

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**REDES DE ACCESO ÓPTICAS: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y
COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS**

**ANÁLISIS DE LA CONVERGENCIA DE SERVICIOS EN UNA RED
DE ACCESO ÓPTICA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

DAVID ISMAEL MOSQUERA ALVAREZ
david.mosquera01@epn.edu.ec

DIRECTOR: PHD. CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA
christian.tipantuna@epn.edu.ec

DMQ, abril 2024

CERTIFICACIONES

Yo, David Ismael Mosquera Alvarez declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

DAVID ISMAEL MOSQUERA ALVAREZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por David Ismael Mosquera Alvarez, bajo mi supervisión.

PHD. CHRISTIAN JOSE TIPANTUÑA TENELEMA
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DAVID ISMAEL MOSQUERA ALVAREZ

ING. CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA, PHD.

ING. JOHANNA BERENICE ARGUERO TELLO, MSC.

DEDICATORIA

Dedico y agradezco a Dios por este trabajo, por entregarme la sabiduría e inteligencia para sobresalir ante cualquier obstáculo y prueba que se me presente, no solo ahora, si no en toda mi carrera y colmarme de bendiciones. Dedico este titulo a mi madre que sin su ayuda, apoyo, ejemplo y enseñanza no hubiera logrado alcanzar mis metas. Y, en general a las personas que siempre han estado a mi lado inculcándome enseñanzas de vida, desde familiares hasta amigos, Dios los bendiga a todos.

David Ismael Mosquera Alvarez

AGRADECIMIENTO

En principal agradezco a Dios por su amor y bendición al entregarme las fuerzas para seguir luchando frente cualquier adversidad, y ponerme en el lugar donde estoy ahora, toda gracia y honra hacia Dios.

Agradezco a mi familia por apoyarme siempre que lo necesitaba, por darme ese empujón de animo y aliento para salir ante todo problema y dificultad. A mi madre Patty, a mi hermano Andres, a mis abuelitos Jose y Angelita, a mi padre Santiago por estar presentes en cada lucha, en cada enseñanza y en cada caída para levantarme y no dejar que me rindiera.

A mis amigos que a lo largo de mi carrera universitaria y académica han estado para mi, con su apoyo hombro a hombro impulsándome siempre a mejorar y no desmayar. Gracias por su amistad que han marcado en mi vida.

Finalmente, agradezco a los profesores de la EPN por que con su enseñanzas marcaron mi vida universitaria, muy aparte del aspecto académico aprendí mucho de cada uno, aprendizaje que lo inculcaré también a mis generaciones posteriores, y en especial agradezco a PhD. Christian Tipantuña y MSc. Berenice Arguero por su paciencia y apoyo que me entregaron a través de este proyecto. Gracias

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Convergencia de servicios	3
1.4.2 Tecnología LTE	7
1.4.3 Redes móviles 5G	12
2 METODOLOGÍA	17
2.1 Análisis de requerimientos	18
2.2 Ambientes de simulación	19
2.3 Diseño y simulación de la red	20
2.3.1 Selección de parámetros UFMC	20
2.3.2 Selección de parámetros LTE	26
2.3.3 Creación del canal RoF	31
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
3.1 Resultados	38
3.1.1 Configuración parámetros para la co-simulación	39
3.1.2 Resultados obtenidos del envío por independiente de las señales sobre el canal RoF	40
3.1.3 Resultados obtenidos del envío en convergencia de ambas señales por el canal RoF	45
3.2 Conclusiones	51

3.3 Recomendaciones	52
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
5 ANEXOS	I

RESUMEN

Las comunicaciones y redes celulares han evolucionado con el tiempo, experimentando un notable aumento en el ancho de banda y buscando constantemente mejorar y mantener beneficios, superando desventajas inherentes. A lo largo de las generaciones, estas mejoras han introducido significativas características y funcionalidades, aunque también se han eliminado aspectos de generaciones anteriores. En respuesta a esta dinámica evolutiva, surge la necesidad de realizar el envío simultáneo de señales de diferentes generaciones por el mismo canal, buscando así una convergencia eficiente. El presente trabajo de integración curricular materializa esta necesidad mediante la implementación práctica en Matlab y OptSim, enfocándose en la transmisión de señales UFMC y LTE a través de un canal RoF. El propósito es observar, mediante métricas analíticas como BER y EVM en relación con la potencia óptica en recepción, la optimización del uso del canal mediante la separación de ambas señales en el dominio de la frecuencia. Las pruebas realizadas inicialmente, que consistieron en el envío independiente de las señales, establecieron un punto de referencia para contrastar los resultados obtenidos al enviar las señales de manera simultánea por el mismo canal. Los hallazgos confirmaron que UFMC cede potencia a LTE, revelando que los niveles en los que UFMC presenta un BER de 10^{-3} son de $-30.987[dBm]$, mientras que para LTE son de $-26.987[dBm]$. Estos resultados, respaldados por simulaciones, presentan perspectivas sólidas para su implementación efectiva en las redes de comunicación contemporáneas.

PALABRAS CLAVE: Matlab, OptSim, convergencia, UFMC, LTE.

ABSTRACT

Cellular networks have evolved, experiencing a remarkable increase in bandwidth and constantly seeking to improve and maintain benefits while overcoming inherent disadvantages. Over the generations, these improvements have introduced significant features and functionalities, although aspects of previous generations have also been eliminated. In response to this evolutionary dynamic, the need arises to simultaneously send signals from different generations over the same channel, thus seeking efficient convergence. This curricular integration work materializes this need through a practical implementation in Matlab and OptSim, focusing on transmitting UFMC and LTE signals through a RoF channel. The purpose is to observe, through analytical metrics such as BER and EVM with the optical power in reception, the optimization of the use of the channel by separating both signals in the frequency domain. The initial tests, which consisted of sending the signals independently, established a benchmark to contrast the results obtained by sending the signals simultaneously over the same channel. The findings confirmed that UFMC yields power to LTE, revealing that the levels at which UFMC exhibits a BER of 10^{-3} are $-30.987[dBm]$, while for LTE they are $-26.987[dBm]$. These results, supported by simulations, present solid prospects for practical implementation in contemporary communication networks.

KEYWORDS: Matlab, OptSim, convergence, UFMC, LTE.

1 INTRODUCCIÓN

El rápido avance en las tecnologías de la comunicación han revolucionado la forma en que nos conectamos e interactuamos en la era digital actual. En este contexto, las redes de acceso óptico desempeñan un fundamental papel a la hora de proporcionar una conectividad fiable y de alta velocidad a los usuarios finales. Sin embargo, a medida que sigue creciendo la demanda de diversos servicios, como la tecnología móvil de evolución a largo plazo (LTE: Long Term Evolution) y 5G, surge la necesidad de convergencia en las redes de acceso óptico. La convergencia de servicios se refiere a la integración sin fisuras de múltiples servicios de comunicación a través de una infraestructura común, lo que permite una utilización eficiente de los recursos de red y mejores experiencias de usuario. La convergencia de servicios puede ser una tarea compleja, ya que los distintos servicios tienen requisitos diferentes en cuanto a ancho de banda, latencia y fluctuación. Otro reto es la necesidad de garantizar que la red óptica pasiva (PON: Passive Optical Network) pueda actualizarse de forma fácil y rentable para soportar nuevos servicios a medida que estén disponibles. Esto es importante en el contexto de la quinta generación celular, que se espera que requiera mucho más ancho de banda que las generaciones anteriores de redes móviles [1] [2].

Para explorar la convergencia de servicios en una red de acceso óptico, es esencial examinar los antecedentes teóricos de las tecnologías pertinentes. Esto incluye una revisión de las redes móviles LTE y 5G, ampliamente utilizadas para las comunicaciones inalámbricas, así como de las formas de onda usando la técnica de modulación multiportadora filtrada de manera universal (UFMC: Universal Filtered Multi-Carrier), que ofrecen una mayor eficiencia espectral. Además, es crucial comprender las arquitecturas de radio sobre fibra (RoF: Radio over Fiber) y las redes PON, ya que proporcionan la infraestructura para transmitir y distribuir señales en redes de acceso óptico [2].

Partiendo de la base teórica, el presente trabajo de integración curricular tiene por objetivo principal realizar un análisis a través de simulación de la convergencia de servicios en un ambiente PON. En este contexto, se procede con el diseño de un enlace óptico back-to-back para establecer una conexión fronthaul capaz de transmitir y recibir señales UFMC y LTE. Este enlace servirá como componente clave en la convergencia de servicios dentro de la red de acceso óptico. Además, utilizando el software Matlab, se generarán señales de forma de onda UFMC y LTE para simular escenarios de transmisión realistas sobre la red PON diseñada. La integración de la transmisión de señales LTE y UFMC con la red PON se realizará a través de un entorno de co-simulación, combinando las herramientas Optsim

y Matlab. Finalmente, se analiza el rendimiento de la transmisión de la señal, considerando variaciones en los parámetros de transmisión. Este análisis se basa en métricas clave como la tasa de error binario (BER: Bit Error Rate), la relación señal ruido (SNR: Signal-to-Noise Ratio), la magnitud de vector de error (EVM: Error Vector Magnitude) y la interferencia entre señales [3].

Este trabajo de integración curricular se enfoca en investigar la convergencia de servicios en una red de acceso óptico con el propósito de comprender y mejorar la eficiencia en el uso de recursos de ancho de banda y la calidad de los servicios. Los resultados de esta investigación pretenden contribuir a la optimización de las redes de acceso óptico, satisfaciendo la creciente demanda de servicios de comunicación diversificados y de alta calidad. En última instancia, esto se traducirá en una mejor experiencia para los usuarios en el entorno digital.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la convergencia de servicios en una red de acceso óptica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar el fundamento teórico sobre LTE, red móvil 5G, formas de onda UFMC, RoF, redes PON y convergencia de servicios.
2. Diseñar un enlace back-to-back óptico que funcionará como enlace de fronthaul para la transmisión y recepción simultánea de señales UFMC y LTE.
3. Generar señales de forma de onda UFMC y LTE en el software de Matlab para transmitir sobre la red PON diseñada.
4. Integrar la transmisión de señales LTE y UFMC con la red PON diseñada en un ambiente de co-simulación compuesto por Optsim y Matlab.
5. Analizar el desempeño de la transmisión de señales (convergencia) considerando variación de parámetros de transmisión y en base a métricas como BER y EVM.

1.3 ALCANCE

El objetivo principal del presente trabajo de integración curricular es el análisis de la convergencia de servicios en una red PON considerando la transmisión simultánea de señales UFMC y LTE. Inicialmente se partirá con una revisión teórica general de la tecnología móvil LTE, 5G en particular de la forma de onda UFMC, de la tecnología de RoF, de las redes PON y de la convergencia de servicios [4] [5]. Adicionalmente, se incorporará conceptuali-

zaciones de métricas como el ancho de banda transmitido, BER y EVM.

Posteriormente se procederá con el aparatado de diseño de la red PON sobre la cual se transmitirán las señales UFMC y LTE. Para el diseño de la red PON se empleará el software Optsim, mismo que permite simular todos los componentes de la red incluida la fibra. Así también se generarán las señales UFMC y LTE en el software Matlab [6]. Tanto las señales como la red se integrarán en un ambiente de co-simulación integrado por Optsim y Matlab. Con el sistema de RoF implementado se procederá a realizar variación de parámetros de transmisión y verificar el funcionamiento en base a las métricas BER, SNR y EVM. Otro aspecto importante por evaluar en la transmisión simultánea de señales en la red PON es el ancho de banda de las señales transmitidas y la separación de los espectros [4].

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 CONVERGENCIA DE SERVICIOS

La convergencia de servicios se define como la integración de diferentes tipos de servicios en una única red o plataforma. Puede hacerse utilizando una infraestructura común para prestar múltiples servicios o combinando diferentes servicios en una oferta única como se muestra en la Figura 1.1 . La convergencia de servicios está impulsada por varios factores, como la creciente demanda de servicios intensivos en ancho de banda, la necesidad de reducir costes y el deseo de ofrecer una experiencia de usuario más fluida [7].



Figura 1.1: Abstracción sobre la convergencia de servicios y tecnologías en la última década, basado en [8].

Ventajas

- ❑ **Mejora del rendimiento:** Se proporciona un uso más eficiente de los recursos en una red determinada.
- ❑ **Mayor seguridad:** Se garantiza un enfoque más unificado de la gestión de la seguridad en la jerarquización de servicios.
- ❑ **Reducción de costes:** Al eliminar la necesidad de construir y mantener múltiples redes debido a la integración de servicios puede ayudar a reducir costes de servicio y operación.
- ❑ **Mejora de la experiencia del usuario:** Se oferta una forma más fluida de acceder a múltiples servicios de manera simultánea o por acceso controlado.

La convergencia de servicios es una tendencia en rápida evolución que está teniendo un gran impacto en la industria de las telecomunicaciones. A medida que siga creciendo la demanda de servicios intensivos en ancho de banda, siendo cada vez más significativa para satisfacer las necesidades de los usuarios [9].

1.4.1.1 Conceptualización de la convergencia de servicios

La conceptualización de convergencia de servicios se refiere a la integración y fusión de diferentes tipos de servicios en una oferta unificada. Implica reunir múltiples servicios que tradicionalmente se prestaban por separado, combinar sus funcionalidades y ofrecerlos como una solución global [10].

La convergencia de servicios está impulsada por los avances tecnológicos y la constante demanda creciente de experiencias integradas y sin fisuras. Hace provecho de diversas tecnologías existentes, como las telecomunicaciones, las tecnologías de la información e Internet, para hacer converger diferentes servicios en una única plataforma, sistema o red. Un ejemplo de convergencia de servicios se observa en el área de las telecomunicaciones. En el pasado, las llamadas de voz, la mensajería y el acceso a Internet se prestaban por separado a través de redes y dispositivos diferentes. Sin embargo, con la llegada de los smartphones y las tecnologías de red avanzadas, estos servicios han convergido en un único dispositivo y plataforma. Los usuarios pueden ahora acceder a llamadas de voz, videollamadas, mensajería, navegación por Internet, servicios multimedia, entre otros, a través de sus teléfonos inteligentes, eliminando la necesidad de múltiples dispositivos y suscripciones separadas.

Aunque la convergencia de servicios también presenta inconvenientes, sobre todo en cuestiones de interoperabilidad, seguridad y privacidad. La integración de diversos servicios y tecnologías requiere protocolos normalizados y una conectividad fluida. Además, a medida que los servicios están más interconectados, se requieren fuertes medidas de seguridad para salvaguardar la información y la privacidad de los usuarios [11].

En general, la convergencia de servicios es una idea que cambia el paradigma y une varios servicios, tecnologías e industrias para producir soluciones integradas y globales. Tiene la capacidad de mejorar la experiencia del usuario, estimular la innovación y cambiar varios sectores económicos [12].

1.4.1.2 Tecnologías habilitadoras de la convergencia de servicios

Hay una serie de tecnologías que están permitiendo la convergencia de servicios hoy en día. Entre ellas figuran las siguientes:

- ❑ **Fibra óptica:** Medio de gran ancho de banda y bajas pérdidas que puede utilizarse para transmitir una amplia gama de servicios, como voz, vídeo y datos.
- ❑ **Redes definidas por software:** Se refiere a la arquitectura de red que desacopla el plano de datos del plano de control. Esto permite una gestión más flexible y eficiente de la red, que puede utilizarse para apoyar la convergencia de servicios.
- ❑ **Virtualización de funciones de red:** Tecnología que permite virtualizar las funciones de red y ejecutarlas en servidores de uso general. Esto puede ayudar a reducir costes y mejorar la agilidad, lo que puede ser beneficioso para la convergencia de servicios.

Las tecnologías facilitadoras están impulsando la convergencia de diferentes servicios, lo que está generando nuevas oportunidades para empresas y consumidores. Dichas tecnologías se observan en la Figura 1.2. Es así que, las empresas pueden utilizar los servicios convergentes para mejorar la colaboración y la comunicación, mientras que los consumidores pueden utilizarlos para acceder a una gama más amplia de contenidos y servicios [13]. Además de las tecnologías de fibra óptica, redes definidas por software y la virtualización de funciones de red, se tiene las siguientes:

- ❑ **La computación en nube:** Oferta una plataforma escalable y rentable para la prestación de servicios convergentes.

- ❑ **Los macrodatos:** El análisis de macrodatos^[1] puede utilizarse para mejorar el rendimiento y la personalización de los servicios convergentes.
- ❑ **Inteligencia artificial:** Herramienta que se puede utilizar para automatizar tareas y crear nuevos servicios que antes no eran posibles.

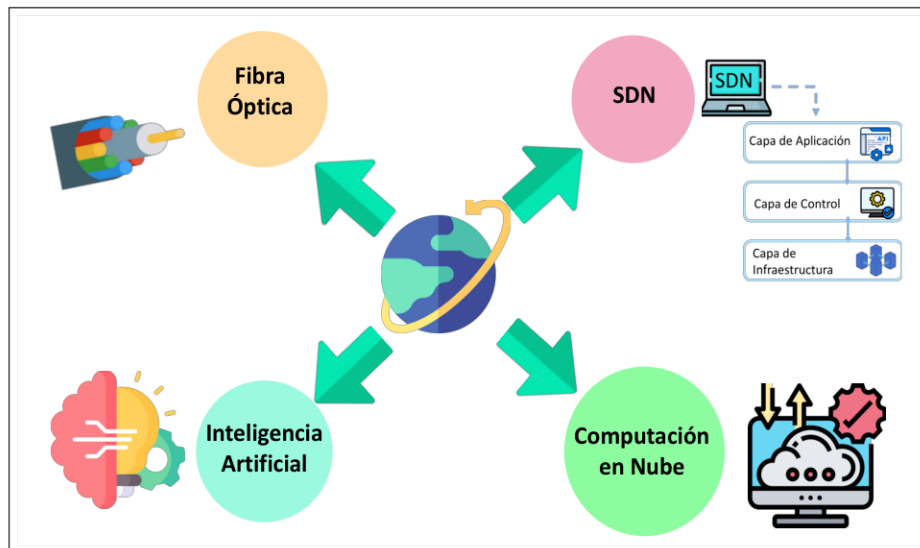


Figura 1.2: Tecnologías habilitadoras de la convergencia de servicios en la última década, basado en [13].

1.4.1.3 Tendencias y evolución en una red de acceso

La convergencia de servicios es una tendencia en rápida evolución. La creciente demanda de servicios intensivos en ancho de banda, la necesidad de reducir costes y el deseo de ofrecer una experiencia de usuario más fluida están impulsando la adopción de la convergencia de servicios [12]. Algunas de las tendencias clave de la convergencia de servicios se muestran en la siguiente lista:

- ❑ **La convergencia de las redes fijas y móviles:** Ambos tipos de redes se utilizan cada vez más para prestar una amplia gama de servicios. Esto, impulsado por la creciente demanda de datos de alta velocidad, así como por la necesidad de ofrecer una experiencia de usuario más fluida.
- ❑ **Convergencia de voz, vídeo y datos:** Cada vez más, los servicios se prestan a través de redes IP, lo que se combina con una creciente demanda de servicios multimedia

^[1] **Macrodatos:** Son datos sobre agregados, como la economía, la población o una industria concreta. Suelen proceder de organismos públicos o empresas privadas. Los macrodatos pueden utilizarse para hacer previsiones sobre tendencias futuras [14].

y la necesidad imperante de reducir costos. Planteando desafíos significantes en el ámbito de las telecomunicaciones.

