



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Transmisores ópticos de señales de ondas milimétricas  
para redes de acceso 6G

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

AUTOR/A: Romero Huedo, Jaime

Tutor/a: Ortega Tamarit, Beatriz

Director/a Experimental: MORA ALMERICH, JOSE

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



## Resumen

La tecnología de acceso de ondas milimétricas es considerada una tecnología habilitadora de las redes 5G y 6G. El uso de frecuencias elevadas y las limitaciones que presenta la electrónica motivan la utilización de sistemas ópticos para la generación, transmisión y distribución de señales en la banda 30-300 GHz. Este trabajo se enfoca en proponer y evaluar una estructura de transmisión óptica, incluyendo el análisis tanto de la transmisión de un servicio individual como de múltiples servicios simultáneos. Para llevar a cabo esta evaluación, se han utilizado programas de simulación y se han realizado medidas experimentales en el laboratorio, permitiendo comparar y contrastar los resultados obtenidos. Estas actividades han proporcionado información detallada sobre el rendimiento y las características del esquema propuesto en diferentes escenarios de transmisión.

## Resum

La tecnologia d'accés d'ones mil·limètriques és considerada una tecnologia habilitadora de les xarxes 5G i 6G. L'ús de freqüències altes i les limitacions que presenta l'electrònica motiven la utilització de sistemes òptics per a la generació, transmissió i distribució de senyals en la banda de 30-300 GHz. Aquest treball es focalitza a proposar i avaluar una estructura de transmissió òptica, incloent l'anàlisi tant de la transmissió d'un servei individual com de múltiples serveis simultanis. Per a dur a terme aquesta avaluació, s'han utilitzat programes de simulació i s'han realitzat mesures experimentals en el laboratori, permetent comparar i contrastar els resultats obtinguts. Aquestes activitats han proporcionat informació detallada sobre el rendiment i les característiques de l'esquema proposat en diferents escenaris de transmissió.

## Abstract

The millimeter wave access technology is considered an enabling technology for 5G and 6G networks. The use of high frequencies and the limitations presented by electronics drive the utilization of optical systems for signal generation, transmission, and distribution in the 30-300 GHz band. This work focuses on proposing and evaluating an optical transmission structure, including analysis of both individual service transmission and simultaneous transmission of multiple services. To carry out this evaluation, simulation programs have been used and experimental measurements have been conducted in the laboratory, allowing for comparison and contrasting of the obtained results. These activities have provided detailed information on the performance and characteristics of the proposed scheme in different transmission scenarios.



## Índice

Capítulo 1. Introducción, objetivos y estructura .....	8
1.1 Motivación .....	8
1.2 Objetivos .....	10
1.3 Estructura de la memoria.....	11
1.4 Tareas y planificación temporal. ....	11
1.5 Objetivos de desarrollo Sostenible. ....	12
Capítulo 2. Fundamentos y estado del arte .....	13
2.1 Tecnologías habilitadoras.....	13
2.1.1 Un nuevo espectro.....	13
2.1.2 Una nueva arquitectura.....	16
2.1.3 Una nueva interfaz aérea. ....	17
2.1.4 Una nueva red.....	17
2.1.5 Un nuevo paradigma .....	19
2.2 Radio sobre Fibra (RoF).....	20
2.3 Generación fotónica de señales de onda milimétrica mediante CS-MZM.....	23
2.3.1 Análisis teórico comparación generación fotónica OB2B y RoF. ....	26
Capítulo 3. Sistema de transmisión de datos mediante DML sobre señales mmW generadas fotónicamente.29	
3.1 Esquema de transmisión de datos.....	29
3.2 Respuesta en frecuencia .....	30
3.2.1 Espectros eléctricos y ópticos para 1GHz en BB y en banda MMW .....	32
3.2.2 Simulaciones Barrido en frecuencia.....	34
3.3 Transmisión de datos.....	36
3.3.1 Transmisión de datos por DML en BB. ....	36
3.3.2 Transmisión de datos mediante el diagrama esquemático de transmisión RoF (DML+CS-MZM) .....	39
Capítulo 4. Propuesta de un sistema de transmisión de múltiples señales de datos con generación fotónica CS-MZM y DML.....	50
4.1 Esquema de transmisión de datos.....	50
4.2 Transmisión de 2 servicios.....	51
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras .....	56
Capítulo 6. Bibliografía.....	58

## Índice de Figuras

FIGURA 1.1. VOLUMEN DE TRÁFICO CREADO, COPIADO O CONSUMIDO EN LA ÚLTIMA DÉCADA Y ESTIMACIÓN PRÓXIMOS AÑOS. FUENTE: [1] .....	8
FIGURA 1.2. NUEVOS ESCENARIOS Y CASOS DE USO QUE SE PRESENTAN EN EL 6G. FUENTE: [2] .....	9
FIGURA 1.3. COMPARATIVA REQUISITOS TÉCNICOS DE LOS PRINCIPALES INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO (KPIs) ENTRE LAS TECNOLOGÍAS 5G (ROJO) Y 6G(AZUL). FUENTE: [2] .....	10
FIGURA 1.4. DIAGRAMA DE GANNT .....	12
FIGURA 2.1. ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA Y MOLECULAR A FRECUENCIA DE ONDAS MILIMÉTRICAS. FUENTE [3] .....	14
FIGURA 2.2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. FUENTE: [4] .....	14
FIGURA 2.3. (A) ESQUEMA LASER MODULACIÓN DIRECTA (B) RELACIÓN CORRIENTE – POTENCIA LASER [6] .....	16
FIGURA 2.4. EJEMPLO ARQUITECTURA C-RAN. FUENTE:[6] .....	19
FIGURA 2.5. VENTANAS DE TRANSMISIÓN FIBRA ÓPTICA. FUENTE [10] .....	21
FIGURA 2.6. ENLACE ROF IM-DD. FUENTE [11] .....	21
FIGURA 2.7. CONFIGURACIONES DE UN ENLACE ROF: (A) RF - SOBRE FIBRA, (B) IF – SOBRE FIBRA, (C) BB – SOBRE FIBRA. FUENTE [11] .....	22
FIGURA 2.8. ESTRUCTURAS MACH-ZEHNDER. (A) SINGLE DRIVE, (B) DUAL DRIVE. FUENTE [6]. .....	24
FIGURA 2.9. ZONAS DE TRABAJO MACH-ZEHNDER. [6]. .....	25
FIGURA 3.1. ESQUEMA DE TRANSMISIÓN DE DATOS SOBRE SEÑALES MMW GENERADAS FOTÓNICAMENTE.....	29
FIGURA 3.2. ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA PARA TRANSMISIÓN ROF OPTISYSTEM. ....	30
FIGURA 3.3. ESPECTROS ÓPTICOS EN LOS 3 PUNTOS DE INTERÉS (A) DML (B) DESPUÉS MZM (C) ENTRADA PD. ....	33
FIGURA 3.4. ESPECTROS ELÉCTRICOS PARA UN TONO DE FRECUENCIA 1 GHZ. (A) BB(1GHZ), (B) MMW (39 GHZ), (C) MMW (41 GHZ). ....	33
FIGURA 3.5. COMPARACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA PARA BB Y AMBAS BANDAS MMW CONSIDERANDO DIFERENTES LONGITUDES DE FIBRA (A) L= 0KM, (B) L = 10 KM Y (C) L = 25 KM .....	34
FIGURA 3.6. MEDIDAS EXPERIMENTALES DE POTENCIA ELÉCTRICA PARA BB Y AMBAS BANDAS MMW PARA OB2B Y CONFIGURACIÓN CON FIBRA (L = 25 KM) .....	35
FIGURA 3.7. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA LA TRANSMISIÓN DE UN SERVICIO EN BB.....	36
FIGURA 3.8. MÓDULO PARA TRANSMITIR UN SERVICIO .....	37
FIGURA 3.9. MÓDULO PARA RECIBIR UN SERVICIO .....	38
FIGURA 3.10. TRANSMISIÓN DE DATOS POR DML EN BB IF 500MHZ 25MSps 4QAM. (A) CONSTELACIÓN TRANSMITIDA. (B) CONSTELACIÓN RECIBIDA. (C) CONSTELACIÓN RECIBIDA AJUSTADA. ....	39
FIGURA 3.11. ESQUEMA CON UN SERVICIO CON DML+ CS-MZM. PROCESADO DE SEÑAL EN BB Y MMW .....	40
FIGURA 3.12. ESPECTRO ELÉCTRICO CON $F_{IF} = 100\text{MHZ}$ , MODULACIÓN 4QAM A 10MS/S Y SIN FIBRA EN LAS BANDAS DE FRECUENCIAS: (A) BB 100 MHZ, (B) MMW 39.9 GHZ, (C) MMW 40.1 GHZ.....	41
FIGURA 3.13. CONSTELACIONES RECIBIDAS CON $F_{IF} = 100\text{MHZ}$ , MODULACIÓN 4QAM A 10MS/S Y SIN FIBRA EN LAS BANDAS DE FRECUENCIAS: (A) BB 100 MHZ, (B) MMW 39.9 GHZ, (C) MMW 40.1 GHZ. ....	41
FIGURA 3.14. ESPECTRO ELÉCTRICO CON $F_{IF} = 100\text{MHZ}$ , MODULACIÓN 4QAM A 10MS/S Y 10 KM FIBRA EN LAS BANDAS DE FRECUENCIAS: (A) BB 100 MHZ, (B) MMW 39.9 GHZ, (C) MMW 40.1 GHZ.....	42
FIGURA 3.15. CONSTELACIONES RECIBIDAS CON $F_{IF} = 100\text{MHZ}$ , MODULACIÓN 4QAM A 10MS/S Y 10 KM FIBRA EN LAS BANDAS DE FRECUENCIAS: (A) BB 100 MHZ, (B) MMW 39.9 GHZ, (C) MMW 40.1 GHZ.....	42
FIGURA 3.16. SERVICIO CON $F_{IF} = 100\text{MHZ}$ , MODULACIÓN 4QAM Y 10MS/S (A) EVM vs RoP. (B) EVM vs ReP. (C) EVM vs MER .....	43
FIGURA 3.17. ESPECTRO ELÉCTRICO DEL SERVICIO CON FRECUENCIA CON $F_{IF} = 2\text{GHZ}$ , MODULACIÓN 4QAM Y 20MS/S EN BB Y MMW. SIN FIBRA: (A) BB 2 GHZ, (B) MMW 38 GHZ, (C) MMW 42 GHZ. 10 KM FIBRA: (D) BB 2 GHZ, (E) MMW 38 GHZ, (F) MMW 42 GHZ. ....	45
FIGURA 3.18. CONSTELACIONES RECIBIDAS DEL SERVICIO CON FRECUENCIA CON $F_{IF} = 2\text{GHZ}$ , MODULACIÓN 4QAM Y 20MS/S EN BB Y MMW. SIN FIBRA: (A) BB 2 GHZ, (B) MMW 38 GHZ, (C) MMW 42 GHZ. 10 KM FIBRA: (D) BB 2 GHZ, (E) MMW 38 GHZ, (F) MMW 42 GHZ. ....	46
FIGURA 3.19. SERVICIO CON $F_{IF} = 2\text{GHZ}$ , MODULACIÓN 4QAM Y 20MS/S: (A) EVM vs RoP, (B) EVM vs ReP, (C) EVM vs MER .....	47
FIGURA 3.20. ESPECTRO ELÉCTRICO DEL SERVICIO CON FRECUENCIA CON $F_{IF} = 1\text{GHZ}$ , MODULACIÓN 16QAM Y 100MS/S EN BB Y MMW. SIN FIBRA: (A) BB 1 GHZ, (B) MMW 39 GHZ, (C) MMW 41 GHZ. 10 KM FIBRA: (D) BB 1 GHZ, (E) MMW 39 GHZ, (F) MMW 41 GHZ. ....	48



FIGURA 3.21. CONSTELACIONES RECIBIDAS DEL SERVICIO CON FRECUENCIA CON  $F_{IF} = 1\text{GHz}$ , MODULACIÓN 16QAM Y 100MS/S EN BB Y MMW. SIN FIBRA: (A) BB 1 GHz, (B) MMW 39 GHz, (C) MMW 41 GHz. 10 KM FIBRA: (D) BB 1 GHz, (E) MMW 39 GHz, (F) MMW 41 GHz. .... 49

FIGURA 4.1. ESQUEMA DE TRANSMISIÓN DE DOS SERVICIOS SOBRE SEÑALES MMW GENERADAS FOTÓNICAMENTE. .... 50

FIGURA 4.2. ESQUEMA DEL SISTEMA PARA TRANSMISIÓN DE 2 SERVICIO ROF (OPTISYSTEM) ..... 51

FIGURA 4.3. ESPECTRO ELÉCTRICO RECIBIDO DE LA TRANSMISIÓN DE DOS SERVICIOS. SIN FIBRA: (A) BB 100MHz SERVICIO 1, (B) MMW 42 GHz SERVICIO2. 10 KM FIBRA: (C) BB 100 MHz SERVICIO 1, (D) MMW 42 GHz SERVICIO 2. .... 52

FIGURA 4.4. CONSTELACIONES RECIBIDAS DE LA TRANSMISIÓN DE DOS SERVICIOS. SIN FIBRA: (A) BB 100MHz SERVICIO 1, (B) MMW 42 GHz SERVICIO2. 10 KM FIBRA: (C) BB 100 MHz SERVICIO 1, (D) MMW 42 GHz SERVICIO 2. .... 52

FIGURA 4.5. TRANSMISIÓN DE 2 SERVICIOS. OPSTISYSTEM: (A) EVM vs ROP, (B) EVM vs ReP, (C) EVM vs MER. MEDIDAS EXPERIMENTALES: (D) EVM vs ROP, (E) EVM vs ReP.,(F) EVM vs MER..... 54

FIGURA 4.6 COMPARACIÓN EVM vs ROP TRANSMISIÓN 1 SERVICIO POR SEPARADO O AMBOS A LA VEZ. (A) BB, (B) MMW. .... 54



## Índice de Tablas

TABLA 1. BANDAS LATERALES ÓPTICAS Y LAS FUNCIONES DE BESSEL DEL PRIMER AL TERCER ORDEN DEL CAMPO ÓPTICO EN LA SALIDA DEL CS-MZM. ....	25
TABLA 2. TÉRMINOS DE LA FOTO CORRIENTE RECIBIDA I(T) EN BANDA BASE Y BANDA DE ONDAS MILIMÉTRICAS PARA LAS CONFIGURACIONES OB2B Y RF-ROF .....	28
TABLA 3. PARÁMETROS MÓDULO DML. ....	31
TABLA 4. EVM Y MER PARA BB Y MMW SEÑAL IF 100MHZ, QPSK 10MS/S SIN FIBRA .....	41
TABLA 5. EVM Y MER PARA BB Y MMW SEÑAL IF 100MHZ, QPSK 10MS/S 10 KM FIBRA.....	43
TABLA 6. EVM Y MER PARA BB Y MMW SEÑAL IF 2 GHZ, QPSK 20MS/S].....	46
TABLA 7. EVM Y MER PARA BB Y MMW SERVICIO IF 1000MHZ, 16QAM 100MS/S .....	49
TABLA 8. EVM Y MER PARA 2 SERVICIOS SIMULTÁNEOS.....	53



## Lista de acrónimos

5G – Quinta generación de tecnología inalámbrica  
6G – Sexta generación de tecnología inalámbrica  
BB – Banda base  
BBU – Unidad de banda base  
C-RAN - Red de acceso a radio basada en la nube  
CS – Supresión de portadora  
DML – Laser modulado directamente  
eMBB – Ancho de banda mejorado  
ER – Realidad extendida  
EVM – Vector magnitud de error  
FSO – Comunicaciones ópticas por el espacio libre  
HTC – Comunicaciones Holográficas  
IA – Inteligencia artificial  
IF – Frecuencia intermedia  
IM-DD – Modulación de intensidad y detección directa  
I/Q – Fase y cuadratura  
KPIs – Indicadores clave de rendimiento  
LEO – Constelación satélites órbita terrestre baja  
LiNbO3 – Niobato de litio  
LNA – Amplificador de bajo ruido  
LOS – Línea de visión directa  
MIMO – Múltiple entrada y salida  
ML – Aprendizaje automático  
MMW – Ondas milimétricas  
mMTC – Conexiones masivas tipo máquina  
mULC – comunicación masiva ultra confiable y de baja latencia  
MWP – Fotónica de microondas  
MZM – Modulador Mach-Zehnder  
NLOS – sin línea de visión directa  
OB2B – Enlace óptico punto a punto  
ODS – Objetivos de desarrollo sostenible  
OL – Oscilador local  
ONU – Unidad de red óptica



PD – Fotodetector

PM – Modulador de fase

QAM – Modulador de amplitud en cuadratura

QoS – Calidad de servicio

QPSK – Modulador de fase cuadratura

RAN – Red de acceso radio

ReP – Potencia eléctrica recibida

RoF – Radio sobre fibra

RoP – Potencia óptica recibida

RRU – Unidad remota de radio

Rx – Receptor

Tx – Transmisor

uMBB – Banda de ancho móvil omnipresente

UAV – Vehículos aéreos no tripulados

URLLC – Comunicaciones ultra confiables y de baja latencia

ULBC – Comunicación de banda ancha de baja latencia y ultra confiable

VLC – Comunicaciones por luz visible

## Capítulo 1. Introducción, objetivos y estructura.

### 1.1 Motivación

La sexta generación de tecnología inalámbrica (6G) surge como respuesta a la necesidad de abordar y satisfacer los requisitos que se derivan de la era tecnológica en la que vivimos, y se prevé que estos requisitos continúen creciendo y evolucionando en los próximos años. Entre los años 2010 y 2020, el volumen de tráfico de datos se multiplicó por 30, lo que condujo a la necesidad de desarrollar la quinta generación de tecnología inalámbrica (5G). Sin embargo, este crecimiento del tráfico de datos ha continuado y se espera que siga creciendo a una tasa anual del 40% hasta 2025 [1], tal como se muestra en la Figura 1.1. Esta proyección indica que para el año 2025, se alcanzará un total de 181 zettabytes de tráfico de datos.

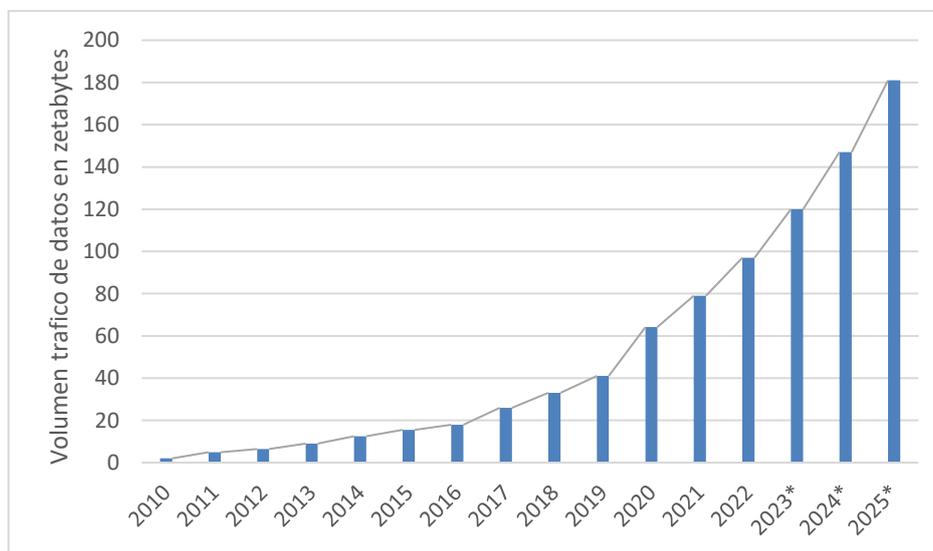


Figura 1.1. Volumen de tráfico creado, copiado o consumido en la última década y estimación próximos años.  
Fuente: [1]

Además, a medida que surgen nuevas necesidades y casos de uso, estos cada vez demandan un mayor ancho de banda y requieren velocidades mucho mayores. Así pues, las redes móviles que existen hoy en día no podrán satisfacer las necesidades de una sociedad modernizada y una industria futura. A continuación, se presentan algunas de las necesidades que ya han sido identificadas para un futuro próximo.

Las comunicaciones holográficas (HTC), permitiendo hologramas de alta definición en aplicaciones como telepresencia, educación, etc. La realidad extendida (ER), que es una combinación de realidad aumentada, virtual y mixta. El internet táctil, que permita una respuesta en tiempo real, imprescindible en aplicaciones de la industria remota o cirugía robótica. Experiencias multisensoriales, capacidad de transmitir y percibir el ambiente, mediante los 5 sentidos humanos. El “*Digital Twin*”, la creación de un modelo digital idéntico al real y que responda de la misma manera a estímulos o simulaciones que lo haría el real. La conducción autónoma, 100% segura y accesible en cualquier lugar. Todos los casos citados son algunos de los muchos ejemplos de casos de uso futuros que demandarán unas prestaciones que hoy en día la red no puede ofrecer.

La tecnología 6G tiene como objetivo combinar las capacidades del 5G: la banda ancha móvil mejorada (eMBB) que proporciona velocidades de datos extremadamente altas, la comunicación ultra confiable y de baja latencia (URLLC) y la comunicación masiva de tipo máquina (mMTC), además de mejorar sus prestaciones. En la Figura 1.2 se observan los 3 escenarios nuevos que surgen de la convergencia de los escenarios de 5G: “ubiquitous mobile broadband” (uMBB), “ultra-reliable low-latency broadband communication” (ULCB) y “massive ultra-reliable low-latency communication” (mULC) [2].

- La comunicación de banda ancha de baja latencia y ultra confiable, también conocida como (ULBC) proporcionará a las aplicaciones que necesitan una gran fiabilidad y latencia muy baja, un rendimiento extremadamente alto. Algunos casos de uso en este escenario serían: HTC, ER, Internet táctil, experiencias multisensoriales e inteligencia pervasiva.
- La banda ancha móvil omnipresente (uMBB) es una tecnología que combina funciones mejoradas de ancho de banda con capacidades de movilidad, cobertura y posicionamiento. Esto permite una conexión ubicua en toda la superficie de la tierra, brindando una conectividad constante y confiable en cualquier lugar. El concepto de "digital twin" (gemelo digital), la inteligencia pervasiva, las comunicaciones mejoradas a bordo de diferentes medios de transporte y la conectividad global son algunos de los casos de uso que se benefician en este escenario.
- La comunicación masiva ultra confiable y de baja latencia (mULC). Permitirá la implementación de sensores y actuadores masivos en industrias verticales. Siendo de gran aplicabilidad en el transporte y logística, internet táctil y la conexión global ubicua.

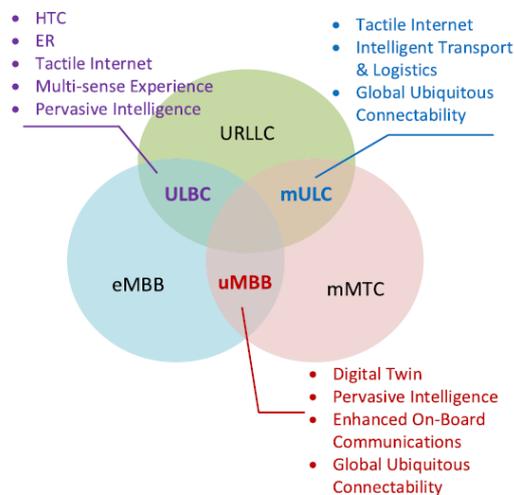


Figura 1.2. Nuevos escenarios y casos de uso que se presentan en el 6G. Fuente: [2]

En cuanto a las prestaciones esperadas para el 6G, suponen un incremento respecto al 5G como se observa en la Figura 1.3:

- Una tasa de Bit máximo pico de hasta 1 Tb/s.
- Conexión de 10.000.000 de dispositivos por km<sup>2</sup>
- Una fiabilidad casi absoluta, superior al 99,99999%
- Mayor movilidad, hasta 1000 km/h.
- Posicionamiento detallado, en torno al 1 cm de precisión.
- Latencia inferior a 1 ms.

- Capacidad de tráfico superior a 1 Gbps/m<sup>2</sup>.

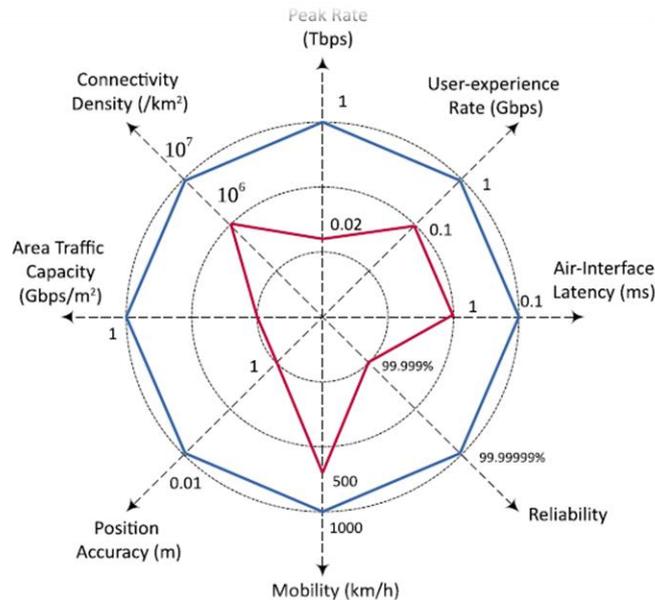


Figura 1.3. Comparativa requisitos técnicos de los principales indicadores clave de rendimiento (KPIs) entre las tecnologías 5g (Rojo) y 6g(Azul). Fuente: [2]

En resumen, la evolución de las redes hacia la 6G será clave para habilitar las tecnologías y servicios del futuro. Para lograrlo, se pretende converger las capacidades del 5G y mejorarlas, así como desarrollar nuevas tecnologías que permitan cubrir las demandas de los usuarios y satisfacer sus necesidades de conectividad.

