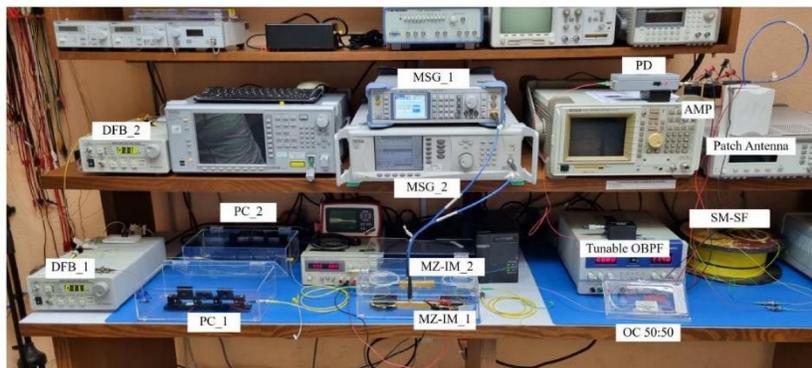


Fig. 4. Photograph of the experimental setup.

$f_1 = 2.37$ GHz is recovered, and when the filter is readjusted at the λ_2 value, the signal $f_2 = 2.50$ GHz is recovered.

The selected modulated optical signal (λ_1 or λ_2) is injected into the Photo-Detector (PD, Miteq, model: DR-125G, Bandwidth-13 GHz, $\mathfrak{R} = 0.9\text{A/W}$) [33] providing its corresponding electrical signal (f_1 or f_2) which is amplified (ZVA-183-S+, 700-18000 MHz, and gain of 26 dB) [34] and connected to the directional patch antenna where it is radiated. The other directional patch antenna detects this radiated signal, amplifies it (ZVA-183-S+), and connects it to the Electrical Signal Analyzer (ESA, Agilent Technologies N9344C) for recording. The distance between the two antennas is 2 meters. The signal-to-noise ratio (SNR) parameter is adopted to evaluate the quality of each microwave signal.

Finally, Fig. 4 is a photograph of the experimental setup where the devices and equipment used in this experiment are indicated. The principle of operation of the photonics devices used in this work can be found in references [35, 36].

3. Discussion of Results

Figure 5 shows the registered microwave signals $f_1 = 2.37$ GHz, and $f_2 = 2.50$ GHz carefully recovered one by one by tuning the OBP to $\lambda_1 = 1548.26$ nm or $\lambda_2 = 1550.22$ nm, respectively. This graph shows the measured SNR value (level of the signal to the level of background noise). Due to the high SNR obtained, other wireless services that operate in the frequency range of 2.40 - 2.48 GHz, such as Radio-Frequency Identification (RFID), ZigBee, WiFi, Bluetooth Low Energy (BLE), and Ultra-Wide Band (UWB) [37], are overshadowed and therefore are not detected in the registered microwave signals. From these signals, it is evident the significant separation of the noise floor, stability, and purity for the recovered MW signals.

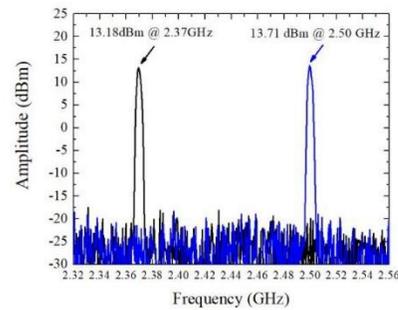


Fig. 5 Registered microwave signals $f_1 = 2.37$ GHz when the OBP is tuned at $\lambda_1 = 1548.26$ nm (black line), and $f_2 = 2.50$ GHz when the OBP is tuned at $\lambda_2 = 1550.22$ nm (blue line).

Table 1 summarizes the measured amplitude and SNR values corresponding to each wavelength.

Table 1. Measured amplitude and SNR values corresponding to each wavelength.

λ (nm)	$f_1 = 2.37$ GHz		$f_2 = 2.50$ GHz	
	Amplitude (dBm)	SNR (dB)	Amplitude (dBm)	SNR (dB)
$\lambda_1 = 1548.26$	13.18	37.45		
$\lambda_2 = 1550.22$			13.71	36.46

Although this proposal has been successfully validated for the case of two signals, this approach can be extended for more than two signals. In this regard, Fig. 6 illustrates the particular case for 4 signals using the appropriate Optical Couplers (OC). It is important to note that, due to the optical characteristics of the OBP filter, the wavelengths used must be near 1550 nm.

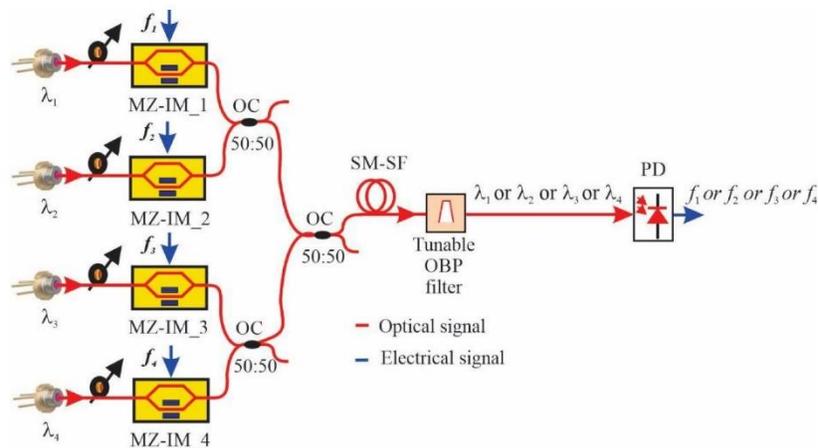


Fig. 6. Proposal to recover four different data signals sharing an optical link using a tunable OBP filter.

4. Conclusions

The purpose of this paper was to experimentally demonstrate a novel electro-optical setup that allows channel routing of microwave signals sharing the same optical link using a tunable Optical Band Pass filter. This setup enables subsequent indoor wireless transmission. The criterion used to validate the performance of this proposal was the measurement of the signal-to-noise ratio (SNR) value for each microwave signal. On average, an SNR = 37.01 dB was obtained. The high SNR indicates more signal than noise, ensuring high spectral purity for the obtained signals. Another performance metric to evaluate the quality of the microwave signals is measuring the phase noise of these signals. Taking advantage of the tuning range (1535 nm to 1565 nm), potentially, this proposal could allow the transmission of 30 different wavelengths that represent possible 30 users. The satisfactory of MW signals through 25 km of Single Mode-Standard Fiber was successfully demonstrated. This finding suggests potential applications in long-optical-range systems [38]. Potentially, microwave signals can be used as electrical carriers to transmit baseband information. In addition, this approach demonstrated the sharing of optical fiber among multiple users to deliver services via wireless links in indoor environments. It is well known that in a wireless indoor environment, the radiated signals can be affected by noise, interference, signal reflections on walls, furniture, people, etc. [39]. In this experiment, due to the short distance between antennas (2 meters), aligned to the point of view, these factors did not influence the measurements. A technical limitation of this proposal is that, unlike a WDM system, the recovery of each data signal is realized one at a time. Another limitation for transmitting 30 different wavelengths using the setup proposed in this work is the number of OCs employed. The fact that the OBP filter works at 1550 nm allows the standardization of its use and compatibility with other traditional techniques such as WDM, OTDM, POL-MUX, and SDM. Although this proposal was validated for the microwave S-band, this frequency interval can be extended to the maximum electrical bandwidth of the PD used.

