



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE FIBRA ÓPTICA BASADO EN WDM PARA UN
PROTOTIPO DE FRONTHAUL PASIVO DE UNA ARQUITECTURA DE RED DE ACCESO
DE RADIO CENTRALIZADA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MIGUEL CERVANTES VÁZQUEZ

TUTOR
DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., NOVIEMBRE, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE
Secretario: DR. HERNÁNDEZ CORDERO JUAN ARNALDO
1 er. Vocal: DR. GUTIÉRREZ CASTREJÓN RAMÓN
2 do. Vocal: DR. RANGEL LICEA VÍCTOR
3 er. Vocal: DR. SANDOVAL ROMERO GABRIEL EDUARDO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN

FIRMA

Dedicatoria

Dedico este trabajo al amigo con el que compartí gran parte de mi vida, que sin saberlo formó a la persona que soy ahora. Te amo y te extraño Rey, siempre estarás en mi mente.

Hallar algo constante en la existencia es inusual y difícil de observar, pero el amor y la dedicación de mis padres hacia mí va más allá. Muchas gracias, nadie entendería el amor y apoyo que me han brindado. Este trabajo es por y para ustedes.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, porque realmente me ha educado y guiado en todos los ámbitos a lo largo de mi vida. Brindándome profesores, amigos y experiencias invaluableles.

Agradezco infinitamente a todas las personas que me han apoyado, ya que ellos han hecho posible la culminación de este trabajo. Gracias por la confianza y las oportunidades que me dieron. Nombrarlos uno a uno sería una odisea, disculpen una vez más mi vagancia.

Si algo del contenido de este trabajo tiene sentido es gracias al apoyo y guía que el Dr. Ramón ha invertido en ello y en mí. Muchas gracias por sus observaciones y recomendaciones, espero algún día tener algo de su talento. También agradezco al sínodo por sus consejos y tiempo que dedicaron para mejorar este trabajo.

Este trabajo fue posible gracias a la beca otorgada a lo largo de todo el posgrado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) donde me encuentro con el CVU 1005501. Asimismo, agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN103720 por el apoyo brindado.

Siempre pensé que mis logros serían más grandiosos si los conseguía individualmente, pero la vida me ha enseñado que la ayuda y la compañía son lo más valioso que se puede tener.

Resumen

En el trabajo de investigación que aquí se presenta se analizan los principales rasgos de las redes móviles de quinta generación que desatarán una revolución tecnológica en el mundo, debido a que brindarán la conectividad que será capaz de implementar nuevas funciones en la industria y en el hogar. Estas nuevas funciones serán aptas para evolucionar hacia las ciudades inteligentes.

Se explican las arquitecturas y técnicas propuestas por diferentes grupos de investigación, tanto de la academia como de la industria, que buscan solventar los requisitos que envuelven a las redes 5G. Además, se explica el proceso que se llevó para la selección de esas tecnologías.

Se informa la implementación de un *fronthaul* óptico, utilizando un escenario pasivo como medio principal de transporte, que conduce hacia una infraestructura de red rentable y económica para grupos gubernamentales o empresariales que buscan la convergencia de una red 5G con redes heredadas; de la misma manera, se hace la comparación y se describen las ventajas que se tienen sobre una red óptica activa.

Finalmente se dan a conocer los parámetros de desempeño que componen a la red y se determina la eficiencia de esta con base en los requisitos planteados para los diferentes servicios que soportan estas redes de telecomunicaciones.

Palabras clave: 5G, C-RAN, *fronthaul* óptico, WDM, PON

Abstract

In the research work presented here, the main features of the 5th generation mobile networks that will release a technological revolution in the world are analyzed, because they will provide the connectivity that will be able to implement new functions in the industry and in the home. These new functions will be suitable for evolving towards smart cities.

The architectures and techniques proposed by different research groups, both from academia and industry, that seek to solve the requirements that surround 5G networks are explained; In addition, the process that was carried out for the selection of these technologies is explained.

The implementation of an optical fronthaul is reported, using a passive scenario as the main means of transport, leading towards a cost-effective and economical network infrastructure for government or enterprise groups seeking the convergence of a 5G network with legacy networks; in the same way, the comparison is made and the advantages over an active optical network are described.

Finally, the performance parameters that make up the network are disclosed, and its efficiency is determined based on the requirements set for the different services that these telecommunications networks support.