## 1.2 Objetivos

Debido al crecimiento de las redes de comunicaciones, se requiere el uso de nuevas tecnologías habilitadoras capaces de hacer frente a esta demanda. Este trabajo se centra en la exploración de un nuevo espectro para las redes de acceso, mediante el uso de ondas milimétricas que se generan mediante espectros ópticos. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de transmisión de datos en la banda de frecuencias milimétricas utilizando técnicas de generación fotónica que permita la transmisión de múltiples servicios independientes mediante la tecnología de radio sobre fibra.

Como objetivos secundarios, se abordarán en este proyecto los siguientes desafíos:

- Investigar y analizar las características de las ondas milimétricas y su potencial para la transmisión de datos en redes de acceso.
- Estudiar y comprender los fundamentos teóricos de la generación fotónica de señales en la banda de frecuencia milimétrica.
- Diseñar y simular un sistema de transmisión de datos utilizando técnicas de generación óptica en la banda de ondas milimétricas.
- Investigar y proponer modificaciones al sistema de transmisión de datos para la transmisión de múltiples servicios.

### 1.3 Estructura de la memoria

La estructura de este trabajo se divide en 5 partes. En la sección actual, se presenta la motivación y los objetivos de la investigación. En el segundo capítulo, se realiza una revisión exhaustiva de los fundamentos teóricos y conceptos clave que se utilizarán a lo largo del trabajo. Esto incluye una exploración de las tecnologías habilitadoras, la técnica de radio sobre fibra y la generación fotónica de señales de ondas milimétricas.

En el tercer capítulo, se propone un diseño para un esquema de transmisión de datos mediante señales de ondas milimétricas generadas fotónicamente, para ello se utiliza un láser modulado directamente. Además, se realiza un análisis detallado de la respuesta en frecuencia y la transmisión de datos utilizando técnicas como QPSK y QAM.

En el cuarto capítulo, se presenta una propuesta de esquema para la transmisión de múltiples servicios y se analizan los resultados obtenidos a través de la simulación utilizando Optisystem. Estos resultados se compararán con las medidas realizadas en el laboratorio sobre un diseño experimental.

Finalmente, en el quinto capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la investigación realizada. Se resumen los hallazgos clave, se discuten las implicaciones de los resultados y se brindan recomendaciones para investigaciones futuras en este campo.

En resumen, este trabajo aborda la transmisión de datos mediante la utilización de un láser modulado directamente y la generación fotónica de señales de ondas milimétricas. Se investigan aspectos como la respuesta en frecuencia, la transmisión de datos y la capacidad de transmisión de múltiples servicios. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para el desarrollo de sistemas de comunicación de alta velocidad y gran capacidad mediante el uso de tecnologías convergentes en el contexto de las comunicaciones ópticas y las tecnologías de ondas milimétricas.

### 1.4 Tareas y planificación temporal.

En esta sección se presenta la organización y la estimación de tiempo para cada una de las tareas llevadas a cabo en este trabajo.

Los primeros meses se dedicaron a la investigación y formación, a través de la lectura de artículos, publicaciones y tutoriales relacionados con el programa de simulación Optisystem.

Posteriormente, a mediados de abril, se iniciaron los primeros diseños de transmisión de datos. Una vez completados los diseños, se realizaron las pruebas y simulaciones necesarias. Simultáneamente, se comenzó el proceso de documentación y redacción del trabajo.

Finalmente, una vez que las simulaciones demostraron ser exitosas, se planteó y desarrolló el sistema de transmisión de múltiples servicios. En la Figura 1.4 se puede apreciar el tiempo aproximado dedicado a cada tarea.

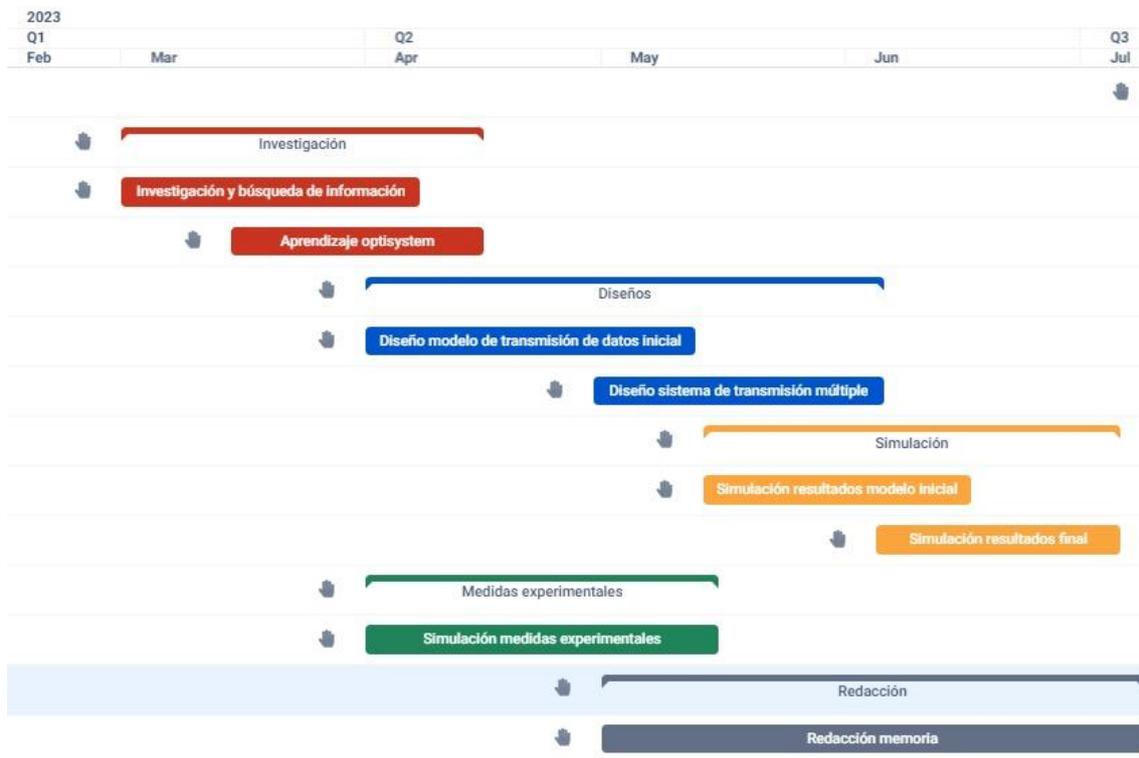


Figura 1.4. Diagrama de Gannt

## 1.5 Objetivos de desarrollo Sostenible.

El desarrollo de la sexta generación de tecnología inalámbrica tiene un impacto significativo en varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los cuales destacan el ODS 7 de Energía asequible y no contaminante, el ODS 9 de Industria, innovación e infraestructura, y el ODS 11 de Ciudades y comunidades sostenibles.

El 6G impulsará la innovación tecnológica y fomentará el desarrollo de nuevas industrias, así como mejorará la infraestructura de comunicaciones para facilitar el acceso a la conectividad. Sin embargo, la creciente demanda de datos y la expansión de las tecnologías de comunicación inalámbrica conlleva un aumento en el consumo de energía. Con el 6G, se busca abordar este desafío mediante el desarrollo de tecnologías y estrategias que permitan una mayor eficiencia en la transmisión de datos. Una de las formas en que el 6G puede lograr esto es a través de la utilización de técnicas avanzadas de procesamiento de señales y gestión de recursos. Como, por ejemplo: la transmisión radio sobre fibra y la generación fotónica de señales de ondas milimétricas. Estas técnicas pueden ayudar a optimizar el uso del espectro electromagnético y minimizar la interferencia, lo que a su vez reduce la necesidad de amplificadores y repetidores de señal que consumen energía.

El enfoque en la eficiencia energética del 6G tiene como objetivo no solo reducir el consumo de energía, sino también promover una mayor sostenibilidad y minimizar el impacto ambiental de las comunicaciones inalámbricas. Al lograr una transmisión de datos más eficiente y consumir menos energía, el 6G contribuirá a avanzar hacia una energía más asequible y menos contaminante, alineándose así con el ODS 7.

## Capítulo 2. Fundamentos y estado del arte

El aumento constante en el número de dispositivos conectados a Internet, junto con la creciente demanda de ancho de banda y la necesidad de una mayor eficiencia energética, están llevando a los investigadores y a la industria a buscar nuevas tecnologías que permitan una mayor velocidad de transmisión de datos, una mayor capacidad de red, una menor latencia y una mayor eficiencia energética. Para satisfacer estas demandas, se han propuesto cinco tecnologías habilitadoras para el futuro de las comunicaciones móviles: el nuevo espectro, la nueva red, la nueva interfaz de aire, la nueva arquitectura y el nuevo paradigma. Cada una de estas estrategias tiene sus propias ventajas y desafíos únicos, pero en conjunto podrían permitir una red móvil más eficiente, rápida y confiable para el futuro [2].

### 2.1 Tecnologías habilitadoras

#### 2.1.1 *Un nuevo espectro.*

Una de las tecnologías habilitadoras clave para el futuro de las comunicaciones móviles es ampliar el espectro de uso, que se subdivide en cinco categorías: ondas milimétricas, comunicaciones en Terahercios, comunicaciones de luz visible, comunicaciones inalámbricas ópticas y gestión dinámica del espectro.

Hasta ahora, las frecuencias utilizadas se han limitado a menos de 6 GHz. Sin embargo, con la llegada del 5G, se han comenzado a desarrollar sistemas capaces de operar en todo el rango de frecuencias de las ondas milimétricas, que abarca desde 30 GHz hasta 300 GHz. Esta tecnología es importante debido a su amplio ancho de banda de hasta 270 GHz, lo que aumenta la capacidad del canal según el teorema de Shannon.

Además, las frecuencias milimétricas tienen una longitud de onda más corta, lo que permite utilizar antenas de menor tamaño y formar matrices con un mayor número de ellas en un espacio más reducido. Esto también resulta en un ancho de haz más estrecho, lo que es útil, por ejemplo, en los radares de detección [3]. Sin embargo, el uso de esta tecnología plantea desafíos técnicos que actualmente están siendo objeto de estudio.

En la Figura 2.1 se pueden observar los picos de atenuación debido a la absorción atmosférica y molecular. En las bandas de 35 GHz, 94 GHz, 140 GHz y 220 GHz, la propagación de ondas milimétricas experimenta una atenuación relativamente pequeña. Por lo que las comunicaciones a larga distancia pueden lograrse a estas frecuencias. En cambio, en las bandas de 60 GHz y 180 GHz se atenúan en mayor medida, esto es debido a la absorción de oxígeno a presiones a nivel del mar, que forma una amplia banda de absorción alrededor de los 60 GHz donde las ondas pueden llegar a sufrir hasta 15 dB de atenuación por km.

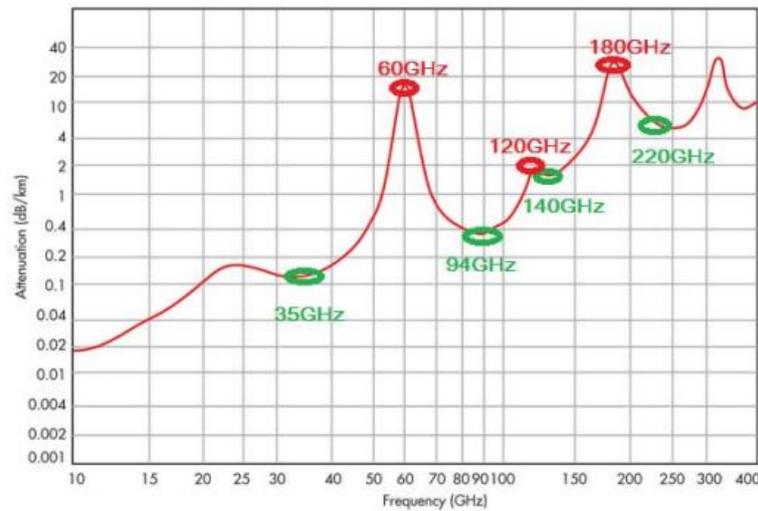


Figura 2.1. Atenuación atmosférica y molecular a frecuencia de ondas milimétricas. Fuente [3]

Además, hay una mayor dependencia de la línea de visión directa (LOS), lo que significa que los obstáculos pueden afectar la calidad de la señal. Por tanto, el desvanecimiento lento tiene un impacto más severo en la movilidad. Sumado a todo esto, en entornos interiores, las interferencias resultan en un problema importante.

A pesar de estos desafíos, esta tecnología es clave para el desarrollo de redes de acceso como el 6G, ya que tiene un gran potencial para reducir la congestión de la red debido a su alta capacidad de transmisión.

En cuanto a la generación y detección de señales de Terahercios, en la Figura 2.2 se puede apreciar el espectro electromagnético donde se encuentran situadas en una posición intermedia entre las señales de microondas y las señales infrarrojas.

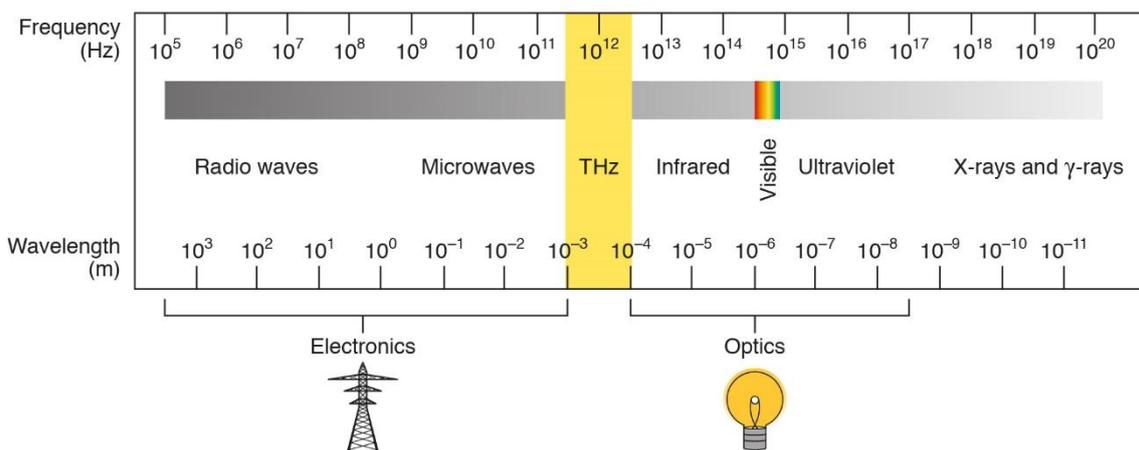


Figura 2.2. Espectro electromagnético. Fuente: [4]

Las características de esta banda son similares a la de la banda de ondas milimétricas, aportan un ancho de banda inmenso, pero sufren de un gran "path loss" (perdida por propagación) y por tanto una cobertura limitada. Por este motivo dependen de LOS siendo imposible propagarse en escenarios sin línea de visión directa (NLOS). Sin embargo, esta característica puede plantearse como una ventaja en términos de seguridad, ya que en escenarios "indoor" estas ondas no se propagarían al exterior. Para los casos en los que LOS sea posible, tienen una velocidad de

transferencia enorme, baja latencia y gran fiabilidad. Además, el tamaño de las antenas es aún menor, pudiéndose juntar miles de ellas para superar las pérdidas por propagación. Por otro lado, resultan insensibles a los efectos atmosféricos. Estas características proporcionan a las ondas de terahercios tres utilidades [5]:

- THz para Transporte Inalámbrico de Datos “*Wireless Backhaul*”. Consisten en enlaces como extensiones de fibra óptica, por ejemplo, para áreas rurales o remotas y así garantizar que la alta velocidad de acceso a internet llega a cualquier parte.
- THz para acceso red inalámbrico. Posibilitarán una conexión fluida entre redes cableadas de altísima velocidad y dispositivos inalámbricos personales, logrando una integración total y un equilibrio en la velocidad de transferencia de datos entre ambas conexiones. Esto hará más fácil la utilización de aplicaciones que demandan un ancho de banda significativo, tanto para usuarios que permanecen en un lugar fijo como para aquellos que se mueven, especialmente en entornos locales e interiores de acceso. Se usará en aplicaciones como videoconferencias holográficas y distribución inalámbrica de datos a alta velocidad.
- Acceso Inalámbrico de THz para Sistemas Ciber físicos: La plena adopción de redes digitales en la industria, el comercio y los servicios públicos, incluyendo el control de tráfico, la conducción autónoma, el monitoreo remoto de la salud, la cadena de suministro, los procedimientos de seguridad y la automatización de grandes instalaciones de producción, representa escenarios ciber físicos que requerirán las características de una latencia casi nula proporcionada por la banda de terahercios.

Las Comunicaciones de Luz Visible (VLC) se basan en el uso de luces LED para la transmisión de datos, lo que las hace altamente eficientes en cuanto al consumo de energía y adecuadas para aplicaciones en interiores. Además, la tecnología VLC también ofrece una alta precisión en la localización de dispositivos. Sin embargo, la cobertura de las comunicaciones VLC está limitada debido a su incapacidad para penetrar obstáculos como paredes. A pesar de esto son una tecnología idónea para el desarrollo de las futuras redes de acceso 6G. Fuera de las frecuencias de la luz visible, existen otras comunicaciones ópticas inalámbricas con gran potencial, como los infrarrojos y ultravioleta.

También existe la posibilidad de emplear el espectro visible para enlaces punto a punto inalámbricos, basados en el uso de láseres como fuentes ópticas. Estos sistemas de comunicaciones ópticas se basan en un láser al que se le aplica una señal eléctrica que transforma en una señal óptica. A estos láseres se le conocen como láseres modulados directamente DML y serán los que se utilizarán a lo largo de todo proyecto. En la figura 7(a) se puede observar el esquema funcionamiento de un láser, donde al DML se le introduce una corriente constante ( $I_{\text{bias}}$ ) y la señal de datos  $i(t)$ . En la Figura 7(b), se observa la relación entre la corriente de entrada y la potencia óptica emitida. Se aprecia una mínima corriente para que el láser funcione de manera lineal conocida como corriente umbral y la pendiente entre corriente de entrada y potencia óptica de salida. En la ecuación 2.1 se obtiene el campo óptico de salida de un DML.

$$E(t, z = 0) = \sqrt{P(t)} e^{\varphi(t)} e^{j\omega_0 t} \quad (2.1)$$

Donde  $P(t)$  es la intensidad de la señal óptica de salida,  $\varphi(t)$  es la fase y  $\omega_0$  es la frecuencia angular del campo eléctrico.

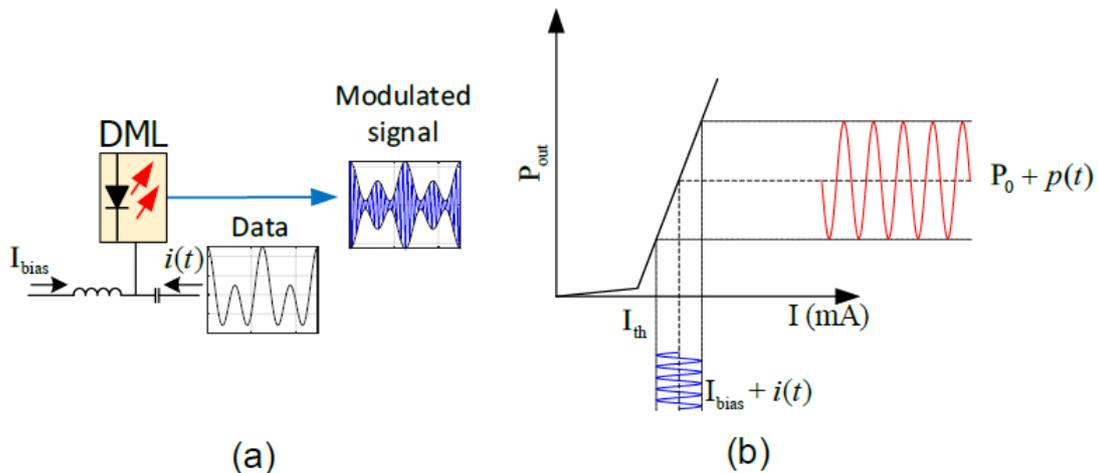


Figura 2.3. (a) Esquema laser modulación directa (b) Relación corriente – potencia laser [6]

En estas tecnologías se puede aplicar tanto la multiplexación eléctrica (por ejemplo, la multiplexación por división de tiempo, la multiplexación por división de frecuencia y la multiplexación por división de código) como a la multiplexación óptica o por división de longitud de onda; lo que permite soportar a múltiples usuarios en un solo punto de acceso. Además, esta tecnología también ofrece ventajas en términos de comunicaciones ópticas por espacio libre (FSO), lo que permitirá proporcionar cobertura en áreas rurales.

Por último, la gestión dinámica del espectro es una técnica que permite el uso flexible y eficiente del espectro mediante la asignación dinámica de frecuencias y canales de acuerdo con las necesidades del usuario y las condiciones de la red. La gestión dinámica del espectro puede mejorar la eficiencia del espectro y reducir la interferencia en la red, pero también puede requerir una mayor complejidad y coordinación en la red.

### 2.1.2 Una nueva arquitectura.

Esta sección se enfoca en nuevas tecnologías y enfoques arquitectónicos para mejorar la conectividad inalámbrica. Éstas son tecnologías disruptivas que permiten una conectividad más rápida, confiable y extendida para áreas remotas y de difícil acceso. Esta sección se divide en: grandes constelaciones de satélites, plataformas de alta altitud y vehículos aéreos no tripulados.

La primera tecnología consiste en constelación de satélites en órbita baja (LEO), la cual ofrece una amplia cobertura global y una alta capacidad de transmisión de datos a través de una red de satélites en órbita baja. Sin embargo, esta tecnología se enfrenta a desafíos como la latencia y la necesidad de infraestructuras terrestres para la interconexión.

En cuanto a la utilización de plataformas en la atmósfera superior; se haría mediante aviones no tripulados o globos aerostáticos, para proporcionar servicios de comunicación y conectividad. Estas plataformas se sitúan a altitudes de entre 20 y 50 kilómetros, lo que les permite cubrir grandes áreas geográficas y ofrecer servicios de comunicación a zonas remotas o de difícil acceso. Además, debido a su posición en la atmósfera, las plataformas de alta altitud también pueden mejorar la calidad y la velocidad de las comunicaciones en áreas urbanas congestionadas y aumentar la capacidad de la red. Sin embargo, la utilización de plataformas en la atmósfera también presenta desafíos importantes, como la necesidad de garantizar la seguridad y la fiabilidad de la red, y la necesidad de cumplir con los requisitos regulatorios y de seguridad aérea.

Finalmente, vehículos aéreos no tripulados (UAV), se refiere al uso de drones para la entrega de servicios de comunicaciones. Esta tecnología tiene el potencial de brindar una solución de red móvil flexible y escalable, así como para situaciones de emergencia y desastres naturales.

### 2.1.3 Una nueva interfaz aérea.

La definición de una nueva interfaz aérea se enfoca en las tecnologías que permiten mejorar la eficiencia espectral, la capacidad y la fiabilidad de las comunicaciones inalámbricas. Esta sección se divide en cuatro subcategorías: “*Massive MIMO*”, “*Intelligent Reflecting Surfaces*”, “*Coordinated Multi-Point and Cell-Free*” y nuevas modulaciones.

En primer lugar, “*Massive MIMO*” es una tecnología que utiliza una gran cantidad de antenas para mejorar la capacidad y la eficiencia espectral de las comunicaciones inalámbricas. Así, se pueden aumentar el número de usuarios y mejorar la calidad de la señal. Por otro lado, presenta complicaciones para implementarse en dispositivos móviles y necesita de una mayor cantidad de recursos de procesamiento.

En segundo lugar, las superficies reflectantes inteligentes se utilizan para mejorar la calidad de la señal y la eficiencia espectral de las comunicaciones inalámbricas. Con estas superficies se puede enfocar la señal en una dirección específica, mejorar la cobertura en áreas con sombras y reducir la interferencia. Sin embargo, son necesarios una mayor cantidad de dispositivos de “*hardware*” para implementar esta tecnología.

En tercer lugar, el Punto Múltiple Coordinado y Sin Células consiste en múltiples puntos de acceso para mejorar la eficiencia espectral y la cobertura de las comunicaciones inalámbricas para proporcionar servicios de alta calidad en áreas de alta densidad de usuarios.