- ❑ **Convergencia de servicios y aplicaciones:** Se están desarrollando nuevos servicios que combinan múltiples características y funciones. Esto, impulsado por la creciente demanda de servicios más sofisticados, como lo es la conexión entre redes móviles de alta velocidad en las denominadas conexiones de backhaul, combinación de redes celulares con redes WiFi mejorando la experiencia del usuario mediante una mayor visibilidad y una mejor gestión de la transición y el uso de tecnología Cloud RAN que se utiliza como medio de conexión entre elementos de la arquitectura de la red [15].

1.4.1.4 Integración de servicios en una red de acceso

La convergencia de servicios implica integrar múltiples servicios en una única red de acceso, ya sea mediante una infraestructura compartida o combinando servicios en una oferta única [16]. La integración de servicios en una misma red de acceso plantea una serie de retos:

- ❑ **Heterogeneidad de los servicios:** Los servicios que deben integrarse pueden ser heterogéneos, lo que significa que tienen requisitos diferentes en cuanto se refiere a ancho de banda, latencia y calidad de servicio.
- ❑ **Heterogeneidad de las redes:** Las redes que deben integrarse pueden ser heterogéneas, es decir, utilizar tecnologías y topologías diferentes.
- ❑ **Heterogeneidad de los dispositivos:** Los dispositivos que deben integrarse pueden ser heterogéneos, es decir, utilizar sistemas operativos y capacidades diferentes.

En conclusión, la convergencia de servicios, impulsada por múltiples factores, promete reducir costos, mejorar el rendimiento y la seguridad, y optimizar la experiencia del usuario. Esto permite la creación de sistemas que integran dos o más servicios, incluso transmitiendo dos tipos de señales por un mismo enlace. El objetivo es enviar la forma de onda UFMC y una señal LTE para poner a prueba la convergencia frente al envío independiente de ambas señales.

1.4.2 TECNOLOGÍA LTE

LTE es una tecnología de telecomunicaciones móviles de cuarta generación (4G) que se lanzó por primera vez en 2009. LTE está diseñada para ofrecer mayores velocidades de transmisión de datos y menor latencia que las tecnologías móviles anteriores, como 3G.

LTE también está diseñada para ser más eficiente energéticamente, lo que puede ayudar a prolongar la duración de la batería en los dispositivos móviles [17]. Además, utiliza una serie de nuevas tecnologías para alcanzar sus objetivos de rendimiento, entre ellas:

- ❑ **Acceso múltiple por división ortogonal de frecuencias (OFDM: Ortogonal Frequency Division Multiplexing):** Técnica de modulación, la cual permite a varios usuarios compartir el mismo espectro radioeléctrico. Esto puede ayudar a mejorar la eficiencia de dicha red y aumentar la capacidad de tráfico de datos.
- ❑ **Entrada múltiple, salida múltiple (MIMO: Multiple Input Multiple Output):** Es una técnica que utiliza varias antenas para transmitir y recibir datos. Esto puede ayudar a mejorar el rendimiento de la red aumentando la velocidad de transmisión de datos y reduciendo la latencia.
- ❑ **Acceso a paquetes de alta velocidad:** Tecnología utilizada para mejorar la velocidad de transmisión de datos de las redes 3G. LTE puede utilizar el acceso a paquetes de alta velocidad para ofrecer compatibilidad con dispositivos 3G.

LTE ha sido ampliamente adoptada por operadores móviles de todo el mundo. Se espera que LTE siga siendo la tecnología móvil dominante en un futuro previsible a nivel global. Se tiene varias ventajas:

Ventajas

- ❑ LTE puede proporcionar velocidades de datos de hasta 100 [Mbps], lo que es significativamente más rápido que 3G, la cual abarca una velocidad de descarga alrededor de 2 [Mbps] [18].
- ❑ LTE tiene una latencia entre 30 a 50 milisegundos, mucho menor que 3G, tecnología la cual oscila entre 100 a 500 milisegundos [18].
- ❑ LTE es más eficiente energética mente que 3G, en contraste 80 % a 60 %, lo que puede ayudar a prolongar la duración de la batería en los dispositivos móviles.
- ❑ LTE tiene una cobertura más amplia que 3G, existiendo en más áreas rurales lo que significa que los usuarios pueden acceder a la red en más lugares. Sin embargo, la cobertura rural puede seguir siendo limitada en algunas zonas.

LTE es un gran avance tecnológico que ha revolucionado el sector de las telecomunicaciones móviles [17]. LTE ha hecho posible que los usuarios accedan a datos de alta velocidad

en sus dispositivos móviles teniendo un aumento a 100 [Mbps] para usuarios móviles y hasta 1 [Gbps] para usuarios fijos, aumentando en casi 100 veces que la antigua generación 3G . Esto ha contribuido a que los dispositivos móviles sean más ubicuos^[2].

1.4.2.1 Arquitectura de LTE

La arquitectura LTE se divide en dos partes: i) la red de acceso radioeléctrico (RAN: Radio Acces Network) y ii) el núcleo de paquetes evolucionado (EPC: Evolved Packet Core). La RAN se encarga de transmitir y recibir datos entre los dispositivos móviles y el EPC. A su vez, se divide en dos partes: i) el Nodo evolucionado B (eNodeB: E-UTRAN Node B) y ii) el equipo de usuario (UE: User Equipment). El eNodeB es la estación base que se comunica con el UE. El UE es el dispositivo móvil que se comunica con el eNodeB. El EPC es la red central que proporciona las funciones de control y gestión de la red LTE. Se compone de varios nodos, como la entidad de gestión de la movilidad, la pasarela de servicios y la pasarela de la red de paquetes de datos. La arquitectura de una red LTE se observa en la Figura 1.3 La arquitectura LTE está diseñada para ser flexible y escalable, de modo que pueda adaptarse fácilmente a las necesidades cambiantes de usuarios y empresas [19]. LTE exhibe una serie de características que la consolidan como una red altamente eficiente. Entre ellas, se incluye la expansión del radio de celda, la implementación de tecnología MIMO, y la agregación de portadoras, lo que habilita la utilización de un solo canal físico para aumentar tanto el ancho de banda efectivo como la velocidad de transferencia de datos. Además, LTE es capaz de respaldar una variada gama de servicios, abarcando desde comunicación de voz hasta transmisión de datos y vídeo. Estas son algunas de las características clave de la arquitectura LTE:

- ❑ **Red basada en IP:** LTE es una red basada en IP, lo que significa que todos los datos se transmiten por IP. Esto facilita la gestión y el control de la red y permite ofrecer una gama más amplia de servicios.
- ❑ **Acceso múltiple por división ortogonal de frecuencias:** Divide el espectro disponible en varios canales más pequeños, que se asignan a distintos usuarios. Esto permite a LTE admitir un gran número de usuarios simultáneamente.

^[2] **Ubicuo:** Término que hace referencia a la existencia permanente de una tecnología en en varios lugares al mismo tiempo, permitiendo así la conexión constante entre dispositivos y personas.

- ❑ **Agregación de portadoras:** LTE admite la agregación de portadoras, que permite agregar varias portadoras LTE para ofrecer velocidades de datos más altas.

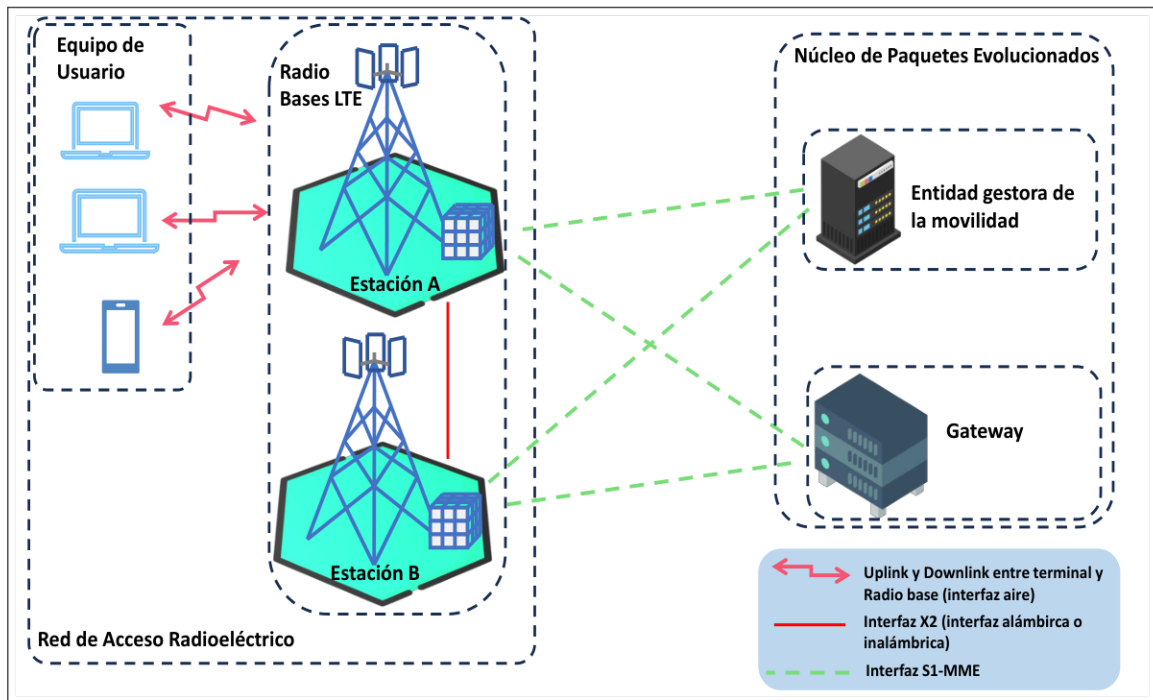


Figura 1.3: Arquitectura de una red de acceso usando como base un sistema LTE, basada en [17].

1.4.2.2 Modos de operación de LTE

LTE funciona en varios modos para adaptarse a diferentes escenarios y requisitos. A continuación, se explican tres modos de funcionamiento de LTE:

- ❑ **Duplexación por División de Frecuencia (FDD: Frequency Division Duplexing):** En el modo FDD, las transmisiones de enlace ascendente (UL: Uplink) y descendente (DL: DownLink) tienen lugar en bandas de frecuencia distintas. La comunicación full-duplex es posible gracias a las capacidades de transmisión y recepción simultáneas de este modo. Los canales UL y DL se dividen en bandas de frecuencia emparejadas, donde las transmisiones UL y DL tienen lugar simultáneamente, pero en frecuencias distintas. FDD ofrece capacidad UL y DL simétrica y se utiliza con frecuencia en despliegues LTE [20].
- ❑ **Duplexación por División en el Tiempo (TDD: Time Division Duplexing):** TDD emplea la misma banda de frecuencia para las transmisiones UL y DL, a diferencia de FDD. TDD divide el periodo en franjas horarias discretas para la transmisión UL y DL en lugar de dividir la banda de frecuencia. TDD permite la asignación dinámica de franjas horarias en función de las demandas de tráfico, lo que permite una gestión

flexible de la capacidad UL y DL [20].

- ❑ **Duplexación por División de Frecuencia Semidúplex (HDFDD: Half Duplex Frequency Division Duplexing):** Esta variación del modo FDD permite capacidades UL y DL asimétricas. Permite el uso de la misma banda de frecuencia para la transmisión UL y DL, pero no al mismo tiempo. Al igual que en TDD, las transmisiones UL y DL se alternan en el tiempo. HDFDD, a diferencia de TDD, tiene distintos periodos de tiempo para la transmisión UL y DL. Este modo permite un uso más flexible del espectro disponible, aumentando la capacidad en una dirección sea DL o UL y reduciéndola en la otra correspondientemente [20].

Los modos de funcionamiento FDD, TDD y HDFDD aportan flexibilidad y adaptación a las distintas necesidades de la red LTE. FDD garantiza una separación de transmisión UL y DL distinta, TDD ofrece una asignación dinámica de franjas horarias y HDFDD permite una capacidad UL y DL asimétrica. Para maximizar la eficacia y el rendimiento de sus redes LTE, los operadores de red pueden seleccionar el modo adecuado en función de variables como los patrones de tráfico, la disponibilidad de espectro y las condiciones de despliegue [21].

1.4.2.3 Servicios y aplicaciones habilitadas por LTE

LTE puede utilizarse para soportar una amplia gama de servicios y aplicaciones, entre los que se incluyen los mostrados en la Figura 1.4

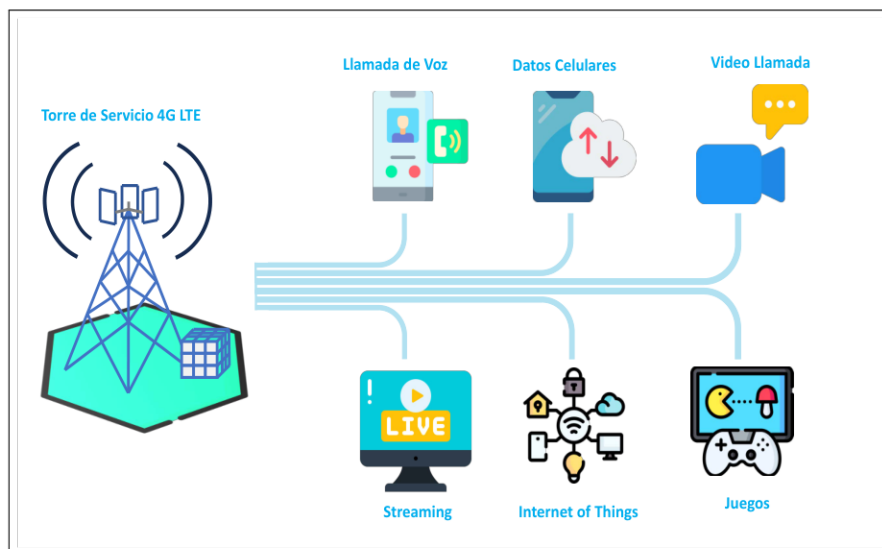


Figura 1.4: Servicios y aplicaciones habilitadas por LTE, basado en [22] [23].

1.4.3 REDES MÓVILES 5G

5G es la quinta generación de tecnología de redes celulares. Está diseñada para proporcionar velocidades de datos significativamente más altas, menor latencia y mejor eficiencia energética que las generaciones anteriores de redes celulares. Se espera que la 5G se utilice para dar soporte a una amplia gama de nuevas aplicaciones, como la realidad aumentada, la realidad virtual y los coches auto conducidos [24].

1.4.3.1 Características y beneficios de las redes móviles 5G frente a 4G

El contraste entre estas dos generaciones móviles se muestra en la Tabla 1.1

Tabla 1.1: Características y beneficios de las redes móviles 5G frente a 4G, basado en [24] y [25].

Características	5G	4G
Altas velocidades de datos	Proporciona velocidades de datos de hasta 10 [Gbps].	Ofrece velocidades de datos que varían desde los 10 [Mbps] hasta un máximo pico de 100 [Mbps].
Baja latencia	Presenta una latencia inferior a 5 milisegundos, lo que significa que la comunicación entre dispositivos es casi instantánea.	Tiene una latencia promedio de alrededor de 60 a 98 milisegundos, lo que implica una pequeña demora en la comunicación entre dispositivos.
Eficiencia energética	Beneficioso para los dispositivos finales, sin embargo para la red general se considera un aumento de hasta el 170 % en un par de años .	Para dispositivos finales en comparación con 5G se tiene un desgaste energético del 90 % por unidad de tráfico enviado y recibido.
Más capacidad	Puede soportar hasta 100 veces el número de dispositivos que usualmente 4G soportaría. Esto es importante para aplicaciones como el Internet de las Cosas (IOT: Internet of Things).	Puede resultar en congestión de la red en áreas densamente pobladas, es decir cuando el número de habitantes iguala o aumenta su máximo permitido por su área geográfica o en momentos de alta demanda de un servicio en específico, como voz o vídeo.

La convergencia de servicios, que involucra la integración de varios tipos de servicios en

una sola plataforma, es habilitada por la 5G debido a sus altas velocidades, baja latencia y gran capacidad. Por ejemplo, una plataforma única puede brindar servicios de voz, vídeo y datos de manera eficiente.

1.4.3.2 Formas de onda UFMC

Las formas de onda UFMC son un nuevo tipo de forma de onda que se está utilizando en las redes móviles 5G. Este tipo de onda están diseñadas para proporcionar altas velocidades de datos y baja latencia, en un orden de 10 a 1 en comparación a tecnologías y generaciones previas. Las formas de onda UFMC se basan en el uso de múltiples portadoras de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). La técnica OFDM es una técnica de modulación que divide el flujo de datos en varios flujos más pequeños, cada uno de los cuales se transmite en una portadora diferente. Esto permite un uso más eficiente del espectro y un mejor rendimiento en presencia de interferencias [26].

Tabla 1.2: Ventajas y limitaciones de las formas de onda UFMC, basado en [27] [28] [29].

Ventajas	Limitaciones
Mantiene una buena eficiencia espectral similar al uso de técnicas multiportadora de banco de filtros (FBMC: Filterbank Multicarrier), con mucho menos sobrecarga y fugas de banda como sucede con OFDM.	Complejidad de diseño de receptores ligada al hardware y a la sección electrónica de esta tecnología debido a la necesidad de brindar soporte para demodulación OFDM y FBMC.
Coexistencia con otras técnicas inalámbricas, como OFDM, FBMC y MIMO, debido a su amplio rango de frecuencias.	Relación pico-potencia media (PAPR: peak-to-average power ratio) mayor en comparación con técnicas y formas de onda usadas en LTE.
Asignación flexible de recurso con el filtrado por sub-bandas y con el envío de datos cortos, permitiendo a los operadores optimizar el uso de recursos del espectro para diversas aplicaciones.	Sensibilidad de errores de sincronización de tiempo y frecuencia e interferencia entre portadoras (ICI: Inter-carrier interference).

1.4.3.3 RoF

RoF es una tecnología que utiliza fibra óptica para transmitir señales de radio. RoF se utiliza en diversas aplicaciones, incluidas las redes móviles 5G [3]. Se esquematiza la arquitectura de una red RoF con los siguientes elementos:

- ❑ **Unidad de Antena Remota (RAU: Remote Antenna Unit):** La RAU es el componente de la red RoF encargado de transmitir y recibir señales de radio. Esta suele estar situada en el borde de la celda, donde se conecta al conjunto de antenas. También, convierte la señal de radio en una señal óptica y la transmite a través de una fibra óptica a la BBU.
- ❑ **Unidad de banda base centralizada (BBU: Centralized Baseband Unit):** La BBU es el componente de la red RoF responsable del procesamiento de las señales de radio. Se encuentra situada en un lugar central, como un centro de datos. La BBU recibe la señal óptica de la RAU y la convierte de nuevo en señal de radio. Luego, esta realiza tareas como la modulación, la demodulación y la asignación de recursos.
- ❑ **Fibra óptica:** La fibra óptica es el medio que transporta la señal óptica entre la RAU y la BBU. Esta puede ser monomodo o multimodo. La fibra óptica monomodo se utiliza normalmente para la transmisión a larga distancia, mientras que la multimodo se utiliza normalmente para la transmisión a corta distancia.