Acknowledgments

Rodrigo Cuevas-Terrones, Itzel Sinaí Castillo-García, and Blaise Tshibangu-Mbuebue wish to thank the Mexican Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) for the PhD scholarship numbers 679055, 905894, and 846218, respectively.

References

- [1] F. Q. Kareem, S. R. M. Zeebaree, H. I. Dino, M. A. M. Sadeeq, Z. N. Rashid, D. A. Hasan, and K. H. Sharif, "A survey of optical fiber communications: Challenges and processing time influences," *Asian Journal of Research in Computer Science*, vol. 7, no. 4, pp. 48-58, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.9734/ajrcos/2021/v7i430188>
- [2] H. Fallah, T. Asadishad, G. M. Parsanasab, S. W. Harun, W. S. Mohammed, and M. Yasin, "Optical fiber biosensor toward e-coli bacterial detection on the pollutant water," *Eng. J.*, vol. 25, no. 12, pp. 1-8, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://engj.org/index.php/ej/article/view/4403>
- [3] B. H. L. Lee, "Market & industrial trends of optical interconnect," in *2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, Kyoto, Japan. 2019, pp. 19-24. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/ICSJ47124.2019.8998739>
- [4] T. Muciaccia, F. Gargano, and V. M. N. Passaro, "Passive optical access networks: State of the art and future evolution," *Photonics*, vol. 1, no. 4, pp. 323-346, 2014. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.3390/photonics1040323>
- [5] S. Li, Q. Tian, F. Wang, X. Xin, Q. Zhang, Y. Wang, F. Tian, and L. Yang, "A dynamic optical network units slicing algorithm for centralized flexible time-and-wavelength-division multiplexing passive optical network," in *19th International Conference on Optical Communications and Networks*, Qufu, China 2021, pp. 1-3. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/ICOON53177.2021.9563696>
- [6] M. Jiang, Y. Chen, N. Cheng, Y. Sun, J. Wang, R. Wu, F. Yang, H. Cai, and Y. Gui, "Multi-access RF frequency dissemination based on round-trip three-wavelength optical compensation technique over fiber-optic link," *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1-8, Jun. 2019. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2909777>
- [7] P. H. Chiu, Y. -S. Lin, Y. C. Manie, J. W. Li, J. H. Lin, and P. C. Peng, "Intensity and wavelength-division multiplexing fiber sensor interrogation using a combination of autoencoder pre-trained convolution neural network and differential evolution algorithm," *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 1-9, Feb. 2021. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3050298>
- [8] J. W. Nevin, S. Nallaperuma, N. A. Shevchenko, Z. Shabka, G. Zervas, and S. J. Savory, "Techniques for applying reinforcement learning to routing and wavelength assignment problems in optical fiber communication networks," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 14, pp. 733-748, 2022. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-14-9-733>
- [9] Md. N. H. Prince, M. Faisal, and S.P. Majumder, "Performance analysis of an optical TDM transmission link considering fiber dispersion and demultiplexer crosstalk," *Optik*, vol. 251, p. 168435,

2022. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1016/j.jlco.2021.168435>
- [10] J. He, R. Gan, and N. Song, "Modulation methods in time division multiplexing interferometric fiber optic gyroscopes," in *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Naples, FL, 2019, pp. 1-5. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/ISISS.2019.8739274>
- [11] C. Kherici, and M. Kandouci, "Contribution to the performances study of Optical Time Division Multiplexing OTDM and OTDM/WDM hybrid multiplexing at 160 Gbps," in *International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, Fez, Morocco, 2019, pp. 1-4. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/WITS.2019.8723826>
- [12] N. Badraoui and T. Berceci, "Enhancing the capacity of optical links using polarization multiplexing," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 51, no. 310, 2019. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1007/s11082-019-2017-3>
- [13] C. Gao, X. Tang, Q. Meng, W. Kong, L. Chen, Y. Luan, C. Yang, H. Xu, N. Cui, and X. Zhang, "Physical layer encryption for polarization division multiplexing coherent optical communication system based on the rotation of the polarization state," in *19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, Qufu, China, 2021, pp. 1-3. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/ICOON53177.2021.9563843>
- [14] M. Kyselak, D. Grenar, C. Vlcek, K. Slavicek, and J. Vavra: "The relative tolerances of polarization multiplex on long optical paths," in *International Symposium on Networks, Computers, and Communications (ISNCC)*, Dubai, United Arab Emirates, 2021, pp. 1-4. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/ISNCC52172.2021.9615771>
- [15] X. Wang, Z. Chen, M. Yin, W. Wang, Z. Li, W. Ni, and F. Li, "Laser sharing uplink polarization division multiplexing FBMC passive optical network," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 8, pp. 2323-2332, Apr 2023. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/JLT.2022.3231247>
- [16] L. Zhang, J. Chen, E. Agrell, R. Lin, and L. Wosinska, "Enabling technologies for optical data center networks: Spatial division multiplexing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 18-30, Jan 2021. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/JLT.2019.2941765>
- [17] R. Ullah, S. Ullah, W. A. Imtiaz, A.A. Alatawi, Z. Alzaid, and H. S. Alwageed, "Optimization and analysis of Spectral/Spatial optical code division multiple access passive optical network," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 175, pp. e155084, 2024. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1016/j.aecu.2023.155084>
- [18] H. Furukawa and R. S. Luis, "Petabit-class optical networks based on spatial-division multiplexing technologies," in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Barcelona, Spain, 2020, pp. 1-3. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.23919/ONDM48393.2020.9132998>
- [19] Y. Kokubun and M. Koshiba: "Predictable and unpredictable phenomena in optical fibers for space-division/mode-division multiplexing transmission: Statistical analysis of coupling and mysterious behavior of modes," *IEICE Electronics Express J-STAGE*, vol. 17, no. 15, pp. 1-16, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1587/ele.17.20202001>
- [20] E. Rodrigues, D. Rosário, E. Cerqueira, and H. Oliveira, "Analysis of routing and resource allocation mechanism for space-division multiplexing elastic optical networks," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 20, no. 1, pp. 762-773, March 2023. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/TNSM.2022.3228574>
- [21] H. Zhu, A. S. F. Chang, R. S. Kalawsky, K. F. Tsang, G. P. Hancke, L. L. Bello, and W. K. Ling, "Review of state-of-the-art wireless technologies and applications in smart cities," in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 6187-6192. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/IECON.2017.8217074>
- [22] C. Ranaweera, J. Kua, I. Dias, E. Wong, C. Lim, and A. Nirmalathas, "4G to 6G: disruptions and drivers for optical access [Invited]," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, no. 2, pp. A143-A153, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1364/JOCN.440798>
- [23] A. Y. M. Ellaï, A. M. M. Ammar, and A. R. Zerek, "The experimental investigation of mobile networks using radio over fiber solutions," in *19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Sousse, Tunisia, 2019 pp. 654-659. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/STA.2019.8717249>
- [24] J. Bohata, D. N. Nauyen, Z. Ghassemlooy, B. Ortega, and S. Zvánovec, "The evaluation of an RoF system using FSO and a seamless antenna link for the 5G RAN," in *17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Berlin, Germany, 2021, pp. 1-5. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/ISWCS49558.2021.9562212>
- [25] N. Shibagaki, Y. Sato, and K. Kashima: "W-band Radio Communication System for High-Speed Train using RoF Technologies," in *IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA)*, Kuta, Bali, Indonesia, 2019, pp. 255-257. [Online]. Available:

- <https://www.doi.org/10.1109/CAMA47423.2019.8959792>
- [26] K. Mallick, R. Mukherjee, B. Das, G. C. Mandal, and A. S. Patra, "Bidirectional hybrid OFDM based Wireless-over-fiber transport system using reflective semiconductor amplifier and polarization multiplexing technique," *AFU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 96, pp. 260-266, 2018. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1016/j.acuc.2018.09.041>
- [27] S. S. P. Nugroho, Y. Natali, and C. Apriono, "Design of millimeter-wave based radio over fiber for 5G applications," in *1st International Conference on Information System and Information Technology (ICISIT)*, Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 409-414. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/ICISIT54091.2022.9872765>
- [28] T. Li, Y. Yang, M. Crisp, I. H. White, and R. V. Penty, "Novel digital and analogue hybrid radio over fibre system for distributed antenna system (DAS) fronthaul applications," in *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, CA, 2020, pp. 1-2. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9193188&tag=1>
- [29] W. Li, A. Chen, T. Li, X. Wang, R. Penty, and Y. Yao, "High-efficient converged digital radio over fiber (DRoF) transmission and processing for indoor both cellular and IoT services," in *IEEE 7th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, Dalian, China, 2019, pp. 375-379. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/ICCSNT47585.2019.8962472>
- [30] D. M. Pozar, "Introduction to microwave systems," in *Microwave Systems*, 4th ed. Hoboken, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2011, ch. 14, pp. 658-706.
- [31] Dicon FiberOptics. *Fiber Optics Solutions*. [Online]. Available: <https://www.diconfiberoptics.com/products/scd0124/SCD-0124C.pdf> [Accessed 24 April 2024].
- [32] Manualzz. *Manuals and Solutions*. [Online]. Available: <https://manualzz.com/doc/9696487/hif-2400-datasheet> [Accessed 24 April 2024].
- [33] Narda-Miteq. *Microwave and Optical Components*. [Online]. Available: <https://nardamiteq.com/docs/MITEQ-DR-125G-A.PDF> [Accessed 24 April 2024].
- [34] Mini-Circuits. *RF and Microwave Components*. [Online]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZVA-183-S+.pdf> [Accessed 24 April 2024].
- [35] Taylor & Francis Group, LLC, *Encyclopedic Handbook of INTEGRATED OPTICS*, 2006.
- [36] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc., 2019
- [37] Z. Hajikhondi-Meybodi, M. Salimibeni, K. N. Plataniotis, and A. Mohammadi, "Bluetooth low energy-based angle of arrival estimation via switch antenna array for indoor localization," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Information Fusion (FUSION)*, Rustenburg, South Africa, 2020, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.23919/FUSION45008.2020.9190573>
- [38] K. Zhong, X. Zhou, J. Huo, C. Yu, C. Lu, and A. P. T. Lau, "Digital signal processing for short-reach optical communications: A review of current technologies and future trends," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2 pp. 377-400, Jan. 2018, doi: <https://www.doi.org/10.1109/JLT.2018.2793881>
- [39] M. S. Neyestanak, E. Azizi, and E. Salarpour, "IoT Performance improving for indoor and outdoor environments," in *2021 5th International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, Isfahan, Iran, 2021, pp. 1-6, doi: <https://www.doi.org/10.1109/IoT52625.2021.9469604>

Implementation of an Indoor Free-Space Optical Communication Link using On-Off Keying Optical Modulation, a useful didactic tool for Optoelectronic Engineering Students.

Rodrigo Cuevas-Terrones^a, Blaise Tshibangu-Mbuebue^a, Enrique Eugenio Pérez-Mayesffer Azcárraga^b, Josefina Castañeda-Camacho^b,
Alejandro García-Juárez^c, Ignacio Enrique Zaldívar-Huerta^a

^aInstituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

^bBenemérita Universidad Autónoma de Puebla

^cUniversidad de Sonora

Puebla, Puebla, México

Hermosillo, Sonora, México

zaldivar@inaoep.mx

Abstract— This work describes the experimental implementation of an indoor Free-Space Optical (FSO) communication link using On-Off Keying optical modulation for a laser source. FSO is a topic of big interest due to is an optical communication technique that propagates light in free space to wirelessly transfer data in indoor and outdoor environments. Therefore, this proposal allows optoelectronic engineering students involved in optical communications to complement the formation of the classroom. The experimental setup uses an FPGA (Field Programmable Gate Array) development card to process the electrical information to be transmitted that is used to directly modulate a laser source whose central wavelength is 830 nm. The novelty of this proposal resides in the fact that the digitized information to be transmitted is easily processed in the FPGA, which makes it easier and more direct the optical modulation. This experimental setup can be easily replicated in a laboratory and has a potential application as a didactic tool in a course on optical communication systems.

Keywords—free space optical, vhsic hardware description language on-off keying, field programmable gate array

I. INTRODUCTION

Alexander Graham Bell is known as the inventor of the telephone in 1876, however, in 1880, he successfully demonstrated the conveying of sound using a beam of sunlight propagating in free space by means of his invention called “photophone” whose setup is shown at Fig. 1.

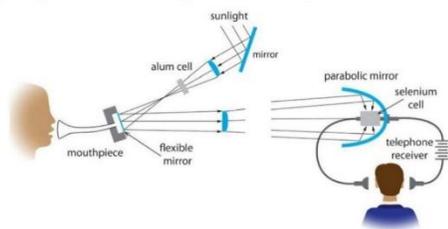


Fig. 1. Schematic of a working Photophone as is described in [1].