Finalmente, se plantean nuevos esquemas de modulación para mejorar la capacidad y la eficiencia espectral de las comunicaciones inalámbricas. Mediante estos nuevos esquemas de modulación se pueden proporcionar servicios de alta calidad en condiciones de baja señal y ruido. Sin embargo, también presenta desafíos como la necesidad de una mayor cantidad de recursos de procesamiento para implementar esta tecnología.

### 2.1.4 Una nueva red.

La Nueva Red de Comunicaciones es una de las estrategias habilitadoras que permitirán a las redes de comunicaciones cumplir con las expectativas de 6G. Esta sección se divide en cinco subcategorías: softwarización y la virtualización, segmentación de la red de acceso radio (RAN) “*RAN Slicing*”, “*Open-RAN*”, red de acceso de radio en la nube (C-RAN) y la seguridad post cuántica. A continuación, se detallan las ventajas y desafíos de cada subcategoría.

La softwarización y la virtualización son tecnologías que permiten la flexibilidad y la agilidad en la gestión de redes de comunicaciones al separar el hardware de la funcionalidad de software, lo que significa que las redes pueden ser configuradas, actualizadas y optimizadas de forma más rápida y eficiente. Estas tecnologías permiten una gestión más automatizada y simplificada, así como una reducción significativa en los costos de construcción y mantenimiento de infraestructura de red. Sin embargo, estos avances también presentan desafíos como la necesidad de garantizar la seguridad y privacidad de los datos y la necesidad de desarrollar nuevas herramientas de gestión para monitorear y controlar estas redes virtualizadas.

La seguridad post cuántica, trata la necesidad de proteger las comunicaciones contra los ataques de los ordenadores cuánticos. Sin embargo, su implementación requerirá cambios significativos en la infraestructura de la red existente, así como en el hardware y software de los dispositivos móviles.

“*RAN Slicing*” es una tecnología que permite a las operadoras de telecomunicaciones dividir la infraestructura de la red en múltiples redes virtuales para satisfacer las necesidades específicas de cada servicio o aplicación. Aunque esta tecnología también puede presentar desafíos en

términos de garantizar la calidad del servicio (QoS) y la seguridad de los datos, y la necesidad de desarrollar nuevas herramientas de gestión para controlar las redes segmentadas.

La tecnología Open-RAN busca establecer un ecosistema de redes de acceso radio abiertas y estandarizadas, que permita a los operadores de telecomunicaciones usar equipos y software de diferentes fabricantes y así aumentar la flexibilidad y reducir los costos de la construcción y mantenimiento de la infraestructura de la red.

C-RAN es un modelo de arquitectura de red de comunicaciones móviles que se basa en la centralización de recursos de radio. En esta arquitectura de red inalámbrica, la mayoría de las funciones de procesamiento de señales se llevan a cabo en un centro de datos centralizado, en lugar de en la estación base de cada célula como en las redes móviles tradicionales. En C-RAN, el procesamiento de señales se realiza en la nube mientras que la estación base de cada célula solo se encarga de la transmisión y recepción de señales de radio.

C-RAN es la arquitectura de red que se va a utilizar en este trabajo ya que presenta las siguientes ventajas: mejor uso de los recursos, más flexibilidad y escalabilidad y reducción de los costes. Al centralizar el procesamiento de señales, los recursos pueden ser compartidos entre múltiples células, lo que aumenta la eficiencia y mejora la calidad del servicio. Además, la centralización permite una mayor flexibilidad en la gestión de la red y la capacidad de escalar la red según sea necesario. Finalmente, C-RAN también puede reducir los costos de infraestructura al simplificar la implementación de nuevas estaciones base y reducir la necesidad de mantenimiento y reparación en el sitio de la célula [7].

Tal y como aparece en la Figura 2.4, la arquitectura C-RAN se divide en dos secciones: la unidad de banda base (BBU) y la unidad remota de radio (RRU). La BBU centralizada es responsable de todas las funciones de la capa 1 (muestreo, modulación y asignación de recursos), capa 2 (control de acceso al medio) y capa 3 (control de recursos radio). Por otro lado, la RRU contiene los componentes de transmisión y recepción radio, como amplificadores de bajo ruido (LNA), convertidores optoelectrónicos y un sistema de antena. Ambas secciones se unen mediante lo que se conoce como “*fronthaul-link*”, que es un medio de fibra óptica a través del cual se transportan los datos de los diferentes RRU hacia la BBU.

Los BBUs, están centralizados en lo que se conoce como “*Central Office*” (CO) y se puede encontrar en la nube o un centro de datos. El CO posee un “*hardware*” y “*software*” con capacidades de computación y almacenamiento elevadas. Finalmente, el enlace que se conoce como “*backhaul*” puede conectar varios CO entre ellos además de proporcionarles acceso a la red central a través de la red de transporte.

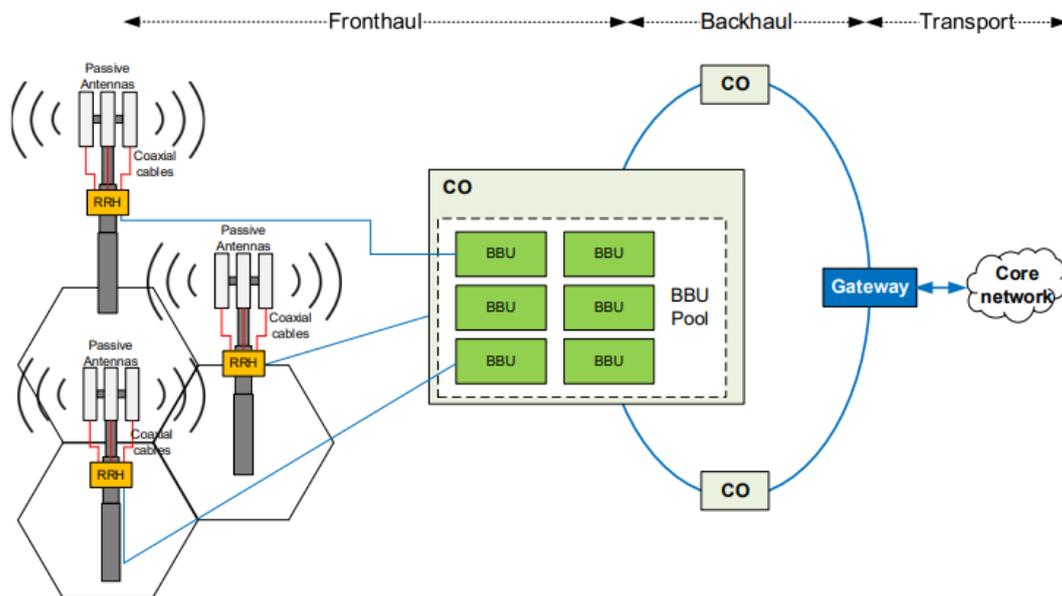


Figura 2.4. Ejemplo arquitectura C-RAN. Fuente:[6]

La centralización de la BBU permite una mejor utilización de los recursos de procesamiento, ya que varias RRU pueden compartir una única BBU. En segundo lugar, al utilizar fibra óptica para conectar la BBU y la RRU, se reduce la latencia y se mejora la capacidad de la red. Además, la centralización de la BBU facilita la implementación de técnicas de procesamiento avanzadas, como la cancelación de interferencias y la coordinación de múltiples puntos de transmisión [7].

En resumen, C-RAN es una tecnología prometedora que permite mejorar significativamente la eficiencia y la flexibilidad de las redes inalámbricas. Además, es compatible con tecnologías de virtualización en tiempo real y de plataforma abierta, lo que permite una asignación de recursos compartidos dinámica y una mayor interoperabilidad entre diferentes proveedores.

### 2.1.5 Un nuevo paradigma

La forma en que se piensa acerca de las redes de comunicaciones y su uso se está transformando. Cómo se diseñan las redes, se implementan y operan, permitiendo una mayor eficiencia, flexibilidad y capacidad de adaptación. Este nuevo paradigma incluye: la inteligencia artificial (IA), "Blockchain", "Digital Twin" o gemelo digital, "Intelligent Edge Computing" y la Convergencia de tecnologías de comunicaciones, Computación y Control.

La IA, se refiere a la capacidad de las máquinas para aprender y realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana. En el contexto de las redes de comunicaciones, la IA puede utilizarse para mejorar la eficiencia de la red, optimizar el rendimiento y la calidad de la experiencia del usuario, y mejorar la seguridad. Sin embargo, también es importante abordar las cuestiones éticas y de privacidad relacionadas con la utilización de la IA en las redes de comunicaciones.

La tecnología "Blockchain" se utiliza para la creación de registros seguros, transparentes y no modificables de transacciones. En comunicaciones, puede utilizarse para mejorar la seguridad y la privacidad de las transacciones, así como para mejorar la eficiencia y reducir los costos de las transacciones.

Un gemelo digital es una réplica digital de un objeto físico o un sistema en un modelo digital. De esta replica se derivan pruebas, simulaciones de su comportamiento y optimizaciones sin afectar el objeto físico. Los “*Digital Twin*” pueden utilizarse para simular el comportamiento de la red y optimizar su rendimiento y eficiencia.

Computación inteligente en el borde de la red “*Intelligent Edge Computing*”, se refiere a la habilidad de procesar y realizar tareas de cómputo en el extremo de la red, cerca de donde se generan los datos. Esto reduciría significativamente el coste para los operadores y la carga de la red. La IA y el “*Maching Learning*” (ML) son necesarios para complementar esta funcionalidad. Lo que permitirá mejorar la latencia y reducir el tráfico de la red. Sin embargo, la diversidad de tipos de terminales dificulta la orquestación y aprendizaje de la red.

La convergencia de las tecnologías de comunicaciones, computación y control está permitiendo la creación de redes más integradas, eficientes y flexibles. Esto puede mejorar el rendimiento de la red y la calidad de la experiencia del usuario. Aunque, por otro lado, también es importante abordar las cuestiones relacionadas con la privacidad y la seguridad de los datos en esta convergencia de tecnologías.

En conclusión, las tecnologías habilitadoras para 6G que se han discutido en este apartado abren un amplio abanico de posibilidades para mejorar la conectividad, velocidad y eficiencia de las redes de comunicaciones. Con ellas se abordarán los desafíos actuales de la conectividad y se podrán brindar soluciones innovadoras que permitan a las personas, empresas e industrias conectar y comunicarse de manera más rápida, segura y eficiente. A medida que las redes de comunicaciones evolucionan hacia 6G, estas tecnologías habilitadoras serán fundamentales para el éxito de la nueva generación de conectividad inalámbrica.

## 2.2 Radio sobre Fibra (RoF)

acceso inalámbrico se ha convertido en una de las tecnologías más populares debido a su versatilidad y capacidad de ofrecer movilidad a los usuarios. Con el tiempo, el uso de esta tecnología ha aumentado exponencialmente, impulsada por el creciente número de usuarios y la aparición de nuevas aplicaciones que requieren un ancho de banda cada vez mayor. Para satisfacer estas necesidades, se ha aumentado la frecuencia de trabajo y se han buscado nuevas bandas de frecuencia disponibles, incluyendo el rango de ondas milimétricas (MMW), para permitir comunicaciones inalámbricas más rápidas y eficientes [8].

La tecnología RoF consiste en el uso de la fibra óptica para distribuir señales eléctricas de  $f_{RF}$  y microondas desde una central hasta una antena remota que es la que se encargar de transmitir estas señales.

La fibra óptica presenta ventajas respecto a las señales de radiofrecuencia que se transmiten a través del aire o de líneas de transmisión a frecuencias altas, ya que, a diferencia de las ondas radio, la fibra óptica experimenta pérdidas significativamente menores. Otro beneficio importante es la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas. Debido a esto, se requiere menos inversión en equipos para regenerar la señal, lo que se traduce en un ahorro económico significativo. Además, la fibra óptica posee una capacidad de transmisión de datos muy alta, lo que la hace capaz de procesar información a velocidades mucho mayores que las posibles con tecnologías basadas en señales eléctricas [9].

En los sistemas de comunicaciones ópticos actuales, la longitud de onda de la señal óptica que se transmite coincide con las llamadas “ventanas ópticas”, que son las regiones del espectro óptico en las que la fibra óptica tiene una menor atenuación y dispersión. En la figura 2.5 se pueden apreciar las 3 ventanas ópticas.

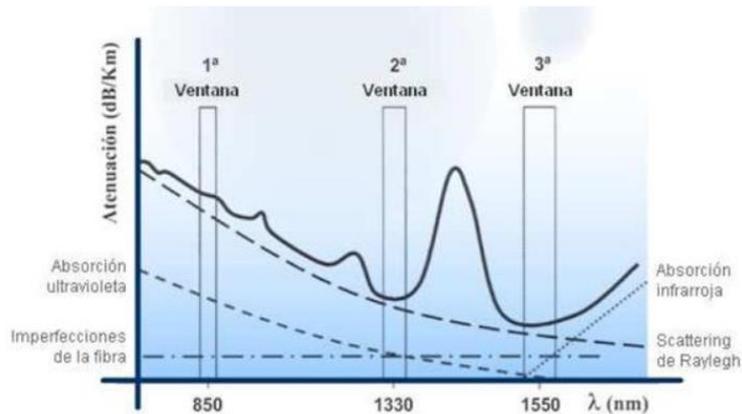


Figura 2.5. Ventanas de transmisión fibra óptica. Fuente [10]

La tercera ventana óptica, que se encuentra en una longitud de onda de 1550 nm, es la que presenta la menor atenuación, lo que permite que se utilice para enlaces de comunicaciones de larga distancia. Además, esta ventana cuenta con amplificadores ópticos que permiten amplificar la señal y, por lo tanto, aumentar aún más la distancia de los enlaces ópticos.

La ventana óptica de 1300 nm, conocida como la segunda ventana, también se utiliza en sistemas de comunicaciones ópticas, ya que en esta banda la dispersión cromática es mínima. Esto significa que la señal óptica puede viajar a través de la fibra óptica sin dispersarse demasiado y sin perder calidad.

Por último, la primera ventana óptica, que se encuentra en una longitud de onda de 850 nm, también se utiliza en algunos sistemas de comunicaciones ópticos, aunque no tiene las mismas ventajas en términos de pérdida óptica y ancho de banda que las otras dos ventanas ópticas mencionadas anteriormente.

En esta tecnología, la señal de información modula a una portadora óptica que es generada por el láser transmisor. Esta información será transmitida en forma de luz a lo largo de la fibra óptica a la frecuencia del láser y será recibida en el extremo por un fotodetector, a esta técnica se le conoce como modulación de intensidad y detección directa (IM-DD). Este esquema se puede observar en la figura 2.6, donde se presenta un enlace descendente RoF mediante la técnica IM-DD.

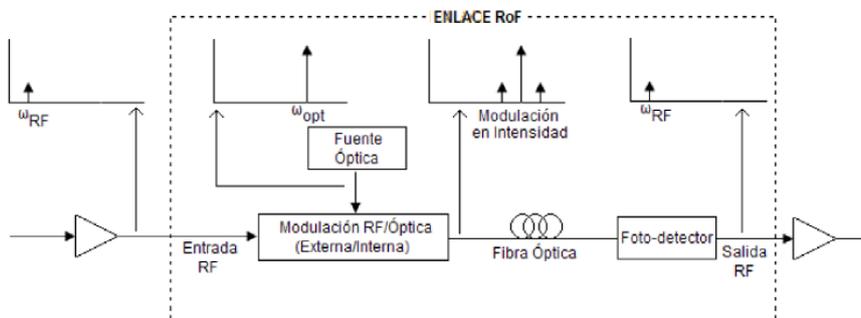


Figura 2.6. Enlace RoF IM-DD. Fuente [11]

La transmisión RoF puede ser analógica o digital. En el caso de una transmisión digital, es necesario primero digitalizar la señal analógica con una alta resolución de cuantificación, lo que resulta en un gran consumo de ancho de banda óptico.

Por otro lado, al transmitir señales analógicas a través de la fibra óptica, puede ser utilizadas señales de diferentes tipos: señales de radiofrecuencia (RF), señales de frecuencia intermedia (IF) o señales de banda base (BB) [11]. En la Figura 2.7. se puede ver un diagrama esquemático de las diferentes opciones para transmitir señales analógicas con RoF. En estos esquemas el láser de la BBU es modulado externamente con la señal correspondiente: RF, IF o BB.

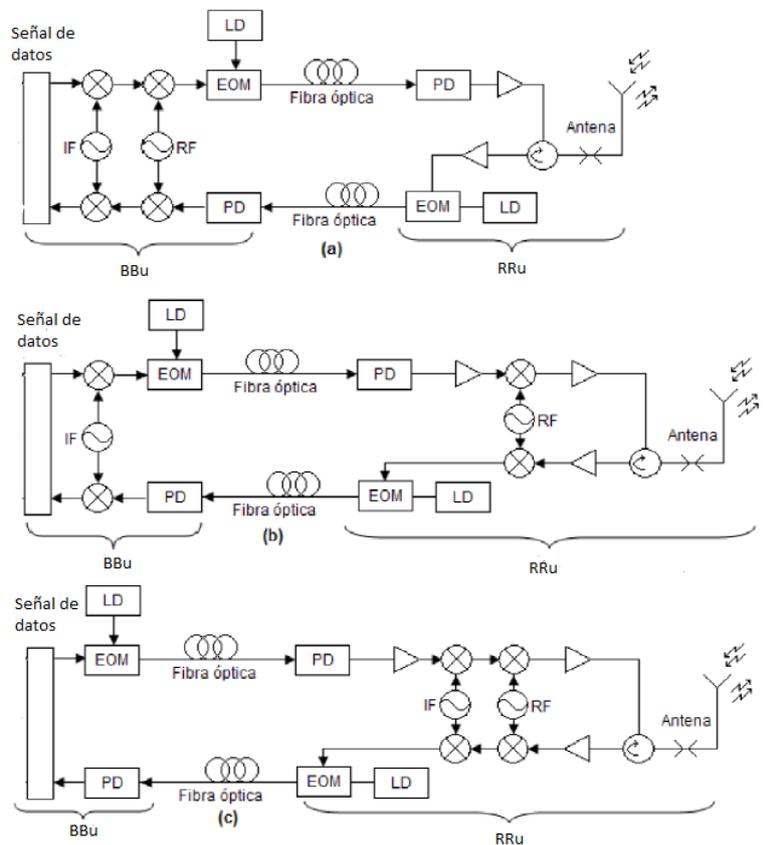


Figura 2.7. Configuraciones de un enlace RoF: (a) RF - sobre fibra, (b) IF – sobre fibra, (c) BB – sobre fibra.  
Fuente [11]

En la Figura 2.7(a) correspondiente a la técnica RF-RoF se observa como la señal RF es en primer lugar, generada dentro de la BBU y después modula la potencia del láser. Esta señal se transmitirá a través de la fibra y será detectada por el fotodiodo, la señal eléctrica recibida en la RRU puede ser retransmitida directamente por la antena. Este tipo de configuración ofrece una ventaja al tener una RRU más sencilla, pero al mismo tiempo es vulnerable a un fenómeno conocido como dispersión cromática de la fibra, lo cual restringe considerablemente la distancia que se puede alcanzar en la transmisión.

La configuración IF-RoF presentada en la Figura 2.7(b) se obtiene a partir de la modulación de la señal óptica del láser mediante la señal de dato IF generada en la BBU. Esta señal recibida en la RRU tendrá que ser convertida a RF en la RRU para poder ser transmitida por la antena. En esta configuración, la influencia de la dispersión cromática en la distribución de las señales IF (Intermedias) se reduce en comparación con el esquema anterior. Sin embargo, la antena de la RRU utilizada en sistemas de RoF requiere hardware adicional, como osciladores locales (LO) de frecuencias milimétricas/microondas, para llevar a cabo la conversión de frecuencias.

Finalmente, en la configuración BB-RoF, Figura 2.7(c), la señal en banda base modula la señal óptica del láser y es la RRU la que se encarga de transformar esta señal a RF. Por este motivo,

en la transmisión en banda base, el impacto de la dispersión de la fibra es insignificante. Sin embargo, la configuración de la Estación Base (ER) se vuelve mucho más compleja en este escenario.

La configuración utilizada en el desarrollo del trabajo es la RF-RoF; debido a que como se verá posteriormente, la consecuencia de la dispersión cromática junto con las características del chirp del láser DML resultará en una mayor potencia eléctrica recibida en la banda de  $f_{RF}$  en el receptor.

### 2.3 Generación fotónica de señales de onda milimétrica mediante CS-MZM.

La tecnología de fotónica de microondas (MWP) es una tecnología que establece una conexión entre los campos de las microondas y la óptica, empleando dispositivos optoelectrónicos para la transmisión, generación y procesamiento de señales ópticas y eléctricas. Esto permite obtener las ventajas que ofrece la tecnología fotónica en sistemas eléctricos presentando una mejora significativa en su rendimiento y eficiencia.

En términos generales, la generación fotónica de  $f_{RF}$  se basa en la modulación de la luz óptica con una señal de  $f_{RF}$  para producir una señal de  $f_{RF}$  modulada ópticamente. Esta tecnología aporta ventajas inherentes a la fotónica como unas bajas pérdidas, ancho de banda elevado, inmunidad a interferencias electromagnéticas, y también proporcionando características que son muy difíciles o incluso imposibles de lograr con tecnologías tradicionales, como una sintonización y reconfiguración rápidas [12].

En el contexto de la electrónica, existen limitaciones en la generación y uso de señales de alta frecuencia: A medida que aumenta la frecuencia de la señal, es más complicado generar y manipular dichas señales con dispositivos electrónicos habituales, que pueden tener limitaciones de: ancho de banda, velocidad de conmutación y capacidad para procesar las señales. Por otro lado, existen pérdidas significativas en las líneas de transmisión o comunicaciones inalámbricas a estas altas frecuencias. Estas pérdidas pueden afectar negativamente a la calidad de la señal, la integridad de la información transmitida y la eficiencia del sistema en general.

En cuanto a la generación de señales RF a partir de señales ópticas, el proceso que se lleva a cabo es conocido como “*photomixing*”, proceso en el cual dos señales ópticas de distinta frecuencia son mezcladas entre sí para generar una nueva señal cuya frecuencia es el resultado de la diferencia de las dos.

Partiendo de dos señales ópticas, con amplitud  $E_{01}$  y  $E_{02}$ , frecuencia angular  $\omega_1$  y  $\omega_2$  y fase  $\phi_1$  y  $\phi_2$ .

$$E_1(t) = E_{01} e^{j(\omega_1 t + \phi_1(t))} \quad (2.1)$$

$$E_2(t) = E_{02} e^{j(\omega_2 t + \phi_2(t))} \quad (2.2)$$

La corriente detectada por el diodo viene determinada por la potencia óptica y la responsividad del mismo.

$$i_{PD}(t) = \Re \cdot P(t) = \Re \cdot |E(t) \cdot E^*(t)|^2 \quad (2.3)$$

Por tanto, después de la foto detección la expresión de la corriente queda como en la ecuación 2.4, donde  $E_{01}$  y  $E_{02}$  representa la corriente DC y el tercer término es la señal a RF  $w_1 - w_2$ .

$$i_{pD}(t) = \Re \cdot P(t) = \Re \cdot \{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1(t) - \phi_2(t)]\} \quad (2.4)$$

Sin embargo, es de gran importancia que las dos portadoras estén en fase para evitar el ruido de fase, puesto que este perturbaría en gran medida los formatos de modulación multi-portadora. En la literatura se pueden encontrar 4 técnicas diferentes para la generación de señales MMW fotónicamente. Control de fase óptica (bloqueo por inyección, bucle de bloqueo de fase y bloqueo de fase por inyección), fuentes de luz multimodo (doble longitud de onda, bloqueo de modos y super continuo), modulación externa (fase e intensidad) y efectos no lineales (dispersión Brillouin estimulada y mezcla de cuatro ondas) [6]. Este trabajo utilizará la modulación externa.

La modulación de fase consiste en una guía de onda a la que se le aplica un campo eléctrico. Estos componentes electroópticos sufren un efecto llamado “*Pockels*”, mediante el cual su índice de refracción varía respecto al campo eléctrico aplicado. Para este propósito se suelen utilizar cristales como el niobato de litio (LiNbO<sub>3</sub>). Este cambio en el índice de refracción causa la generación de bandas alrededor de la frecuencia óptica central ( $\omega_0 \pm n \cdot \omega_{RF}$ ). Posteriormente, es necesario filtrar las bandas deseadas para obtener la señal modulada con precisión.

El modulador de intensidad no es más que una combinación de moduladores de fase, conocido como interferómetro Mach-Zehnder, encontramos de dos tipos “*single drive*” y “*dual drive*”. En la Figura 2.8 se pueden apreciar ambas estructuras.