Además de esos elementos se encuentran los elementos intermedios como amplificadores, moduladores, circuladores, enfrentadores, fuentes de alimentación, entre otros. Las ventajas dominantes dentro de RoF frente a otros tipos de transmisión están ligadas a una mayor cobertura, debido a los enlaces de fibra, menor pérdida de señal, y una alta velocidad de transmisión de datos por su amplio ancho de banda, mayor cobertura, cubriendo distancias de alrededor de los 100 kilómetros [30]. Así también, los sistemas RoF se usan en diversos sistemas de comunicación inalámbrica, como:

- ❑ **Redes celulares:** Los sistemas RoF pueden utilizarse para redes celulares de backhaul. Esto significa que pueden utilizarse para transmitir señales entre estaciones base y la red central.
- ❑ **Banda ancha inalámbrica:** Los sistemas RoF pueden utilizarse para prestar servicios inalámbricos de banda ancha. Esto significa que pueden utilizarse para proporcionar acceso a Internet de alta velocidad, rodeando de 27.4 a 32 [Gbps], a hogares y empresas [31].
- ❑ **Comunicaciones de máquina a máquina (M2M: Machine to Machine):** Los sistemas RoF pueden utilizarse para comunicaciones M2M. Esto significa que pueden utilizarse para conectar a Internet dispositivos como sensores y actuadores.

La tecnología RoF es una tecnología prometedora para los futuros sistemas de comunicación inalámbrica. A medida que aumente la demanda de servicios inalámbricos, es probable que se generalice el uso de la tecnología RoF. Por otro lado, las limitaciones presentes en RoF están [32]:

- ❑ **Dispersión de la fibra:** La dispersión de la fibra es un fenómeno que hace que las distintas longitudes de onda de la luz de una señal óptica viajen a velocidades diferentes. Esto puede provocar la distorsión de la señal, lo que puede degradar el rendimiento del sistema RoF.
- ❑ **Limitaciones de potencia:** Los sistemas RoF suelen estar limitados por la cantidad de potencia que se puede transmitir a través de la fibra óptica, debido a que la fibra óptica sólo puede transmitir una determinada cantidad de potencia antes de empezar a degradarse.
- ❑ **Coste:** Estos sistemas pueden ser más caros que los sistemas tradicionales basados en cobre. Ya que la fibra óptica y los componentes ópticos suelen ser más caros que el cobre.
- ❑ **Complejidad:** Su complejidad radica en la instalación y mantenimiento de los sistemas tradicionales basados en cobre. Debido a que la fibra óptica es un medio más delicado que el cobre.

1.4.3.4 Redes Ópticas Pasivas

Las red PON son un tipo de red óptica que utiliza divisores ópticos pasivos para dividir la señal óptica del transmisor óptico en múltiples señales ópticas [33]. Estas redes se utilizan en diversas aplicaciones, incluidas las redes móviles 5G. La arquitectura de una PON se compone de las siguientes secciones:

- ❑ **Terminal de línea óptica (OLT: Optical Line Terminal):** El OLT es la unidad central de una red PON. Suele estar situada en una oficina central o en un centro de datos. La OLT se encarga de generar la señal óptica y de enviarla a las ONU. La OLT también es responsable de gestionar la red y de proporcionar servicios de seguridad.
- ❑ **Unidades ópticas de red (ONU: Optical Network Unit):** Las ONU son los terminales de usuario de una red PON. Suelen estar situados en las instalaciones del cliente. Se encargan de recibir la señal óptica de la OLT y de convertirla en señal eléctrica.

Los ONU también son responsables de proporcionar servicios al usuario final, como acceso a Internet, televisión y telefonía.

- ❑ **Red de distribución óptica (ODN: Optical Distribution Network):** La ODN es esencial en una PON. Enlaza varias ONU y varios OLT mediante fibras ópticas y componentes. La ODN consta de cinco segmentos y tiene un impacto significativo en el rendimiento de la PON, con un coste de construcción relativamente alto (50-70 %) debido a su topología punto a multipunto (P2MP) [34].

Las redes PON pueden ahorrar costes de instalación al compartir una sola fibra óptica entre varios usuarios. También tienen una gran escalabilidad para satisfacer la demanda de servicios de banda ancha. Sin embargo, la capacidad de carga y el ancho de banda total de los PON son limitados debido al uso compartido de la fibra óptica. Además, la complejidad de su diseño, instalación y gestión puede provocar problemas de rendimiento y escasa fiabilidad [33]. La arquitectura más simple de una red PON se muestra en la Figura 1.5

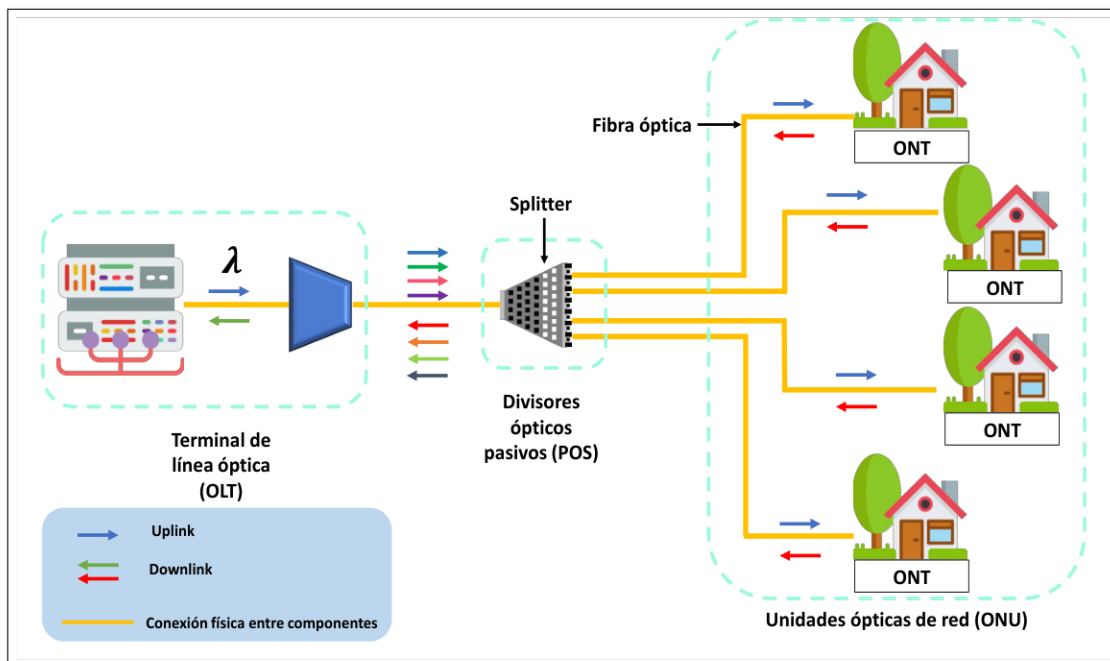


Figura 1.5: Arquitectura general de una red óptica pasiva, basada en [35].

2 METODOLOGÍA

En este capítulo, se detalla la metodología utilizada tanto para desarrollar las simulaciones de las formas de onda UFMC y LTE como para el sistema de comunicaciones RoF. La simulación se llevó a cabo utilizando las soluciones de software Matlab con su Communications Toolbox y OptSim en su versión 2020, mediante una co-simulación entre estas dos aplicaciones, estableciendo un enlace entre dos soluciones de software de simulación distintas, como Matlab y OptSim.

Al referirse a Matlab, se expone el funcionamiento de los bloques de código concebidos para cada módulo que constituye tanto el emisor como el receptor. Gracias al uso de la Communications Toolbox, se hace posible emplear diversas funciones que gestionan algoritmos predefinidos para llevar a cabo la modulación y demodulación de la señal de datos. De igual manera, mediante funciones propias de Matlab, se realizan diversas operaciones matemáticas, como IFFT/FFT, obtención de las partes real e imaginaria de un vector de datos, XOR (Exclusive OR) para la generación de la señal de sincronización, entre otras operaciones. Además, para analizar el rendimiento global del sistema, se desarrollaron otros scripts y funciones para examinar el BER y EVM. Por otro lado, en OptSim, se configura el canal de fibra óptica con sus respectivos componentes, incluyendo elementos de control como osciloscopios eléctricos y ópticos, así como el medidor de potencia óptica, para asegurar y verificar su correcto funcionamiento. La interacción entre Matlab y OptSim en la co-simulación se representa en la Figura 2.1, donde Matlab se destaca como la herramienta utilizada para el diseño, análisis y verificación del sistema UFMC y LTE. Esto se debe a que este software de simulación proporciona diversos algoritmos y funciones basadas en modelos matemáticos que facilitan la construcción de los bloques que componen tanto la transmisión como la recepción.

En específico, el primer bloque de la Figura 2.1 se refiere a la etapa de transmisión del sistema. Una vez configurados los parámetros para construir las señales UFMC y LTE, en Matlab se crean los bloques que componen el transmisor UFMC y LTE. Tras la generación de las señales de interés, se envían a OptSim mediante el enlace de co-simulación. Por otro lado, OptSim permite simular y analizar la propagación de una señal de radiofrecuencia en un sistema de comunicación óptico. En el segundo bloque de la Figura 2.1, se ilustra la implementación de un enlace de Modulación de Intensidad-Detección Directa (IM-DD). Este realiza la conversión eléctrico-óptica mediante un láser y un modulador Mach-Zehnder. La intensidad del láser modula la señal eléctrica, y en recepción, se emplea un foto-detector

para la conversión optoelectrónica. Los componentes que posibilitan esta implementación deben configurarse dentro del enlace óptico.

Finalmente, cuando las señales han recorrido completamente el canal óptico, llegan al receptor, tanto de la forma de onda UFMC como al receptor LTE. El proceso de recepción descrito en el tercer bloque de la Figura 2.1 se implementa en un script de Matlab que lleva a cabo la recepción y obtiene gráficos y tasas de control. Esta información facilita el análisis del rendimiento del enlace de fronthaul. Secciones posteriores proporcionarán detalles más precisos sobre la implementación de los scripts de Matlab y OptSim.

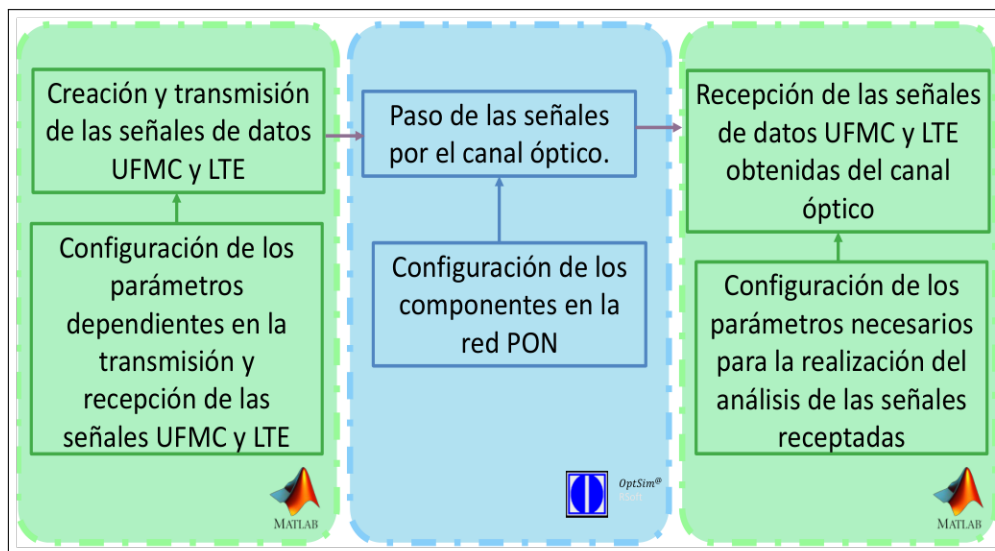


Figura 2.1: Diagrama de Procesos en la co-simulación entre Matlab y OptSim.

2.1 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Cumplir los estrictos requisitos establecidos por el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T: International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) es imprescindible para el éxito de las redes ópticas. El presente enlace óptico cumple dichas normas, con especial atención a las normas del UIT-T que rigen la arquitectura XGS-PON. Esto incluye una atención meticulosa a las longitudes de onda de funcionamiento, en las que se espera dentro de la gama establecida de 1550 [nm]. Esta elección se ajusta a las recomendaciones de la norma UIT-T G.987, lo que garantiza la compatibilidad con la infraestructura óptica existente y pérdidas por dispersión mínimas rodeando desde los 0.01 [dB] a los 0.05 [dB]. El cumplimiento de las normas UIT-T y la longitud de onda de funcionamiento, son elementos cruciales para lograr una red convergente capaz de soportar diversos servicios como UFMC y LTE simultáneamente.

La arquitectura XGS-PON (red óptica pasiva simétrica de 10 Gigabits), según las normas del UIT-T, representa un avance fundamental en las redes ópticas orientadas a la convergencia de servicios [36]. Se caracteriza por su capacidad para suministrar velocidades de datos simétricas de hasta 10 [Gbps] tanto en sentido ascendente como descendente, dando así cabida a las crecientes demandas de aplicaciones y servicios intensivos en ancho de banda. XGS-PON opera dentro de la ventana de longitudes de onda ópticas de 1575-1605 [nm], en línea con las recomendaciones UIT-T G.987, garantizando una interferencia mínima con la infraestructura óptica existente y facilitando una coexistencia eficiente con otros sistemas ópticos. Además, admite niveles de potencia óptica en el rango de -23 [dBm] a -29 [dBm], lo que la hace idónea para aplicaciones de largo alcance, como los suministros de servicios de banda ancha en áreas remotas y servicios IoT [37].

2.2 AMBIENTES DE SIMULACIÓN

Matlab es un entorno de simulación versátil y potente para el presente caso de estudio, que permite generar y analizar señales de redes celulares. Aprovechando su amplio conjunto de herramientas de procesamiento de señales y comunicaciones, Matlab facilita la creación y manipulación de formas de onda UFMC y LTE. La capacidad de Matlab para simular escenarios de señal complejos permite modelar las complejidades de los sistemas de comunicación celular. Así mismo Matlab proporciona una plataforma para el análisis exhaustivo de señales, permitiendo la evaluación del BER y los diagramas de constelación. Finalmente, la caracterización de Matlab implica la utilización de las capacidades de programación para desarrollar scripts y funciones personalizadas para la generación de señales, modulación y posterior análisis cuantitativo [38].

En el entorno de simulación OptSim, se amplía el estudio al dominio óptico, centrándose en los aspectos de transmisión y recepción de señales UFMC y LTE a través del enlace óptico. OptSim destaca en la simulación del comportamiento de los sistemas de comunicación óptica, teniendo en cuenta factores como la dispersión de la fibra, la amplificación óptica y los efectos dependientes de la longitud de onda [39].

Por otro lado, la co-simulación entre Matlab y OptSim sirve como enfoque dinámico y exhaustivo para analizar la interacción entre las señales de la red celular, en específico UFMC y LTE, y los sistemas de comunicación óptica. La potencia de Matlab en el procesamiento de señales, unida a la destreza de OptSim en la simulación de redes ópticas, permite modelar a la perfección la ruta de comunicación completa. Esta estrategia de si-

mulación conjunta es vital para obtener una comprensión total del comportamiento de la señal desde la generación hasta la transmisión óptica, garantizando una evaluación sólida de métricas de rendimiento como BER y diagramas de constelación. La integración de estas herramientas no sólo responde al modelado escenarios complejos, sino que también aborda los aspectos necesarios y útiles un análisis exhaustivo de las señales en una red óptica convergente [40].

2.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED

En la Figura 2.2 se presenta el flujo que sigue la co-simulación implementada en el presente trabajo de integración curricular. Los elementos representados con color azul representan los procesos realizados en Matlab, es decir, la generación de las dos señales, UPMC y LTE, con los respectivos procesos dentro de cada una, dichos procesos se detallan en la Sección 2.3.3. Por otro lado, las secciones representadas en color verde son todos los procesos realizados en OptSim. La representación del paso de las señales por medio del canal óptico, la convergencia de señales en un solo enlace de fibra óptica, la conversión electro-óptica y viceversa, así también herramientas de visualización de señales en tiempo real son los procesos a destacar en esta área de simulación, de igual manera, en la Sección 2.3.3 se detallan los elementos óptico utilizados, y como estos influyen en el flujo del proceso.

En el marco de este análisis preliminar para el trabajo de integración curricular, se ha decidido centrar la atención en la modulación 4-QAM para ambas señales UPMC y LTE. Esta elección se fundamenta en consideraciones prácticas relacionadas con las limitaciones de software. Actualmente, la simulación de modulaciones más densas, como 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM, presenta desafíos en términos de capacidad computacional y recursos disponibles en las herramientas de simulación empleadas.

Es esencial destacar que esta decisión no limita la validez ni el impacto de los resultados obtenidos en este análisis preliminar, ya que el enfoque en la modulación 4-QAM proporciona una evaluación sólida y representativa del desempeño de la convergencia de servicios en el contexto del canal RoF.

2.3.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS UPMC

En el ámbito de la selección de parámetros en la sección de transmisión UPMC, las consideraciones giran en torno a la duración del símbolo y el espaciado entre subportadoras. La selección de un esquema de modulación adecuado, como la modulación de amplitud en cuadratura (QAM: Quadrature Amplitude Modulation) repercute directamente en la veloci-

dad de transmisión de datos y la eficiencia espectral. La duración del símbolo y el espaciado entre subportadoras influyen en el ancho de banda de la señal y en la resistencia a las interferencias entre símbolos.

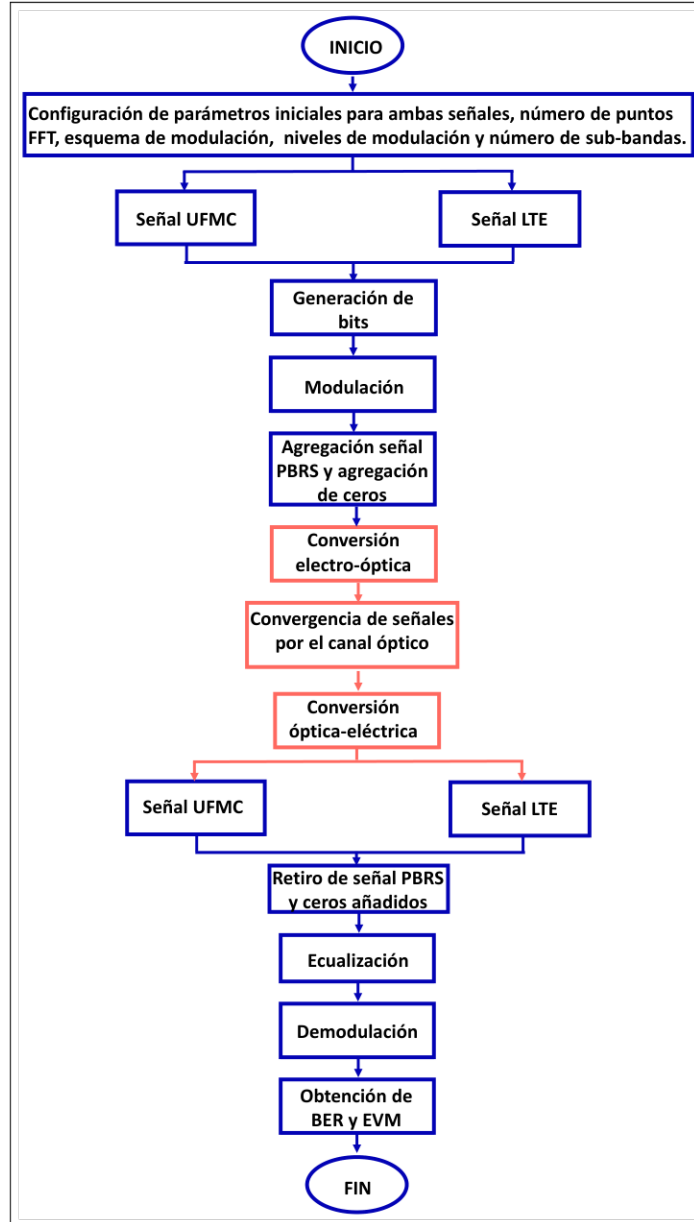


Figura 2.2: Diagrama de flujo general sobre la generación de señales UFMC y LTE, paso por el enlace óptico, y recepción de las mismas para su posterior análisis.