Índice

Capítulo 1	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación y definición del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Contribuciones	5
1.6 Estructura del trabajo de investigación	6
Capítulo 2. Redes 5G	7
2.1 Antecedentes de las redes celulares y el <i>fronthaul</i>	7
2.2 ¿Qué es 5G?	8
2.2.1 Principales escenarios de uso en 5G	12
2.2.1.1 Banda ancha móvil mejorada (eMBB, <i>enhanced mobile broadband</i>).....	12
2.2.1.2 Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC, <i>massive machine-type communications</i>).....	12
2.2.1.3 Comunicaciones ultra confiables de baja latencia (URLLC, <i>ultra-reliable low-latency communications</i>).....	13
2.3 Red de acceso de radio centralizada (C-RAN)	13
2.3.1 Arquitectura C-RAN	13
2.3.1.1 Cabecera de radio remota (RRH, <i>Radio Remote Header</i>)	15
2.3.1.2 Unidad de banda base (BBU, <i>Baseband Unit</i>)	17
2.3.1.2.1 Módulos BBU.....	17
2.3.2 Redes definidas por software en C-RAN	18
2.3.3 Topologías C-RAN	20
2.3.3.1 BBU Hotel	20
2.3.3.2 BBU pool.....	21
2.3.3.3 BBU Cloud.....	21
2.4 Estado del arte del <i>fronthaul</i>	22
2.4.1 Radio digital sobre fibra (D-RoF, <i>Digital Radio over Fiber</i>).....	23
2.4.2 Radio analógico sobre fibra (A-RoF, <i>Analog radio over Fiber</i>)	25
2.4.3 Tendencias de la tecnología en el <i>Fronthaul</i>	26
2.5 <i>Fronthaul</i>	30
2.5.1 Interfaz común de radio pública (CPRI, <i>Common Public Radio Interface</i>)	31

2.5.1.1	Estructura del Frame CPRI.....	32
2.5.1.2	Muestreo.....	33
2.5.1.3	Mapeo.....	33
2.5.1.4	Agrupamiento.....	34
2.5.1.5	Entramado.....	35
2.5.1.6	Trama de Radio.....	36
2.5.2	Velocidad de línea en CPRI.....	36
2.5.3	Capacidad en el <i>fronthaul</i>	38
Capítulo 3. <i>Fronthaul</i> Pasivo.....		39
3.1	Multiplexación por división de longitud de onda (WDM, <i>Wavelength Division Multiplexing</i>).....	40
3.1.1	Bandas de comunicación óptica.....	41
3.1.2	Categorías WDM.....	44
3.1.2.1	Multiplexación por división de longitud de onda gruesa o ligera (CWDM, <i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>).....	44
3.1.2.2	Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM, <i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>).....	45
3.1.3	Componentes WDM.....	46
3.1.3.1	Elementos ópticos fundamentales.....	47
3.1.3.2	Interferómetro Mach-Zehnder.....	49
3.1.3.3	Filtros ópticos.....	50
3.1.3.3.1	Filtros de películas delgadas (TFF, <i>Thin-Film Filter</i>).....	50
3.1.3.3.2	Filtros basados en rejilla de fibra de Bragg (FBG, <i>Fiber Bragg grating</i>).....	51
3.1.3.3.3	Filtros basados en rejilla de guía de ondas en arreglo (AWG, <i>Arrayed waveguide grating</i>)	52
3.1.4	Rendimiento de WDM.....	53
3.2	<i>Fronthauling</i> con WDM.....	57
3.2.1	<i>Fronthaul</i> DWDM activo.....	59
3.2.2	<i>Fronthaul</i> pasivo.....	64
Capítulo 4. Desarrollo experimental.....		68
4.1	Estructura de la red.....	68
4.1.1	Elementos de red.....	72
4.1.1.1	Periférico de radio de <i>software</i> universal (USRP, <i>Universal Software Radio Peripheral</i>).....	72