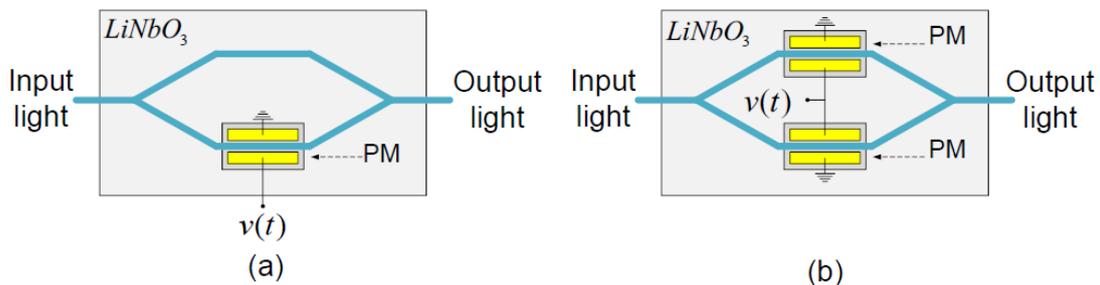


Figura 2.8. Estructuras Mach-Zehnder. (a) *single drive*, (b) *dual drive*. Fuente [6].

Como se observa en la Figura 2.8, en el Mach zehnder “*single drive*”, la tensión solo se aplica a un brazo, mientras que en el “*dual drive*” esta se aplica a ambos. Durante el desarrollo del trabajo se usará la configuración *dual drive*, así que nos centraremos en esta.

Dependiendo de la tensión aplicada a cada brazo, el modulador Mach Zehnder tiene un determinado comportamiento; a esto se le conoce como polarización y hace referencia a diferencia de tensión aplicada a cada brazo ( $V_{bias}$ ). En la Figura 2.9 se observan las 4 regiones de operación.

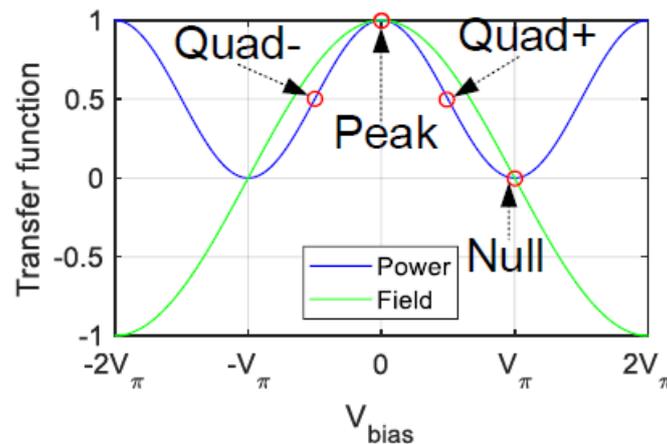


Figura 2.9. Zonas de trabajo Mach-Zehnder. [6].

Como se aprecia en la Figura, los puntos en los que  $V_{bias} = \pm V_{\pi/2}$ , se conocen como modo de funcionamiento en cuadratura y corresponden generalmente a las regiones utilizadas para la modulación electroóptica, mientras que los picos  $V_{bias} = 0$  y los nullos  $V_{bias} = \pi$ , son regiones no lineales que pueden ser utilizadas para generar pulsos.

El modo de trabajo que se va a utilizar es el no lineal, en especial el punto “Null”, ya que en este modo se produce el efecto de supresión de portadora “Carrier Supression” (CS) y, por tanto, solo se obtienen las bandas laterales.

En un modulador Mach-Zehnder, que funciona en modo CS, es decir  $V_{bias}=V\pi$ , las amplitudes de las bandas laterales generadas están relacionadas con las funciones de Bessel impares asociadas correspondientes,  $J_{2n-1}(m)$ , donde  $m$  es el índice de modulación de fase. [6].

$$E_{out}(t) = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} \{(-1)^n J_{2n-1}(m) [\cos([\omega_0 + (2n-1)\omega_{RF}]t - n\pi) + \cos([\omega_0 + (2n-1)\omega_{RF}]t + n\pi)]\} \quad (2.5)$$

Las funciones de Bessel son una serie de funciones matemáticas que surgen en problemas de propagación de ondas. En el contexto de un modulador MZM, se utilizan para describir cómo varían las amplitudes de las bandas laterales generadas en respuesta a la modulación de fase aplicada.

Si  $V_{RF} = V_{\pi}$ , el índice máximo de modulación de fase es de  $\pi/2$ , y el argumento de las funciones de Bessel se encuentra en el rango de  $0$  a  $\pi/2$ . Como se observa en la Tabla 1 para las funciones de orden superior, las amplitudes se vuelven despreciables. Esto significa que solo las bandas laterales de primer orden tienen amplitudes significativas, mientras que las bandas laterales de orden superior pueden ser ignoradas o consideradas despreciables [6].

n	$J_{2n-1}(m)$	Sidebands
1	0.5668	$-J_1(m) [\cos([\omega_0 + \omega_{RF}]t) + \cos([\omega_0 - \omega_{RF}]t)]$
2	0.0690	$J_3(m) [\cos([\omega_0 + 3\omega_{RF}]t) + \cos([\omega_0 - 3\omega_{RF}]t)]$
3	0.022	$-J_5(m) [\cos([\omega_0 + 5\omega_{RF}]t) + \cos([\omega_0 - 5\omega_{RF}]t)]$

Tabla 1. bandas laterales ópticas y las funciones de Bessel del primer al tercer orden del campo óptico en la salida del CS-MZM.

Así pues, mediante un modulador MZM trabajando en el punto nulo, al que se le aplica una señal RF, logrará modular la portadora óptica a  $\omega_0 \pm \omega_{RF}$ . Si a este efecto le añadimos la foto detección obtendremos en el fotodiodo una señal de frecuencia en la banda de milimétricas a  $2 * f_{RF}$ .

A continuación, se va a realizar un estudio analítico de la respuesta en frecuencia para la generación fotónica de ondas milimétricas, comparando los resultados teóricos para una transmisión “*Optical back to back*” (OB2B) y una transmisión RF-RoF. Los cálculos y expresiones que se estudiarán a continuación han sido obtenidos de [13]

### 2.3.1 Análisis teórico comparación generación fotónica OB2B y RoF.

A partir del campo eléctrico de salida de un láser que emite a  $\omega_0$ , que es modulado directamente por una única frecuencia angular de modulación de  $\omega = 2\pi f$ .

$$E_{DML}(t) = \sqrt{P_o(1 + m_{AM} \cdot \cos \omega t)} e^{j m_{PM} \cos(\omega t + \Delta\varphi)} e^{j \omega_0 t} \quad (2.6)$$

Donde  $P_o$  es la potencia de salida de laser,  $m_{AM}$  y  $m_{PM}$  son los términos de modulación de amplitud y modulación de fase y  $\Delta\varphi$  representa la diferencia entre modulación de amplitud y fase introducida por el láser. Se va a realizar una comparación de los parámetros que recibirá un fotodetector según la ecuación 2.4; tanto en banda base como a frecuencia de  $f_{RF}$  para un esquema de transmisión OB2B y un esquema RF-RoF.

La función de transferencia de pequeña señal del láser, que caracteriza el efecto de “*chirp*” se presenta en la ecuación 2.7 y establece la relación entre los términos de modulación de amplitud y modulación de fase mediante el factor de mejora del ancho de línea,  $\alpha$ , y el “*chirp*” adiabático del láser,  $\kappa$ ; se expresa de la siguiente manera.

$$\frac{m_{PM}}{m_{AM}} \cdot e^{j\Delta\varphi} = \alpha \left( 1 - j \frac{\kappa P_o}{\omega} \right) \quad (2.7)$$

En este régimen de señal pequeña, la intensidad del campo eléctrico en la salida de la fuente de luz se puede definir como:

$$E_{DML}(t) = 1 + m_+ \cdot e^{j\omega t} + m_- \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.8)$$

Donde  $m_+$  y  $m_-$  se pueden representar en términos de modulación de amplitud y modulación de fase.

$$m_+ = \frac{1}{2} (m_{AM} + j m_{PM} e^{j\Delta\varphi}) \quad (2.9)$$

$$m_- = \frac{1}{2} (m_{AM} + j m_{PM} e^{-j\Delta\varphi}) \quad (2.10)$$

Por otro lado, la respuesta de un Mach-Zehnder al que se le aplica una única señal de radiofrecuencia  $\omega_{RF} = 2\pi f_{RF}$ , se expresa como:

$$h_{MZM}(t) = \cos(\varphi_{DC} + 2m_{RF} \cos \omega_{RF} t) \quad (2.11)$$

Considerando que el Mach-Zehnder funciona en modo supresión de portadora, es decir  $\varphi_{DC} = \pi/2$ , se obtiene la siguiente expresión.

$$h_{MZM}(t) = \cos \varphi_{DC} + m_{RF} \sin \varphi_{DC} \cdot (e^{j\omega_{RF} t} + e^{-j\omega_{RF} t}) \quad (2.12)$$

En último lugar, la respuesta en frecuencia de la fibra óptica se puede expresar de la siguiente manera:

$$h_{SSMF}(t) = \frac{1}{\sqrt{j2\pi\beta_2 L}} e^{j\frac{\pi}{2\beta_2 L} t^2} \quad (2.13)$$

Siguiendo bajo la suposición de pequeña señal, la expresión para calcular el campo de OB2B y RF-RoF queda de la siguiente manera:

$$E_{B2B}(t) = E_{DML}(t) \cdot h_{MZM}(t) \quad (2.14)$$

$$E_{RF-RoF}(t) = [E_{DML}(t) \cdot h_{MZM}(t)] \otimes h_{SSMF}(t) \quad (2.15)$$

Por tanto, la expresión completa del campo para RF-RoF es:

$$E_{RF-RoF}(t) = \sqrt{P_o} e^{j\omega_o t} \left\{ \cos \varphi_{DC} + \cos \varphi_{DC} e^{j\frac{1}{2}\beta L \omega^2} (m_+ \cdot e^{j\omega t} + m_- \cdot e^{-j\omega t}) + m_{RF} \sin \varphi_{DC} e^{j\frac{1}{2}\beta L \omega_{RF}^2} (e^{j\omega_{RF} t} + e^{-j\omega_{RF} t}) + m_{RF} \sin \varphi_{DC} e^{j\frac{1}{2}\beta L (\omega_{RF} + \omega)^2} (m_+ \cdot e^{j(\omega_{RF} + \omega)t} + m_- \cdot e^{-j(\omega_{RF} + \omega)t}) + m_{RF} \sin \varphi_{DC} e^{j\frac{1}{2}\beta L (\omega_{RF} - \omega)^2} (m_- \cdot e^{j(\omega_{RF} - \omega)t} + m_+ \cdot e^{-j(\omega_{RF} - \omega)t}) \right\} \quad (2.16)$$

Una vez conocido el campo, según la expresión 2.4, se puede expresar la corriente que detectara el fotodiodo. En la tabla 2, se muestran los términos en banda base y en la banda de milimétricas  $2\omega_{RF} \pm \omega$  para ambas configuraciones:

	CONFIG.	$i(t)$
$\omega$	OB2B	$\Re P_o m_{AM} \cdot [\cos^2 \varphi_{DC} + 2m_{RF}^2 \sin^2 \varphi_{DC}]$
	FIBRA	$\Re P_o \left[ \sqrt{1 + \alpha^2} \cos \left( \frac{1}{2} \beta_2 L \omega^2 + \alpha \tan \alpha \right) + j \alpha \frac{\kappa P_o}{\omega} \sin \left( \frac{1}{2} \beta_2 L \omega^2 \right) \right]$ $\cdot [m_{AM} \cos^2 \varphi_{DC} + 2m_{AM} m_{RF}^2 \sin^2 \varphi_{DC} \cos(\beta_2 L \omega_{RF} \Omega)]$
$2\omega_{RF} \pm \omega$	OB2B	$\Re P_o m_{AM} m_{RF}^2 \sin^2 \varphi_{DC}$
	FIBRA	$\Re P_o m_{AM} m_{RF}^2 \sin^2 \varphi_{DC} \cdot \left[ \sqrt{1 + \alpha^2} \cos \left( \frac{1}{2} \beta_2 L (\omega^2 \pm 2\omega_{RF} \omega) + \alpha \tan \alpha \right) \right.$ $\left. + j \alpha \frac{\kappa P_o}{\omega} \cdot \sin \left( \frac{1}{2} \beta_2 L (\omega^2 \pm 2\omega_{RF} \omega) \right) \right]$

**Tabla 2. Términos de la foto corriente recibida  $i(t)$  en banda base y banda de ondas milimétricas para las configuraciones OB2B y RF-RoF.**

### Capítulo 3. Sistema de transmisión de datos mediante DML sobre señales mmW generadas fotónicamente.

En este capítulo se introduce el diseño preliminar de un sistema de transmisión RoF (Radio over Fiber) que utiliza un sistema de generación fotónica de ondas milimétricas basado en CS-MZM con DML. Este sistema está diseñado para transmitir, en una primera fase, un único servicio utilizando la generación fotónica de RF, y posteriormente transmitir la señal a través de la tecnología RoF. La fuente óptica (DML) será modulada directamente con los datos, posteriormente se realizará una “*up conversión*” en el MZM para después transmitir la señal óptica por la fibra, y finalmente la información se recibirá y demodulará en el receptor. El esquema del sistema de transmisión RoF se presenta con el objetivo de lograr una transmisión eficiente y confiable de la información a través de la tecnología fotónica.

Los resultados obtenidos se han conseguido mediante el uso del simulador Optisystem. OptiSystem es un software de simulación óptica desarrollado por Optiwave Systems Inc, que se utiliza para diseñar, analizar y optimizar sistemas de comunicaciones ópticas. De esta manera, Optisystem permite evaluar el comportamiento de ciertos componentes ópticos antes de implementarlos de manera real, ahorrando tiempo y recursos. OptiSystem utiliza una combinación de modelos matemáticos y algoritmos sofisticados para modelar los efectos físicos de la propagación de la luz, la dispersión, la atenuación, la no linealidad y otros fenómenos ópticos en el sistema. De este modo, los usuarios pueden ver gráficas de potencia óptica, diagramas de ojos, espectros de señales y otros parámetros relevantes para evaluar el desempeño del sistema. En el anexo 1 se hace una explicación más detallada de los módulos y modos de funcionamiento que tiene este software de simulación.

#### 3.1 Esquema de transmisión de datos

En el esquema a utilizar, los datos serán los encargados de modular al DML, la señal óptica resultante se introduce en el modulador MZM, que trabaja en el punto de polarización “*null*”, y recibe una señal de RF. El resultado serán dos bandas ópticas separadas  $\pm f_{RF}$  de la portadora óptica entrante, ya que la portadora será suprimida. Estas señales de  $f_{RF}$  serán transportadas mediante RoF sobre fibra óptica hasta llegar al receptor. Allí un fotodetector llevará a cabo el proceso de “*photomixing*” donde convertirá la señal óptica en eléctrica, batiendo ambas bandas y dando como resultado una señal eléctrica a frecuencia  $2 * f_{RF}$ . En la Figura 3.1 se puede observar un esquemático del funcionamiento con los componentes a utilizar.

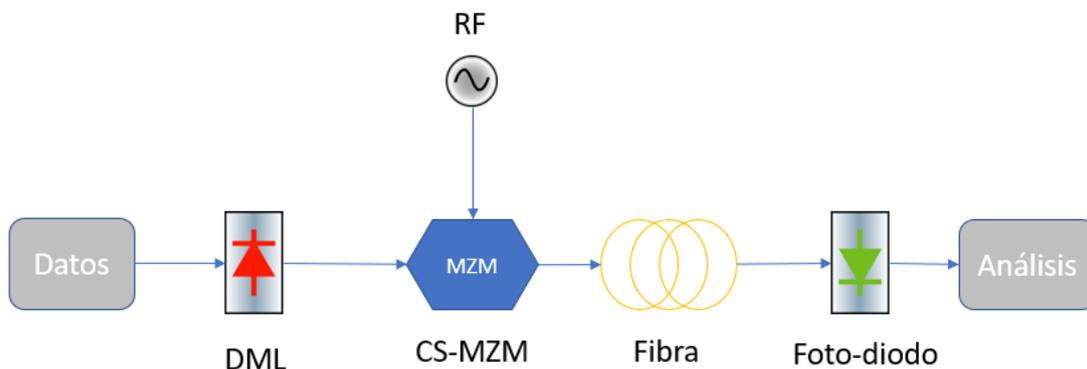


Figura 3.1. Esquema de transmisión de datos sobre señales mmW generadas fotónicamente.

Este esquema se utilizará para transmitir diferentes esquemas de modulación. En los siguientes apartados, se realizará un estudio de las características y se evaluarán los parámetros de interés como: la potencia eléctrica recibida (ReP), la magnitud del vector error (EVM), la potencia óptica recibida (RoP) y la relación de error de modulación (MER) para sistemas de transmisión QPSK, 16QAM.

Como paso previo a la transmisión de los datos se realizará un estudio de la respuesta en frecuencia del sistema.

### 3.2 Respuesta en frecuencia

Para medir la función de transferencia se, se han generado una serie de portadoras que abarcan desde 200MHz hasta 15GHz. De esta manera, se ha podido caracterizar la respuesta en frecuencia del sistema en cuestión y así comparar los resultados obtenidos en la simulación con los medidos de forma experimental en [13].

En la Figura 3.2 se puede observar el diagrama esquemático que se va a utilizar para medir la función de transferencia del sistema. A continuación, se realizará un análisis detallado de cada uno de los módulos.

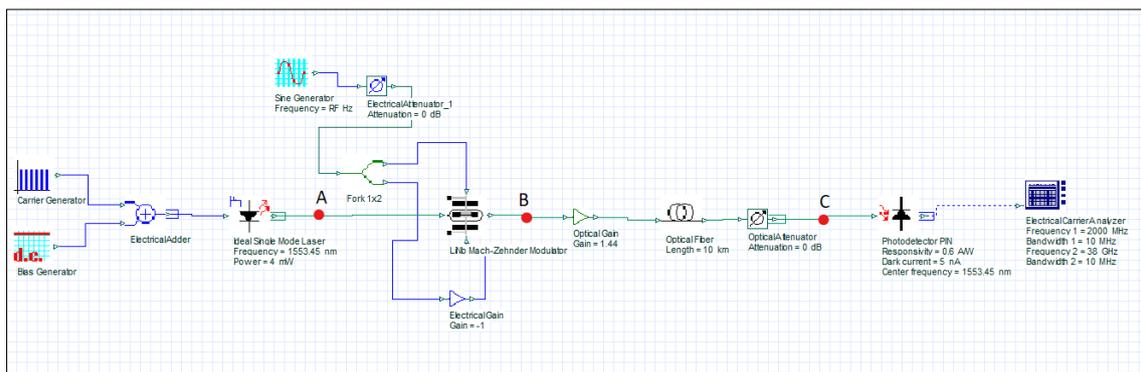


Figura 3.2. Esquemático del sistema para transmisión RoF Optisystem.

En la Figura número 15 se pueden observar los siguientes componentes:

- El módulo de “Carrier Generator”, es responsable de generar la portadora en el sistema. Para simular adecuadamente el comportamiento del sistema, se utiliza el modo de barrido de frecuencia “sweep” (ver Anexo 1), que se encarga de variar la frecuencia de la portadora en un rango de frecuencias deseado; en este caso, la frecuencia inicial es de 200MHz y la frecuencia final es de 15GHz, mediante saltos de 200 MHz, habrá un total de 75 iteraciones. Este modo de barrido permite que la simulación se repita varias veces, variando la frecuencia de la portadora en cada repetición, lo que resulta en una caracterización más precisa del sistema en cuestión.
- El módulo de “Bias Generator” es un generador de Bias o corriente continua, que será la encargada de posicionar el punto de trabajo del láser DML. Esta corriente se ha fijado en 41 mA, ya que ha de ser superior al corriente umbral del láser y es un punto óptimo para obtener la Ganancia en MMW como se explicará más adelante.

- El módulo “*electrical adder*” o sumador se encargará de sumar la corriente generada por la portadora; un seno de frecuencia variable y amplitud 2 mA y una corriente continua generada por el generador de Bias de 41 mA.
- DML: El láser de modulación directa es un semiconductor que se emplea en sistemas de comunicación óptica para producir señales de luz que se modulan directamente desde la fuente de luz. La corriente que se aplica al laser modula directamente la señal óptica. El módulo utilizado en concreto para este sistema, de todos los que dispone el simulador Optisystem es el “*Ideal Single Mode Laser*” el cual permite que se introduzcan una serie de parámetros físicos del láser, con tal de parametrizar el comportamiento del mismo. Para parametrizar correctamente el láser, se parte de la señal eléctrica recibida del sumador, 41 mA DC y 2 mA  $i(t)$ . Los parámetros deseados en el láser para que tenga un comportamiento lo más similar posible al laser utilizado en las medidas experimentales son los siguientes:
  - Longitud de onda: 1553.45nm.
  - Potencia: 4mW
  - Anchura espectral: 10 MHz
  - Configuración: analógica
  - Chirp parámetro alpha: 1.5
  - Chirp adiabático:  $14.9 * 10^{12} \text{ 1}/(W * S)$

Para ello, los parámetros físicos introducidos son los que se observan en la Tabla 3.

Longitud de onda	1553.45 nm
Volumen de la capa activa	3.00E-14 cm <sup>3</sup>
Velocidad de grupo	8.50E+09 cm/s
Eficiencia cuántica	0.4
Coefficiente de ganancia diferencial	7.00E-20 cm <sup>2</sup>
Densidad de portadores en la transparencia	1.00E+18 cm <sup>-3</sup>
Factor de confinamiento de modo	0.4
Modelo de recombinación	“lifetime”
Tiempo de vida del portador	7.76E-10 s
Tiempo de vida del fotón	1.60E-12 s
Factor de emisión espontánea	3.00E-05
Coefficiente de compresión de ganancia	2.86E-20 cm <sup>3</sup>
Factor de mejora de la anchura de línea (Alpha chirp)	1.5

Tabla 3. Parámetros módulo DML.

- Modulador MZM: El modulador Mach-Zehnder (MZM) se configura en modo de supresión de portadora (CS-MZM), lo que significa que su punto de polarización se ajusta a cero para eliminar la señal portadora original. Para llevar a cabo la modulación, el modulador se alimenta con una señal de radiofrecuencia (RF) de 20 GHz. En este módulo ocurrirá el fenómeno conocido como up-conversión, ya que a partir de la frecuencia de la señal generará RF, se generarán dos bandas en la señal óptica de entrada. De esta manera, el MZM actúa como un modulador de amplitud que permite la modificación de la intensidad de la señal de luz óptica para transportar información.

Para lograr el comportamiento de CS-MZM, se ha parametrizado el MZM basado en una guía de onda de litio-niobato (LiNbO<sub>3</sub>) de la siguiente manera.

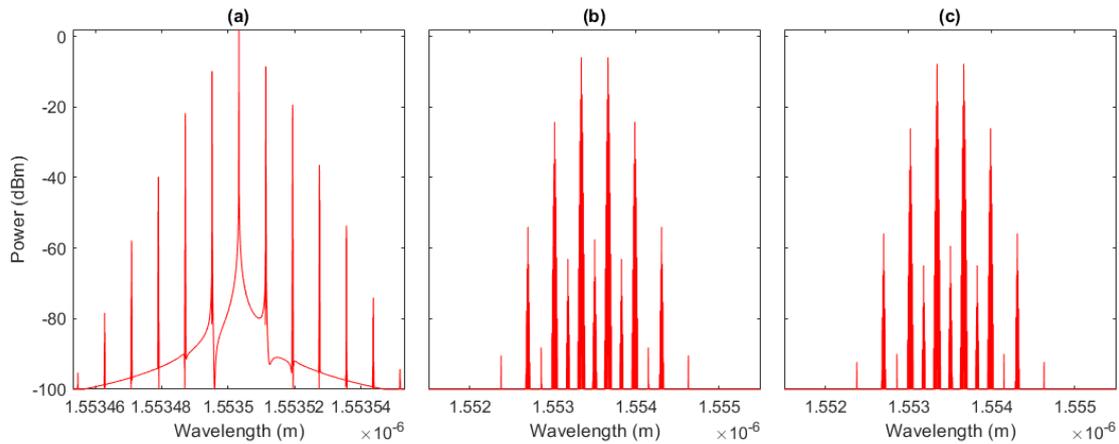
- Voltaje de polarización de conmutación: 4 V.
  - Voltaje de polarización de la señal de radiofrecuencia: 4V.
  - Voltaje en cada brazo: brazo 1 = -2V, brazo 2 =2V.
  - Relación extinción supresión de portadora: 50 dB.
  - Perdidas de inserción: 3dB.
- Fibra óptica: medio de transmisión utilizado en sistemas de comunicación para transmitir señales de luz moduladas. Los parámetros de la fibra son los siguientes.
    - Longitud: 25km.
    - Atenuación: 0.2 dB/km.
    - Dispersión  $\beta_2$  22.1 ps<sup>2</sup>/km.
    - Dispersión  $\beta_3$  0 ps<sup>3</sup>/km.
  - Ganancia y atenuador óptico: Estos elementos se introducen para disponer un RoP, a la entrada del fotodetector de 4 dBm, posteriormente, se variará su nivel para tener distintos niveles de señal óptica a la entrada del fotodetector.
  - Fotodetector: El fotodetector recibe la señal óptica modulada transmitida y la convierte en una señal eléctrica. Los parámetros del fotodetector utilizado son los siguientes:
    - Frecuencia central: 1553.45 nm.
    - Responsividad 0.6 A/W.
    - Modelo de función de transferencia: ideal.
    - Densidad de ruido térmico: 50e-012 A/Hz<sup>0.5</sup>.
    - Ruido shot: activado con distribución gaussiana.
  - Analizador de espectros eléctricos: Con este elemento se medirán las potencias eléctricas recibidas a las frecuencias de interés: BB,  $2* f_{RF}$  -BB y  $2* f_{RF}$  +BB.