El proceso de selección de parámetros UFMC implica un meticuloso equilibrio para lograr altas velocidades de datos, eficiencia espectral y características de señal robustas para una integración satisfactoria en una red óptica convergente. En el ámbito de la selección de parámetros UFMC para la recepción, las consideraciones clave giran en torno al filtrado, la demodulación y la ecuación. Lo que consiste en adaptar estos parámetros para recuperar eficazmente las señales UFMC del canal óptico. Las técnicas de ecuación desem-

peñan un papel fundamental a la hora de mitigar los efectos de las distorsiones del canal que se producen durante la recepción de la señal. Este proceso implica la implementación de algoritmos en Matlab para ejecutar procesos de filtrado, demodulación y ecualización, alineados con las características de las señales UFMC, mismas que fueron mencionadas en la Sección 1.4.3.2.

2.3.1.1 Esquema y codificación UFMC

En la Figura 2.3 se representa mediante un diagrama de flujo los procesos realizados en cada sección correspondientes tanto a transmisión como recepción de la forma de onda UFMC. El proceso de transmisión de la forma de onda UFMC comienza con la generación de datos binarios, que representan la información que se desea transmitir. A continuación, estos bits se convierten en símbolos mediante un esquema de modulación QAM, asociando cada grupo de bits a símbolos complejos específicos de la constelación QAM. Luego, el ancho de banda disponible, el cual puede ser desde 200 [MHz] a 1600 [MHz], se divide en varias subportadoras, cada una de las cuales transporta un símbolo modulado. La característica exclusiva de UFMC es la aplicación de un filtro prototipo a cada subportadora, que moldea la señal en los dominios temporal y frecuencial para la contención espectral. Tras el filtrado, las subportadoras moduladas se combinan linealmente para crear la señal UFMC, garantizando la coherencia y la ortogonalidad. A continuación, esta señal se transmite a través de un canal RoF, en la que intervienen componentes como moduladores MZM, diodos láser y fibra óptica. Una vez recibida, la señal UFMC se somete al proceso inverso, que incluye demodulación, filtrado y ecualización, para recuperar los símbolos originales. A continuación, los símbolos recibidos se comparan con los transmitidos originalmente y se aplican técnicas de corrección de errores para aumentar la fiabilidad. Esta secuencia orquestada de pasos garantiza la transmisión eficaz y fiable de señales UFMC a través de los dominios eléctrico y óptico.

- **Generación de bits:** Se crean datos binarios para representar la información que se va a transmitir, en este caso necesarios para UFMC. Estos bits suelen proceder de protocolos de capa superior, y representan información digital. En el Código 2.1 se presenta la inicialización del proceso para crear bits, donde la variable `BitsPorSubportadora` describe el número de bits que forman parte de una portadora, y la variable `TamañoDeSubbanda` es la longitud de la columna, lo que garantiza que el vector se module de la forma adecuada en M-QAM.

Código 2.1: Línea de código mediante la cual se generan bits por medio de rutinas nativas de Matlab.

```
1 BitsIniciales = randi([0 1], BitsPorSubportadora*  
    TamanoDeSubanda, 1);
```

- ❑ **Mapeo de símbolos:** Los bits generados se convierten en símbolos mediante un esquema de modulación. En UFMC, se suele emplear un esquema de modulación QAM en este caso particular se empleará solo 4-QAM [41]. Este mapeo implica asociar cada grupo de bits con un símbolo complejo específico de la constelación QAM [41]. Dicho proceso se muestra en el Código 2.2. Asimismo, mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT : Inverse Fast Fourier Transform), se busca asegurar el ancho de banda predeterminado con el propósito de facilitar su posterior análisis y modelado en el entorno de simulación OptSim.

Código 2.2: Mapeo de símbolos por medio de funciones nativas y generación de algoritmos en Matlab.

```
1 SimbolosIniciales = qamMapper(BitsIniciales);  
- DataDeEntrada(:,BandaIndexada) = BitsIniciales;  
- SimbolosTransmitir=[SimbolosTransmitir; BitsIniciales];
```

- ❑ **Asignación de subportadoras y sub-bandas:** UFMC divide el ancho de banda disponible en múltiples subportadoras, cada una de las cuales transporta un símbolo modulado. Estas subportadoras se eligen cuidadosamente para minimizar las fugas espectrales ^[1] y facilitar la ortogonalidad de las portadoras. Este proceso se realiza por medio del algoritmo presentado en el Código 2.3.

Código 2.3: Codificación en Matlab en el proceso de asignación de subportadoras por medio de funciones en Matlab.

```
1 Offset = SubandaDeSeparacion+(BandaIndexada - 1)*  
    TamanoDeSubanda;
```

^[1] **Fuga espectral:** Este efecto ocurre cuando parte de la energía de una subportadora se mezcla con las subportadoras adyacentes, creando interferencia y afectando la calidad de la señal debido a las imperfecciones de la ortogonalidad de las subportadoras [42].

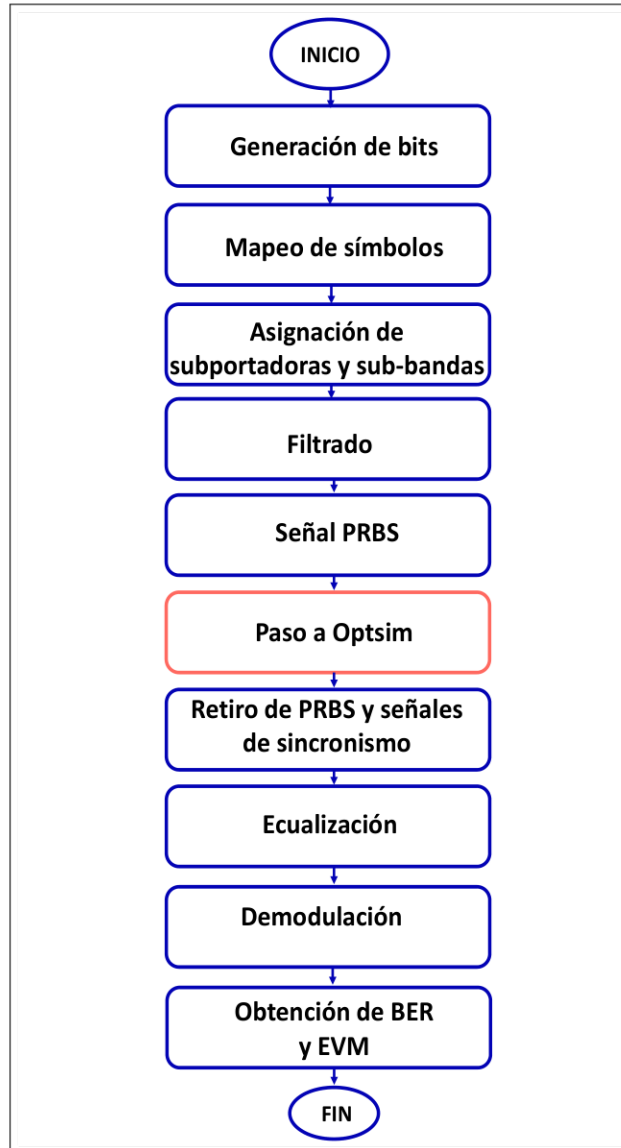


Figura 2.3: Proceso de codificación ligado a la forma de onda UFMC antes y después del paso de OptSim [3].

- **Filtrado:** Cada subportadora se filtra mediante un filtro prototipo, una característica clave de la forma de onda UFMC. Este filtro da forma a la señal tanto en el dominio de tiempo como de frecuencia, garantizando que cada subportadora tenga una forma espectral bien definida. En este caso en específico se utiliza un filtro Dolp-Chebyshev debido a la capacidad para proporcionar una respuesta en frecuencia precisa y eficiente, minimizando la interferencia entre subportadoras y optimizando el rendimiento del sistema en condiciones de ruido y canal adversas [43]. El uso de este filtro se usará por medio de la función nativa *chebwin* de Matlab, tal como se muestra en el Código 2.4.

Código 2.4: Parámetros del filtro Dolp-Chebyshev y la creación del mismo por medio de una función nativa de Matlab.

```
1 LongitudDeFiltro = 43;
- AtenuacionDeLobulo = 50;
- Filtro = chebwin(LongitudDeFiltro , AtenuacionDeLobulo);
```

- ❑ **Señal PRBS:** Se emplea la señal PRBS en la sección de sincronización, siendo esta de una longitud superior a la de la señal de bits iniciales, y así mejorar la confiabilidad, la detección de errores y la resistencia a interferencias en sistemas de comunicación [3]. La señal PRBS está compuesta únicamente por secuencias de 1 y 0, siguiendo un esquema de aleatoriedad completo con características de autocorrelación y correlación cruzada muy similares al ruido blanco [3]. Esta secuencia de 1 y 0 se genera mediante una función que sigue una cadena de flujo inicializada por un polinomio generador de séptimo grado, lo que permite la creación de una secuencia de 128 bits [3]. A través de la inicialización de la función PRBS, tal como se ilustra en el Código 2.5, se genera la señal que precede al envío a través del canal óptico.

Código 2.5: Identación de la función PRBS en Matlab.

```
1 SeñalPRBS = PRBS([1 1 0 0 1 0 1] , [7 6]);
```

- ❑ **Combinación de señales a través de OptSim:** Tras el filtrado, las subportadoras moduladas se combinan linealmente para crear la señal UPMC, compuesta por parte imaginaria y real [39]. Este proceso de combinación asegura que cada subportadora contribuye coherentemente a la señal global, manteniendo la ortogonalidad. Sin embargo, para realizar el paso a OptSim, se debe separar parte real e imaginaria, además de agregar una cadena de relleno, tanto al inicio como al final, dicho proceso de combinación se muestra en el Código 2.6. Este proceso es necesario ya que para el proceso de co-simulación OptSim admite ciertos valores específicos de cantidad de muestras, frecuencia de muestreo y muestras por bit, estas especificaciones se detallan con más precisión en la Sección 2.3.3.

Código 2.6: Configuración de la señal UFMC antes de realizar el envío hacia OptSim.

```
1 RealUFMC = real(SenialTrx)';  
- ImaginarioUFMC = imag(SenialTrx)';  
- SenalUFMC= [zeros(1,10e2) SenalPRBS RealUFMC SenalPRBS zeros  
  (1,10e2)]  
- NumeroDeMuestras=num_samples;  
5 DiferenciaDeLongitud=NumeroDeMuestras-length(SenalUFMC);  
- SenalTrx=[zeros(1,0.5*DiferenciaLongitud) SenalUFMC zeros  
  (1,0.5*DiferenciaLongitud)];  
- TX_UFMC=SenalTx';
```

❑ **Recepción y demodulación:** En el extremo receptor, la señal UFMC sufre el proceso inverso. La señal se somete a filtrado, ecualización y demodulación para recuperar los símbolos originales.

❑ **Análisis y corrección de errores:** Los símbolos recibidos se someten a una comparación con los símbolos transmitidos originalmente para la detección y corrección de errores. Este proceso se lleva a cabo mediante la evaluación de la secuencia generada por la señal PRBS y la introducción estratégica de señales de relleno. Estas acciones, junto con la aplicación de algoritmos de corrección de errores, contribuyen significativamente a mejorar la integridad de la comunicación.

Código 2.7: Uso de funciones nativas de Matlab para realizar la analisis y corrección de errores.

```
1 biterr(BitsEnTransmision ,BitsEnRecepcion);  
- evm = comm.EVM;  
- EVM = evm(SenalTrx ,SenalRx);
```

2.3.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS LTE

En el contexto de LTE, los parámetros fundamentales para el proceso de transmisión son la elección del esquema de modulación, la duración del prefijo cíclico y la separación entre subportadoras. El esquema de modulación, que a menudo emplea QAM, influye profunda-

mente en las velocidades de transmisión de datos y el rendimiento general del sistema [44]. La selección de la duración del prefijo cíclico y el espaciado entre subportadoras influye directamente en la resistencia de la señal a las deficiencias del canal y en la eficiencia espectral. Por otro lado, si nos centramos en la selección de parámetros LTE en recepción, hay que tener en cuenta las técnicas de filtrado, demodulación y sincronización. Las técnicas de sincronización son esenciales para alinear la señal recibida con el reloj local, minimizando los errores de sincronización [44].

2.3.2.1 Esquema y codificación LTE

LTE emplea OFDM como esquema fundamental de modulación, aprovechando sus características para lograr altas velocidades de datos y un rendimiento sólido incluso en presencia de condiciones adversas en el canal de comunicación. La elección de OFDM se fundamenta en su capacidad para abordar eficientemente diversas deficiencias del canal. El uso de OFDM implica la división del espectro disponible en múltiples subportadoras ortogonales. Esta estrategia no solo facilita un uso eficaz del ancho de banda, sino que también fortalece la resistencia ante desvanecimientos selectivos en frecuencia. En este contexto, la robustez aludida se refiere a la capacidad del sistema para mantener un rendimiento consistente y confiable, incluso en situaciones donde el canal puede presentar fluctuaciones, interferencias o pérdidas de señal. Para llevar a cabo este proceso, se sigue un enfoque sistemático que abarca la modulación de datos, la asignación precisa de subportadoras y la adición de un prefijo cíclico. Este conjunto de técnicas contribuye a mitigar los efectos adversos de las deficiencias del canal, asegurando un funcionamiento robusto y eficiente del sistema LTE [44].

El proceso de transmisión de LTE implica varias etapas clave, que abarcan desde la generación de datos digitales hasta la transmisión de señales moduladas a través de un canal óptico, dichos procesos se enmarcan a manera de diagrama de flujo en la Figura 2.4. El proceso de transmisión de señales LTE es una secuencia que comprende varias etapas, estas etapas se muestran en la Figura 2.4. El proceso comienza con la generación de bits de datos binarios provenientes de protocolos de capa superior. Estos bits se someten a codificación de canal, empleando técnicas como códigos de paridad o códigos convolucionales, para agregar redundancia y mejorar la detección y corrección de errores.

Posteriormente, los bits codificados se modulan mediante QAM, asignándolos a símbolos con amplitud y fase variables. Estos símbolos modulados se organizan en tramas, unidades fundamentales de transmisión en LTE, que se subdividen en subtramas para alojar distintos tipos de información, como datos de usuario, señales de control y referencias de sincronización. Esta estructuración garantiza una gestión eficiente de la diversidad de información transmitida. La codificación se aplica para introducir aleatoriedad controlada, ayudar a la sincronización y reducir los patrones de bits consecutivos. LTE emplea la modulación OFDM, que divide el espectro de frecuencias en subportadoras ortogonales para una transmisión eficaz de los datos. La señal LTE mapeada en las diferentes subportadoras y modulada se transmite a través de un canal óptico, utilizando componentes como moduladores MZM, diodos láser y amplificadores ópticos. En el extremo receptor, la señal transmitida se somete a conversión óptica-eléctrica, demodulación y decodificación del canal para recuperar los bits originales codificados por el canal.

Por último, se aplican técnicas de corrección de errores como la decodificación turbo o también conocida como la decodificación de códigos de bloque lineales, los cuales están definidos por una matriz de paridad de baja densidad y así garantizar la precisión y fiabilidad de los datos recuperados.

- ❑ **Generación de bits:** La transmisión LTE comienza con la generación de bits de datos binarios que representan la información que se va a transmitir. Estos bits suelen derivarse de protocolos de capa superior, representando información digital como voz, vídeo u otros datos. La generación de bits se realiza con la inicialización del Código 2.8 en Matlab.

Código 2.8: Generación de bits para LTE por medio de rutinas en Matlab.

```
1 DatosGen= randi([0,1],[1,NumBitsTx]);
```

- ❑ **Codificación de canal:** Los datos binarios se someten a una codificación de canal, denominada solicitud de repetición automática híbrida rápida (HARQ: Fast Hybrid Automatic Repeat Request), en la que se añaden bits redundantes adicionales a los datos originales para mejorar las capacidades de detección y corrección de errores. La codificación de canal es esencial para una comunicación robusta en presencia de ruido e interferencias [45].

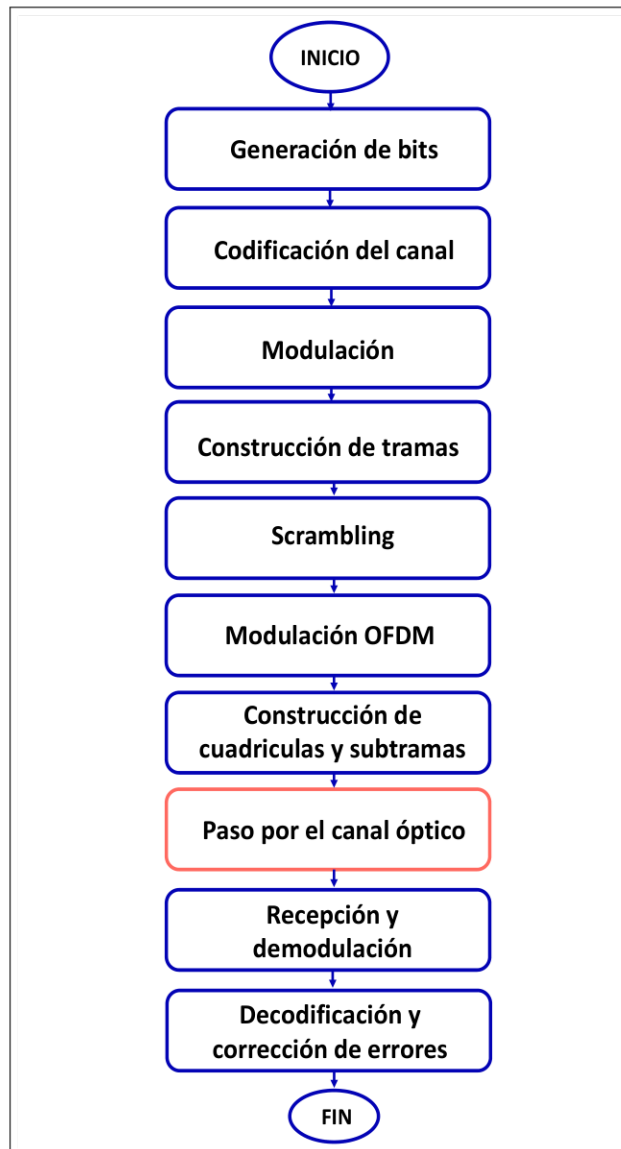


Figura 2.4: Proceso de codificación ligado a la señal LTE, antes y luego del paso de la misma por el canal óptico en la co-simulación.

- ❑ **Modulación:** A continuación, los bits codificados por el canal se modulan mediante un esquema específico, usualmente es QAM en el contexto de LTE. La modulación consiste en asignar grupos de bits a símbolos con amplitud y fase variables, lo que permite un uso eficiente del ancho de banda disponible. Esta modulación se realiza empleando el Código 2.9.

Código 2.9: Modulación en M-QAM con la ayuda de la función `qammod` de Matlab.

```
1 y = qammod(CadenaBits, NumeroNiveles);
```

- ❑ **Construcción de tramas:** Los símbolos modulados se organizan en tramas, las unidades básicas de la transmisión LTE. Una trama consta de recursos de tiempo y fre-

cuencia asignados para transmitir los símbolos modulados, lo que permite a múltiples usuarios compartir el canal de comunicación de forma eficiente.