4.1.1.2	Estaciones de trabajo (Workstations)	74
4.1.1.3	MUX/DEMUX	76
4.1.1.4	Componentes	78
4.1.1.4.1	Transceptores conectables de factor de forma pequeña plus (SFP+, <i>Small Form-factor Pluggable plus</i>)	78
4.1.1.4.2	Cable Ribbon	81
4.1.1.4.3	Conectores LC/UPC	82
4.2	Implementación del <i>fronthaul</i>	84
4.2.1	Tendido de fibra óptica	85
4.2.2	Construcción del enlace de fibra óptica para el <i>fronthaul</i>	88
4.3	Parámetros ópticos que caracterizar en pruebas preliminares	98
4.3.1	Potencia óptica	98
4.3.2	Longitud de onda	99
4.3.3	Frecuencia	99
4.3.4	Ancho de línea	100
4.3.5	Relación de supresión de modo lateral (SMSR, <i>Side Mode Suppression Ratio</i>)	101
4.3.6	Relación de señal óptica con el ruido (OSNR, <i>Optical Signal to Noise Ratio</i>)	102
4.4	Herramientas de medición	104
4.4.1	Medidor de potencia	104
4.4.2	Analizador de espectro óptico	105
4.4.3	Aplicación web PL-1000TE	106
4.4.4	Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo	107
4.5	Caracterización de componentes ópticos	110
4.5.1	Potencia óptica en SFP+	110
4.5.2	Espectro óptico en SFP+	113
4.5.3	Caracterización de MUX/DEMUX	122
Capítulo 5. Resultados y análisis		128
5.1	Pruebas OTDR	128
5.2	Presupuesto de potencia	140
5.3	Presupuesto de dispersión	151
5.4	Transmisión de canales DWDM	152
Capítulo 6. Conclusiones y sumario		156
Trabajo a futuro		160

Apéndice.....	162
Técnicas/tecnologías sobresalientes en 5G	162
mmWave	162
Beamforming.....	165
Beam-steering	166
Beam-sweeping.....	166
MIMO masivo	167
Referencias.....	169

Acrónimos

16QAM	16 Quadrature Amplitude Modulation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
ADC	Analog - Digital Converter
AMF	Access and Mobility Management Function
AP	Access Point
API	Application Programming Interface
A-RoF	Analog radio over Fiber
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
AWG	Arrayed waveguide grating
AxC	AntennacARRIER
BBU	Baseband Unit
BER	Bit Error Ratio
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BTS/BS	Base Station
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAPEX	Capital expenditure
CDMA	Code Division Multiple Access
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CPRI	Common Public Radio Interface
CU	Central Unit
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DAC	Digital-analog converter
DCM	Dispersion Compensation Module
DL	Downlink
DMT	Discrete Multi-tone
D-RAN	Distributed RAN
D-RoF	Digital Radio over Fiber
DSP	Digital Signal Processing
DU	Distributed Unit
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
E2E	End-to-End
eCPRI	Enhanced CPRI
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EN-DC	E-UTRA - NR Dual Connectivity
en-gNodeB/en-gNB	Next-generation eNodeB
eNodeB/eNB	evolved Node B
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
FBG	Fiber Bragg grating
FBMC	Filter Bank Multicarrier Modulation
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FIFO	First-In First-Out
Fi-Wi	Fiber-Wireless
FM	Modulated Frequency

FMF	Few Mode Fiber
FPR	Free Propagation Region
FSO	Free-Space Optical communication
FWM	Four Wave Mixing
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
HW	Hardware
i2rs	Interface to the Routing System
IFoF	Intermediate Frequency-over-Fiber
IM/DD	Intensity Modulation / Direct Detection
IMT-2020	International Mobile Telecommunications-2020
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IQ	In-phase - Quadrature
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunication Union
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LMT	Local Maintenance Terminal
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
MAC	Medium Access Control
MCF	Multi Core Fiber
MEMS	Microelectromechanical Systems
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity
MMF	Multi Mode Fiber
mMTC	Massive Machine-Type Communications
MSA	Mutual Standard Agreement
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
NF	Network Functions
NR	New Radio
NRZ	Non Return to Zero
NS	Network Slicing
NSA	Non-Stand Alone
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer
OAM	Operation, Administration and Maintenance
OBSAI	Open Base Station Architecture Initiative
OC	Optical Coupler
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OLT	Optical Line Terminal
OM	Operation and Maintenance
ONT	Optical Line Terminal
OPEX	Operational expenditures
ORI	Open Radio equipment Interface
ORL	Optical Return Loss
OSFP	Open Shortest Path First

OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OSS	Operation & Support System
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
OXC	Optical Cross-Connect
P2MP	Point-to-MultiPoint
P2P	Point-to-Point
PA	Power Amplifier
PCPS	Private Chaotic Phase Scrambling
PD	Photodetector
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PHY	Physical Layer
PoE	Power over Ethernet
PoF	Power over Fiber
PON	Passive Optical Network
PS	Probabilistic Constellation Shaping
PS-DP-16QAM	Probabilistically Shaped Dual-Polarization 16-ary
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAT	Radio Access Technology
RLC	Radio Link Control
ROADM	Reconfigurable OADM
RRC	Radio Resource Control
RRH	Radio Remote Header
RU	Radio Unit
RZ	Return to Zero
SBA	Service-Based Architecture
SDM	Space Division Multiplexing
SDN	Software-defined networking
SDR	Software Defined Radio
SFP+	Small Form-factor Pluggable plus
SGW	Serving Gateway
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SRS	Stimulated Raman Scattering
SW	Software
TDMA	Time Division Multiple Access
TFF	Thin-Film Filter
UFMC	Universal Filtered MultiCarrier
UHD	Ultra High-Definition
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UP	Uplink
UPEU	Universal Power and Environment Interface Unit
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XGM	Cross Gain Modulation
XPM	Cross Phase Modulation
XR	Extinction Ratio

Capítulo 1

1.1 Introducción

El uso de la tecnología en la vida cotidiana y en la industria ha tenido un gran auge en la última década, al grado de digitalizar todos los servicios que se consumen en el mundo; lo que abarca desde el control de cosechas en bases de datos, hasta el encendido de luces en casas inteligentes. Además, se planea emplear este tipo de herramientas en tareas de alto grado de precisión, como lo son los vehículos autónomos, el control de tráfico y cirugías a distancia. Todos estos servicios y aplicaciones del mundo moderno están soportados mediante las redes de telecomunicaciones [1], que se encuentran en constante evolución. La última propuesta comercial que se ha adoptado es el desarrollo de las redes 5G, la cual se formalizó el 20 de diciembre de 2017 por el Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) con la publicación de las especificaciones de la red “sin autonomía” (NSA, *Non-Stand Alone*), que consta de varios desafíos e innovaciones tecnológicas importantes. Por ejemplo: la implementación de ondas milimétricas en la capa de acceso de la red, así como la densificación de antenas con el concepto de múltiples entradas, múltiples salidas (MIMO, *Multiple-input Multiple-output*) masivo, la formación de haces (*beamforming*) y el seguimiento de haces (*beamtracking*) [2]. Además de la propuesta en que la red de telecomunicaciones se basará completamente en fibra óptica, es decir, la capa de transporte y núcleo estarán constituidas principalmente sobre fibra óptica [3]. Todo esto da lugar a la formación de una red convergente entre fibra óptica y un medio inalámbrico para el acceso a la red, denominado fibra-inalámbrico (Fi-Wi, *Fiber-Wireless*) [4]. Esta nueva red convergente compuesta de los dos medios característicos de 5G en la parte de las radio-bases se denomina *fronthaul* y es uno de los principales objetos de estudio, puesto que diversos análisis indican que será el cuello de botella del tráfico de las nuevas redes [5]. En la figura 1 [6] se muestra la utilización de *beamforming* y *beamtracking* en un sitio de acceso celular, la cual es la red de acceso a usuarios finales.

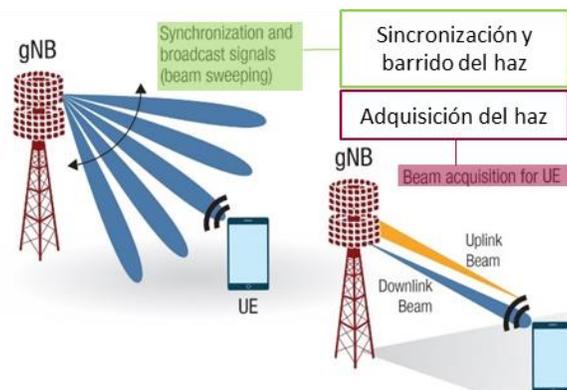


Figura 1 Barrido de la señal, utilizando beamforming y MIMO masivo para la señalización y tráfico de datos entre el usuario y la red de acceso inalámbrica [6].