### 3.2.1 Espectros eléctricos y ópticos para 1GHz en BB y en banda MMW

Para el análisis de la función de transferencia del esquema planteado, se han señalado 3 puntos de interés en la Figura 3.2. En primer lugar, en A se muestra el espectro óptico obtenido al modular directamente el láser con los datos. En segundo lugar, en B se muestra el espectro óptico después de pasar la señal por un modulador Mach-Zehnder trabajando en modo supresión de portadora (CS-MZM). En tercer lugar, en C se muestra el espectro óptico después de haber atravesado 25 km de fibra óptica. A continuación, se analizarán cada uno de los puntos de interés detalladamente, mediante la simulación de un único tono de frecuencia 1GHz.

En la Figura 3.3(a), se han obtenido los espectros ópticos de A, B y C al modular directamente el láser con un tono de frecuencia 1GHz. La resolución de los visualizadores es ideal, a diferencia de lo que suele ocurrir en el laboratorio que, para los espectros ópticos se obtiene una resolución de 1.25 - 2.5GHz; se ha simulado de esta manera con el fin de observar las bandas producidas por la modulación de 1GHz. En la Figura 3.3, se puede apreciar que la longitud de onda es de 1553.5 nm, o su equivalente en frecuencia de 192.978 THz. Una vez la señal ha atravesado el modulador, se observan las dos bandas separadas en la Figura 3.3(b) Además, también se puede apreciar la ratio de supresión de portadora, que es de unos 50 dBm. En la Figura 3.3(b), se observa una banda en 1.553343  $\mu$ m (192.998 THz) y la otra en 1.553664  $\mu$ m (192.958 THz), distanciándolas como afirma la teoría 40 GHz. Finalmente, en la Figura 3.3(c),

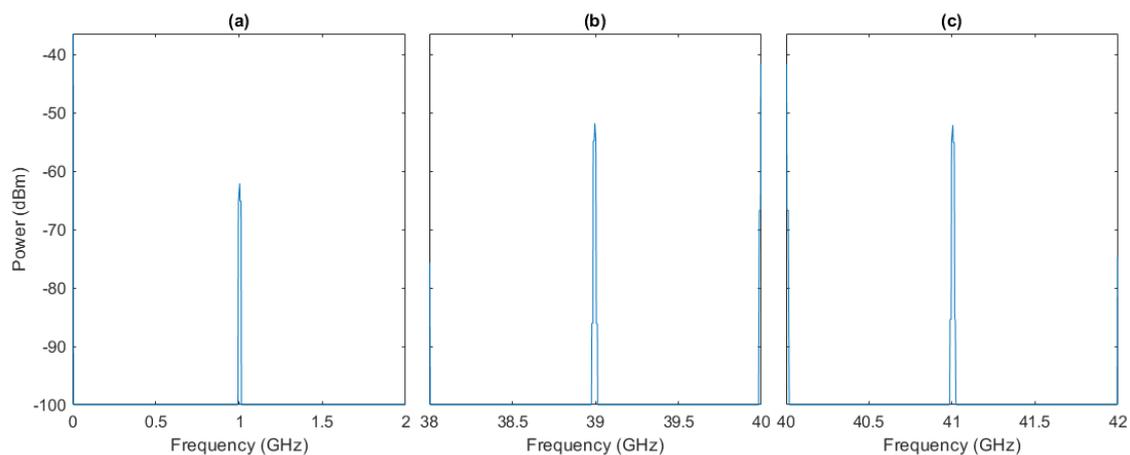
se puede apreciar el espectro de la señal óptica una vez se ha propagado a través de 25 km de fibra, observándose una atenuación en la señal de 5dB.



**Figura 3.3. Espectros ópticos en los 3 puntos de interés (a) DML (b) después MZM (c) entrada PD.**

Finalmente, con la llegada de la señal al fotoreceptor, esta sufrirá una conversión óptico-eléctrica mediante el proceso de detección directa que se llevará a cabo en el fotodiodo.

En la Figura 3.4, se observa el espectro eléctrico obtenido, dividido por las bandas de interés: BB (1GHz), donde se obtiene una potencia de unos -61.5 dBm y MMW (39 y 41 GHz) donde se obtiene una potencia eléctrica de unos -51 dBm. Este efecto de ganancia que se ha producido en MMW, es el que se ha comentado en los fundamentos teóricos, cuando existe compensación de chirp con la dispersión de la fibra. Dicho efecto se analizará con detalle más adelante para ver cómo afecta en la transmisión de datos el aumento de potencia recibida al EVM o MER.



**Figura 3.4. Espectros eléctricos para un tono de frecuencia 1 GHz. (a) BB(1GHz), (b) MMW (39 GHz), (c) MMW (41 GHz).**

### 3.2.2 Simulaciones Barrido en frecuencia

Una vez se ha presentado el esquema, se procede a la simulación de los resultados, para comparar la conexión óptica directa (OB2B) con los resultados obtenidos con fibra (10 km y 25 km). La única modificación necesaria en el sistema para simular el OB2B es deshabilitar el módulo de fibra óptica; resultando en la simulación como si fuera un enlace óptico directo.

Para medir la función de transferencia, se han generado portadoras que abarcan un rango de frecuencias desde 200 MHz hasta 15 GHz, con un barrido realizado por todas las frecuencias cada 200 MHz. Por otro lado, con el fin de compensar las pérdidas por atenuación de la fibra (0,2 dB/km) y obtener el mismo RoP en las 3 simulaciones, se ha aumentado el valor del amplificador óptico que es ideal, por lo que no supone en un aumento de ruido. El valor de RoP se ha fijado en 4 dBm. En la Figura 3.5 se pueden apreciar los resultados de potencia eléctrica recibidos para OB2B, 10 y 25 km.

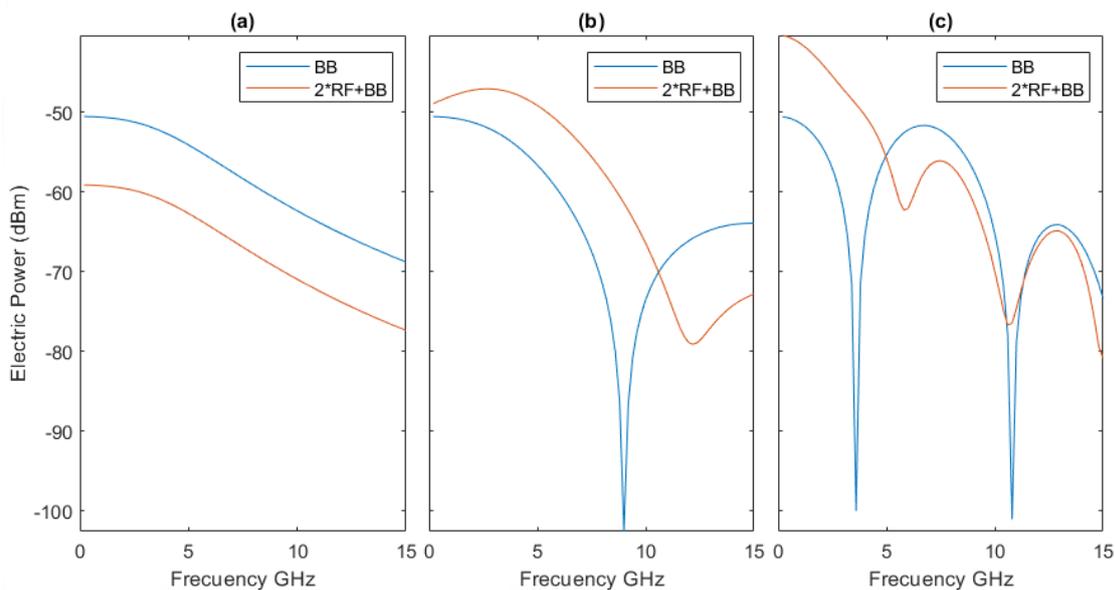


Figura 3.5. Comparación de potencia eléctrica para BB y ambas bandas mmW considerando diferentes longitudes de fibra (a)  $L=0$  km, (b)  $L=10$  km y (c)  $L=25$  km

El ancho de banda del láser utilizado es de aproximadamente 4.5 GHz, como se puede apreciar en la Figura 3.5(a). En esta figura, se observa una caída de 3 dB en la potencia a 4.5 GHz. Además, se observa que la potencia eléctrica recibida para  $L=0$  km es mayor en el caso de BB que en el caso de MMW. Esta diferencia se mantiene constante en todo el rango de frecuencias. Estos resultados coinciden con las ecuaciones obtenidas para BB y MMW en la tabla 2, como se esperaba en el caso de la transmisión óptica a través de OB2B. Sin embargo, como ya se ha comprobado en el espectro eléctrico de la Figura 3.4; cuando existe fibra, la potencia recibida en la banda de milimétricas aumenta. Esta ganancia en la banda de milimétricas ha sido estudiada en [14] y depende del chirp del láser caracterizado por el factor de mejora de la anchura de línea y el chirp adiabático (conocidos como parámetros  $\alpha$  y  $\kappa$  respectivamente), la potencia de emisión del láser, la dispersión y la longitud de la fibra y la frecuencia de  $f_{RF}$  que se inyecta al CS-MZM.

Por otro lado, resultan interesantes los nulos observados en la frecuencia de banda base, con la presencia de fibra. Estos nulos se encuentran a la frecuencia de 9 GHz para longitud 10 km y a la frecuencia de 3.6 GHz para la longitud 25 km. A partir del segundo término de las ecuaciones de la Tabla 2 para la configuración con fibra, se puede obtener la siguiente ecuación que

proporciona una expresión teórica en donde se encuentran los nulos en una transmisión en banda base en configuración teórica.

$$\omega_n = \frac{(2n+1)\pi}{2} \frac{1}{|\beta_z|L\omega_{RF}} \quad (n = 0, 1 \dots) \quad (3.1)$$

Sustituyendo la dispersión de la fibra (22.1 ps<sup>2</sup>/km) y la  $f_{RF}$  (20GHz), se obtiene para una distancia de 10 km el primer nulo ( $n = 0$ ) en 9 GHz y para  $L = 25$  km, el primer nulo se encuentra en 3.6GHz y el segundo nulo ( $n = 1$ ) se encuentra en 10.8GHz. Por tanto, estos nulos son independientes de los parámetros del láser y solo dependen de los parámetros de la fibra y la frecuencia de modulación  $f_{RF}$ .

La Figura 3.6 muestra los resultados de las medidas experimentales donde se observa el primer nulo a 25 km en 3.6GHz. También se puede apreciar el segundo nulo a 10.8GHz, aunque se observa con mayor cantidad de ruido. En cuanto al montaje utilizado en la configuración experimental, los elementos utilizados son los que se presentan en [13]:

- Un DML de la marca Optical Zonu, modelo OZ516, con un ancho de banda de 3 dB de 7.75 GHz.
- Un generador de señales (SG) de la marca Rohde Schwarz, modelo SMW200A, y
- Analizador de señales (SA), modelo FSW43, para medir la respuesta en frecuencia del sistema.
- MZM (Modulador Mach-Zehnder) de la marca Sumitomo, modelo T.DEH1.5-40X-ADCY-Z, polarizado en el punto de transmisión nula ( $V\pi$ ), es decir, a 8.22 V, para obtener la señal óptica con supresión de portadora.
- Para la conversión optoelectrónica se utilizó un fotodetector (PD) de la marca Finisar, modelo XPDV3120R, que opera en régimen lineal, con el objetivo de generar una señal de microondas (mmW) a la frecuencia deseada mediante la mezcla de bandas laterales.

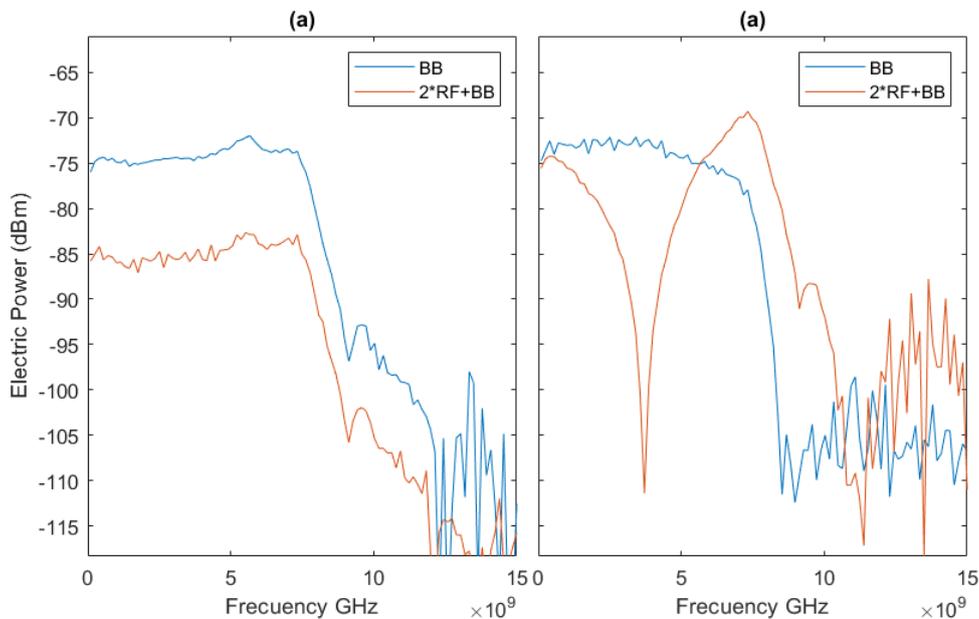


Figura 3.6. Medidas experimentales de potencia eléctrica para BB y ambas bandas mmW para OB2B y configuración con fibra ( $L = 25$  km)

Los resultados experimentales obtenidos muestran que el ancho de banda del láser es mayor al del simulador, 7.75 GHz. Sin embargo, se aprecia un comportamiento cualitativo muy similar al de las medidas con el simulador. Cabe destacar que la ganancia en MMW es menor, debido a que parámetros como el fotodetector, que se han supuesto ideales, sufren una pérdida debido a la responsividad de altas frecuencias.

Una vez obtenida la función de transferencia del láser DML y comprobado su comportamiento similar al laser utilizado en las medidas experimentales, se está en disposición de simular la transmisión de datos. Así pues, en el apartado siguiente se tratará de simular un único servicio.

### 3.3 Transmisión de datos

Este apartado consistirá en la creación y simulación de un diagrama esquemático, en el cual sea posible configurar de manera sencilla e intuitiva los parámetros de transmisión de interés como: la velocidad de transmisión (Msímbolos/s), el esquema de modulación (QPSK, 4QAM, 16 QAM) o la frecuencia intermedia de modulación ( $f_{IF}$ ), frecuencia intermedia a la que se modularán los datos antes de introducirlos al DML.

Para ello, se partirá de un esquema simple, en el que solo se encuentre el láser DML y se irán añadiendo módulos, tanto para transmisión y recepción.

#### 3.3.1 Transmisión de datos por DML en BB.

En este paso previo, se va a realizar la simulación de transmisión de datos en banda base, mediante el uso de un del DML. En la Figura 3.7, se puede apreciar el esquemático que se va a utilizar. En él se observa un módulo denominado como Transmisor, en este módulo se generarán y modularán los datos. También se puede apreciar un módulo denominado Receptor (Rx), donde se recibirán y demodularán los datos. Ambos módulos están descritos en las Figuras 3.8 y 3.9 respectivamente. Además, se ha añadido un atenuador eléctrico variable, para poder controlar la potencia eléctrica que se inserta en el DML y un amplificador el eléctrico a la salida del fotodetector, para aumentar el nivel de señal recibida antes de proceder a la demodulación.

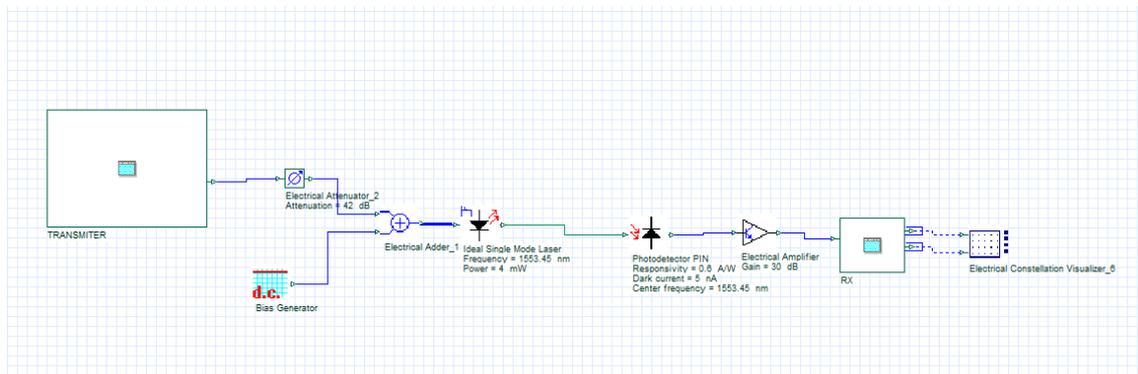


Figura 3.7. Diagrama esquemático para la transmisión de un servicio en BB.

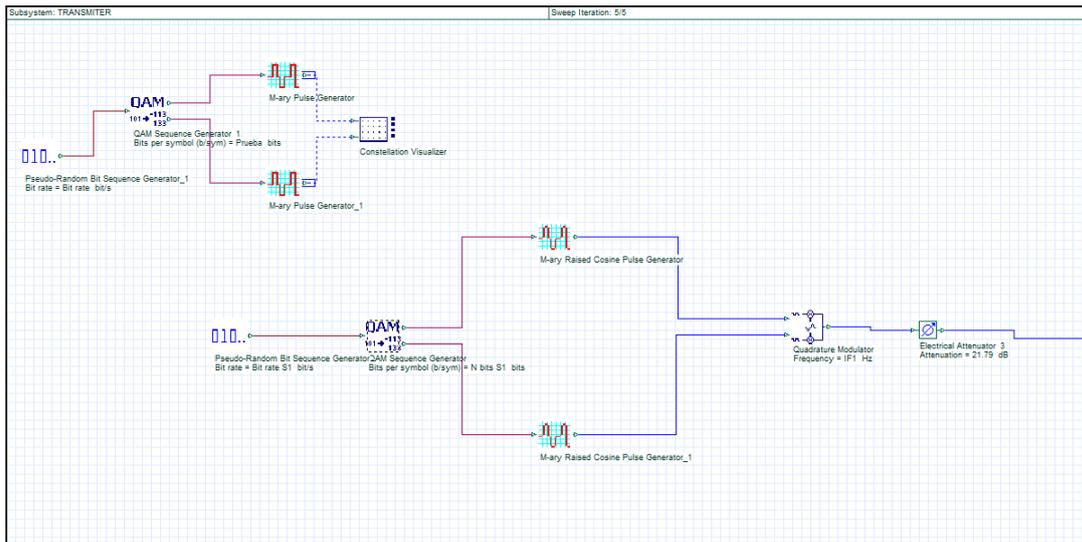


Figura 3.8. Módulo para transmitir un servicio

Este esquema de transmisión tiene dos partes diferenciadas, una parte que nos permite visualizar la constelación de datos enviadas y otra parte, que nos genera la constelación que se enviará al sistema; filtrando la señal tanto la parte I como en la Q con un filtro Nyquist. Los módulos utilizados en el diagrama esquemático se presentan a continuación:

- El módulo de “*Pseudo-Random Bit Generator*” consiste en un generador de bits aleatorio en el que será necesario introducir el “*bit rate*” deseado.
- El “*QAM Sequence Generator*”: Genera dos secuencias de símbolos M-arios paralelos a partir de señales binarias utilizando modulación por amplitud en cuadratura (QAM):
  - Como parámetro será necesario indicar el número de bits por símbolo: 2 para 4QAM o 4 para 16QA.
- El módulo de “*M-ary Pulse Generator*” consiste en un generador de pulsos multinivel a partir de la señal M-aria de entrada. Estos pulsos son fácilmente representables en un visualizador de constelaciones para ver la constelación transmitida.
- El módulo de “*M-ary Cosine Pulse Generator*” es un módulo parecido al anterior pero en el que también incluye un filtrado paso bajo de la señal. En este módulo es necesario determinar los siguientes parámetros:
  - Symbol rate. Símbolos por segundo que se quieren transmitir.
  - Roll off factor. Es un parámetro que se utiliza en la modulación de pulsos para controlar la forma de las transiciones entre los símbolos transmitidos. Se ha utilizado un parámetro típico de 0.2.
  - Squared root. Es necesario activarlo para que se trate de un filtro raíz cuadrada y así evitar en mayor medida la interferencia entre símbolos.
- El módulo de “*Quadrature Modulator*” implementa un modulador de amplitud analógico en cuadratura; donde I y Q son las señales eléctricas de entrada.
  - Frecuencia de la portadora. Es la frecuencia IF a la que se quiere modular la señal.
- Atenuador. Se ha fijado una atenuación fija de 21.79 dB, para obtener a la salida del transmisor una potencia de señal eléctrica de 15 dBm, similar a la del laboratorio.

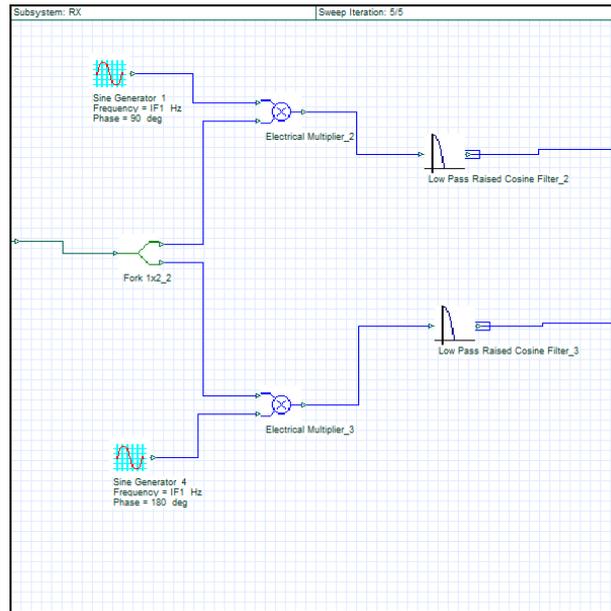


Figura 3.9. Módulo para recibir un servicio

La Figura 3.9, es un diagrama esquemático para realizar la demodulación de la señal eléctrica recibida, en el que si se vuelve a aplicar la señal IF como portadora y se filtra cada banda con un filtro raíz coseno, se obtiene la señal original en BB que puede ser visualizada por un visualizador de constelaciones.

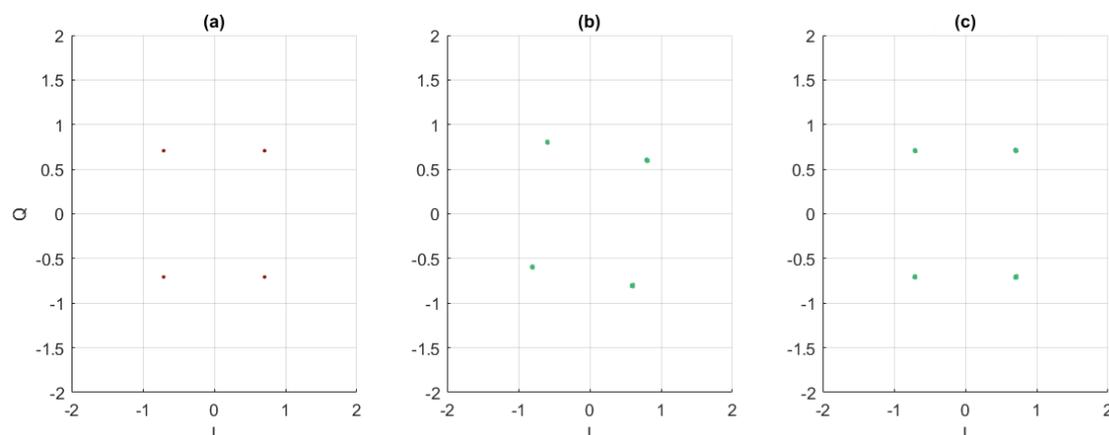
Cabe destacar, que los filtros utilizados, deforman la señal temporal, por lo que tan solo en el momento inicial de lo que dura símbolo, el nivel de señal representa exactamente el símbolo. El momento en el que los visualizadores determinan el instante que utilizan de la señal temporal para representar el símbolo, se configura como instante de decisión y se ha configurado para que sea al inicio de cada símbolo.

Una vez presentados todos los módulos del diagrama esquemático se procede a realizar una simulación para la transmisión de un servicio con las siguientes características.

Velocidad de transmisión 25Msimbolos/s,

Modulación 4QAM

Frecuencia intermedia de IF = 500 MHz. En la Figura 3.10, se puede observar la transmisión y recepción de este servicio.