- ❑ **Scrambling:** El scrambling en la generación de señales LTE introduce aleatoriedad controlada en los símbolos enmarcados, mejorando la sincronización y evitando secuencias largas de bits idénticos. Este proceso es esencial para garantizar la robustez y eficiencia del sistema de comunicación, al prevenir patrones predecibles. Además de su función en la introducción de aleatoriedad, el scrambling se integra estratégicamente en el flujo de procesos, fortaleciendo la seguridad y resistencia ante interferencias o intentos de interceptación. Este enfoque optimiza la calidad de la señal LTE.
- ❑ **Modulación OFDM:** LTE utiliza la modulación OFDM, misma modulación que se inicializa con el Código 2.10, la cual divide el espectro de frecuencias disponible en múltiples subportadoras ortogonales, cada una de las cuales transporta un símbolo modulado. Esta técnica mejora la resistencia al desvanecimiento selectivo en frecuencia^[2].

Código 2.10: Parámetros iniciales de la modulación OFDM, y generación de rutinas para la creación de la señal LTE.

```
1 SeparacionCol= reshape(SenalIn, NumPortadoras, NumSimbOFDM);  
- Xd = zeros(PuntosFFT, NumSimbOFDM);  
- for jj=0:62  
-     kk=63-jj;  
5     SeparacionColConj(kk,:) = SeparacionCol(jj+1,:);  
- end
```

- ❑ **Construcción de subtramas:** Las tramas LTE se dividen a su vez en subtramas, cada una de las cuales contiene un número específico de símbolos OFDM. Estas tramas se mapean en cuadrículas para su posterior envío a través del canal. Las subtramas y cuadrículas proporcionan flexibilidad para acomodar diferentes tipos de información y requisitos específicos del usuario.
- ❑ **Transmisión a través de canal óptico:** La señal LTE modulada se transmite a través

^[2] **Desvanecimiento selectivo en frecuencia:** El desvanecimiento selectivo en frecuencia es un fenómeno de las comunicaciones inalámbricas en el que las distintas frecuencias de una señal transmitida experimentan distintos grados de atenuación y desplazamiento de fase debido a las características del medio de propagación [46].

del canal óptico. Al igual que en UPMC, para transmitir la forma de onda LTE se debe re-acondicionar la señal para que no exista ningún error al momento de enviar la señal a OptSim. Dichos cambios hacen referencia a la longitud de la señal, la cual se debe rellenar de ceros antes y después de la señal LTE pura. Es así que en recepción se debe realizar la extracción de estas señales para no repercutir con el análisis de errores.

- ❑ **Recepción y demodulación:** En el extremo receptor, la señal LTE transmitida se demodula. Se extraen los símbolos demodulados y se aplica la decodificación de canal para recuperar los bits originales codificados por canal.
- ❑ **Decodificación y corrección de errores:** Los bits decodificados por canal se someten a procesos de decodificación, incluida la decodificación Turbo o la decodificación de comprobación de paridad de baja densidad^[3] (LDPC:Low Density Parity Check), para corregir los errores introducidos por parte de OptSim durante la transmisión de las señales.

Cabe mencionar que tanto el código completo de LTE como el de UPMC se encuentran en un repositorio de github en la sección de Anexos del presente trabajo de integración curricular.

2.3.3 CREACIÓN DEL CANAL ROF

La eficacia y el rendimiento de los parámetros del canal óptico son fundamentales para el éxito global de la simulación. Cada elemento contribuye de forma única al recorrido de la señal a través de la red XGS-PON. Los moduladores MZM manipulan eficazmente las señales, los diodos láser proporcionan una fuente de luz coherente y fiable, y los sumadores de frecuencia facilitan la combinación de señales diversas. La fibra óptica garantiza una transmisión fiable, mientras que los amplificadores y atenuadores optimizan la intensidad y calidad de la señal. Los filtros pasabajos refinan las características de la señal y los elementos de visualización de la señal permiten conocer su comportamiento. En esta sección se presenta cada elemento del enlace óptico con sus respectivas configuraciones.

^[3] **LDPC:** Es un código de corrección de errores utilizado en comunicación digital para mejorar la fiabilidad de la transmisión de datos. La decodificación LDPC consiste en actualizar iterativamente las probabilidades de los valores de los bits en función de la información recibida, con el objetivo de converger a los datos correctos [47].

A lo largo de este trabajo de integración curricular, se ha abordado la convergencia de dos señales a través de un canal RoF. Para clarificar y validar las posibles pérdidas resultantes de la co-simulación entre Matlab y OptSim, se ha esquematizado una topología back-to-back para cada señal de manera independiente. Esta configuración adicional proporciona una perspectiva más detallada y permite afirmar las variaciones obtenidas. A partir de esta implementación back-to-back, se ha diseñado otra topología para el envío independiente de las señales a través del canal RoF, como se ilustra en la Figura 2.5. Esto facilita la obtención de gráficas y valores de referencia para ambas señales, UFMC y LTE. Estos resultados desempeñarán un papel crucial en el Capítulo 3, donde se llevará a cabo un análisis exhaustivo de las señales por separado, así como de los resultados de su convergencia a través del mismo canal RoF.

2.3.3.1 Parámetros globales

Dentro de los parámetros de configuración para OptSim se establecen los requisitos de los servicios tanto para LTE como UFMC, que respectivamente corresponden a 4G y 5G dentro de las generaciones de comunicación celular. Estos criterios se han establecido en consonancia con las directrices de la ITU-T, específicamente en G.984.1, G.984.2 y G.984.3 para sistemas GPON y redes RoF, así como en 3GPP: TS 25.415 y TS 25.401 para LTE y 5G, los cuales se muestra en la Tabla 2.1 [48] [49]. En específico se establece la velocidad de transmisión, cantidad de muestras en bit, tiempo de simulación, y longitud de onda central.

Tabla 2.1: Parámetros de configuración para OptSim [3].

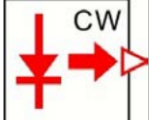
Parámetros	Valor	Unidad
Velocidad de transmisión de referencia	10	[Gbits/s]
Tiempo de simulación	11000	[ns]
Frecuencia central de simulación	1550	[nm]
Muestras por bit	4	[muestras]

2.3.3.2 Parámetros específicos de cada elemento

A continuación se presenta la configuración por independiente de cada elemento usado dentro de la topología presentada en las Figura 2.5

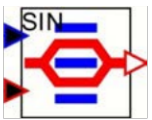
❑ Láser del tipo lorentziano continuo

Tabla 2.2: Parámetros de configuración del láser lorentziano continuo.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Potencia CW	0	[dBm]	[-3000,3000]
	Potencia CW	1	[mW]	(0,Inf)

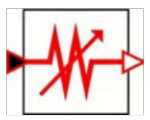
❑ Modulador Mach-Zendher

Tabla 2.3: Parámetros de configuración del modulador Mach-Zendher.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Voltaje de Transividad máxima	19	[V]	(0,Inf)
	Voltaje Pi	38	[V]	(0,Inf)

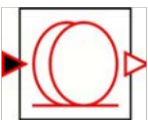
❑ Atenuador óptico

Tabla 2.4: Parámetros de configuración del atenuador óptico.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Atenuación	17.72113	[dBm]	[0,Inf)
	Atenuación	0.13	<i>Adimensional</i>	(0,1]

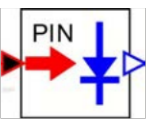
❑ Fibra óptica

Tabla 2.5: Parámetros de configuración de la fibra óptica.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Longitud	25	[Km]	(0,Inf)
	Perdida	0.2	[dB/Km]	(0,Inf)
	Dispersión a una frecuencia de referencia	0.35	[(ps ²)/Km]	(0,Inf)
	Dispersión a una frecuencia de referencia	17	[ps/nm/Km]	(0,Inf)

❑ Foto-diodo PIN

Tabla 2.6: Parámetros de configuración del foto-diodo PIN.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Eficiencia Cuántica	0.7	-	(0,1)
	Responsividad	0.8751	[A/W]	(0,Inf)
	Ruido cuántico a una frecuencia de referencia	<i>Encendido</i>		
	Corriente Oscura de referencia	0.1	[nA]	(0,Inf)

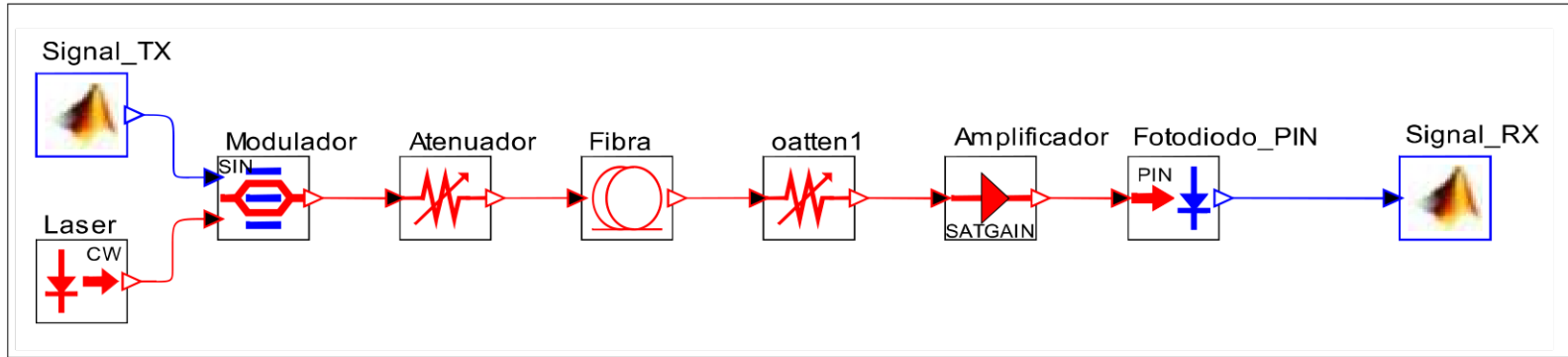


Figura 2.5: Enlace RoF por independiente para las señales UFMC y LTE, con la co-simulación explícita y la adición de la sección óptica.

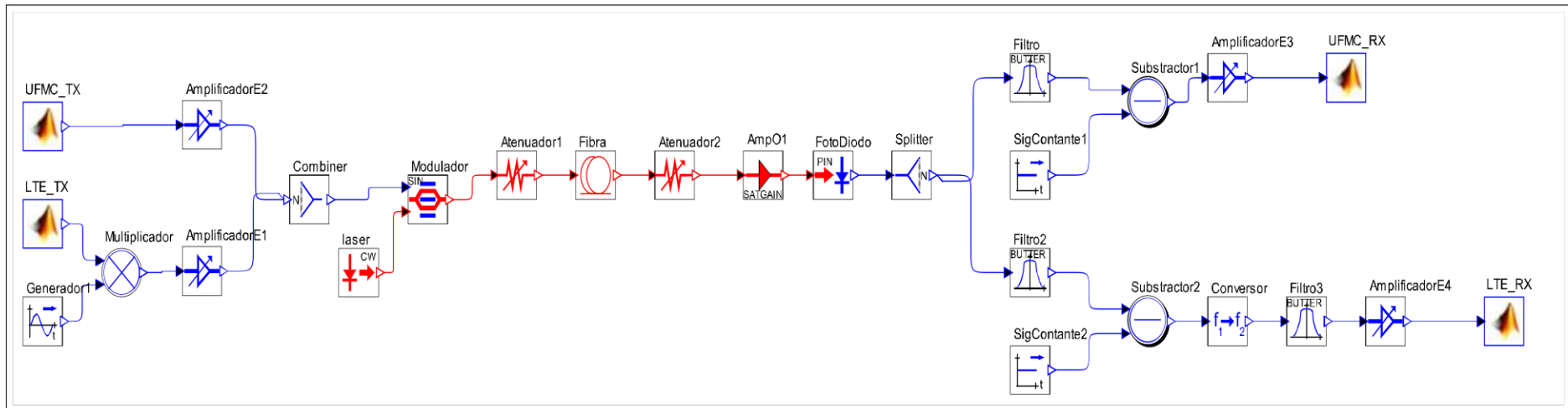
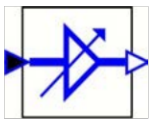


Figura 2.6: Topología general del enlace RoF para converger las señales LTE y UFMC.


❑ **Amplificador eléctrico**

Tabla 2.7: Parámetros de configuración del amplificador eléctrico.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Ganancia	9.54243	[dBm]	[0,Inf)
	Ganancia	3	Adimensional	(0,Inf)

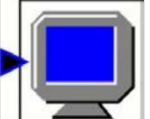
❑ **Amplificador óptico**

Tabla 2.8: Parámetros de configuración del amplificador óptico.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Figura de ruido	15	[dB]	(0,Inf)
	Ganancia de pequeña señal	31.62	[Km]	(1,Inf)

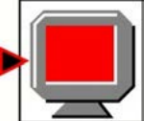
❑ **Osciloscopio eléctrico**

Tabla 2.9: Parámetros de configuración del osciloscopio eléctrico.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Velocidad de bit nominal	10	[GHz]	(0,Inf)
	Muestras por bit	4	[muestras]	(0,Inf)
	Tiempo de inicio	0	[ns]	[0,295669.3335]
	Tiempo de fin	295669.3335	[ns]	(0,295669.3335]

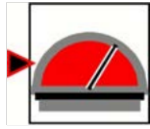
❑ **Analizador de espectro óptico (OSA: Optical Spectrum Analyzer)**

Tabla 2.10: Parámetros de configuración del OSA.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Medición de la duración	<i>Completa</i>		
	Factor de muestra	1	[muestras]	[1,1182677]
	Tiempo de inicio	0	[ns]	[0,295669.3335]
	Tiempo de fin	295669.3335	[ns]	(0,295669.3335]

❑ **Medidor de potencia óptica (OPM: Optical Power Meter)**

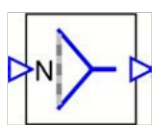
Tabla 2.11: Parámetros de configuración del medidor de potencia óptica.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Ancho de banda de medición	<i>Completo</i>		
	Frecuencia central	192.80002	[THz]	[192.78402,192.81602]
	Guía de onda central	1554.94	[nm]	(0,Inf)
	Ancho de banda bilateral a -3[dB]	16	[GHz]	(0,32]
	Ancho de banda bilateral a -3[dB]	0.40325	[nm]	(0,Inf)

Adicional a los elementos ya mostrados, para la topología presentada en la Figura 2.6 Se añadieron elementos necesarios para la convergencia de ambas señales, los cuales se presentan a continuación.

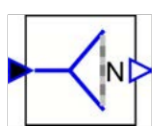
❑ **Combinador**

Tabla 2.12: Parámetros de configuración del combinador.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Atenuación del puerto de entrada	0	[dBm]	[0,Inf)
	Atenuación del puerto de salida	1	<i>Adimensional</i>	(0,1]

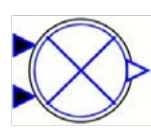
❑ **Splitter**

Tabla 2.13: Parámetros de configuración del splitter.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Atenuación del puerto de entrada	0	[dBm]	[0,Inf)
	Atenuación del puerto de salida	1	<i>Adimensional</i>	(0,1]

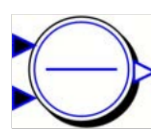
❑ **Multiplicador**

Tabla 2.14: Parámetros de configuración del multiplicador.

	Puerto	Valor	Cantidad
	Entrada	Eléctrico	2
	Salida	Eléctrico	1

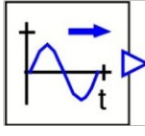
❑ **Subtractor**

Tabla 2.15: Parámetros de configuración del substractor.

	Puerto	Valor	Cantidad
	Entrada	Eléctrico	2
	Salida	Eléctrico	1

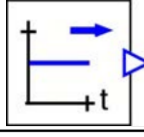
❑ **Generador de ondas senoidales**

Tabla 2.16: Parámetros de configuración del generador de ondas senoidales.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Frecuencia	0.9	[GHz]	(0,16)
	Amplitud	1	[AU]	[0,Inf]
	Fase	0	[Radianes]	[0,6.28319]

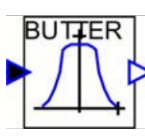
❑ **Generador de ondas de polarización**

Tabla 2.17: Parámetros de configuración del generador de ondas de polarización.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Nivel	0	[AU]	(-Inf,Inf)
	Naturaleza	<i>Elctrica</i>		

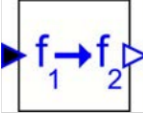
❑ **Filtro de tipo Butterworth**

Tabla 2.18: Parámetros de configuración del filtro de tipo Butterworth.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Número de polo	10	Polo	[1,10]
	Frecuencia central	6.4	[GHz]	(0,8)
	Ancho de banda a -3[dB]	7.9	[GHz]	(0,8)
	Tipo	<i>Pasabajos</i>		

❑ **Conversor**

Tabla 2.19: Parámetros de configuración del conversor.

	Parámetros	Valor	Unidad	Rango
	Frecuencia antigua	0.0006	[THz]	[-1e+32,1e+32]
	Frecuencia nueva	0	[THz]	[-1e+32,1e+32]

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

En este capítulo, se exponen los resultados derivados de la co-simulación realizada mediante la integración de Matlab y OptSim, abordando los diversos escenarios previamente delineados en el segundo capítulo del presente trabajo de integración curricular. La presentación de estos resultados se ha concebido en formato gráfico, utilizando parámetros esenciales como el BER y el EVM, en función de la potencia óptica de recepción, adoptando la modulación 4-QAM. Esta elección técnica específica proporciona una representación detallada y cuantitativa del desempeño del sistema en condiciones diversas. Para contextualizar y evaluar los resultados, se realizará una comparación exhaustiva con las directrices actuales para canal RoF, presentadas de manera sistematizada en la Tabla 3.1 [48].

Se introduce ahora un análisis más detallado de los resultados obtenidos tanto en la simulación por independiente de cada señal como en la convergencia de ambas. El propósito es contrastar los niveles de potencia donde se obtiene un BER de 10^{-3} , una métrica que establece un comportamiento estable de las señales para su uso futuro en campo. Este análisis sigue las recomendaciones tanto de la UIT-T para UFMF como de 3GPP para LTE, garantizando así que los niveles de rendimiento estén alineados con estándares reconocidos internacionalmente.

A lo largo de esta sección, se desglosarán minuciosamente los gráficos para la modulación ya descrita, permitiendo una interpretación rigurosa de los datos y destacando las tendencias emergentes en términos de BER y EVM. Este análisis se registrará sobre el marco teórico establecido en los capítulos previos, consolidando así una comprensión total de la convergencia de servicios mediante la transmisión simultánea de señales LTE y UFMF en un canal RoF. La meticulosa presentación de los resultados y su correlación con estándares establecidos contribuirán a una evaluación crítica, fundamentada y contextualizada de la eficiencia y viabilidad de esta convergencia en el ámbito de las telecomunicaciones.

Tabla 3.1: Requerimiento de EVM y BER para las señales UFMF y LTE para un modelo de modulación 4- QAM sobre un canal RoF, basado en [48].