La composición de las redes tradicionales ubica todo lo necesario para la recepción y envío de señales RF, además del procesamiento en banda base dentro de la misma radio-base; esto sigue una arquitectura distribuida, es decir, las redes tradicionales siguen la arquitectura de red distribuida de acceso por radio (D-RAN, *Distributed RAN*) [7]. Las redes actuales están basadas en la centralización, debido que al implementar o desarrollar una red, esta tendría mayor escalabilidad, mejor utilización de recursos y ahorros considerables en su despliegue. Este tipo de arquitectura es

la red centralizada de acceso por radio o a veces nombrada red en la nube de acceso por radio (C-RAN, Cloud-RAN) [8]. Esta nueva arquitectura C-RAN separa dos elementos muy importantes de las radio-bases, que son la cabecera de radio remota (RRH, *Radio Remote Header*) y la unidad de banda base (BBU, *Baseband Unit*) [9], como se muestra en la figura 2 [10]. Estos dos elementos se consideran los músculos y el cerebro de la radio-base, ya que en el RRH se hacen los procesos de conversión de las señales electroópticas hacia señales RF y viceversa, también se da el acondicionamiento para señales ascendentes (UP, *uplink*) y descendentes (DL, *downlink*), además de que aquí se puede llevar a cabo la implementación de MIMO. Por otro lado, tenemos que la BBU es responsable de la comunicación a través de la interfaz física y que está compuesta por un procesador de señales digitales para procesar señales de voz hacia el RRH para su transmisión a una unidad móvil y para procesar señales de voz inversas recibidas desde la unidad móvil. En pocas palabras, la BBU es un dispositivo que interpreta las frecuencias de banda base en los sistemas de telecomunicaciones, incluidas las redes de computadoras, Internet, redes telefónicas y sistemas de transmisión de radio [11].

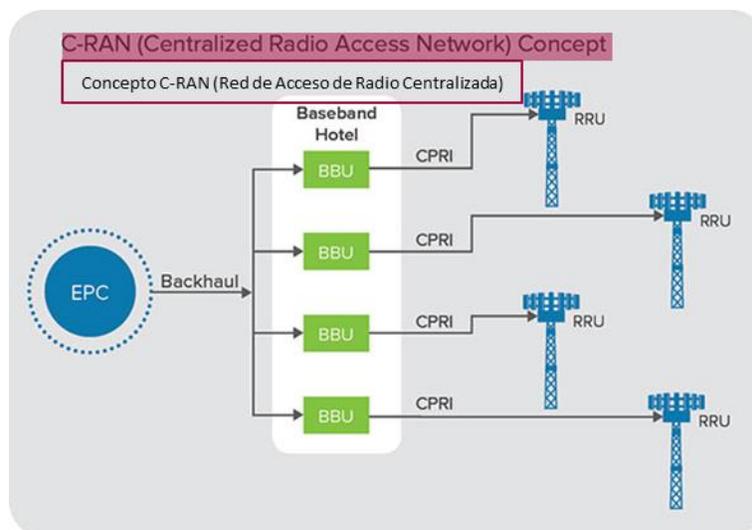


Figura 2 Arquitectura C-RAN que interconecta BBU de un mismo sitio físico con RRH/RRU de diferentes sitios físicos [10].

Por otro lado, diversas tecnologías se planean integrar para satisfacer la alta tasa de transmisión en el *fronthaul* óptico. Algunas tecnologías que destacan para esto es la multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) y la utilización de la tecnología de las redes ópticas pasivas (PON, *Passive Optical Network*). También hay otras propuestas noveles como la multiplexación por división espacial (SDM, *Space Division Multiplexing*) y otros esquemas de modulación que se plantean como sustituyentes de la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplex*) que son: la portadora múltiple filtrada universal (UFMC, *Universal Filtered MultiCarrier*), la modulación de portadora múltiple del banco de filtros (FBMC, *Filter Bank Multicarrier Modulation*) y la multiplexación por división de frecuencia generalizada (GFDM, *Generalized Frequency Division Multiplexing*) [12]; esto sin contar las técnicas de procesamiento digital de señales (DSP, *Digital Signal Processing*) que ayudan a aumentar la relación señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*), incrementar distancias, disminuir la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Ratio*) y ajustar demás parámetros que benefician a la red en general [13].

Se han seleccionado a WDM y a las redes ópticas pasivas como tecnologías clave para cubrir las demandas tan estrictas de 5G, debido a que son tecnologías bien establecidas y en conjunto brindan una red con alta capacidad de integración, altas tasas de transmisión, además que destacan por su bajo costo de operación (OPEX, *Operational expenditures*) y su bajo gasto de capital o inversión (CAPEX, *Capital expenditure*) [14].