**Figura 3.10. Transmisión de datos por DML en BB IF 500MHz 25MSps 4QAM. (a) Constelación transmitida. (b) Constelación recibida. (c) Constelación recibida ajustada.**

En la Figura 3.10, se pueden apreciar la constelación de símbolos transmitida y la recibida. Para representar las medidas, poder compararlas y medir los valores de EVM, se ha procedido a normalizarlas. Además, se puede apreciar un giro en la fase de la señal recibida producido por las características de emisión del láser. Tanto la normalización como la medida y reversión del cálculo de fase se han llevado a cabo mediante código en Matlab. A partir de este momento, las gráficas normalizadas se presentarán habiendo revertido giro de su fase, ya que este es un proceso que hacen automáticamente los instrumentos de medida del laboratorio.

El cálculo del EVM y el MER, también ha sido llevado a cabo a través de una función de Matlab, cuyas expresiones se muestran en las ecuaciones 3.2 y 3.3 respectivamente [15][16].

$$EVM(\%) = 100 * \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^K}, e^K = (I_k - \tilde{I}_k)^2 + (Q_k - \tilde{Q}_k)^2 \quad (3.2)$$

$$MER = 10 * \log_{10} \left( \frac{\sum_{k=1}^N I_k + Q_k}{\sum_{k=1}^N e^K} \right) dB \quad (3.3)$$

Donde  $I_k$  y  $Q_k$  son el componente en fase y cuadratura de la señal.

De esta manera, los resultados de la transmisión de un único servicio se pueden contemplar en la constelación normalizada ajustada en la Figura 3.10. Esta transmisión ha presentado un EVM = 0.75769 % y un MER = 42.4102 dB y un giro de fase en su constelación de 8.42°. Según los umbrales de EVM del estándar de 5G según 3GPP que indica un máximo de 17.5 para la modulación QPSK y de 12.5 para la modulación 16QAM, esta constelación presenta un EVM adecuado. En cuanto al EVM en la industria de las comunicaciones inalámbricas, se tiene como un indicador de buen rendimiento, una señal con MER 25 dB o superior.

Mediante este procedimiento se han presentado la forma en la que visualizar las constelaciones y el modo en el que se obtienen los resultados. En este contexto, a continuación, se realizará la simulación y análisis de la transmisión de un servicio en un esquemático con conversión a la banda de ondas milimétricas, incluyendo la transmisión por un enlace de fibra.

### 3.3.2 Transmisión de datos mediante el diagrama esquemático de transmisión RoF (DML+CS-MZM)

En este apartado se va a simular un sistema de transmisión de un único servicio, en un diagrama esquemático como el de la Figura 3.11, en el que se han añadido al diagrama esquemático de la Figura 3.7, los elementos necesarios para la conversión a la banda de ondas milimétricas y la transmisión por fibra.

Durante la simulación y el análisis de este sistema se harán medidas en OB2B (Fibra = 0 km) y con fibra (Fibra = 10 km). Además, se extraerán los resultados de EVM y MER, respecto la ReP y el RoP, para ello se variará la atenuación del atenuador óptico que se encuentra justo antes del fotodetector.

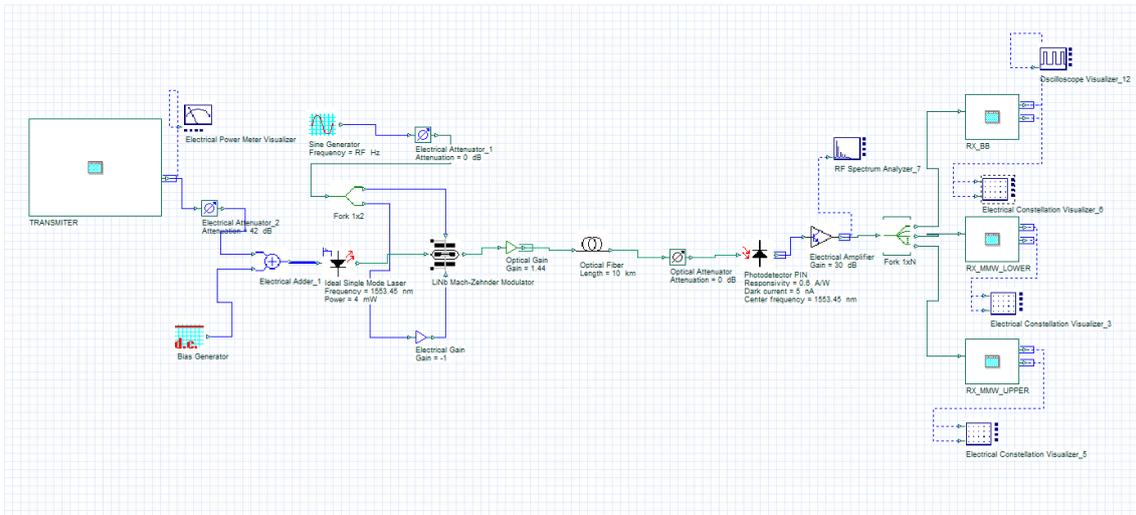


Figura 3.11. Esquema con un servicio con DML+ CS-MZM. Procesado de señal en BB y MMW

En la Figura 3.11 se pueden observar 3 módulos de recepción: RX\_BB, RX\_MMW\_LOWER y RX\_MMW\_UPPER. Estos módulos son exactamente iguales al de la Figura 3.9, modulo para la recepción de un servicio, en el que, lo único que cambia es la frecuencia que se desea analizar. RX\_BB para banda base,  $2 * f_{RF} - f_{IF1}$ , para RX\_MMW\_LOWER y  $2 * f_{RF} + f_{IF1}$  para RX\_MMW\_UPPER; exceptuando el módulo de RX\_MMW\_LOWER, el cual sufre un desfase de  $180^\circ$  en su banda I. Por este motivo, se generará para esta banda un seno(x) en vez de un -sen(x) como ocurre en banda base y en la banda superior de MMW.

Con el fin de evaluar la flexibilidad del sistema, se van a evaluar la transmisión de varios servicios diferentes por separado caracterizados por las siguientes señales:

- $f_{IF} = 100$  MHz, 4QAM, 10 MSym/s.
- $f_{IF} = 2$  GHz, 4QAM, 20 MSym/s.
- $f_{IF} = 1$  GHz, QAM16, 100 MSym/s.

### 3.3.2.1 Transmisión de una señal con IF 100 MHz, modulación 4QAM y velocidad de transmisión 10 MSym/s.

Para el análisis del sistema, se procederá en un primer momento a fijar la señal óptica recibida en 4 dBm, como se realizó en el laboratorio, y extraer los espectros eléctricos y las constelaciones. Finalmente, se realizará un estudio de la variación del MER y EVM, variando la señal óptica recibida con el atenuador.

El primer servicio consiste en una  $f_{IF}$  baja, de 100MHz, una constelación de 4 símbolos, 2 bits por símbolos y una velocidad de transmisión de 10 Mega símbolos por segundo. Para lograr esta velocidad de transmisión, los generadores aleatorios de bits se fijarán en 20 Mbits/s. Se va a proceder, en primer lugar, a analizar tanto el espectro eléctrico recibido en las 3 bandas, como las constelaciones, para OB2B y  $L = 10$  km.

En la Figura 3.12, se observan las 3 bandas de interés de la función de transferencia en OB2B, como era de esperar, y guardando coherencia con los resultados obtenidos en la Figura 3.5, la potencia eléctrica recibida es mayor en banda base (100MHz) que en MMW (39.9 y 401.1 GHz), siendo la diferencia entre ambas unos 10 dB.

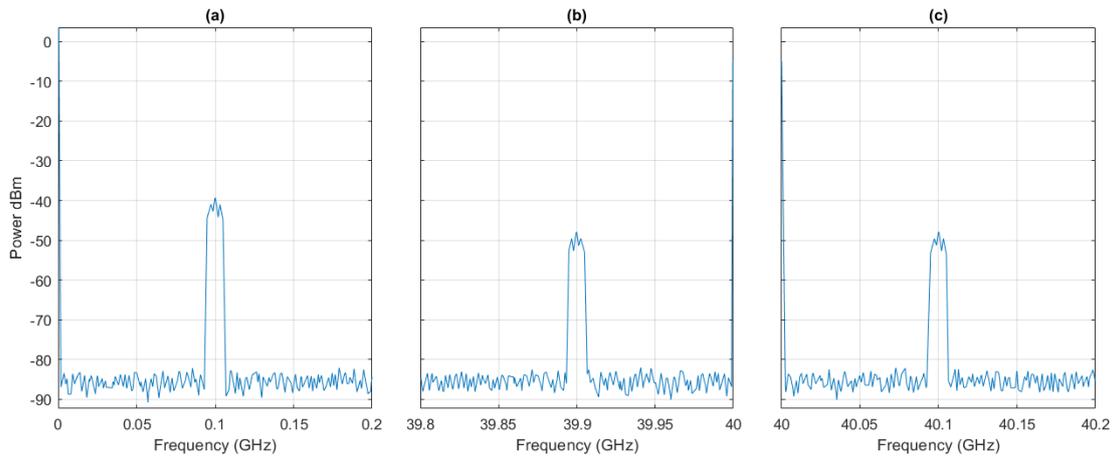


Figura 3.12. Espectro elèctric con  $f_{IF} = 100\text{MHz}$ , modulaci3n 4QAM a 10MS/s y sin fibra en las bandas de frecuencias: (a) BB 100 MHz, (b) MMW 39.9 GHz, (c) MMW 40.1 GHz.

En la Figura 3.13, se muestran las constelaciones recibidas en las 3 bandas. Debido a que existe una mejor SNR para 100MHz, se aprecia el diagrama de constelaci3n m3s nítido, siendo mayor el MER y menor el EVM, que para la frecuencia de MMW.

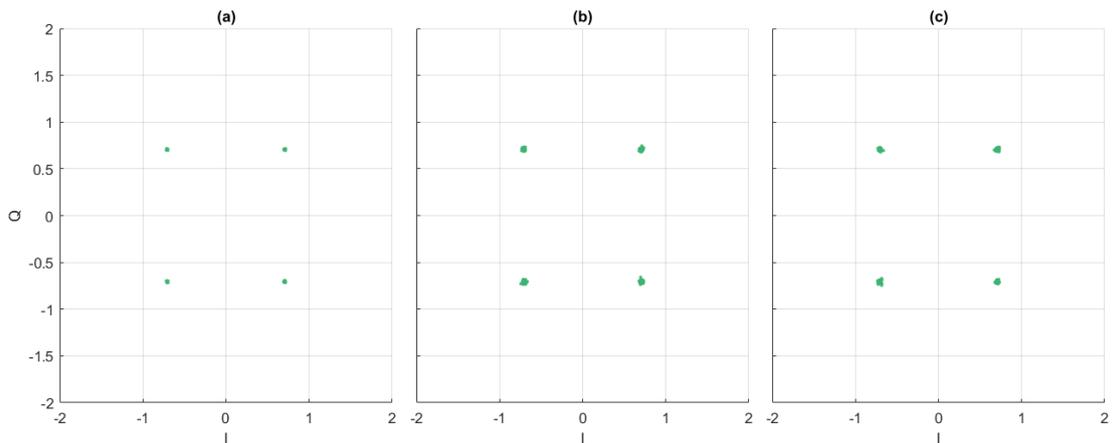


Figura 3.13. Constelaciones recibidas con  $f_{IF} = 100\text{MHz}$ , modulaci3n 4QAM a 10MS/s y sin fibra en las bandas de frecuencias: (a) BB 100 MHz, (b) MMW 39.9 GHz, (c) MMW 40.1 GHz.

Por otro lado, no existe apenas diferencia entre la banda superior y la inferior de las bandas milimétricas. Los resultados de EVM y MER en las tres frecuencias se observan en la Tabla 4.

	100 MHz	39.9 GHz	40.1 GHz
EVM (%)	0.7	1.8	1.7
MER (dB)	43.5	35	35.6

Tabla 4. EVM y MER para BB y MMW con  $f_{IF} = 100\text{MHz}$ , modulaci3n 4QAM a 10MS/s y sin fibra.

Los resultados obtenidos para la simulaci3n tras la propagaci3n a trav3s de 10 km de fibra 3ptica (fibra 10 km), se pueden apreciar en la Figura 3.14 y la Figura 3.15, donde se representan los espectros elèctricos y las sus constelaciones, respectivamente.

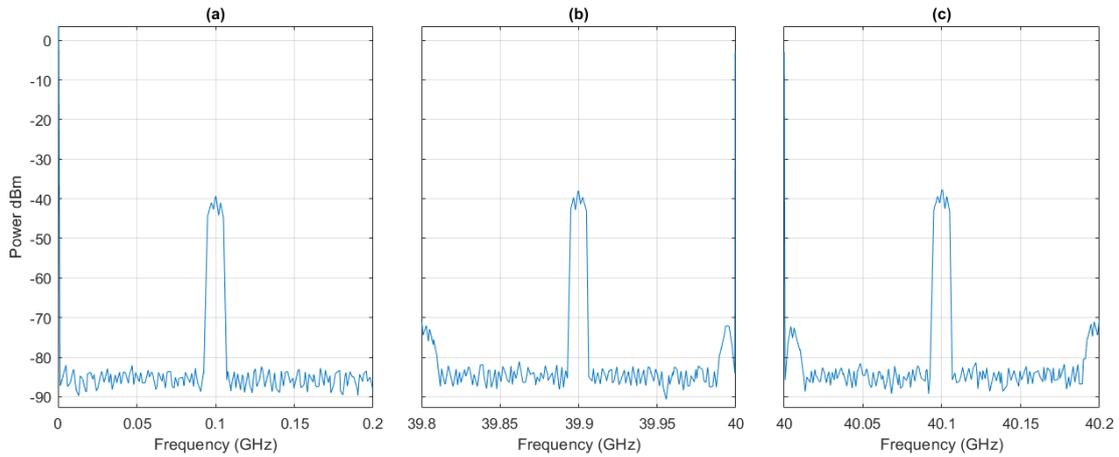


Figura 3.14. Espectro eléctrico con  $f_{IF} = 100\text{MHz}$ , modulación 4QAM a 10MS/s y 10 km fibra en las bandas de frecuencias: (a) BB 100 MHz, (b) MMW 39.9 GHz, (c) MMW 40.1 GHz.

Comparando los resultados con los obtenidos sin fibra, se observa que la presencia de datos no altera el comportamiento de la respuesta en frecuencia, ya que como se observó en la Figura 3.5, el espectro eléctrico en 100MHz, se mantiene constante mientras que los espectros en 39.9GHz, y 40,1 GHz aumentan su potencia unos 10 dB. Cabe destacar que en los espectros de la banda de milimétricas, 40 GHz y 39.8 y 40.2 GHz, se aprecian armónicos debido a los productos de intermodulación en estas bandas.

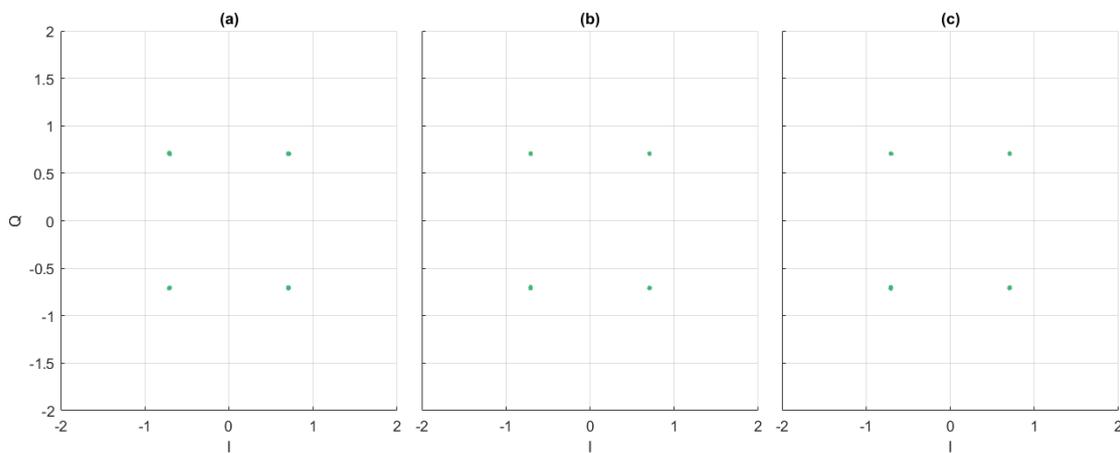


Figura 3.15. Constelaciones recibidas con  $f_{IF} = 100\text{MHz}$ , modulación 4QAM a 10MS/s y 10 km fibra en las bandas de frecuencias: (a) BB 100 MHz, (b) MMW 39.9 GHz, (c) MMW 40.1 GHz.

Aunque exista un ruido ligeramente mayor, en la Figura 3.15 se aprecia claramente como la mayor potencia eléctrica en la banda MMW resulta en una constelación mucho más nítida con respecto a la Figura 3.13, obteniéndose un mejor EVM y MER.

	100 MHz	39.9 GHz	40.1 GHz
EVM (%)	0.7	0.5	0.5
MER (dB)	43.6	45.6	45.2

Tabla 5. EVM y MER para BB y MMW con  $f_{IF} = 100\text{MHz}$ , modulación 4QAM a 10MS/s y 10 km fibra

Una vez obtenidos los espectros y diagramas de constelación para un RoP de 4dBm, se procede a realizar un análisis del EVM y MER respecto a variaciones en el RoP y el ReP. Para ello se variará el valor del atenuador óptico colocado delante del fotodetector de 0 a 20dB.

En la Figura 3.16, se puede el comportamiento del sistema frente a la transmisión de la señal con  $f_{IF} = 100\text{ MHz}$ , 4QAM y 10 MSim/s.

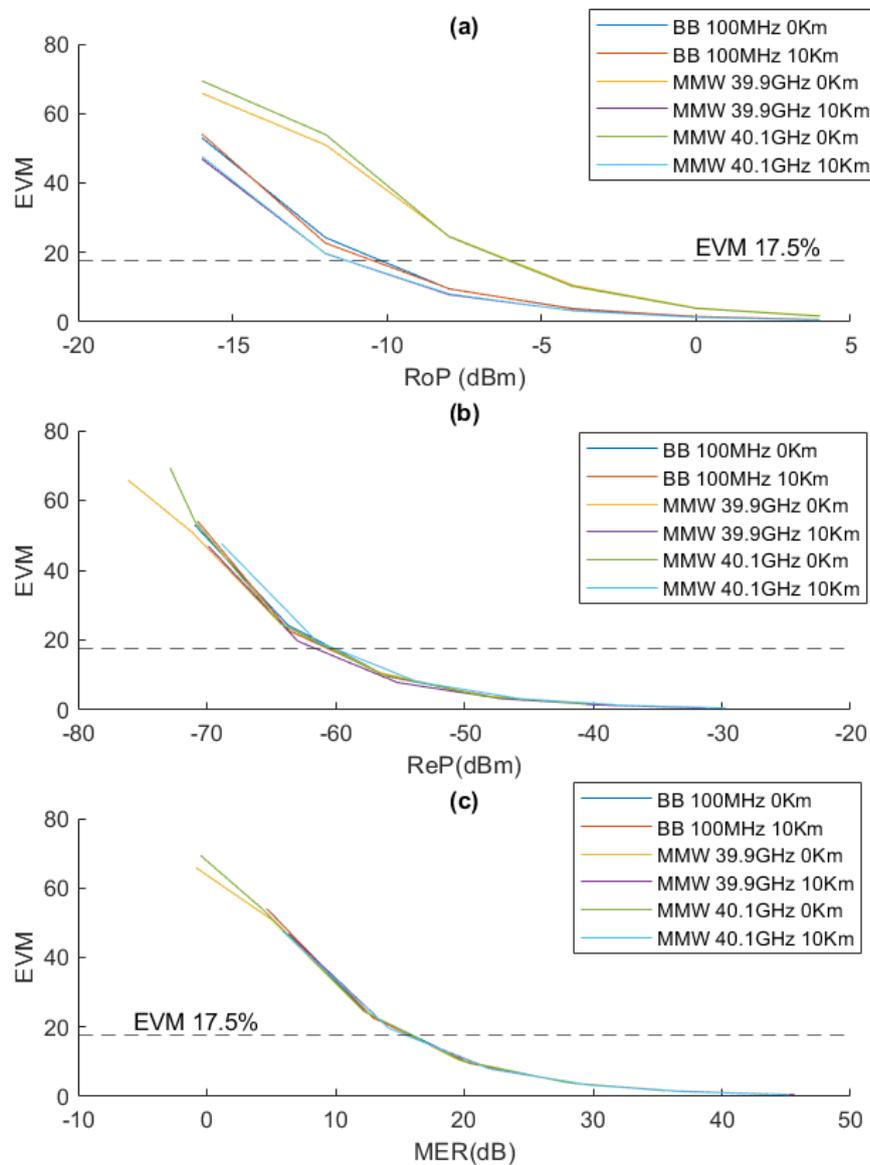


Figura 3.16. Servicio con  $f_{IF} = 100\text{MHz}$ , modulación 4QAM y 10MS/s (a) EVM vs RoP. (b) EVM vs ReP. (c) EVM vs MER

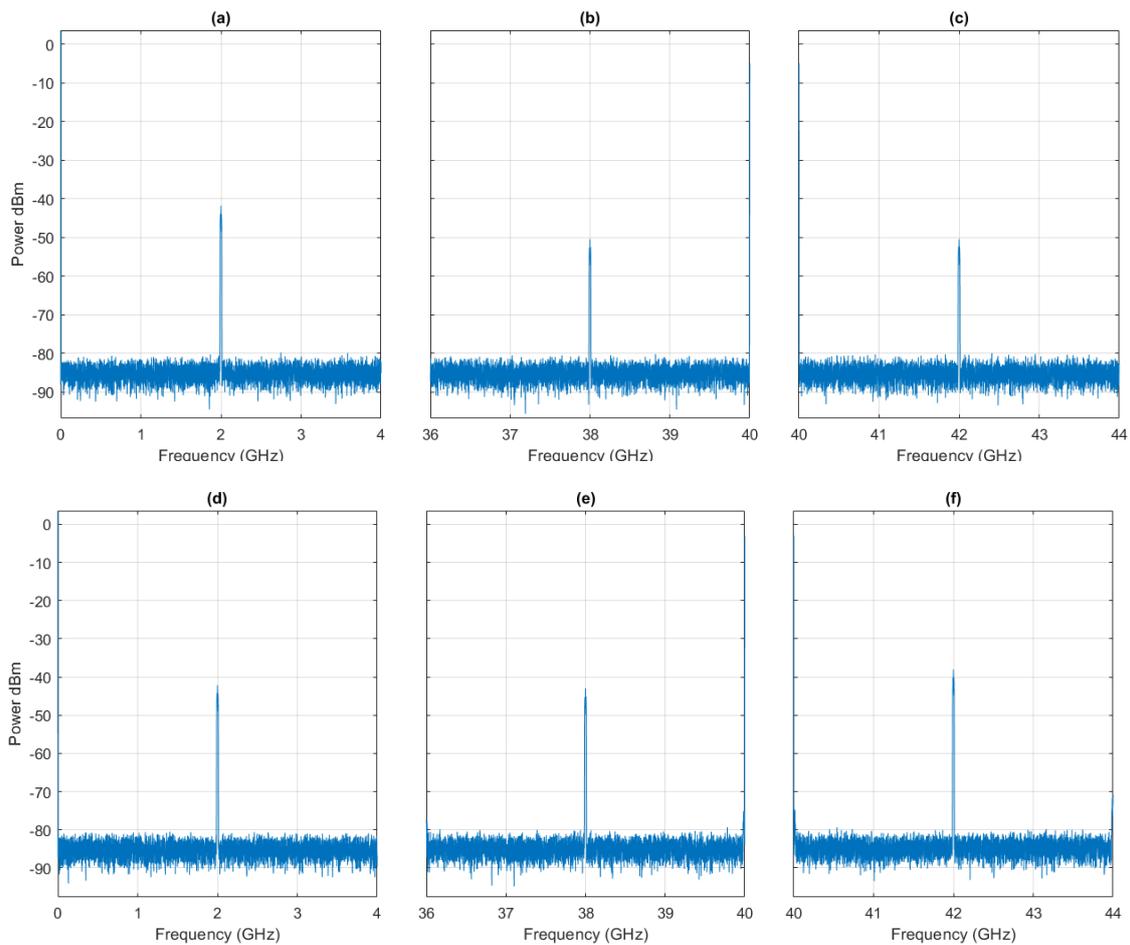
Se observa en las tres gráficas de la Figura 3.16 que la transmisión en BB (100MHz) tiene un comportamiento muy similar con y sin fibra. Sin embargo, el EVM respecto del RoP, sufre variaciones en la banda de MMW, obteniéndose un EVM mayor cuando existe fibra debido al efecto combinado de la dispersión de la fibra y el chirp del DML, de acuerdo con la función de transferencia obtenida teórica y experimentalmente en las Figuras 3.5 y 3.6, respectivamente. Se observa también que para esta frecuencia IF, ambas bandas 39.9 y 40.1 GHz, tienen un comportamiento muy similar. El RoP mínimo necesario para cumplir con las especificaciones del 3GPP son: -5.5 dBm para la banda de milimétricas sin fibra y -10dBm para el resto. Por tanto, la banda de milimétricas sin fibra sufre una penalización de 4.5dB. Por otro lado, queda demostrado, que el EVM respecto del ReP es independiente a la banda utilizada y también de si se utiliza fibra o no, y ocurre lo mismo con la dependencia del EVM respecto del MER.