Esquema de modulación	EVM[%]	BER
4-QAM	17.5	10^{-3}

3.1.1 CONFIGURACIÓN PARÁMETROS PARA LA CO-SIMULACIÓN

En el presente subcapítulo, se aborda la configuración de los parámetros para la co-simulación, un componente esencial en el proceso de evaluación de desempeño. Los parámetros específicos de LTE y UFCM en operaciones independientes se han ajustado meticulosamente dentro del entorno de Matlab, y su detallada descripción se encuentra presentada en la Tabla 3.2 para LTE y en la Tabla 3.3 para UFCM, respectivamente. La selección de estos parámetros críticos se basa en criterios específicos asociados a la modulación 4-QAM, un factor crucial en la transmisión eficiente de datos. Resulta de particular importancia destacar que, en virtud de los parámetros definidos para cada señal y bajo la mencionada modulación, se deriva la longitud total de bits de datos enviados por el transmisor. Este enfoque riguroso y específico garantiza la coherencia y precisión en la representación de los datos utilizados en la co-simulación, proporcionando así una base sólida para la interpretación y análisis subsiguiente.

Tabla 3.2: Parámetros de configuración en el entorno de Matlab de la señal LTE [48].

Parámetro	Valor
LTE	
Número de puntos FFT	259
Tamaño sub-banda	254
Cantidad sub-bandas	254
Longitud del filtro	630 puntos
Esquema de modulación	4-QAM

Tabla 3.3: Parámetros de configuración en el entorno de Matlab de la forma de onda UFCM [49].

Parámetro	Valor
UFCM	
Número de puntos FFT	2^{19}
Tamaño sub-banda	100
Cantidad sub-bandas	100
Longitud del filtro	45 puntos
Esquema de modulación	4-QAM

En paralelo, en el marco del entorno de OptSim, se llevó a cabo la configuración detallada de diversos parámetros inherentes al canal RoF, los cuales se encuentran expuestos de manera exhaustiva en la Tabla 3.4. Esta configuración se ha ejecutado tomando como referencia las directrices establecidas por UIT-T y 3GPP [48] [49], específicamente destinadas

a la composición de redes XGS-PON. Este enfoque garantiza la coherencia y alineación del canal RoF con los requisitos predefinidos, como el BER y el EVM, potencia óptica en recepción, y velocidades de transmisión, todos ellos ajustados para operar a niveles óptimos en entornos que demandan velocidades de hasta 10 [Gbps] [3]. La meticulosa conformidad con estas pautas normativas contribuye a establecer un escenario realista y normativamente alineado para la co-simulación, asegurando así la fiabilidad y validez de los resultados obtenidos.

Tabla 3.4: Parámetros de la configuración para el enlace de RoF para el envío por independiente y el envío en simultáneo de LTE y UPMC [49] [45] .

Parámetro de configuración	Valor
OptSim	
Longitud de onda	1550[<i>nm</i>]
Muestras por bit	16[<i>muestras</i>]
Tiempo de simulación	14192128[<i>ns</i>]
Atenuador	
Rango de atenuación	36 – 14[<i>dB</i>]

3.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENVÍO POR INDEPENDIENTE DE LAS SEÑALES SOBRE EL CANAL ROF

En este subcapítulo, se presentan de manera detallada los resultados derivados del envío independiente de las señales a través del canal RoF, utilizando la topología representada en la Figura 2.5. La exposición de estos datos se realiza mediante gráficas que ilustran las variaciones de BER y EVM en función de la potencia óptica de recepción. Esta fase de la investigación es fundamental, ya que los resultados obtenidos en el envío independiente de cada señal actúan como puntos de referencia cruciales para contrastar y evaluar el desempeño del sistema en condiciones de convergencia, tal como se evidencia en la topología presentada en la Figura 2.5.

Se recopilaban con precisión 13 muestras con el objetivo claro de obtener gráficas que reflejen niveles variados de potencia. Esta cantidad específica permitió no solo capturar la variabilidad en los niveles de potencia en recepción, sino también resaltar con precisión la transición de niveles altos a bajos de BER. La elección de este número de muestras se fundamenta en la necesidad de proporcionar una representación gráfica que muestre de manera continua la variación de la potencia, permitiendo al mismo tiempo discernir con

claridad las tendencias en la eficiencia del sistema. La modulación de la potencia en recepción se logró manipulando los valores del atenuador, ajustando sus parámetros entre 0.05 [dBm] y 0.008 [dBm], manteniendo constante el nivel de potencia óptica del láser CW en el extremo del transmisor con un valor de 0 [dBm]. Este enfoque estratégico se alinea con el objetivo de obtener gráficas suavizadas y reveladoras, que sirvan como base para un análisis exhaustivo y comparativo en secciones posteriores [3].

3.1.2.1 Señal LTE

En este subsubcapítulo, se detallan los resultados del envío independiente de la señal LTE según la configuración mostrada en la Figura 2.5. La información recopilada se condensa en la Tabla 3.5, base para las gráficas en la Figura 3.3 y Figura 3.2, que ilustran el comportamiento de la señal en distintas condiciones de potencia óptica de recepción. Se presenta el análisis del BER y el EVM en función de la potencia óptica, proporcionando una visión detallada del rendimiento de la señal LTE operando de manera individual. Este análisis destaca áreas específicas donde la tasa de errores es más susceptible a variaciones en la potencia, ofreciendo así una comprensión más profunda del comportamiento de la señal en condiciones de transmisión independiente.

Tabla 3.5: Valores obtenidos del envío por independiente de la señal LTE en la topología de la Figura 2.5.

# Medición	Potencia de recepción [dBm]	BER	EVM [%]
1	-22.982	0.000833	17.0034
2	-23.983	0.000952	18.3116
3	-24.983	0.000968	19.6672
4	-25.983	0.001437	21.9913
5	-26.982	0.002008	23.789
6	-27.982	0.004087	25.8724
7	-28.982	0.007937	28.3141
8	-29.983	0.012611	30.4287
9	-30.983	0.022222	33.3382
10	-31.982	0.033452	35.3239
11	-32.982	0.050222	37.3648
12	-33.982	0.066627	38.9406
13	-34.982	0.090048	40.4349

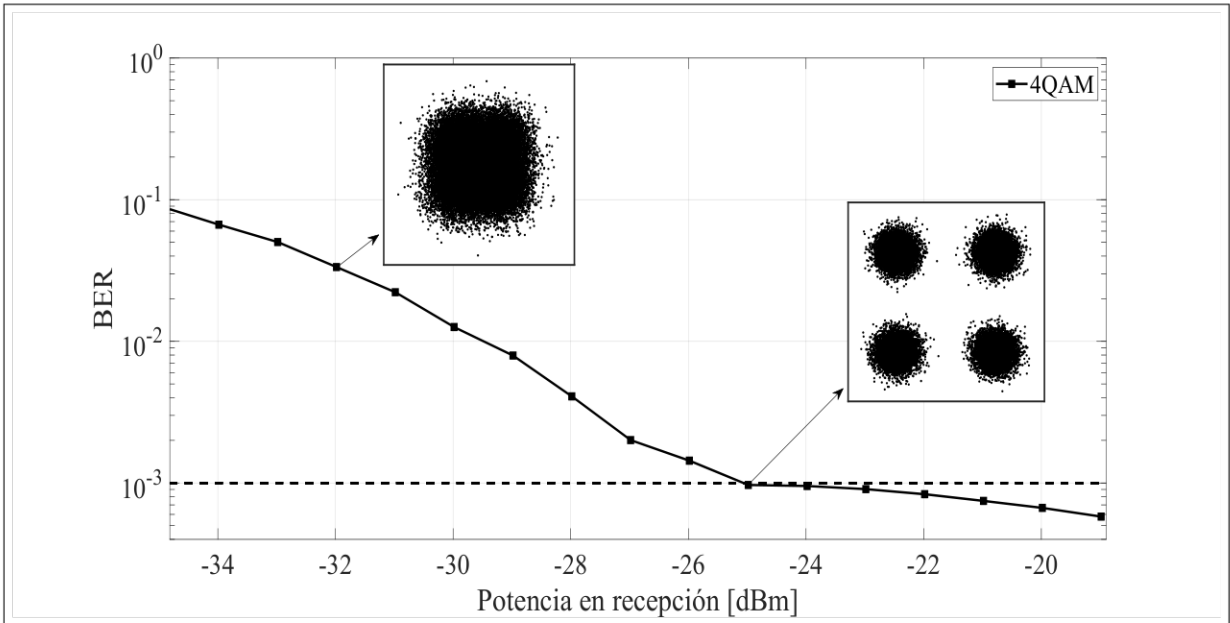


Figura 3.1: BER vs. Potencia óptica en recepción en un esquema de modulación 4-QAM para LTE enviada por independiente.

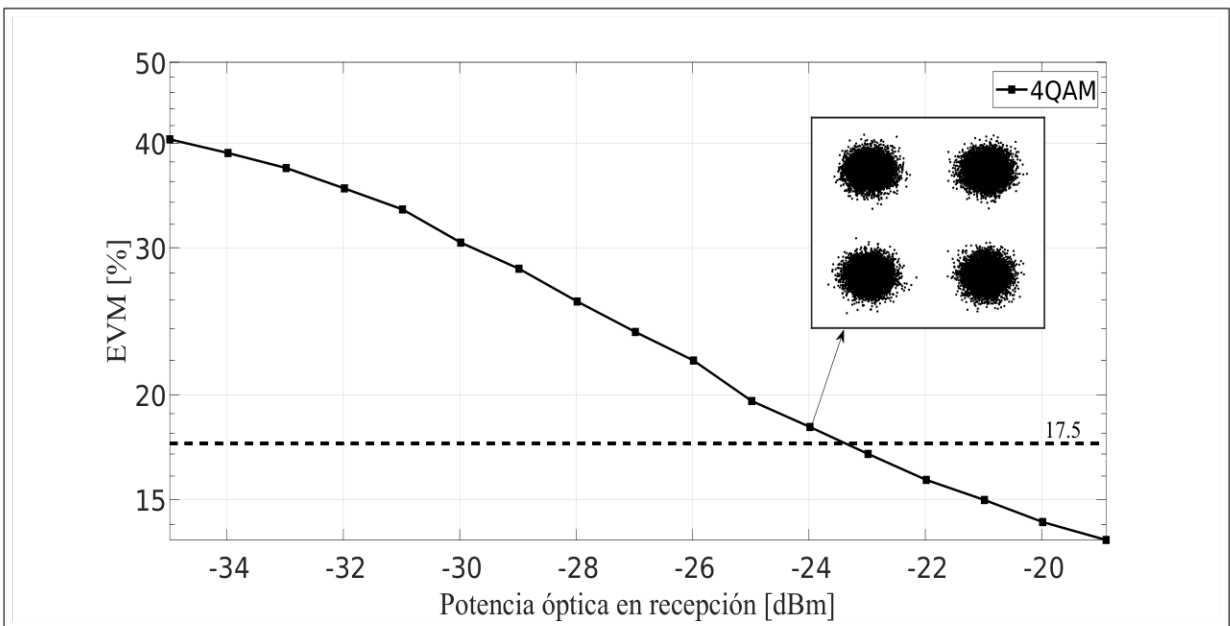


Figura 3.2: EVM[%] vs. Potencia óptica en recepción en un esquema de modulación 4-QAM para LTE enviada por independiente.

En la Figura 3.3, se expone la curva de BER frente a la potencia de recepción para la señal LTE. Este gráfico exhibe un perfil suavizado en el rango de -34.982 [dBm] a -26.982 [dBm], evidenciando una disminución lineal en la BER. No obstante, en el intervalo de -26.982 [dBm] a -19.983 [dBm], se observan fluctuaciones abruptas en los valores de la BER. Estas variaciones pueden atribuirse a las configuraciones específicas de cada componente en la topología, resaltando la importancia de la región crítica donde la BER alcanza el umbral de 10^{-3} . Esto se debe a parámetros implícitos en la topología de simulación, como el atenuador

presente, que desempeña un papel crucial en la variación de la potencia en recepción, junto con las características de la fibra óptica detalladas en la Tabla 2.5 y en consonancia con las directrices establecidas en la Tabla 3.1 [48].

En la Figura 3.2, se detalla la curva de EVM en función de la potencia de recepción para la señal LTE. Este trazado exhibe una suavidad más pronunciada en comparación con la curva de BER, abarcando la totalidad del rango desde -34.982 [dBm] hasta -19.983 [dBm]. Adicionalmente, se verifica que los porcentajes de EVM se mantienen dentro de los límites aceptados para sistemas RoF, según las normativas [48]. La gráfica destaca un rendimiento óptimo para un nivel de potencia de -22.983 [dBm], cifra que cumple con los estándares de aceptación de 3GPP [48]. En conjunto, estos resultados respaldan la robustez y calidad de la transmisión de la señal LTE en un escenario de envío independiente, estableciendo así una base confiable para las comparaciones subsiguientes y el análisis de convergencia de servicios.

Los resultados previamente mencionados están en pleno cumplimiento con las normativas establecidas por 3GPP, gracias a la eficacia de los componentes que integran la topología representada en la Figura 2.5. A este logro se suma la capacidad de esquematizar de manera integral la señal LTE mediante MATLAB, logrando una perfecta integración con la estructura de cada portadora y la composición de trama, entre otros aspectos.

3.1.2.2 Señal UFMC

De manera análoga, la Tabla 3.6 exhibe los datos obtenidos durante el envío independiente de la señal UFMC, y estos resultados se traducen en representaciones gráficas detalladas en las Figura 3.4 y Figura 3.5. Estas gráficas, centradas en BER en función de la potencia óptica de recepción, así como el EVM en condiciones similares, permiten un análisis exhaustivo del comportamiento de la señal UFMC en el canal RoF. La representación visual de estas métricas es esencial para una evaluación precisa y detallada, proporcionando así un entendimiento claro de los resultados obtenidos durante la transmisión independiente de la señal UFMC en el entorno experimental definido por la Figura 2.5.

De forma paralela a la evaluación de la señal LTE, los resultados obtenidos al transmitir de manera independiente la señal UFMC reflejan un rendimiento destacado, evidenciado en la Figura 3.4 y Figura 3.5. En consonancia con las directrices establecidas por la UIT-T, se constata que tanto las curvas de BER y EVM se mantienen dentro de los parámetros estándar para un sistema RoF ($BER=10^{-3}$ Y $EVM=17.5\%$). Específicamente, se logra un

óptimo rendimiento para la UFMC con un BER de 10^{-3} a una potencia de -26.982 [dBm] y un EVM del 17.5 % a una potencia de -28.982 [dBm], superando los requisitos mínimos de sensibilidad recomendados por la UIT-T para las ONU [49]. Todo esto debido al rendimiento superior en términos de eficiencia espectral debido a la construcción optimizada de su señal. Este logro se materializa mediante la precisa esquematización de la señal directamente desde su código en MATLAB. Los recursos disponibles en la topología, como se ilustra en la Figura 2.5, respaldan de manera integral estos resultados.

La observación detallada de las gráficas de BER vs. Potencia Óptica de Recepción, tanto para la señal LTE como para la UFMC en transmisiones independientes, ratifica la eficacia intrínseca de ambos sistemas de comunicación en sus respectivos entornos. La capacidad de adaptación de la LTE se evidencia en su rendimiento consistente, al ajustarse eficientemente a la modulación convencional y estructura de transmisión según los parámetros del canal RoF, alineándose con las directrices de la UIT-T. En contraste, la eficiencia de la forma de onda de UFMC en transmisión independiente destaca su capacidad para optimizar el espectro, brindando mayor flexibilidad espectral y robustez ante interferencias, en comparación con las señales 5G. Estos hallazgos refuerzan la base para una convergencia exitosa de servicios, respaldando la viabilidad técnica de integrar señales de diferentes orígenes y generaciones en un único canal RoF.

Tabla 3.6: Valores obtenidos del envío por independiente de la forma de onda UFMC en la topología de la Figura 2.5.

# Medición	Potencia de recepción [dBm]	BER	EVM [%]
1	-22.983	0	6.66
2	-23.982	0	7.65
3	-24.982	5.00E-05	9.14
4	-25.983	2.00E-04	11.24
5	-26.982	8.00E-04	14.08
6	-27.982	3.50E-03	17.82
7	-28.982	1.30E-02	22.65
8	-29.983	2.50E-02	28.82
9	-30.983	3.50E-02	36.67
10	-31.982	5.00E-02	46.60
11	-32.982	6.00E-02	59.15
12	-33.982	7.00E-02	74.98
13	-34.982	8.00E-02	94.94

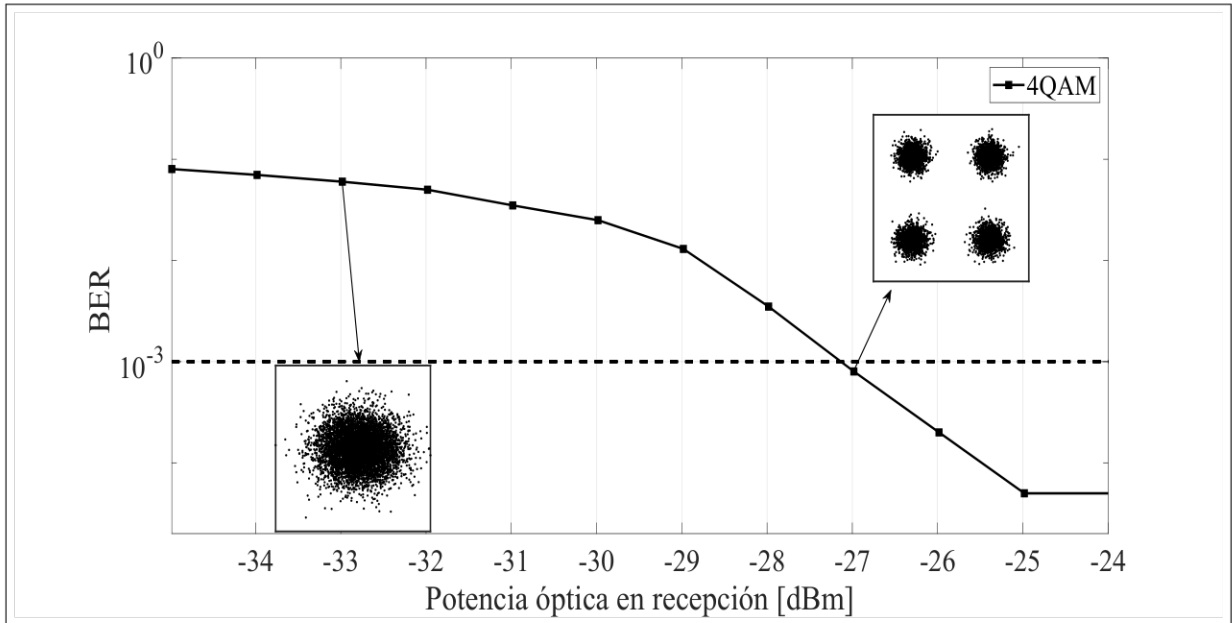


Figura 3.3: BER vs. Potencia óptica en recepción en un esquema de modulación 4-QAM para la forma de onda UFMC enviada por independiente.