This invention is considered the first wireless communications system that allowed the transmission of voice over a distance of approximately 200 m using light as a carrier.

Due to technical limitations of that time, this invention failed to protect transmissions from outside interferences, such as dust and clouds, that easily interrupt the sunlight. The apparition of fiber optics in the 1970s allowed solving this limitation for the secure transport of light without dependence on environmental conditions [2]. If well is true that fiber-optic allows for solving some limitations for transmissions in free space, sometimes rolling out a fiber network presents deployment complications. This is because digging trenches to lay lines can be time-consuming and costly, and sometimes the terrain poses physical challenges that make expansion very difficult. Therefore, the concept of transmission of information in free air continues with the FSO technology as an interesting alternative [3]. FSO technology is capable of transporting information such as data, voice, and video through the atmosphere using light as a carrier (in a similar way that the photophone), allowing optical connectivity without requiring optical fiber and operating between 750-1600 nm wavelengths. A practical application of FSO technology is found with the “Google antenna” which uses lasers to have a much faster connection than fiber optics [4]. Due to its importance of FSO technology, several research articles have been published about it. For instance, in [5], the authors discuss the transmitter and receiver architecture, as well as, channel modeling schemes. In [6], it is reported a study focused on system architecture for single and multiple optical beams. It also investigates haze and rain impacts on an FSO communication system. In addition, it is shown the implementation of an FSO communication system using a Wavelength Division Multiplexing (WDM) scheme. In [7], it is described a study whose goal is to review the state-of-the-art use cases of FSO in outdoor and indoor scenarios. Also, are identified some open challenges and future research opportunities. In addition, this study addresses FSO transceiver design, security issues, and cost-efficient hybrid FSO/RF solutions. Finally, in [8], it is reported a study analyzing the performance of several modulation techniques employed in the

979-8-3503-1295-9/23/\$31.00 ©2023 IEEE

FSO systems. The results are presented for (Signal-to-Noise-Ratio) SNR, (Bit Error Rate) BER, and Outage Probability (OP). (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) OFDM and M-array (Quadrature Amplitude Modulation) QAM-based FSO systems can transmit data of 4.1 Gbits/s to 10.94 Gbits/s at a distance of 7000 m. Before such a scenario, it is evident that there is a need for students on optical communication systems to understand the principle of operating the FSO systems. Therefore, the purpose of this work is the implementation of an FSO communication system operating in an indoor environment whose optical source emitting at 830nm is directly modulated with information processed in an FPGA development card. The information to be transmitted is a digital signal that generates OOK optical modulation in Non-Return-to-Zero (NRZ) format. The use of an FPGA development card makes it more didactic, easy, and direct the processing of information, as well as, the transfer of data to the optical source. The composition of this paper is given below. Section 2 explains the operation principle of an FSO system. Section 3 presents the experimental setup, followed by a section discussing the results and concepts learned. Section 4 summarizes this article, draws conclusions regarding the experiment performed, and presents future perspectives.

II. OPERATING PRINCIPLE OF A FSO SYSTEM.

FSO is defined as an optical communication technology that uses light to propagate data wirelessly through free space, where, “free space” refers to environments such as outer space or vacuum. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) identified the potential of the FSO technology by assigning the standard IEEE802.15.7 [9]. FSO, also known as Optical Wireless Communication (OWC), uses the Ultra-Violet (UV), Visible, and Infra-Red (IR) frequency bands for data communication. Currently, FSO systems operate in wavelengths from 750 to 1600 nm. This technology employs the Line of Sight (LOS) trajectory for transmission. There are two modulation techniques for transmitting information in an FSO system: direct and external modulation. Fig. 2 (a), and (b) depicts the general diagram of an FSO system employing both modulation techniques.

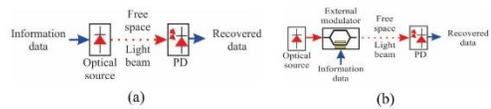


Fig. 2. General scheme of an FSO system employing: (a) direct modulation, and (b) external modulation.

In particular, in this work by reason of simplicity, the direct modulation technique is chosen. Thus, in the following, an explanation of its operation is given. Information data modulates an optical carrier. The generated light beam travels through the air toward a distant destination. At the receiver, the light beam is sensed by a photodetector (PD) which converts the light into an electrical signal delivering the originally transmitted information. Evidently, a careful LOS alignment must be done among the optical source and the photodetector. After signal propagation through the free space channel, the PD receives and processes this signal. On the other hand, there are several modulation formats such as On-Off Keying (OOK),

Multiple Pulse Position Modulation (MPPM), Dual Pulse Position Modulation (DPPM), Pulse-Width Modulation (PWM), Differential Phase-Shift Keying (DPSK), Pulse-Amplitude Modulation (PAM), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), among others [8]. Each of these modulation techniques has its own disadvantages and advantages. This means that some techniques are good for energy efficiency and others good for power efficiency. The choice of a particular modulation technique depends on the site where the FSO will be established and the type of modulation required by the user [10].

III. EXPERIMENTAL SETUP

A. Description of the experimental setup.

In particular, this experiment is validated by focusing on the transmission of written text. For this, the use of platforms found on the Internet allows to transform ASCII (American Standard Code for Information Interchange) text to binary code [11]. Fig. 3 corresponds to a screenshot of a conversion platform showing the phrase “Hello world” and its corresponding binary characters. The generated chain of binary characters is saved in a text file.



Fig. 3. Screenshot showing the phrase “Hello world” and its corresponding binary characters.

Thus, the corresponding binary value to the phrase “Hello world”, is: 01001000 01100101 01101100 01101100 01101111 00100000 01110111 01101111 01110010 01101100 01100100. Once the binary file is obtained, this is fed to the software VHDL (VHSIC Hardware High Description Language, VHSIC: Very High-Speed Integrated Circuits) to be processed. All the above previously described is shown in the step diagram in Fig. 4.

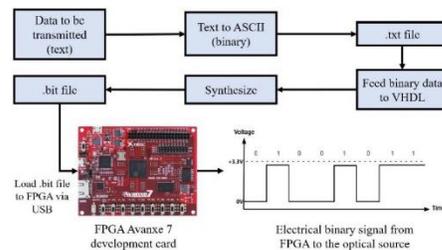


Fig. 4. Diagram indicating the steps to follow to build the digital signal that drives the optical source.

Fig. 5 depicts the experimental arrangement employed to build the FSO communication system for an indoor environment at the laboratory.

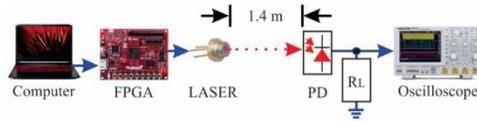


Fig. 5. Experimental setup for the FSO communication scheme.