A continuación, se realizará el análisis para la transmisión de un servicio con distintas características. Ambos servicios, el que se ha analizado y el que se analizará a continuación, serán los propuestos para el diagrama esquemático final de transmisión simultánea.

### ***3.3.2.2 Transmisión de una señal con IF 2 GHz, modulación 4QAM y velocidad de transmisión 20 MSym/s.***

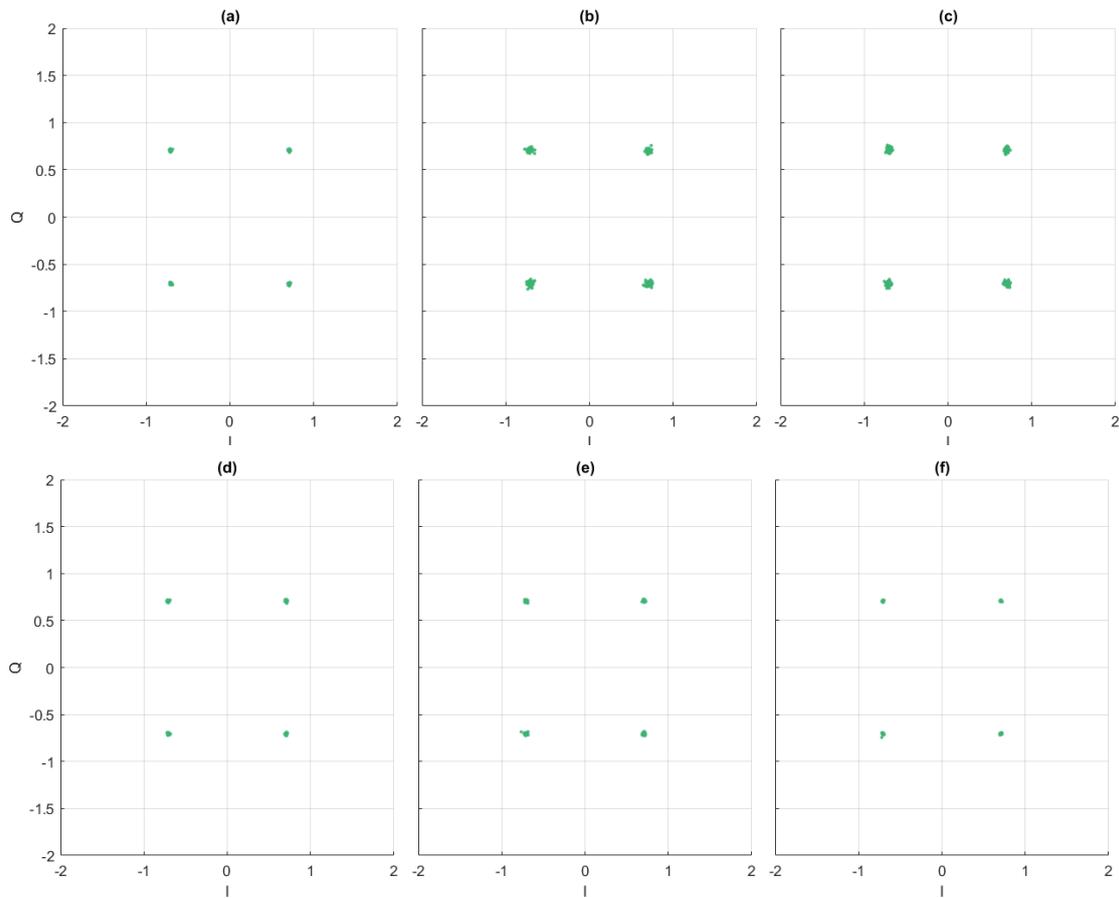
En este apartado se va a realizar un análisis similar al presentado en el servicio anterior. Esta vez, se transmitirá mediante un IF intermedia de 2 GHz, una constelación de 4 símbolos, 2 bits por símbolos (4QAM) y una velocidad de transmisión de 20 Mega símbolos por segundo. Para lograr esta velocidad de transmisión los generadores aleatorios de bits se fijarán en 40 Mbits/s.

En la Figura 3.17, se pueden apreciar los espectros eléctricos para un RoP de 4 dBm. Como ocurría en el caso anterior en banda base (100 MHz), no existen diferencias en el espectro recibido. Esto coincide con la función de transferencia observada en la Figura 3.5, ya que el primer “notch” o nulo para la frecuencia en BB con fibra de 10 km, resulta en 9GHz, todavía muy lejos de la frecuencia  $f_{IF}$  del servicio analizado. Por otro lado, en el comportamiento en la banda MMW se vuelve a apreciar la ganancia asociada a la compensación del chirp y la dispersión de la fibra.



**Figura 3.17. Espectro eléctrico del servicio con frecuencia con  $f_{IF} = 2\text{GHz}$ , modulación 4QAM y 20MS/s en BB y MMW. Sin fibra: (a) BB 2 GHz, (b) MMW 38 GHz, (c) MMW 42 GHz. 10 km fibra: (d) BB 2 GHz, (e) MMW 38 GHz, (f) MMW 42 GHz.**

En la Figura 3.18 se evidencian las conclusiones obtenidas en forma de constelaciones para las 3 bandas con y sin fibra. En la Tabla 5, se puede comprobar el EVM y MER asociado a estas medidas. Como se esperaba, las constelaciones en banda base resultan muy similares acorde a sus EVMs y MERs parecidos. Por otro lado, en la banda MMW, se observa la mejora en mayor proporción en la banda de 42 GHz cuando existe fibra respecto la banda de 38GHz. Los datos respectivos de EVM y MER de la Tabla 5 así lo corroboran.



**Figura 3.18.** Constelaciones recibidas del servicio con frecuencia con  $f_{IF} = 2\text{GHz}$ , modulación 4QAM y 20MS/s en BB y MMW. Sin fibra: (a) BB 2 GHz, (b) MMW 38 GHz, (c) MMW 42 GHz. 10 km fibra: (d) BB 2 GHz, (e) MMW 38 GHz, (f) MMW 42 GHz.

	2 GHz	38 GHz	42 GHz
EVM OB2B (%)	1.1	2.7	2.5
MER OB2B (dB)	39	31.2	31.9
EVM 10 km (%)	1.1	1.3	0.9
MER 10 km (dB)	38.8	37.6	41.2

**Tabla 6.** EVM y MER para BB y MMW con  $f_{IF} = 2\text{GHz}$ , modulación 4QAM y 20MS/s

En la Figura 3.19 se ha hecho un análisis idéntico al de la Figura 3.16, donde se realizaban diversas simulaciones variando el valor del atenuador con el fin de conseguir un barrido del RoP recibido. En la línea de lo que se ha comentado en este apartado, hay que destacar la diferencia entre el EVM respecto del RoP que sufre la banda de 38 GHz, ya que el resto de las medidas tienen un comportamiento muy similar.

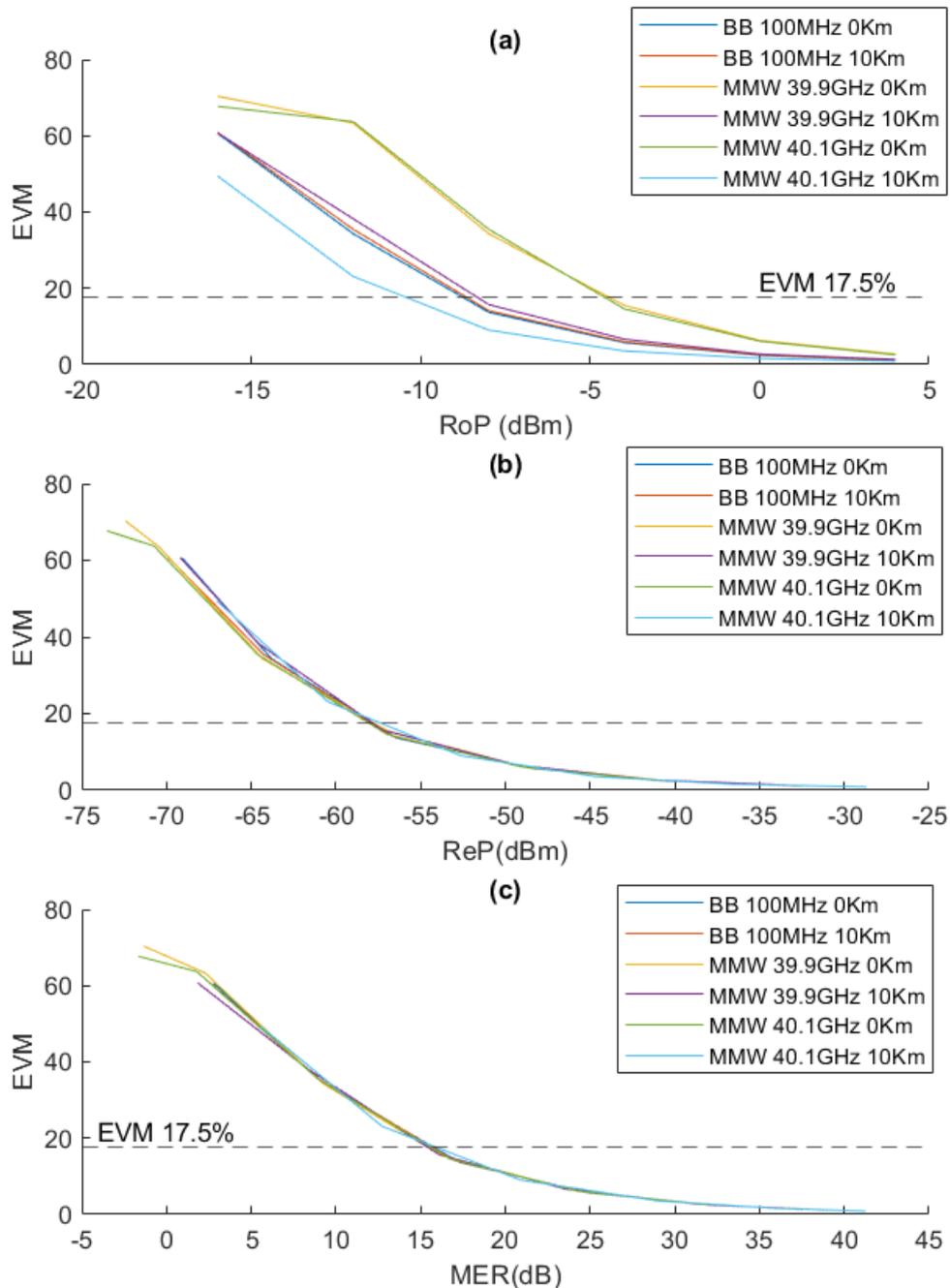


Figura 3.19. Servicio con  $f_{IF} = 2\text{GHz}$ , modulación 4QAM y 20MS/s: (a) EVM vs RoP, (b) EVM vs ReP, (c) EVM vs MER

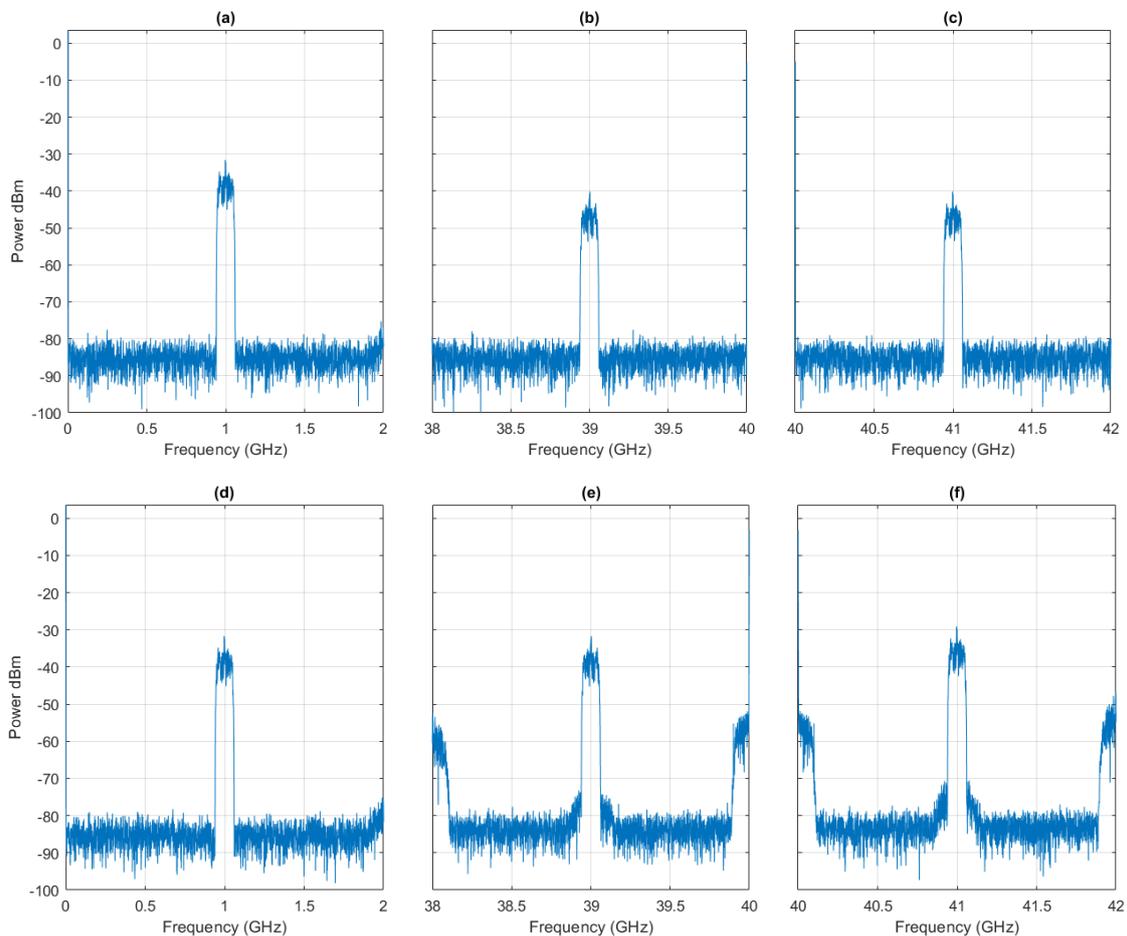
En este caso, el RoP mínimo necesario para cumplir con las especificaciones del 3GPP es de -10 dBm para la banda de milimétricas con fibra, -8 dBm para banda base, y -4.5 dBm para milimétricas sin fibra.

Finalmente, se realizará una breve presentación de otro tipo de servicio con el fin de observar la versatilidad del esquema construido. Así, se podrá afirmar la posibilidad de utilizar otros esquemas de modulación y velocidades muy superiores.

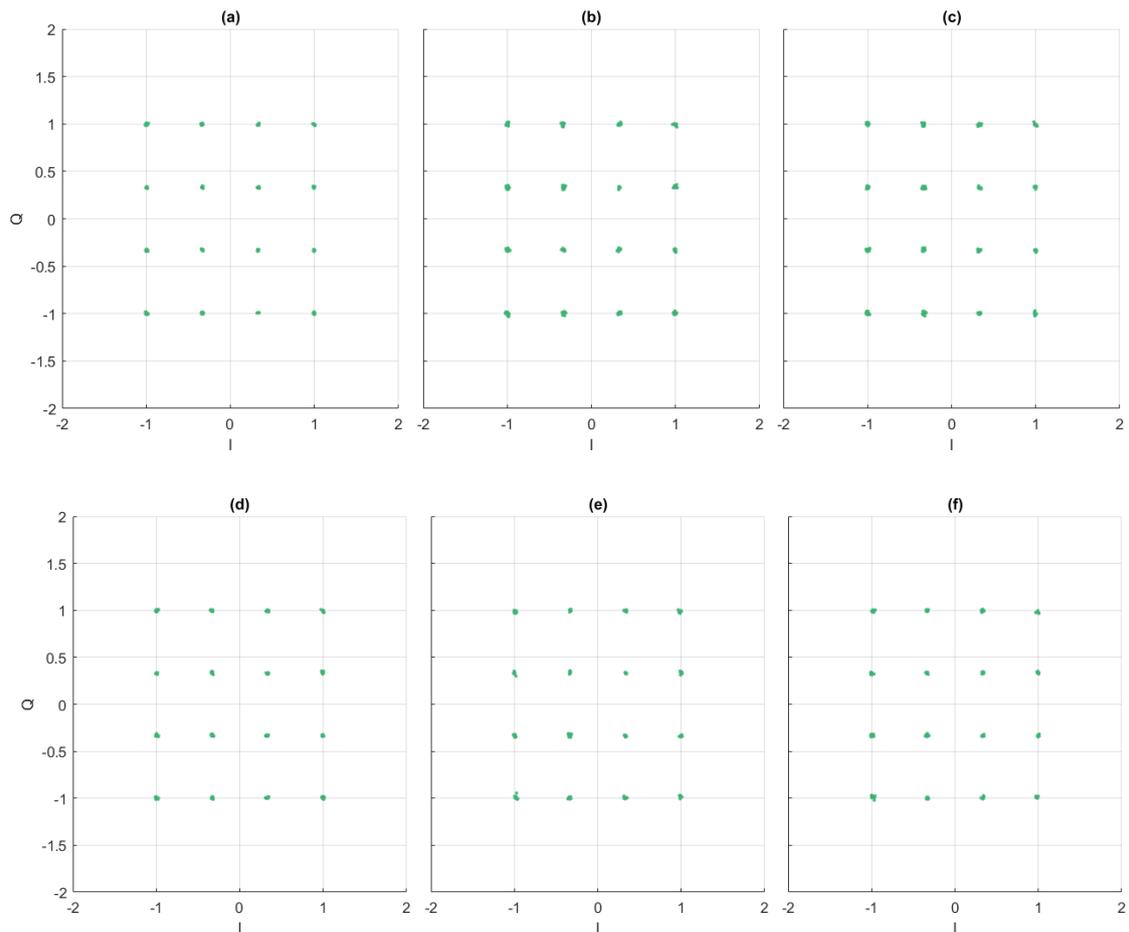
### 3.3.2.3 Transmisión de una señal con $f_{IF}$ 1GHz, modulación 16QAM y velocidad de transmisión 100 MSim/s.

Este último servicio transmitido tiene las siguientes características:  $f_{IF}$  intermedia de 1GHz, una constelación de 16 símbolos, 4 bits por símbolos (16QAM) y una velocidad de transmisión de 100 Mega símbolos por segundo. Para lograr esta velocidad de transmisión los generadores aleatorios de bits se fijarán en 400 Mbits/s.

Se observa un comportamiento similar a los otros servicios, aunque los pulsos presentan un mayor ancho de banda debido al incremento en la velocidad, como se aprecia en la Figura 3.20. Para  $L = 0$ , presenta mejor EVM que el servicio de  $f_{IF} = 2\text{GHz}$ , pero peor que el de  $f_{IF} = 100\text{MHz}$ , como se espera según la con la función de transferencia mostrada en la Figura 3.5. Sin embargo, para  $L = 10\text{ km}$  presenta una ganancia de la potencia eléctrica recibida, pero también sufre una ganancia en las bandas laterales. En cuanto a la banda de milimétricas, los diagramas de constelación presentados en la Figura 3.21 son muy similares.



**Figura 3.20.** Espectro eléctrico del servicio con frecuencia con  $f_{IF} = 1\text{GHz}$ , modulación 16QAM y 100MS/s en BB y MMW. Sin fibra: (a) BB 1 GHz, (b) MMW 39 GHz, (c) MMW 41 GHz. 10 km fibra: (d) BB 1 GHz, (e) MMW 39 GHz, (f) MMW 41 GHz.



**Figura 3.21. Constelaciones recibidas del servicio con frecuencia con  $f_{IF} = 1\text{GHz}$ , modulación 16QAM y 100MS/s en BB y MMW. Sin fibra: (a) BB 1 GHz, (b) MMW 39 GHz, (c) MMW 41 GHz. 10 km fibra: (d) BB 1 GHz, (e) MMW 39 GHz, (f) MMW 41 GHz.**

	1 GHz	39 GHz	41 GHz
EVM OB2B (%)	1	1.5	1.5
MER OB2B (dB)	40.2	36.2	36.5
EVM 10 km (%)	1.1	1.4	1.4
MER 10 km (dB)	38.8	36.8	36.9

**Tabla 7. EVM y MER para BB y MMW del servicio con  $f_{IF} = 1\text{GHz}$ , modulación 16QAM y 100MS/s**

Una vez visualizada la versatilidad del diagrama esquemático, simulados los servicios y analizados por separados, se va a configurar un diagrama esquemático para poder transmitir varios servicios a la vez, comparando las diferencias y verificando si sufren algún tipo de degradación respecto a la transmisión por separado.

## Capítulo 4. Propuesta de un sistema de transmisión de múltiples señales de datos con generación fotónica CS-MZM y DML

En este capítulo se va a presentar el esquema propuesto para realizar la transmisión simultánea de varios servicios mediante la técnica RoF.

### 4.1 Esquema de transmisión de datos

En la Figura 4.1 se puede ver el esquema de transmisión de dos servicios propuesto, este esquema presenta una apariencia similar al del servicio 1. La diferencia es que ambos servicios se introducen directamente al DML, previamente sumados con un mezclador (mixer). Para que exista compatibilidad, estos servicios deberán ser generados a frecuencias IF distintas. Como se verá en las simulaciones y el análisis de resultados, este esquema también presenta una gran flexibilidad ya que cada uno de los servicios es independiente. Es decir, pueden tener velocidades, esquemas de modulación y frecuencias IF diferentes.

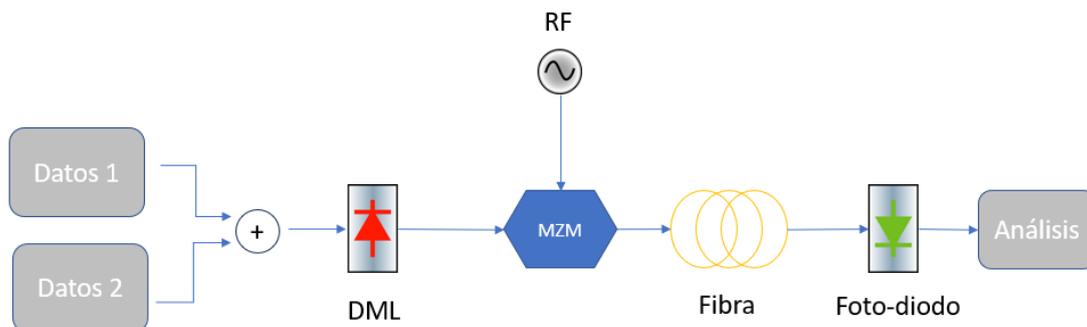


Figura 4.1. Esquema de transmisión de dos servicios sobre señales mmW generadas fotónicamente.

El proceso que sufrirá la señal óptica generada a partir de la suma de los dos servicios es idéntico al ya explicado con anterioridad. El modulador MZM polarizado en modo supresión de portadora generará 2 bandas ópticas en  $\pm f_{RF}$ . En cada banda se encontrarán los 2 servicios. Finalmente, después de la foto detección se generarán dos señales en banda base (Servicio 1 y Servicio 2) y 4 en MMW ( $2 * f_{RF} - f_{IF1}$ ,  $2 * f_{RF} - f_{IF2}$ ,  $2 * f_{RF} + f_{IF1}$ ,  $2 * f_{RF} + f_{IF2}$ ). Con el fin de representar la realidad, se escogerá una banda para cada servicio. La elección escogida es usar la banda base para el Servicio 1, que se tratará del servicio con menor velocidad de transmisión y la MMW superior para el servicio 2, ya que se ha comprobado que esta banda funciona correctamente y de manera muy similar a las simulaciones experimentales.

En la Figura 4.2 se puede observar el esquemático creado en el programa Optisystem para llevar a cabo la simulación y análisis de la transmisión de 2 servicios. El esquema presenta los mismos módulos que los que tenía el esquema para un servicio a excepción que se ha añadido un sumador para combinar ambos servicios antes de utilizar la señal para modular el DML.