Este trabajo de investigación es principalmente experimental, el cual analizará la viabilidad de un *fronthaul* óptico pasivo como solución a los requisitos impuestos de 5G. Puesto que se diseñará una red óptica que enlazará al Instituto de Ingeniería con la Facultad de Ingeniería, para posteriormente implementarse y crear la infraestructura que servirá para establecerse como un *fronthaul* óptico pasivo, utilizando como medio de transporte principal a la tecnología WDM completamente pasivo en planta externa. Con el fin de obtener los parámetros de la red y analizar la factibilidad de su implementación en una red funcional 5G. Además, sobre esta red se empleará la convergencia con la red de acceso inalámbrica y con el núcleo de la red (*core*) para tener una red completa de 4G/5G. La convergencia se hará siguiendo la arquitectura C-RAN. Finalmente, con la investigación realizada en los primeros capítulos de este trabajo y con los resultados experimentales obtenidos, se determinarán los casos de uso reales que puede conseguir esta red, así como las propuestas y cambios que optimizarán la eficiencia de la red.

1.2 Justificación y definición del problema

El acceso a la información y esencialmente a Internet se ha vuelto una necesidad, al grado de que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) lo ha declarado un derecho humano [15]. Este derecho se ha explotado en gran medida en los últimos años, involucrando un crecimiento en las redes de telecomunicaciones. El auge ha sido tal, que se estima que la cantidad de dispositivos conectados a redes IP será más del triple de la población mundial para 2023. Contextualizando el crecimiento: habrá 3.6 dispositivos en red per cápita para 2023, frente a 2.4 dispositivos en red per cápita en 2018, es decir que habrá 29.3 mil millones de dispositivos en red para 2023, frente a los 18.4 mil millones de 2018. Aunado a esto, el desarrollo de aplicaciones y servicios a las redes de telecomunicaciones les exige mayores tasas de transmisión, mayor disponibilidad y menor latencia, además de un despliegue mucho más barato, accesible y rentable. Algunas consecuencias de las nuevas aplicaciones son significativas, pues requieren de una revolución tecnológica y de redes máquina a máquina (M2M, *machine-to-machine*), que por sí solas, serán la mitad de los dispositivos y conexiones conectados a nivel mundial para 2023; sin contar que tan sólo será un 66% de conectividad respecto al total de la población mundial [16], es decir, el tráfico de datos en las redes de telecomunicaciones será excesivo y aun así, ni siquiera se tendrá cubierta la conectividad total mundial. En la figura 3 [16] se muestra un gráfico con las proyecciones de los dispositivos conectados a nivel mundial en el 2023, haciendo una comparación desde el año 2018, mostrando una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR, *Compound annual growth rate*) del 10%.

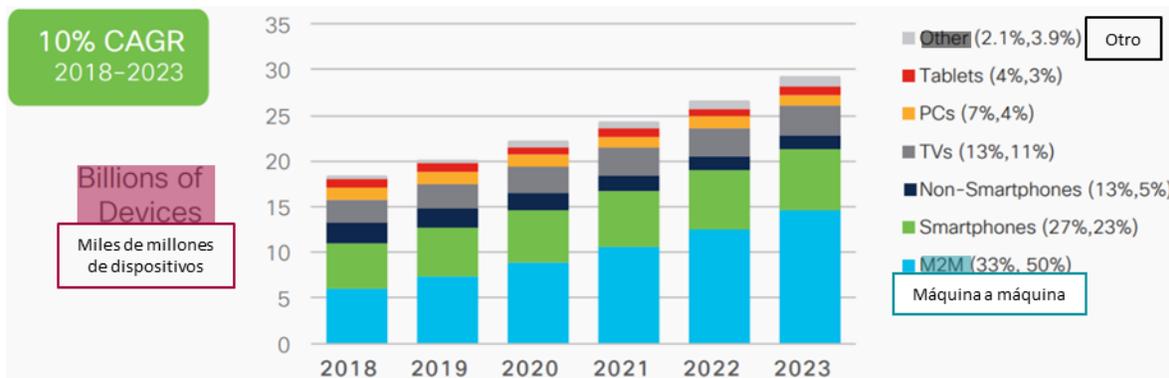


Figura 3 Proyección del número de dispositivos a nivel global hacia el año 2023 [16].

La solución inmediata a los próximos años, tal vez en la próxima década, para las redes de telecomunicaciones es la implementación de 5G, ya que tiene características que le permitirán cumplir con los requisitos que le exigen estos nuevos servicios. Uno de los principales impedimentos para un despliegue eficaz de 5G es el tráfico excesivo en el *fronthaul*, derivado de las nuevas aplicaciones y del uso de CPRI en el *fronthaul*, lo cual muy probablemente ocasione un cuello de botella en la red.