The processed information is transferred to the FPGA development card (Avanxe 7, Artix 7 100T) via the port USB of the computer. The digital electrical signal (composed of 1's and 0's) delivered by the FPGA development card that corresponds to the binary value of the phrase "Hello world" is used to drive the modulated laser source (Coherent, central wavelength of 830nm, an optical power of 50mW). The internal clock of the FPGA development card is programmed at the frequency of 100KHz. This digital signal generates OOK optical modulation in line code Non-Return-to-Zero (NRZ). In OOK, modulated data is characterized by the absence ("off") or the presence ("on") of a light pulse in every symbol lapse [12]. The modulated beam is transmitted in the free space through a distance of 1.4 m. On the other end, a PIN photodetector (PD), whose spectral response is in the interval of 350-1100 nm and exhibits a good responsivity at this wavelength (0.54 A/W), recovers the optical signal. Finally, the photo-current delivered by the PD is connected to an oscilloscope (Tektronix, DPO7104, Bandwidth: 1 GHz) via a load resistor (RL) to visualize the recovered signal. Fig. 6 shows a screen of the oscilloscope illustrating the traces corresponding to the clock, transmitted, and recovered signals.



Fig. 6. Screen of the oscilloscope illustrating the traces for the clock, transmitted, and received signals.

Fig. 7 shows a Photograph of the experimental arrangement mounted to an optical table for the FSO indoor prototype. It is important to remark on the meticulous alignment that must be achieved between the emission of the laser source and the PD to assure a successful transmission.



Fig. 7. Photograph of the experimental arrangement FSO indoor prototype.

B. Analysis of results.

The accuracy of the proposed system is realized by analyzing the transmitted and recovered signals using statistical tools. For this goal, the transmitted and recovered data visualized on the oscilloscope (Fig. 6) are registered and saved to a file with a .csv extension to be processed in MATLAB. Firstly, the correlation (r) between both signals is obtained by using the $xcorr$ function available in the library of this software. Secondly, the minimum Mean Square Error (MSE) is computed as [13]

$$\zeta = 2 - \frac{2r}{\sqrt{E_{tx}E_{rx}}} \quad (1)$$

where r is the correlation value previously computed, E_{tx} and E_{rx} are the energy values assigned to the transmitted and recovered signals, respectively. Eq. (1) is numerically evaluated by using MATLAB and the result of this process is graphically illustrated in Fig. 8.

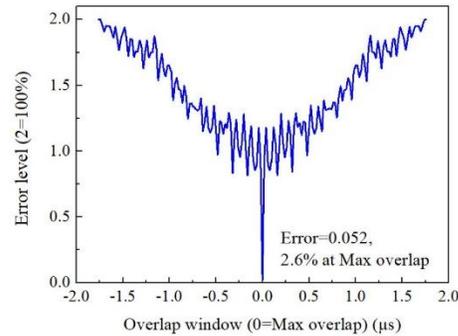


Fig. 8. Result of the evaluation for the MSE for the transmitted and recovered signals.

According to Eq. (1), a large MSE value indicates that both signals (transmitted and received) are very different. Whereas, a small MSE indicates a great similarity. Therefore, observing Figure 8, the MSE is small, practically zero (0.052). This guarantee, that practically all the transmitted data are successfully recovered.

IV. CONCLUSION

In this paper, an indoor FSO communication link using OOK optical modulation has been proposed and experimentally verified. This proposal allowed five optoelectronic engineering students who were taking the course "Introduction to Optical Fiber Communications" in the spring semester of 2023 at the National Institute for Astrophysics Optics and Electronics to reinforce and complement their knowledge gained in the classroom. In general, this experimental setup can be easily replicated in a laboratory and used as a didactic tool. Additionally, we intend to promote this type of experiment in other universities. The main characteristic of this proposal resides in the fact that digitized data can be easily converted into its corresponding electrical signal by an FPGA development card, which simplifies and streamlines the optical modulation process. The electrical information to be transmitted was used to directly modulate an optical source whose central wavelength is 830nm. The estimation of accuracy for the proposed system was evaluated by measuring the MSE between the transmitted and recovered signals using statistics tools. A small value of MSE was obtained, allowing in this way to guarantee that practically all the transmitted data were successfully recovered. We consider that this experimental demonstration serves as a useful tool for students to know the current investigation of FSO technology and motivate more research and study in this field. This setup can also be extended to transmit digitized data as voice and images. Finally, as future work, the challenge we have is to decode the recovered digital information in order to recover the original message. This is, from binary to ASCII text format.

ACKNOWLEDGMENT

R. Cuevas-Terrones and B. Tshibangu-Mbuebue would like to thank the CONACyT for student scholarship numbers 679055 and 846218, respectively.

REFERENCES

- [1] S. Thompson, "The Photophone" *Nature*, vol. 22, p. 481, 1880. <https://doi.org/10.1038/022481a0>
- [2] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, Fifth edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2021.
- [3] Arun K. Majumdar, *Advanced free space optics (FSO): a systems approach*. Springer, 2014.
- [4] Taara: Expanding fast and affordable global internet access with beams of light. Available at <https://x.company/projects/taara/>
- [5] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourthquarter 2014, <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2329501>
- [6] S. A. Al-Gailani et al., "A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7353-7373, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048049>
- [7] S. Zafar and H. Khalid, "Free Space Optical Networks: Applications, Challenges and Research Directions," *Wireless Pers Commun*, vol. 121, pp. 429-457, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08644-4>
- [8] R.G. Sangeetha, C. Hemanth and Ishu Jaiswal, "Performance of different modulation scheme in free space optical transmission - A review," *Optik*, Volume 254, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jleo.2022.168675>
- [9] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7, "Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light," in *IEEE Std 802.15.7-2011*, pp.1-309, September 2011, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.6016195>
- [10] J. M. Hamamreh, H. M. Furqan, and H. Arslan, "Classifications and applications of physical layer security techniques for confidentiality: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1773-1828, 2nd Quart., 2019, <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2878035>
- [11] Ascii Text to Binary Converter. Available at <https://www.binaryhexconverter.com/ascii-text-to-binary-converter>
- [12] Y. Fan and R. J. Green "Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications," *Optical Engineering*, vol 46, June 2007. <https://doi.org/10.1117/1.2746010>
- [13] Proakis, John G. and Manolakis, Dimitris G. *Digital signal processing*, Fourth Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006.