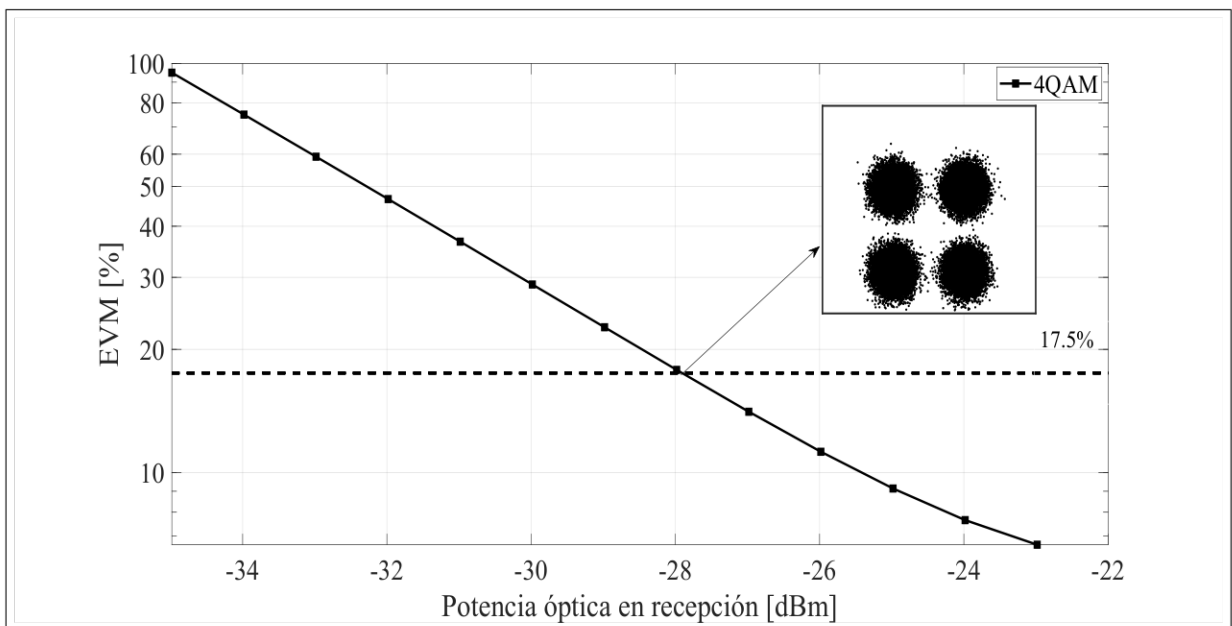


Figura 3.4: EVM [%] vs. Potencia óptica en recepción en un esquema de modulación 4-QAM para la forma de onda UFMC enviada por independiente.

3.1.3 RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENVÍO EN CONVERGENCIA DE AMBAS SEÑALES POR EL CANAL ROF

En este subcapítulo, se exponen los resultados derivados del envío simultáneo de ambas señales a través de la topología presentada en la Figura 2.6. Se recopilaron un total de 18 muestras para este análisis, cuyos detalles se encuentran tabulados en la Tabla 3.7. La elección de este número específico de muestras se fundamenta en la necesidad de obtener

una representación detallada y concordante entre ambas señales convergentes, manteniendo consistencia con el número de datos recopilados durante el envío por separado de cada señal. Durante esta comparación, se observaron niveles más bajos de potencia en los cuales la señal LTE no alcanzaba el requisito de un BER de 10^{-3} . De manera notable, se registraron valores de potencia significativamente inferiores, llegando incluso a un mínimo de -36.931 [dBm], una situación que no se manifestaba en el envío individual de señales.

Adicionalmente, es relevante destacar que se tomó un total de 18 muestras para cada señal convergente, asegurando así una concordancia equitativa en la evaluación del rendimiento de ambas tecnologías. Los niveles bajos de potencia en los cuales UPMC alcanza el requisito de BER, mientras que LTE no, el análisis de lo mencionado se muestra en el siguiente párrafo.

La manipulación de los niveles de potencia se realizó mediante dos atenuadores. El primero varió en un rango de 0.05 [dBm] a 0.008 [dBm], mientras que el segundo se ajustó con incrementos específicos de 1.0003 [dBm] y 1.0005 [dBm]. La variación de estos parámetros en los atenuadores permitió obtener una secuencia casi lineal entre saltos de potencia, lo cual resulta fundamental para facilitar la representación gráfica y evitar discontinuidades notables entre cada valor. Dicha variación se determinó como la más idónea a través de pruebas, considerando la interacción con los demás elementos de las topologías presentadas. Estos ajustes meticulosos permitieron recopilar los datos detallados en la Tabla 3.7.

Además de lo previamente expuesto, se llevó a cabo un ajuste en el espectro de la señal LTE, desplazándolo hacia los 900 MHz en relación con la señal UPMC. Esta modificación se implementó con el propósito de lograr la convergencia efectiva de ambas señales, evitando cualquier tipo de solapamiento perjudicial. Este desplazamiento esencial se visualiza de manera detallada en la Figura 3.7 y Figura 3.8, las cuales representan el espectro en frecuencia de ambas señales por separado y el espectro de la señal en la cual convergen ambas formas de onda, respectivamente.

El desafío en la convergencia de señales radicó en la necesidad de armonizar las características espectrales de LTE y UPMC, garantizando una transmisión simultánea eficaz. Este ajuste de frecuencia resulta crucial para evitar interferencias y asegurar la coexistencia armoniosa de ambas tecnologías en el mismo canal RoF. Se determinó mediante pruebas exhaustivas que el desplazamiento de la señal LTE en 900 MHz con respecto a UPMC es la separación ideal para prevenir problemas de interferencia y daños al pasar ambas seña-

les por el canal convergente. La Figura 3.6, Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9 constituyen representaciones visuales clave para evaluar el desempeño del sistema convergente, ofreciendo una visión detallada de cómo la convergencia afecta las métricas cruciales de BER y EVM en función de la potencia óptica de recepción.

Tabla 3.7: Valores obtenidos de la convergencia entre la señal LTE y la forma de onda UFMC de la topología mostrada en la Figura 2.6.

# Muestra	BER		EVM		Potencia en recepción [dBm]
	LTE	UFMC	LTE	UFMC	
1	0.000579	0	14.9776	10.1512	-20.946
2	0.000667	0	13.4165	9.5911	-18.899
3	0.000675	0	14.0942	9.8054	-19.814
4	0.000833	0	17.0034	10.8646	-22.981
5	0.000905	0	15.8296	10.3234	-21.813
6	0.000952	0	19.6672	11.7821	-24.919
7	0.000968	0	18.3116	11.203	-23.896
8	0.001437	0	21.9913	12.6068	-25.931
9	0.002008	0	23.789	13.36	-26.967
10	0.004087	5.00E-05	25.8724	14.0774	-27.894
11	0.007937	5.00E-05	28.3141	15.3859	-28.932
12	0.012611	5.00E-05	30.4287	16.4783	-29.802
13	0.022222	5.00E-05	33.3382	18.2239	-30.94
14	0.033452	5.00E-05	35.3239	19.9197	-31.855
15	0.050222	6.00E-04	37.3648	21.753	-32.878
16	0.066627	0.0013	38.9406	23.9409	-33.793
17	0.090048	0.0044	40.4349	26.3901	-34.816
18	0.11646	0.0082	41.6174	29.6052	-35.976
19	0.143524	0.0143	42.549	32.2182	-36.961

Al analizar minuciosamente las representaciones gráficas que ilustran la convergencia de señales, se visualiza la exitosa adaptación de la frecuencia de LTE para facilitar la coexistencia con UFMC. El análisis de estos gráficos revela de manera evidente la integración fluida de ambas tecnologías, donde la frecuencia de operación ajustada de LTE juega un papel fundamental en la mitigación de interferencias y en la creación de un entorno propicio para la convergencia. De manera notable, se observa que LTE cede potencia a UFMC, fe-

nómeno que puede atribuirse a la mayor eficiencia espectral y a la estructura de señal más robusta de UPMC. Esto se traduce en la capacidad del sistema para gestionar la asignación de recursos y potencia entre las señales convergentes, optimizando así la eficiencia y el rendimiento del sistema en su conjunto.

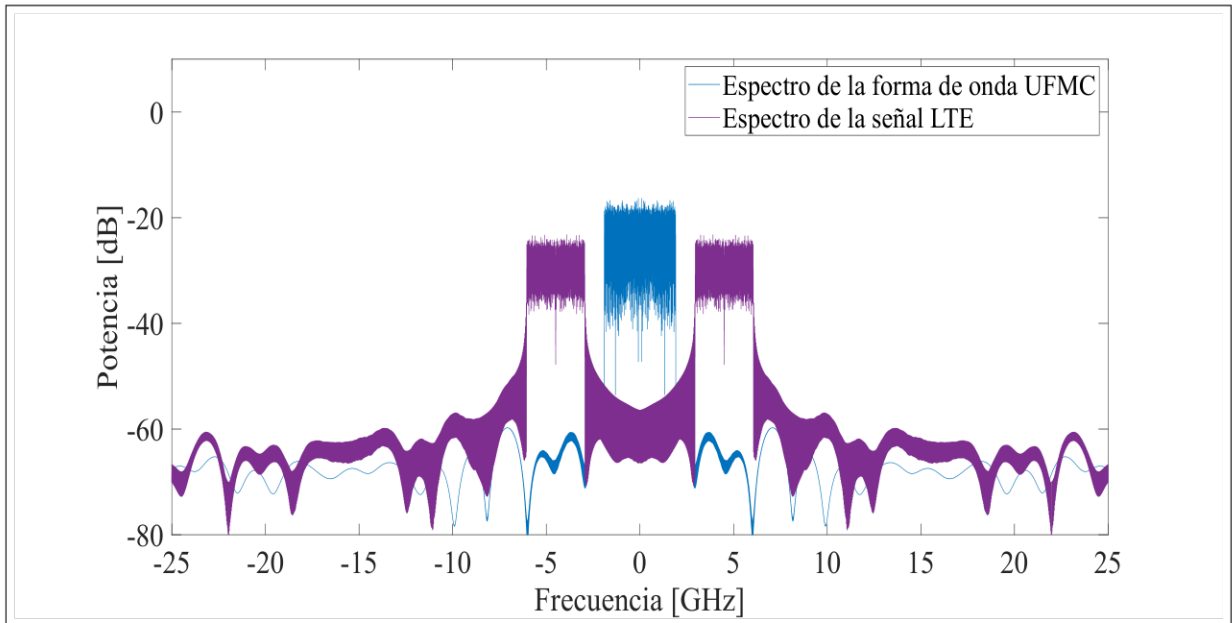


Figura 3.5: Espectro bilateral de las señales por independiente, donde se valida la separación de 900 MHz de la señal LTE respecto a la forma de onda UPMC, la cual se presenta de color morado.

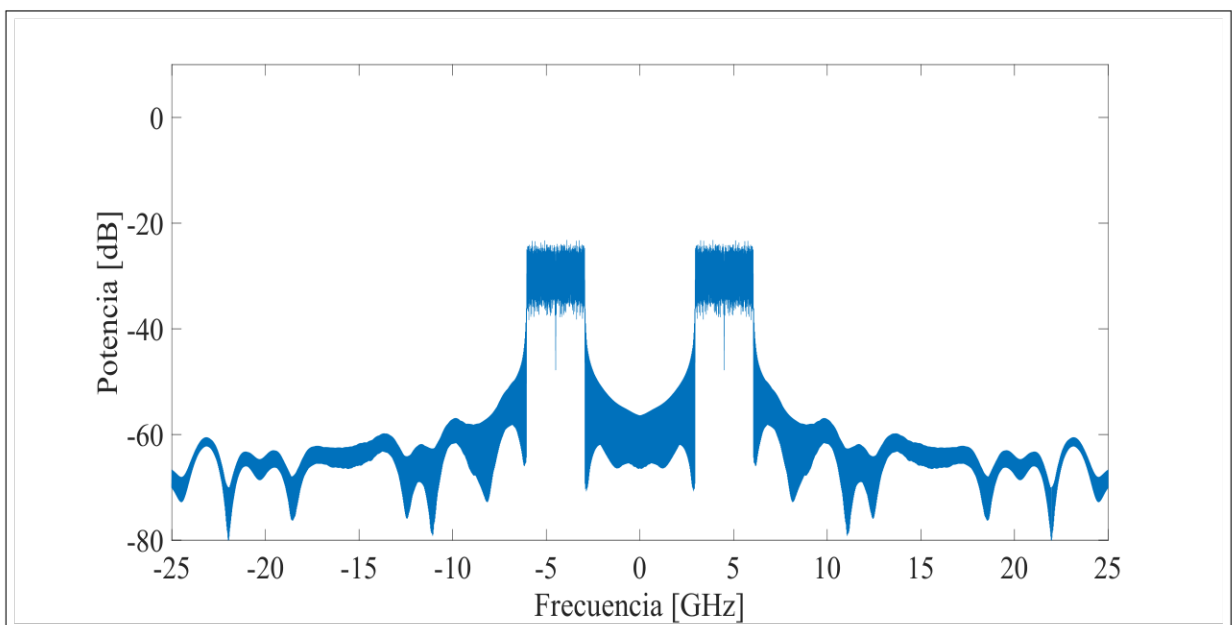


Figura 3.6: El espectro bilateral de la señal convergente, resultado de la transmisión simultánea de ambas señales a través del canal RoF, exhibe una adaptación notablemente similar al espectro bilateral de la señal LTE, como se muestra en la Figura 3.5. Esta última está centrada en 4.5 GHz.

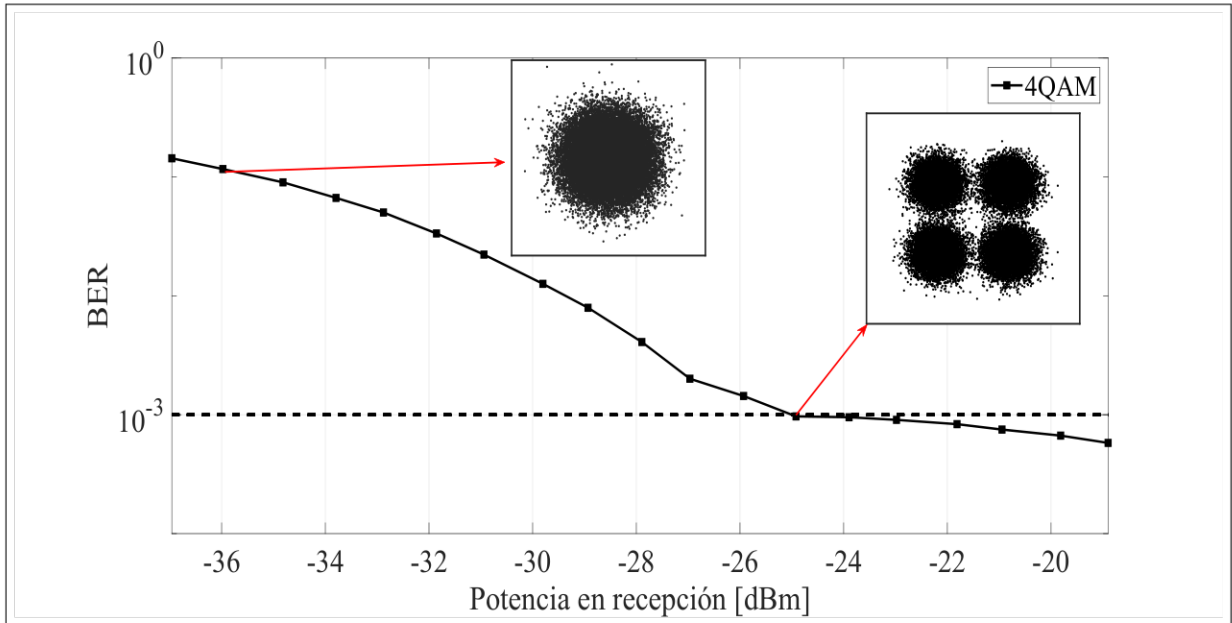


Figura 3.7: BER vs. Potencia óptica en recepción en un esquema de modulación 4-QAM para LTE en convergencia con UPMC.

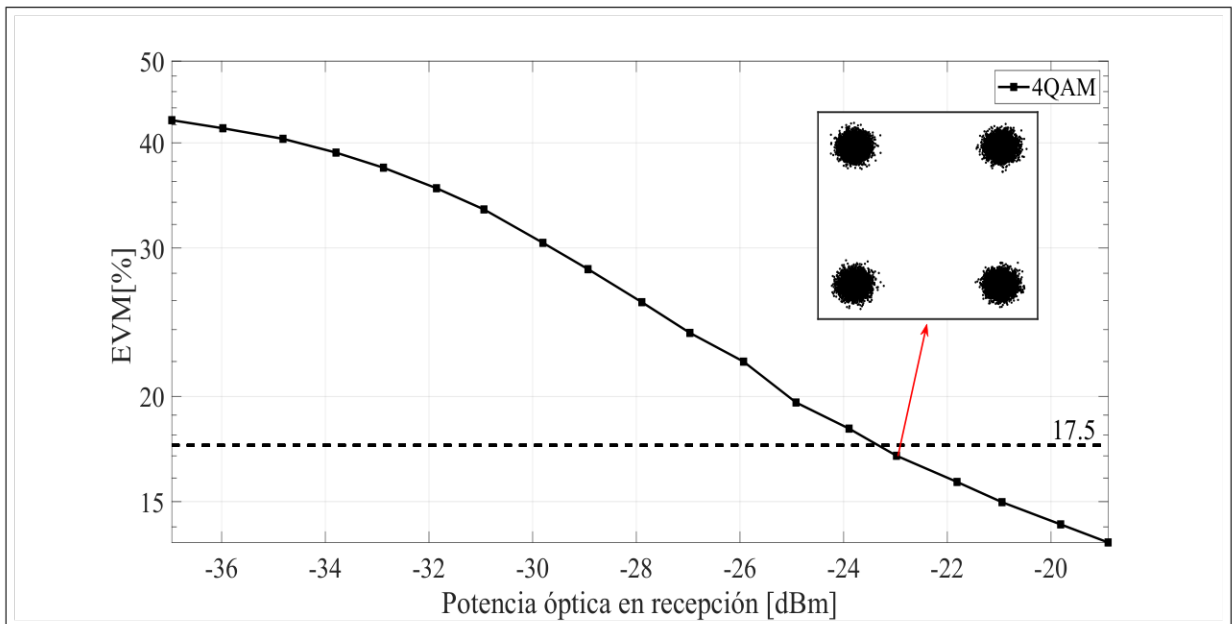


Figura 3.8: EVM [%] vs. Potencia óptica en recepción en un esquema de modulación 4-QAM para LTE en convergencia con UPMC.

La ajustada selección de la frecuencia de operación no solo previene interferencias perjudiciales, sino que también asegura una utilización eficiente del ancho de banda disponible, siendo un aspecto crítico en entornos caracterizados por la limitación de espectro. Esta flexibilidad y capacidad de adaptación del sistema se revelan como elementos fundamentales para el futuro de las redes de telecomunicaciones, especialmente en el contexto de la evolución hacia modelos convergentes más eficientes y versátiles. La convergencia exitosa de

LTE y UFMC sobre el canal RoF, con su equitativa distribución de potencia, representa un hito significativo en la integración de tecnologías diversas en el panorama de las telecomunicaciones avanzadas.