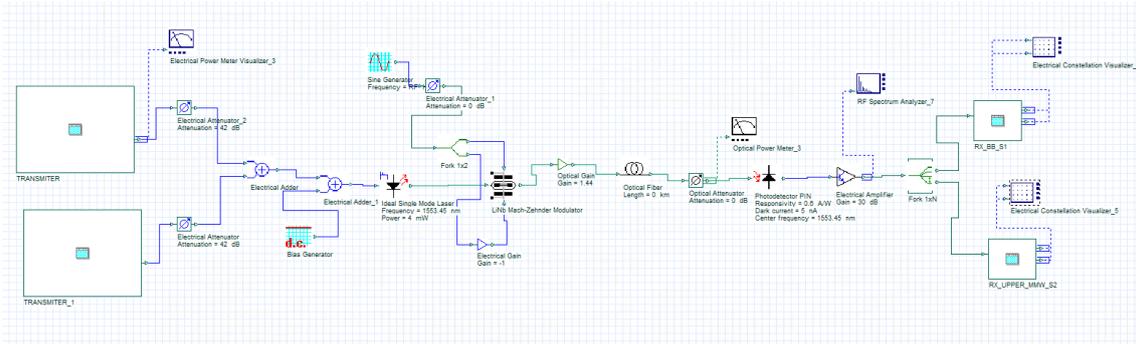


Figura 4.2. Esquema del sistema para transmisión de 2 servicio RoF (Optisystem)

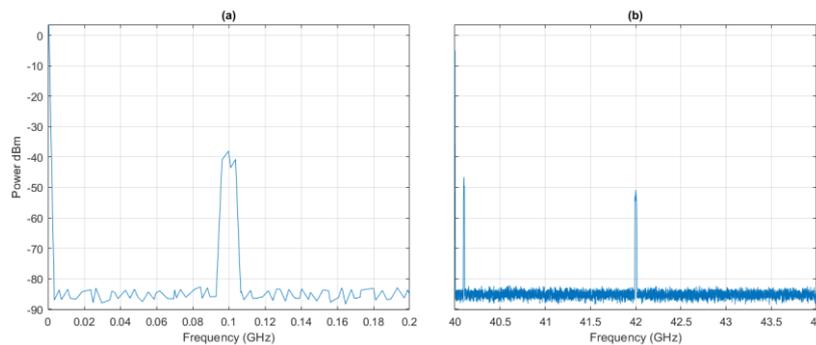
Los módulos de transmisión son idénticos al presentado en la Figura 4.2, aunque variarán su velocidad de transmisión, su esquema de modulación y su frecuencia  $f_{IF}$ . En cuanto a los módulos de recepción: RX\_BB\_S1, se utilizará para demodular el servicio 1 en banda base y RX\_UPPER\_MMW\_S2, se usará para demodular el servicio 2 en MMW.

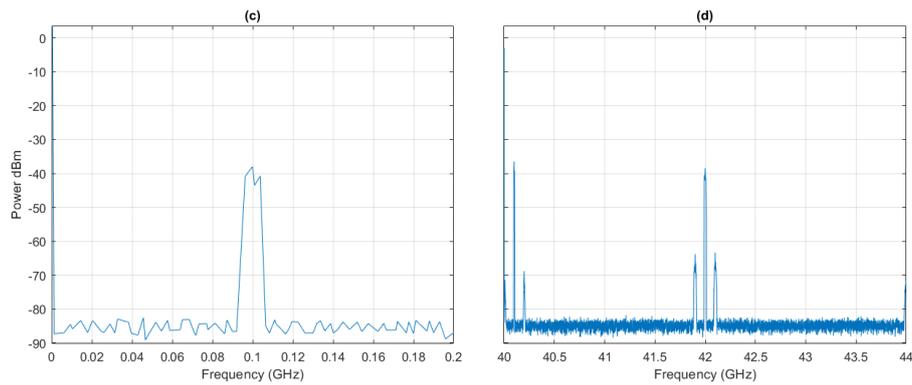
#### 4.2 Transmisión de 2 servicios.

Para realizar un análisis comparativo respecto la transmisión de un solo dato, se va a simular la transmisión de estos dos servicios ya simulados de manera conjunta:

- Servicio 1: 100 MHz  $f_{IF}$ , 4QAM, 10 MSym/s.
- Servicio 2: 2GHz  $f_{IF}$ , 4QAM, 20MSym/s.

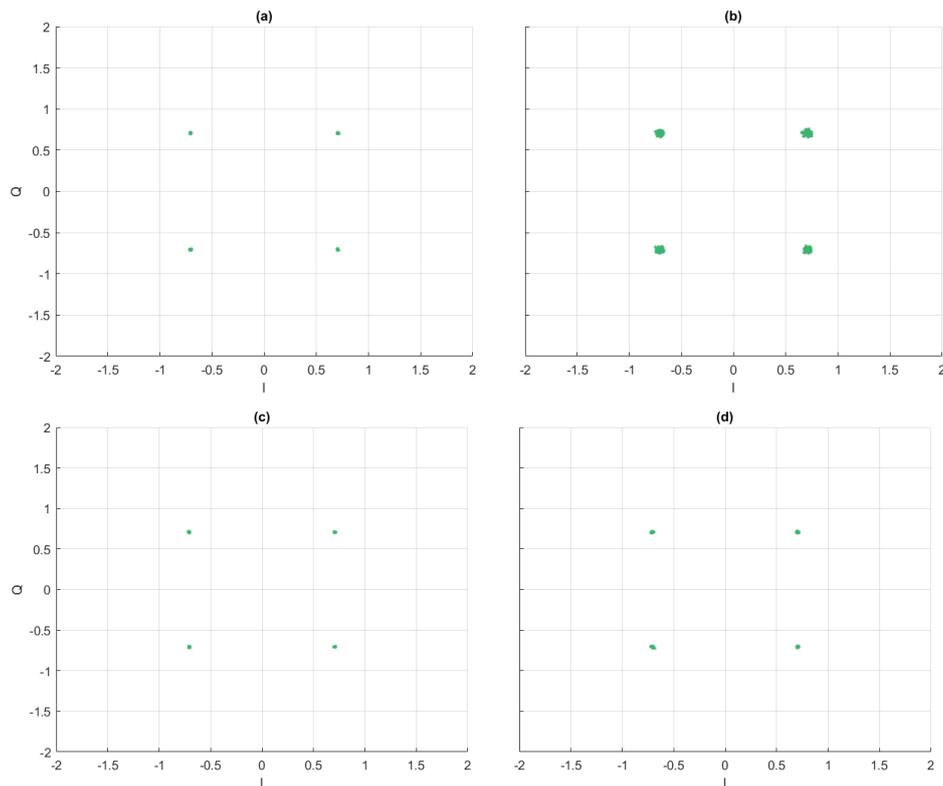
En la Figura 4.3 se pueden apreciar los espectros eléctricos de los dos servicios con y sin fibra. El servicio 1, corresponde con el espectro de 100MHz y presenta una respuesta muy similar, haya o no fibra en el enlace. Por otro lado, en 42GHz, se observa el servicio 2, cuando hay fibra se ven los productos de intermodulación con el servicio 1 a 41.9 y 42.1 GHz.





**Figura 4.3. Espectro eléctrico recibido de la transmisión de dos servicios. Sin fibra: (a) BB 100MHz Servicio 1, (b) MMW 42 GHz Servicio2. 10 km fibra: (c) BB 100 MHz Servicio 1, (d) MMW 42 GHz Servicio 2.**

En la Figura 4.4, se observan ambas constelaciones, como ya ha quedado demostrado, la banda de MMW obtiene con una longitud de fibra de 10 km una ganancia en la recepción, lo que resulta en una constelación menos difusa y con mejor EVM que la que obtiene sin fibra.



**Figura 4.4. Constelaciones recibidas de la transmisión de dos servicios. Sin fibra: (a) BB 100MHz Servicio 1, (b) MMW 42 GHz Servicio2. 10 km fibra: (c) BB 100 MHz Servicio 1, (d) MMW 42 GHz Servicio 2.**

En la Tabla 7, se presenta una comparación del EVM que presentan las constelaciones recibidas cuando se transmiten los dos servicios simultáneos, respecto al EVM observado, cuando se transmiten esos servicios por separado.

	100 MHz (2Servicios)	42 GHz (2Servicios)	100 MHz (1Servicios)	42 GHz (1Servicios)
EVM OB2B (%)	0.7	2.6	0.7	2.5
MER OB2B (dB)	43.9	31.6	43.5	31.9
EVM 10 km (%)	0.7	0.9	0.7	0.9
MER 10 km (dB)	43.7	41.3	43.6	41.2

Tabla 8. EVM y MER para 2 Servicios Simultáneos.

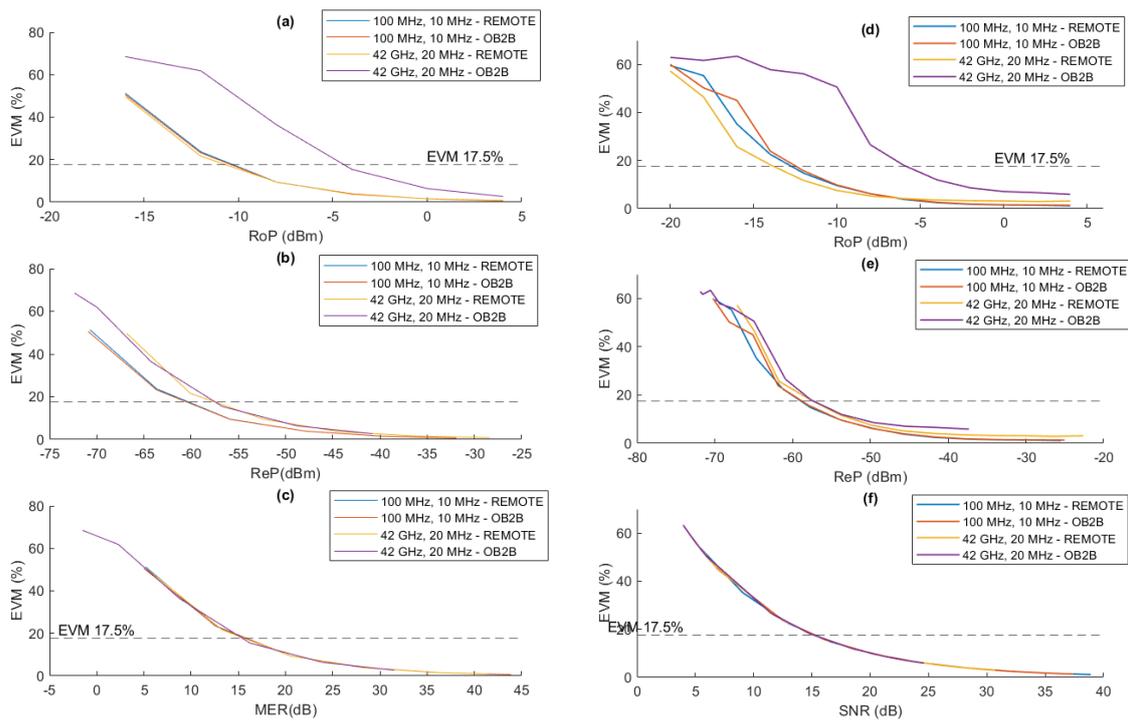
Como se observa, se obtienen unos resultados casi idénticos, con lo cual se puede afirmar que la transmisión de ambos servicios de forma conjunta no perjudica a la calidad de la señal recibida.

A continuación, se va a realizar una comparación de los resultados obtenidos con Optisystem con los resultados extraídos en el laboratorio. El esquema de transmisión para dos servicios que se usó en laboratorio es el presentado en la Figura 4.2. Los elementos del sistema son los siguientes:

- Generador de señales. AWG Arbitrary Waveform Generator AWG7122C (Tektronix). CH1: IF1= 100 MHz (BW = 10 MHz). CH2: IF2 = 2 GHz (BW = 20 MHz).
- Combinador: Combinador de RF ZFRSC-183-S+ (Minicircuits).
- DML: Emcore 5021T-D-1509-FA (BW = 18 GHz), FC/APC. 1550 nm, POUT = 9 dBm
- Modulador Mach Zehnder: Modulador electroóptico dual-drive a 40Gb/s (FC/APC) DEH1.5-40PD-ADC (SUMITOMO OSAKA CEMENT Co., Ltd.). Polarizado en modo supresión de portadora.  $V_{\pi} = 7.5$  V.
- Oscilador local: Generador de señal vectorial E8267C (Agilent), Genera un único tono a  $f_{RF} = 20$  GHz / 23 dBm.
- EDFA. Amplificador de fibra dopado con erbio. Potencia de salida real 16.52 dBm
- SSMF: L = 10 km, atenuación (1550 nm) = 2 dB
- Atenuador óptico variable: EVOA1550A (THORLABS).
- Detector óptico: BW 50 GHz XPDV2320R-VF-VA (FINISAR)
- Amplificador eléctrico. SHF S807C (SHF Communication Technologies). Ganancia variable de 70 kHz a 55GHz, ganancia de 22 a 23dB

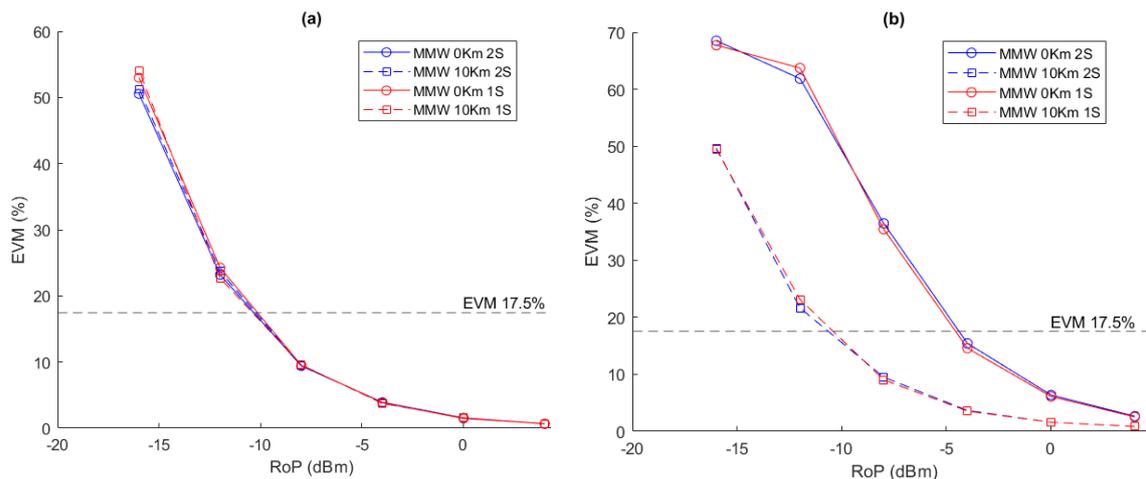
En primer lugar, en la Figura 4.5(a)(b)(c), se aprecian los resultados tras varias simulaciones variando la potencia óptica recibida. Respecto a la relación entre el EVM y RoP, se observa un comportamiento similar para BB con y sin Fibra, y para MMW con fibra. En la Figura 4.5(d)(e)(f), se presentan las medidas experimentales realizadas en el laboratorio.

En la variación respecto al ReP, se observa que para banda base, la pendiente de la curva es ligeramente menor que para MMW. El comportamiento del MER vs EVM es independiente del servicio y la banda escogida. Si se realiza un análisis comparativo de ambas representaciones, se observa un comportamiento cualitativo similar; por lo que se puede concluir que el módulo DML caracterizado en Optisystem está funcionando, al menos en este rango de frecuencias, de manera similar al láser utilizado en el laboratorio.



**Figura 4.5. Transmisión de 2 servicios. Opstisystem: (a) EVM vs RoP, (b) EVM vs ReP, (c) EVM vs MER. Medidas experimentales: (d) EVM vs RoP, (e) EVM vs ReP.,(f) EVM vs MER**

Finalmente, se representa el comportamiento del EVM frente al RoP, para comparar por un lado los servicios 1 y 2 transmitidos de manera independiente respecto ambos servicios transmitidos a la vez. La Figura 4.6 concuerda con los valores de EVM representados en la Tabla 7, demostrando que no existe interferencia entre los servicios, independiente del ROP de la señal recibida.



**Figura 4.6 Comparación EVM vs RoP transmisión 1 servicio por separado o ambos a la vez. (a) BB, (b) MMW.**

Por este motivo, ya que la señal no sufre degradaciones, en este trabajo hemos comprobado que es viable la transmisión de múltiples servicios sobre un enlace RoF con generación fotónica de



señales de onda milimétrica donde un servicio se transmitirá en banda base y otro sobre la banda de frecuencias milimétricas. Así pues, podrán emplearse distintas tecnologías de acceso al usuario: en el primer caso dicha señal podrá ser transmitida por sistemas de ancho de banda limitado como puede ser la tecnología VLC mediante el empleo de LEDs, mientras que el segundo puede ser radiado directamente por las antenas correspondientes, y se corresponderá con un enlace inalámbrico en la banda de ondas milimétricas. Así pues, este trabajo constituye un paso importante hacia la convergencia de tecnologías, como solución habilitadora de las futuras redes 6G.

## Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

Como conclusión a este trabajo, se puede afirmar que se ha logrado diseñar e implementar un sistema de transmisión de múltiples datos en la banda de frecuencia milimétrica, utilizando técnicas de generación fotónica.

En el marco de la investigación desarrollada por el grupo Photonics Research Labs en el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) de la Universitat Politècnica de Valencia, se ha desarrollado el modelo de simulación de este sistema utilizando el software Optisystem. Esta herramienta será de gran utilidad en el proyecto PID2021-126514OB-I00, “Tecnologías ópticas sostenibles para comunicaciones de acceso con ondas milimétricas y luz visible en redes 6G” (OPTIMISE), en el cual se enmarca este TFM, y ha sido un paso previo para la integración de esta herramienta de simulación en el equipo del proyecto.

Debido a que los módulos para caracterizar los componentes en el simulador dependen de variables propuestas por los desarrolladores del simulador y, por tanto, su funcionamiento depende de aproximaciones que han realizado, ha sido realmente complicado lograr que elementos como el DML tengan un comportamiento idéntico al que se encuentra en el laboratorio. Además, ha sido necesario un estudio exhaustivo de los fundamentos teóricos de las características de las ondas milimétricas, la generación fotónica y el comportamiento de un láser DML en pequeña señal. Finalmente, ha sido posible caracterizar un láser que posee un comportamiento cualitativo similar al que se dispone en el laboratorio.

Por un lado, se ha conseguido diseñar un esquema de transmisión de un servicio muy similar al del laboratorio. Este esquema tiene la capacidad y flexibilidad de simular cualquier frecuencia IF, diferentes modulaciones y distintas velocidades. En cuanto a los resultados obtenidos, la función de transferencia del sistema es cualitativamente parecida a la experimental. Se ha podido demostrar el efecto de ganancia de potencia recibida en la banda de milimétricas al incluir la fibra en el enlace de transmisión como consecuencia de la combinación del chirp y dispersión de la fibra en el esquema de generación fotónica de ondas milimétricas. Este resultado tiene un gran interés, ya que permite utilizar esquemas de modulación con un mayor número de bits y aumentar la velocidad de transmisión sin degradar el sistema.

En cuanto a la propuesta del sistema de transmisión para múltiples servicios, se ha optado por un esquema en el que ambos servicios se introducen por el DML, ya que, como se vio en las pruebas preliminares realizadas en el laboratorio, es el esquema que presentaba el comportamiento óptimo.

Los resultados obtenidos para el esquema de transmisión de 2 servicios han demostrado que dicho esquema tiene un comportamiento muy similar al del laboratorio. Además, viendo la comparación entre la transmisión de los servicios por separado y estos mismos de manera conjunta, ha quedado evidenciado que, en la transmisión de varios servicios, ninguno de ellos degrada las prestaciones del otro. Esto característica es una gran ventaja de la tecnología fotónica, por lo que, sin duda, será de gran interés en las redes de acceso futuras de 6G. En breve plazo, procederemos a escribir una publicación que contendrá tanto resultados de simulación como resultados experimentales y cuya novedad consiste en la propuesta y demostración por primera vez de la transmisión de múltiples señales o servicios que habilitan la convergencia de distintas tecnologías de transmisión.

Como líneas de investigación futuras, se ha comentado la necesidad de completar el estudio de los módulos para así utilizar el simulador en el proyecto de investigación OPTIMISE.

Por una parte, cabe la posibilidad de introducir uno o varios datos por el modulador MZM mezclados con la frecuencia RF y realizar un estudio comparativo con el esquema presentado.



Por otra parte, es necesario profundizar en el estudio de estos módulos para lograr un control absoluto de todos los parámetros deseados. En concreto, se ha observado que cuando se introducen los 10 km de fibra óptica, la potencia recibida es menor en la banda de 38GHz que en la de 42GHz, a diferencia de los resultados experimentales, que podría ser debido a que el ancho de banda del láser no coincide con las el de las medidas experimentales y por tanto, requiere un trabajo futuro para mejorar caracterización de este módulo de forma que confirme el comportamiento similar experimental en ambas bandas.

El proyecto OPTIMISE plantea un esquema de transmisión completo, donde se transmitirán varios servicios con funciones y velocidades distintas, y por tanto constituye el trabajo futuro a realizar tras este TFM. Una vez recibidos en el receptor, se plantea la posibilidad de filtrar por un lado la componente en banda base (que sería el servicio con menor velocidad, Servicio 1) y emitirla mediante un láser LED, esta es una de las conocidas tecnologías habilitadoras del 6G, denominada LIFI. Por otro lado, dado que se recibe el Servicio 2 directamente en la banda de MMW, transmitirlo por una antena a dicha frecuencia sin necesidad de modificar la señal. Además, el uso de la inteligencia artificial y machine learning será clave para la gestión de los recursos y la mejora del rendimiento de la red. Estas tecnologías serán utilizadas con el fin de poder seleccionar las frecuencias para el enlace, aumentar la sostenibilidad y formar haces inteligentes para superar las pérdidas por propagación. La convergencia de estas tecnologías habilitadoras resultará imprescindible para poder llevar a cabo la sexta generación de tecnología inalámbrica.

## Capítulo 6. Bibliografía

- [1] “Volume of data/information created, captured, copied, and consumed worldwide from 2010 to 2020, with forecasts from 2021 to 2025 (in zettabytes) [Graph], IDC, & Statista, June 7, 2021. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/>.”
- [2] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, “The road towards 6G: A comprehensive survey,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 334–366, 2021. doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
- [3] X. Wang, L.Kong, F. Kong, F.Qiu, M. Xia, S.Arnou and G.Chen, “Millimeter wave communication: A comprehensive survey,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1616–1653, Jul. 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2844322.
- [4] Oliver Graydon, “Terahertz: Entering applications,” *blogs.nature.com*, May 2018. Accessed: May 29, 2023. [Online]. Available: <https://blogs.nature.com/onyourwavelength/2018/05/21/terahertz-entering-applications/>
- [5] A. Boulogeorgos, A. Aleixiou, T.Merkle, C. Shubert, R. Elschner, A. Katsiotis, P. Stavrianos, D. Kritharidis, P. Chartsias and J.Kokkonemi, “Terahertz Technologies to Deliver Optical Network Quality of Experience in Wireless Systems beyond 5G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 6, pp. 144–151, Jun. 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1700890.
- [6] L. Vallejo Castro, “Photonic Millimeter Wave Signal Generation and Transmission Over Hybrid Links in 5G Communication Networks,” Valencia, Sep. 2022. [Online]. Available: [www.prl.upv.es](http://www.prl.upv.es)
- [7] J. Wu, Z. Zhang, Y. Hong, and Y. Wen, “Cloud radio access network (C-RAN): A primer,” *IEEE Netw*, vol. 29, no. 1, pp. 35–41, Jan. 2015, doi: 10.1109/MNET.2015.7018201.
- [8] M. Rius Mercado, “Sistemas de generación de señales de radiofrecuencia basados en Fotónica de Microondas,” Valencia, 2018.
- [9] A. Ng’oma, *Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems*. Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [10] Leandro G, “Ventanas de transmisión,” 2016. <http://elcajondelectronico.com/tag/ventana-de-transmision/> (accessed May 30, 2023).
- [11] M. Alonso Chávez Vargas, A. J. Arvizu Mondragón Apolinar Reynoso Hernández, H. Soto Ortiz Víctor Ruiz Cortés, and L. Alejandro Márquez Martínez David Hilario Covarrubias Rosales, “Diseño, implementación y caracterización de un foto-receptor para sistemas de transmisión de señales de radiofrecuencia a través de fibra óptica empleando un mezclador optoelectrónico.” 2007.
- [12] J. Capmany, J. Mora, I. Gasulla, J. Sancho, J. Lloret, and S. Sales, “Microwave photonic signal processing,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 571–586, 2013, doi: 10.1109/JLT.2012.2222348.
- [13] L. Vallejo, J. Mora, D. Nguyen, J.Bohata, V.Almenar, S. Zvanovec and B. Ortega, “On the 40 GHz Remote Versus Local Photonic Generation for DML-Based C-RAN Optical Fronthaul,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 21, pp. 6712–6723, Nov. 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3102818.



- [14] M. Botella-Campos, J. Mora, and B. Ortega, "MMW signal gain in DML-based microwave photonic links under large signal regime," *Journal of Lightwave Technology*, pp. 1–9, 2023, doi: 10.1109/JLT.2023.3277701.
- [15] MathWorks, "comm.EVM - Error vector magnitude", en MATLAB R2021b Help, 2021. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/comm.evm-system-object.html> [Acceso el 5 de julio de 2023].
- [16] MathWorks, "merMeasurement - Medida de la relación señal-ruido y error (MER)", en Ayuda de MATLAB R2021b, 2021. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/mermeasurement.html> [Acceso el 5 de julio de 2023].