Digital Signal Transmission Through a Short-Reach Optical Link Using an FPGA Card

Rodrigo Cuevas-Terrones
Departamento de Electrónica
Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica
Tonantzintla, Puebla, México
rodrigo.cuevas@inaoep.mx

Blaise Tshibangu-Mbuebe
Departamento de Electrónica
Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica
Tonantzintla, Puebla, México
bmbuebe@inaoep.mx

Itzel Sinaí Castillo-García
Departamento de Electrónica
Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica
Tonantzintla, Puebla, México
itzelcastillo@inaoep.mx

Josefina Castañeda-Camacho
Facultad de Ciencias de la
Electrónica
Benemérita Universidad
Autónoma de Puebla
Puebla, México
josefina.castaneda@correo.buap.
mx

Ignacio Enrique Zaldivar-Huerta*
Departamento de Electrónica
Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica
Tonantzintla, Puebla, México
zaldivar@inaoep.mx

Abstract—This paper describes the experimental digital signal transmission through a short-reach optical link of 100 m using an FPGA (Field Programmable Gate Array) development card. The use of an FPGA development card allows to process in a friendly way the information to be transmitted, as well as, an easy reconfiguration. This characteristic constitutes the originality of this work. The transmission is carried out in baseband and the performance metric to evaluate this approach is carried out by determining the Mean Square Error (MSE) and the eye diagram. Potentially, this proposal can be used to connect short links in data centers.

Keywords— short-reach optical link, optical communications, digital signal processing, Field Programmable Gate Array

I. INTRODUCTION

Currently, optical communications are focused on long links. However, recently, short-reach optical liaisons have attracted attention, and constitute a key market segment due to the evolution of cloud services and data-center applications [1]. In this sense, there are several works reported in the literature. For instance, in [2] the advancement of all-optical solutions regarding bitrate scalability and energy efficiency is investigated, proposing to decrease the use of Digital Signal Processors (DSPs) for next-generation internal data centers, since a permanent challenge to solve is the energy consumption and the cost of the optical interconnections available to the information and Communication Technology Industry (TIC). In [3], a Convolutional Neural Network is suggested for eye pattern measurement and Bit Error Rate estimation in optical connections between data centers affected by Inter-Core Crosstalk on multicore fibers, to monitor optical performance. In [4], the authors propose a multi-symbol equalization scheme based on Neural Networks (NN) inspired by multi-task learning to deal with possible non-linear deficiencies in short-reach optical interconnects. On the other hand, concerning to High-Order Modulation (HOM) systems, in [5] a Geometric

Constellation Shaping (GCS) technique is proposed for HOM schemes in short-reach optical networks. Finally, in [6] a source-synchronous receiver is presented, whose setup is considered for Mode Division Multiplexed short-reach optical liaisons using forwarded clocks and allows placing the sensitive clock signal in the path with the least value of optical crosstalk for a given photonic interconnect. This optimizes performance in co-engineered electronic/optical solutions and can improve performance. On the other side, there are several modulation formats for the transmission of information in an optical system communication, in this regard, the use of an FPGA card allows to process in a friendly way the information to be transmitted as well as an easy reconfiguration. Precisely, the principal contribution of this work is in the use of an FPGA card which allows processing the information to be transmitted in digital format. The processing is easily carried out by using a computer to transfer the desired information to the FPGA card whose electrical information is fed to an electro-optical modulator to be transmitted through a short-reach optical link of 100 m. In summary, the use of the FPGA card driving the optical modulator constitutes the originality of this work. This work comprises the following sections: Section 2 describes the experimental setup used in this work. Next, Section 3 shows the analysis of the obtained results. Finally, Section 4 gives the conclusion of this article.

II. EXPERIMENTAL SETUP DESCRIPTION

The validation of this proposal is carried out by transmitting a written text. For this goal, as a manner of example, a text phrase is converted to binary ASCII values by using an ad hoc online platform [7]. Fig. 1 is a screenshot of this platform showing the conversion of the phrase "Hello world" (note the capital letter and the space) and its corresponding binary ASCII values (01001000 01100101 01101100 01101100 01101111 00100000 01110111 01101111 01110010 01101100 01100100).



Fig. 1. Screenshot showing the phrase “Hello world” and its corresponding binary characters.

The resulting binary characters are saved in a text file and fed into the VHDL software, generating in turn a source file (see Appendix A). The information of this last file is used to configure the FPGA integrated into the development card (Avanxe 7, Artix 7 100T) via the port USB of the computer generating the corresponding electrical signal in NRZ format. Fig. 2 summarizes the steps of the process previously described.

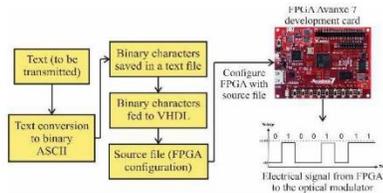


Fig. 2. Steps followed to generate the digital electrical signal from the text.

Once the message or information is converted into its electrical form, this signal is ready to be transmitted through a short-reach optical link using the external modulation technique whose scheme is illustrated in Fig. 3.

Firstly, the Distributed Feedback Laser (DFB, model LP1550-SAD2) is characterized. This DFB is driven by a current controller operated at a current value of 11.4 mA, assuring in this way a power of 1 mW as is indicated in Fig. 4. This measure is achieved by using an optical power meter.

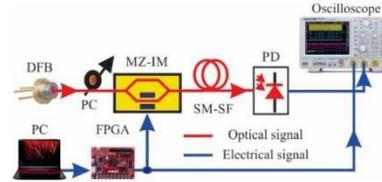


Fig. 3. Experimental disposal of the short-reach optical link used.

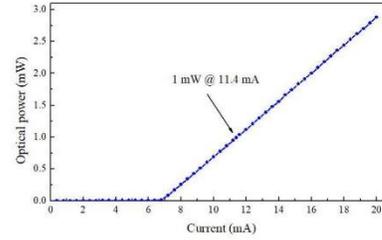


Fig. 4. Current-power curve of the DFB.

Also, its optical spectrum is measured and registered by using an Optical Spectrum Analyzer as is shown in Fig. 5 indicating that the central wavelength is $\lambda_0=1550.48$ nm.

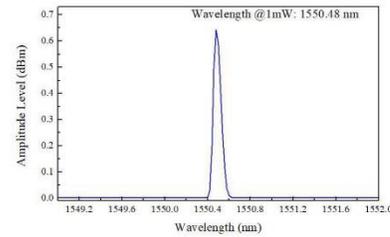


Fig. 5. Optical spectrum of the DFB.

Secondly, the frequency response of the short-reach system, considering a Single Mode-Standard Fiber (SM-SF) whose length is $L=100$ m, chromatic dispersion $D=16.75$ ps/nm·km and $\lambda_0=1550.48$ nm, is numerically evaluated by the use of the relationship [8]

$$H(u_m) = \cos\left(\frac{\pi v_m^2 \lambda_0^2 D L}{c}\right) \quad (1)$$

where c is the light speed and ν_m corresponds to the modulating frequency. The cut-off frequency f_c , for which Eq. (1) is zero, is computed as [8]

$$f_c = \frac{1}{\lambda_0} \sqrt{\frac{(2i-1)c}{2DL}} \quad (2)$$

From this last equation, for $i = 1$, then $f_c = 192.4$ GHz. Fig. 6 corresponds to the frequency response obtained by the use of a numerical evaluation of Eq. (1) using MATLAB. Note the good match on this graph with the numerical value (f_c) previously obtained by the use of Eq. (2). The experiment carried out in this work operates in the flat region at the beginning of this curve.