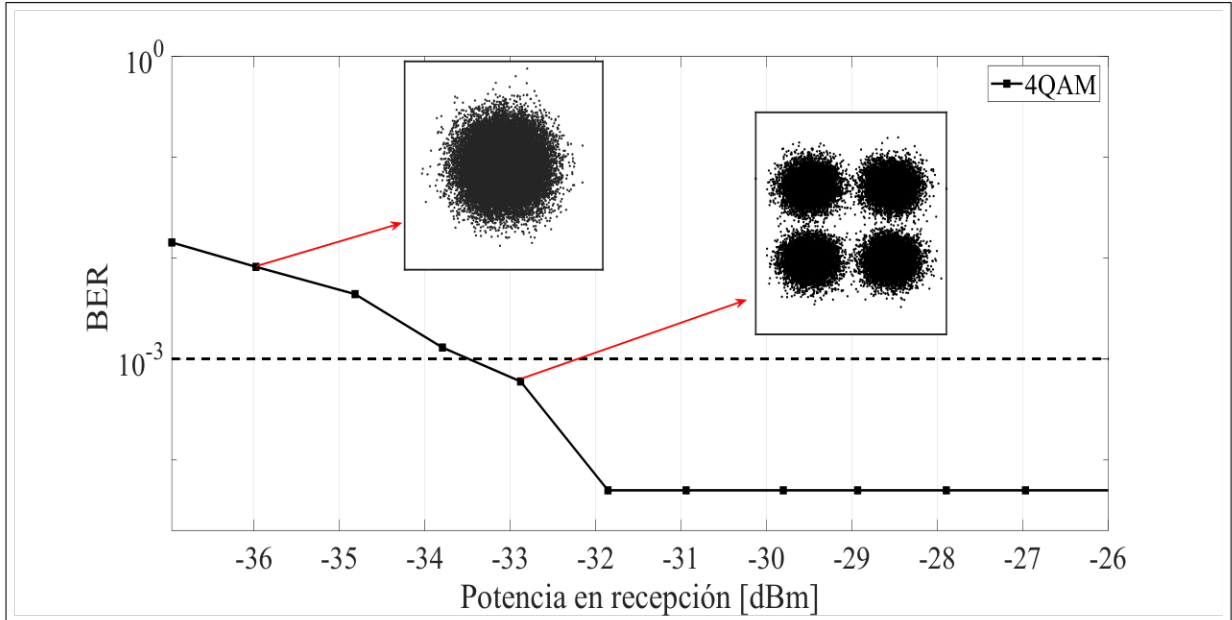


Figura 3.9: BER vs. Potencia óptica en recepción en un esquema de modulación 4-QAM para UFMC en convergencia con LTE.

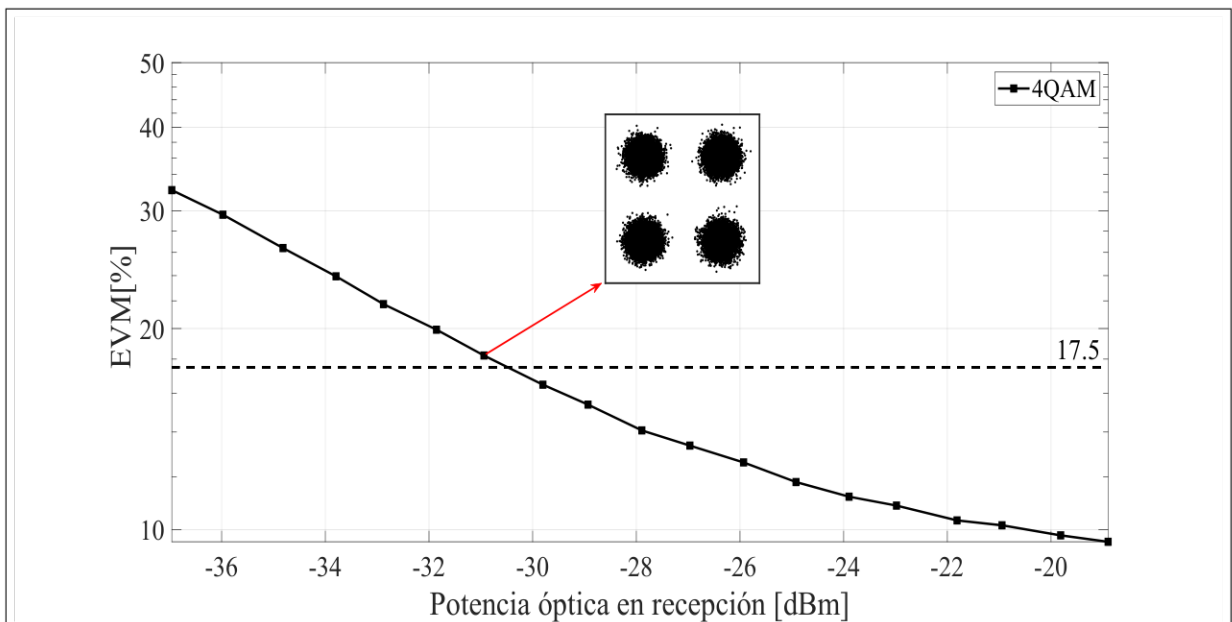


Figura 3.10: EVM [%] vs. Potencia óptica en recepción en un esquema de modulación 4-QAM para UFMC en convergencia con LTE.

En el análisis específico del EVM en función de la potencia de recepción, se observa una tendencia similar de cesión de potencia de UFMC para alcanzar el mismo nivel de EVM

del 17.5% en los mismos rangos de potencia. Este fenómeno subraya la dominancia de la señal LTE sobre UFMC en términos de calidad de transmisión. La distribución equitativa de potencia entre ambas señales en el sistema convergente refleja la capacidad del sistema para gestionar dinámicamente la potencia asignada a cada señal, asegurando así un rendimiento óptimo en condiciones de convergencia. Estos resultados no solo respaldan la viabilidad técnica de la convergencia de servicios en el canal RoF, sino que también destacan la eficiencia y robustez del sistema ante la coexistencia de tecnologías heterogéneas.

3.2 CONCLUSIONES

- ❑ La revisión del fundamento teórico proporcionó una base sólida para comprender los principios clave de LTE, la red móvil 5G, las formas de onda UFMC, el canal RoF, las redes PON y la convergencia de servicios. Este conocimiento fundamentó el diseño para la implementación de la convergencia de señales en el entorno específico de acceso óptico.
- ❑ El diseño del enlace back-to-back óptico se ejecutó exitosamente, facilitando la transmisión y recepción eficiente de señales UFMC y LTE. Este enlace constituyó la infraestructura esencial para la realización de las simulaciones y la evaluación del rendimiento de la convergencia de servicios.
- ❑ La generación precisa de señales UFMC y LTE en el entorno de Matlab permitió la simulación detallada de la convergencia de servicios sobre la red PON diseñada. Este paso fue esencial para evaluar el comportamiento de las señales en un entorno convergente.
- ❑ La integración exitosa de la transmisión de señales LTE y UFMC con la red PON en un ambiente de co-simulación proporcionó un marco de evaluación completo. La combinación de Optsim y Matlab permitió un análisis detallado del rendimiento de la convergencia de servicios, considerando una variedad de parámetros y métricas.
- ❑ En la convergencia de señales LTE y UFMC a través del canal RoF ha demostrado un alto rendimiento en términos de BER. Por un lado, en transmisiones independientes, la señal LTE presentó un BER promedio de 8.54×10^{-4} , por el lado de la convergencia, logró mantenerse por debajo del umbral de 10^{-3} , con un valor medio de 7.84×10^{-5} , evidenciando una mejora en la calidad de la señal.
- ❑ La adaptación de la frecuencia de LTE para permitir la convergencia se evidenció en

notables cambios en el EVM. En el envío por independientes, UPMC arroja un EVM medio del 14.92%, por otro lado, en la convergencia de ambas señales, se logró una reducción significativa, alcanzando un promedio del 0.03%. Este ajuste en la frecuencia de operación no solo evitó interferencias, sino que también contribuyó a una mejora en la calidad de ambas señales.

- ❑ Es pertinente destacar que la convergencia de servicios no se limita a un entorno estático; su eficacia se demostró igualmente en entornos dinámicos. La adaptación dinámica de la frecuencia de LTE para permitir la convergencia abre la puerta a la optimización continua de los recursos del canal, respondiendo dinámicamente a las variaciones en la carga de tráfico y las condiciones del entorno.
- ❑ Los resultados obtenidos respaldan la visión de un entorno de comunicación más eficiente y adaptable, sentando las bases para el diseño e implementación de redes más inteligentes y eficientes. Este estudio no solo proporciona validación teórica, sino también una prueba práctica de la viabilidad de la convergencia de servicios en entornos de radiofrecuencia.

3.3 RECOMENDACIONES

- ❑ La complejidad de manipular Matlab y Optsim para la creación, envío y análisis en entornos de comunicaciones sugiere la necesidad de explorar a fondo estas herramientas. Se recomienda utilizar librerías de terceros que simplifiquen las tareas y realizar un análisis exhaustivo de manuales, recomendaciones y recursos oficiales.
- ❑ Para futuros análisis que involucren el envío de dos o más señales por el mismo canal RoF, se sugiere la manipulación de las frecuencias operativas mediante métodos de fuerza bruta o machine learning. Este enfoque puede proporcionar la mínima separación óptima entre las señales, optimizando así el uso del ancho de banda disponible y mejorando el rendimiento general del sistema convergente.
- ❑ Dada la flexibilidad de Optsim para manipular cualquier cantidad de elementos, se aconseja ajustar la cantidad de atenuadores ópticos según sea necesario. Esto es especialmente crucial para obtener niveles de potencia en recepción que sigan una variación lineal. Evitar variaciones exponenciales asegurará que los datos obtenidos sean ideales para un análisis preciso y una interpretación adecuada del rendimiento del sistema convergente.

- ❑ Se recomienda realizar validaciones continuas de los parámetros clave utilizados en la co-simulación, como la potencia en recepción, para asegurar la consistencia y la fiabilidad de los resultados. Esto implica una revisión regular de las configuraciones y una adaptación dinámica de los parámetros según sea necesario, garantizando así una evaluación precisa y actualizada del rendimiento del sistema.

- ❑ Dada la rápida evolución de las tecnologías de comunicación, se recomienda mantenerse al tanto de las tendencias emergentes y explorar cómo las nuevas tecnologías pueden integrarse en el contexto de la convergencia de servicios. La investigación continua en áreas como inteligencia artificial, redes definidas por software y protocolos avanzados puede proporcionar oportunidades para mejorar la eficiencia y el rendimiento del sistema convergente.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Quezada Sarmiento, L. Conde y M. Labanda-Jaramillo, "La Nueva Generación de Redes Móviles: Tecnología 5G y su aplicación en el contexto e - educación.," jun. de 2018.
- [2] A. Aldana J. Ana Teresa Vallejo C., "TELECOMUNICACIONES, CONVERGENCIA Y REGULACIÓN," Español, *Revista de Economía Institucional*, 2010, ISSN: 0124-5996. dirección: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41915521008>.
- [3] M. C. Dávila Pazmiño, "Prototipos de redes LTE en base a tecnología de radio definida por software e integración de la tecnología de radio sobre fibra en redes móviles: Análisis de la integración de tecnologías de radio sobre fibra en redes móviles: Caso de estudio técnica UFMC.," B.S. thesis, Quito: EPN, 2022., 2022.
- [4] M. N. Tipán, T. B. Arguero y G. V. Arévalo, "UFMC and LTE Convergence Test in Optical Access Network," en *2019 IEEE Fourth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, IEEE, 2019, págs. 1-4.
- [5] V. Pujari, R. Patil, M. Tambe y A. Prof, "Research Paper on Future of 5G Wireless System," pág. 2021, jun. de 2021.
- [6] V. Dubey, D. Chadha y V. Chandra, "Experimental validation of multiple gain combiner in single-relay cooperative FSO communication systems," *Photonic Network Communications*, vol. 37, págs. 110-119, 2019.
- [7] S. K.Mohapatra, J. Bhuyan y H. N.Narang, "Planning and Managing Virtualized Next Generation Networks," *International journal of Computer Networks Communications*, vol. 7, págs. 01-16, nov. de 2015. DOI: 10.5121/ijcnc.2015.7601.
- [8] S. Autor, *CONVERGENCIA TECNOLÓGICA*, 2015. dirección: <https://nathakastellanos.wordpress.com/2015/02/10/convergencia-tecnologica/>.
- [9] M. Camelo, H. Castro e Y. Donoso, "Convergencia de servicios en re-des de próxima generación," *SISTEMAS*, págs. 42-51, ene. de 2008.
- [10] S. Lee, J. Choi e Y.-w. Sawng, "Foresight of promising technologies for healthcare-IoT convergence service by patent analysis," 2019.
- [11] R. Ulloa Espindola et al., "Geopronósticos de asentamientos con construcción civil en áreas periféricas basado en autómatas celulares, caso zona crítica de Quito-Ecuador," Tesis doct., Universitat Rovira i Virgili.

- [12] H. Hanrahan, *Network convergence: services, applications, transport, and operations support*. John Wiley & Sons, 2007.
- [13] O. d. León, "Perspectivas de las tecnologías de telecomunicaciones y sus implicancias en los mercados y marcos regulatorios en los países de América Latina y el Caribe," 2009.
- [14] C. D. Martínez, P. D. García y P. N. Sustaeta, "Sesgos de género ocultos en los macrodatos y revelados mediante redes neurales," *Reis: Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, n.º 172, págs. 41-59, 2020.
- [15] A. Baki, "Comparison of different New Radio (NR) waveforms for wireless communications," *Plos one*, vol. 18, n.º 4, e0283886, 2023.
- [16] J. Á. Fernández Segovia et al., "Algoritmos de planificación del control de potencia y estimación de capacidad en redes LTE," 2015.
- [17] C. Cox, *An Introduction to LTE-LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*, 2023.
- [18] E. Hajlaoui, A. Zaier, A. Khelifi, J. Ghodhbane, M. B. Hamed y L. Sbita, "4G and 5G technologies: A Comparative Study," en *2020 5th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, IEEE, 2020, págs. 1-6.
- [19] S. 2019, *LTE Architecture Concepts*, 2019. dirección: <https://yatebts.com/documentation/concepts/lte-concepts/>.
- [20] A. Thongrak, N. A-Mapat, P. Moungnoul y P. Anunvrapong, "Load Sharing Technique for Coexistence LTE-FDD and LTE-TDD," en *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, 2019, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ICEAST.2019.8802549.
- [21] D. G. Chicango Chinchuña, "Análisis experimental de señales LTE y LTE-Advanced en modo de operación FDD utilizando un generador y un analizador de señales 4G," B.S. thesis, Quito, 2017., 2017.
- [22] S. I. Logroño Naranjo, "PROPUESTA DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LTE EN SISTEMAS DE GESTIÓN DE EMERGENCIAS," 2021.
- [23] M. Quiñones-Cuenca, H. P. Pachar Bravo, J. Martínez-Curipoma, L. Quiñones y R. Torres, "Desarrollo y evaluación de un gateway móvil IoT para redes 4G LTE," *Enfoque UTE*, vol. 11, n.º 4, págs. 16-26, 2020.

- [24] W. Stallings, *5G Wireless*. Pearson Education, 2021.
- [25] A. Hazareena et al., "UFMC system performance analysis for 5G cellular networks," *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, vol. 12, n.º 10, págs. 162-167, 2021.
- [26] P. N. Rani y C. S. Rani, "UFMC: The 5G modulation technique," en *2016 IEEE international conference on computational intelligence and computing research (ICIC)*, IEEE, 2016, págs. 1-3.
- [27] L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, K. Wang, D. Qiao y M. A. Imran, "Optimal filter length and zero padding length design for universal filtered multi-carrier (UFMC) system," *IEEE Access*, vol. 7, págs. 21 687-21 701, 2019.
- [28] M. Saad, A. Al-Ghouwayel y H. Hijazi, "UFMC transceiver complexity reduction," en *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, IEEE, 2018, págs. 295-301.
- [29] A. Uruchima Portilla, "Análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones usando Simulink," *Guayaquil-Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*, 2016.
- [30] A. Zin, M. Bongsu, S. Idrus y N. Zulkifli, "An overview of radio-over-fiber network technology," en *International Conference On Photonics 2010*, IEEE, 2010, págs. 1-3.
- [31] D. I. Inc, *What is LTE: How It Works and Why It Matters*, 2019. dirección: <https://www.digi.com/blog/post/what-is-lte>.
- [32] J. Beas, G. Castanon, I. Aldaya, A. Aragón-Zavala y G. Campuzano, "Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: a survey," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 15, n.º 4, págs. 1593-1619, 2013.
- [33] H. S. Abbas y M. A. Gregory, "The next generation of passive optical networks: A review," *Journal of network and computer applications*, vol. 67, págs. 53-74, 2016.
- [34] A. L. Aguiar, F. B. Sousa e Y. V. de Melo, "Optical Distribution Network Design using PSO," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, n.º 1, págs. 239-242, 2022.
- [35] T. Horvath, P. Munster, V. Oujezsky y N.-H. Bao, "Passive Optical Networks Progress: A Tutorial," *Electronics*, vol. 9, n.º 7, 2020, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics9071081. dirección: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/7/1081>.

- [36] K. Mat Sharif, N. A Ngah, A. Ahmad, K. Khairi, Z. Manaf y D. Tarsono, "Demonstration of XGS-PON and GPON Co-Existing in the Same Passive Optical Network," en *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP)*, 2018, págs. 1-3. DOI: 10.1109/ICP.2018.8533167.
- [37] Y. J. Aruan, P. T. Daely, G. A. R. Sampedro, J. M. Lee y D.-S. Kim, "The Design of The Emerging 5G Using Hybrid GPON and XGS-PON Technology," en *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2021, págs. 1002-1004. DOI: 10.1109/ICTC52510.2021.9620906.
- [38] D. Singh, M. Singh, Z. Hakimjon, D. Singh, M. Singh y Z. Hakimjon, "Requirements of MATLAB/Simulink for signals," *Signal Processing Applications Using Multidimensional Polynomial Splines*, págs. 47-54, 2019.
- [39] Synopsys, *Synopsys OptSim: Single-mode network*, 2023. dirección: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim/single-mode-network.html>.
- [40] MathWorks, *OptSim: A MATLAB toolbox for optical network simulation*, 2023. dirección: https://la.mathworks.com/products/connections/product_detail/optsim.html.
- [41] L. Vallejo, B. Ortega, D.-N. Nguyen, J. Bohata, V. Almenar y S. Zvanovec, "Usability of a 5G fronthaul based on a DML and external modulation for M-QAM transmission over photonicallly generated 40 GHz," *IEEE Access*, vol. 8, págs. 223 730-223 742, 2020.
- [42] K. Hussain et al., "Spectrum shaping techniques for advanced multicarrier communication systems," Tesis doct., Teoria do sinal e comunicacões, 2023.
- [43] R. S. Yarrabothu y U. R. Nelakuditi, "Optimization of out-of-band emission using kaiser-bessel filter for UPMC in 5G cellular communications," *China Communications*, vol. 16, n.º 8, págs. 15-23, 2019.
- [44] A. A. Abdallah y Z. M. Kassas, "Evaluation of Feedback and Feedforward Coupling of Synthetic Aperture Navigation with LTE Signals," en *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, 2019, págs. 1-6. DOI: 10.1109/VTCFall.2019.8891521.
- [45] C. A. Solis Ornelas, N. Cerecedo Torres y O. Estrada Arrenchú, "Estudio de los esquemas de modulación y codificación de canal aplicados a LTE,"
- [46] W. Jiang y H. D. Schotten, "Cell-Free Massive MIMO-OFDM Transmission Over Frequency-Selective Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, n.º 8, págs. 2718-2722, 2021. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3085965.

- [47] M. K. Roberts y P. Anguraj, "A comparative review of recent advances in decoding algorithms for Low-Density Parity-Check (LDPC) codes and their applications," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, n.º 4, págs. 2225-2251, 2021.
- [48] 3GPP, *System architecture and general principles*, <https://www.3gpp.org/specifications/ts>, 2022.
- [49] ITU-T, *Transmission systems and media, digital systems and networks*, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G/en>.

5 ANEXOS

Los códigos completos de Matlab, así como los documentos necesarios para la simulación en OptSim se adjuntan en el siguiente repositorio:

https://github.com/Davosin1404/Convergencia_OptSim-Matlab