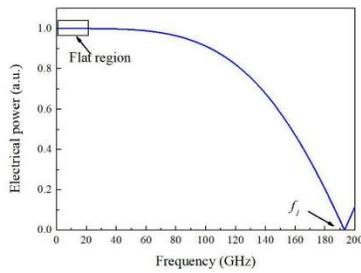


Fig. 6. Numerical frequency response of the electro-optical arrangement produced by Eq. (1).

Thirdly, once the optical and electrical characteristics of the system are known, the next step is to code the digital signal generated by the FPGA card into the Mach Zehnder Intensity Modulator (MZ-IM). Thus, the generated electrical data represented by a high level (“up”) or a low level (“down”) is applied to the RF electrode of the MZ-IM. The modulated light beam is transmitted through 100 m of SM-SF. On the other end, a Photo-Detector (PD, Bandwidth-13 GHz, and $\mathcal{R} = 0.9$ A/W) recovers the optical signal and delivers the electrical digital signal corresponding to the transmitted bits. The electrical output of the PD is plugged to channel 2 of the oscilloscope (Tektronix, Series 2 MSO, Bandwidth: 500 MHz) to visualize the recovered electrical signal. The data corresponding to these signals are saved in files allowing in this way its graphing and its subsequent analysis. Fig. 7 (a) and 7 (b) show the traces corresponding to the transmitted (channel 1) and the recovered signal (channel 2).

III. ANALYSIS AND DISCUSSION OF RESULTS

The performance metric to evaluate this proposal is carried out by measuring the Mean Square Error (MSE) and the eye diagram. For the first metric, the files that contain the data corresponding to the traces for the transmitted and recovered signals are processed by using the *xcorr* function available in the MATLAB library.

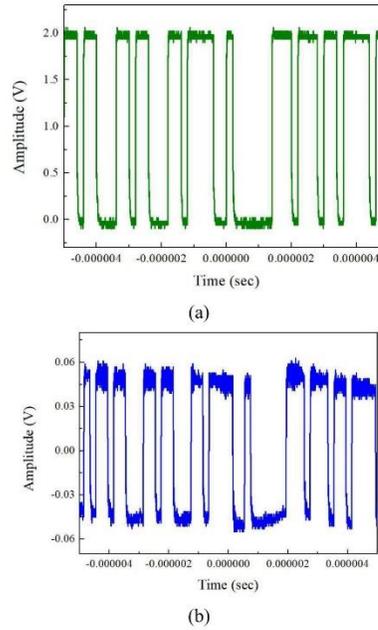


Fig. 7. Traces corresponding to: (a) the transmitted signal and, (b) the recovered signal.

Once the correlation (r) between both signals is obtained, the next step is to obtain the minimum MSE that is computed as [9]

$$\zeta = 2 - \frac{2r}{\sqrt{E_{tx}E_{rx}}} \quad (3)$$

where r is the correlation value previously computed, and E_{tx} and E_{rx} are the energy values for the transmitted and recovered signals, respectively. Eq. (3) is numerically evaluated by using MATLAB and the MSE is graphically illustrated in Fig. 8. From this graph, the small MSE value (0.085) indicates a good grade of reliability for the recovered signal.

For the second metric, it is well known that the signal quality or signal integrity can be evaluated by means of an eye diagram, which is a graphical tool that allows the evaluation of the quality of a digital signal [10]. Used together with other signal integrity measurements, it can help predict performance and know the cause of system impairments. The eye diagrams generated by signals transmitted through optical fiber vary by fiber length because the impacts of dispersion, loss, and nonlinearity in the fiber differs with transmission distance.

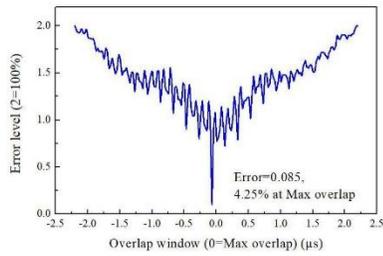


Fig. 8. Graphical result corresponding to the mean square error.

For this goal, again, the files that contain the data corresponding to the traces for the transmitted and recovered signals are processed by using the *eyediagram* function available in the MATLAB library. Fig. 9 (a) and (b) shows the transmitted and recovered signal, respectively.

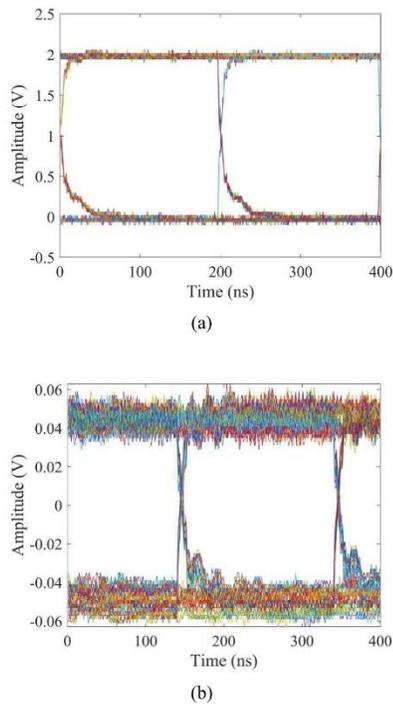


Fig. 9. Eye diagram corresponding to (a) transmitted and (b) recovered signal.

The eye diagram gives insights into the signal timing, amplitude, and noise characteristics. It is created by overlaying multiple segments of the signal waveform, typically acquired over multiple bit periods. Each segment represents the voltage levels of the signal at a specific point in time. From Fig. 7 (b), it is remarkable a good eye aperture, minimum jitter, and signal distortion values assuring in this way a robust system of optical communication. This is acceptable due to the short distance (100 m) used in this optical system.

IV. CONCLUSION

It was successfully demonstrated the experimental digital signal transmission through a short-reach optical link of 100 m using an FPGA development card. The use of an FPGA allowed to process in a friendly way the information to be transmitted. The transmission was carried out in baseband by using an external optical system communication. The performance metric to evaluate this proposal was carried out by measuring the mean square error (MSE) and the eye diagram for the transmitted and recovered waveform. This test enables the validation of this proposal. The small MSE value of 0.85 obtained indicates a high degree of reliability for the recovered signal and therefore for the optical communication system. The main novelty of this work was the use of an FPGA to process the information to be transmitted since it allows an easy processing and modification of the data by changing lines of code. This last, avoid to make changes to the hardware or physical equipment. The main technical limitation was the experimental measure of the eye diagram due to the lack of an oscilloscope with the capability to measure this parameter. However, this technical limitation was solved by using MATLAB software. Finally, as was indicated at the beginning of this article, this proposal has potential applications to connect short links in data centers.

ACKNOWLEDGMENT

R. Cuevas-Terrones, B. Tshibangu-Mbuebue and I. S. Castillo-García wish to thank the Mexican Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) for the Ph.D. scholarship numbers 679055, 846218 and 905894, respectively.

REFERENCES

- [1] K. Zhong, X. Zhou, J. Huo, C. Yu, C. Lu and A. P. T. Lau, "Digital Signal Processing for Short-Reach Optical Communications: A Review of Current Technologies and Future Trends," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 377-400, 15 Jan. 2018, doi: [10.1109/JLT.2018.2793881](https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2793881)
- [2] K. Moschopoulos, M. Nazarathy and I. Tomkos, "Controller for all-optical low power/cost coherent receiver used in short-reach systems," 2022 13th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Porto, Portugal, 2022, pp. 568-573, doi: [10.1109/CSNDSP54353.2022.9907948](https://doi.org/10.1109/CSNDSP54353.2022.9907948).
- [3] S. Esteves, J. Rebola and P. Santana, "Deep learning for BER prediction in optical connections impaired by inter-core crosstalk," 2022 13th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Porto, Portugal, 2022, pp. 440-445, doi: [10.1109/CSNDSP54353.2022.9908035](https://doi.org/10.1109/CSNDSP54353.2022.9908035).
- [4] Z. Xu, S. Dong, J. H. Manton and W. Shieh, "Low-Complexity Multi-Task Learning Aided Neural Networks for Equalization in Short-Reach Optical Interconnects," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 45-54, Jan. 1, 2022, doi: [10.1109/JLT.2021.3117687](https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3117687).

- [5] J. Singh, A. Sandmann, A. Ahrens, S. Lochmann and C. B. Pece, "Geometric Constellation Shaping with Pulse Amplitude Modulation in Short Reach Optical Links," 2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), Riga, Latvia, 2021, pp. 143-148, doi: [10.1109/MTTW53539.2021.9607124](https://doi.org/10.1109/MTTW53539.2021.9607124).
- [6] C. Williams, D. Abdelrahman, X. Jia, A. I. Abbas, O. Liboiron-Ladouceur and G. E. R. Cowan, "Reconfiguration in Source-Synchronous Receivers for Short-Reach Parallel Optical Links," in IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 27, no. 7, pp. 1548-1560, July 2019, doi: [10.1109/TVLSI.2019.2902503](https://doi.org/10.1109/TVLSI.2019.2902503).
- [7] Rapid Tables (Ascii Text to Binary Converter). Available at <https://www.rapidtables.com/convert/number/ascii-to-binary.html>
- [8] I. E. Zaldívar-Huerta, A. García-Juárez, J. Rodríguez-Asomoza, and G. Aguayo-Rodríguez, "A software tool to evaluate the frequency response of a microwave photonic filter in MATLAB based on a Graphical User Interface," *Optik*, Volume 125, Issue 1, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.06.060>
- [9] J. G. Proakis, and D. G. Manolakis, *Digital signal processing*, 4th ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006.
- [10] D. Wang et al., "Comprehensive Eye Diagram Analysis: A Transfer Learning Approach," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1-19, Dec. 2019, Art no. 7205019, doi: [10.1109/JPHOT.2019.2947705](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2947705).

APPENDIX A

The VHDL code used to configure the FPGA consists of a main (structural) entity that integrates a frequency divider and a bit sequence generator, as is shown in Fig. A.1. The frequency divider receives an 100 MHz square wave supplied by the crystal oscillator of the development card. Also, detects the rising edges, and makes a count of them, supplying one pulse for every 9,999 rising edges. This generates a 5 MHz clock output signal, which is delivered to the bit sequence generator. The written message (information to be transmitted) is stored in the bit sequence generator, which in turn, releases a bit value (via BITSa output) for each received clock pulse.

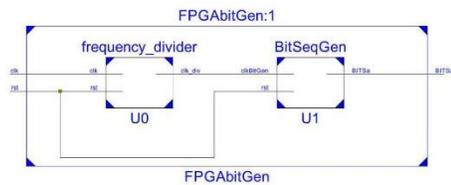


Fig. A.1. Block diagram corresponding to VHDL code.

The full VHDL code is listed in the following.

```

Main entity:
entity FPGAAbtGen is
port ( clk : in std_logic;
      rst : in std_logic;
      BITSa : inout std_logic);
end FPGAAbtGen;
architecture structural of FPGAAbtGen is
component frequency_divider is
port ( clk,rst: in std_logic;
      clk_div: inout std_logic);
end component;
begin

```

```

end component;
component BitSeqGen is
port( rst: in std_logic;
      clkBitGen: in std_logic;
      BITSa: inout std_logic);
end component;
signal SigBitGen: std_logic;
begin
U0: frequency_divider port map (clk=>clk, rst=>rst,
      clk_div=>SigBitGen);
U1: BitSeqGen port map (BITSa=>BITSa,
      clkBitGen=>SigBitGen, rst=>rst);
end structural;

```

```

Frequency divider:
entity frequency_divider is
port ( clk,rst: in std_logic;
      clk_div: inout std_logic);
end frequency_divider;
architecture Behavioral of frequency_divider is
signal i_cuenta: integer;
signal i_clk: std_logic;
begin
process(rst,clk)
begin
if(rst='1')then
i_cuenta<=0;
elsif(rising_edge(clk))then
if(i_cuenta=9999)then
i_cuenta<=0;
i_clk<='1';
else
i_cuenta<=i_cuenta+1;
i_clk<='0';
end if;
end if;
end process;
process(rst,i_clk)
begin
if(rst='1')then
clk_div<='0';
elsif(rising_edge(i_clk))then
clk_div<=not clk_div;
end if;
end process;
end Behavioral;

```

```

Bit sequence generator:
entity BitSeqGen is
port( rst: in std_logic;
      clkBitGen: in std_logic;
      BITSa: inout std_logic);
end BitSeqGen;
architecture Behavioral of BitSeqGen is
constant BitNum : natural := 87; -- Total bits - 1
signal i: integer range 0 to BitNum:=0;
signal VECin: std_logic_vector(0 to
BitNum):="010010000110010101101100011011000110111
10010000001110111011011101110010011011000110010
0"; --Text:"Hello world" - 88 bits

```

```
begin
process (clkBitGen)
begin
if rst='1' then
i<=0;
elsif clkBitGen'event and clkBitGen='1' then
BITSa <=VECin(i);
if i<BitNum then
i <= i+1;
else i<=0;
end if;
end if;
end process;
end Behavioral;
```