Este trabajo de investigación busca mitigar estos problemas de saturación en el *fronthaul* implementando una red con tecnologías ópticas adecuadas para una transmisión masiva, además de la utilización de equipo óptico totalmente pasivo que aminorará los costos de CAPEX y OPEX; para posteriormente converger hacia una red completa con su contraparte de acceso inalámbrica y su interconexión con el núcleo (*core*) de la red. Finalizando como un modelo atractivo para implementarse con redes ya sean completamente 5G o con un modelo híbrido entre redes 5G y redes heredadas.

1.3 Objetivos

- Desarrollar una red de fibra óptica capaz de soportar la arquitectura C-RAN, para implementar redes móviles de tecnología 4G/5G, utilizándose como la red de transporte en un enlace *fronthaul* completamente pasivo.
- Implementar la tecnología WDM pasiva en el *fronthaul* óptico, a fin de cubrir los requerimientos que exigen las redes 4G/5G para poner en práctica a la red en escenarios reales de uso.
- Converger el *fronthaul* óptico con su contraparte inalámbrica en el acceso de la red, además de la interconexión en el *Core* de la red, para una arquitectura completa de la red 4G/5G.
- Medir parámetros de desempeño y determinar la eficiencia de la red desplegada con base en los requisitos propuestos para estas redes de telecomunicaciones.

1.4 Hipótesis

El diseño de una red basada en arquitectura C-RAN incita la expectativa de mejorar las tasas de transmisión de la red del *fronthaul* óptico, puesto que al utilizar la tecnología WDM pasiva como tecnología de transporte, el *fronthaul* incrementa notablemente la capacidad del enlace, además de que obtiene los beneficios de WDM y las redes pasivas, que son transparencia en la comunicación, un despliegue económico, mantenimiento a la red relativamente barato y una utilización del espectro de la fibra óptica más eficiente. Con la culminación de este trabajo de investigación, se espera tener los conocimientos necesarios que determinarán las bases para una implementación exitosa de una red 5G sin la limitante del cuello de botella en el *fronthaul* óptico de forma totalmente pasiva en planta externa.

1.5 Contribuciones

Al ser este un trabajo de investigación principalmente experimental, las contribuciones que aporta su finalización, además de ser tangibles, son llamativas y novedosas para proyectos futuros, puesto que derivó el despliegue de la infraestructura de la misma red, así como la disposición para la investigación en conjunto con la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería. A continuación, se enuncian las contribuciones que se obtuvieron de este trabajo de investigación.

Como principal aportación experimental se tiene el tendido de la fibra óptica que, en conjunto con sus adaptaciones realizadas a lo largo del desarrollo de este trabajo, puede convertirse en uno o varios enlaces que interconectan al Instituto de Ingeniería y a la Facultad de Ingeniería, es decir, la infraestructura de una red de distancia variable de hasta 21 km de largo. Además, gracias a la configuración planteada en este trabajo y a las adecuaciones realizadas es posible incrementar su longitud realizando modificaciones sencillas, o sea, únicamente esas que sean propiamente del medio óptico.

Como parte de la infraestructura de este trabajo, se adquirió equipo óptico WDM para su funcionamiento como MUX/DEMUX en los canales seleccionados, que concretamente corresponden a dos equipos PL-1000TE de *Packet Light*, que al ser módulos ópticos también cuentan con transpondedores ópticos que son capaces de convertir longitudes de onda de 1310 nm o de 850 nm a los canales 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35.

Otra adquisición de mucha relevancia son los transceptores ópticos SFP+ DWDM, puesto que son utilizables en cualquier dispositivo que admita su tecnología y protocolos. Además, como aportación fundamental a la línea de investigación de este trabajo; la manipulación y la implementación de estos SFP+ DWDM sirvió para integrarlos en equipos de red que no son propiamente WDM, lo cual resulta en el pilar principal de este trabajo de investigación.

Esta tesis resulta en una introducción completa en el ámbito óptico para quien desee adentrarse en esta línea de investigación hacia redes funcionales de tecnología 5G basadas en fibra óptica. Junto con la infraestructura, este trabajo escrito resulta como guía en las bases para investigaciones más complejas que el Instituto de Ingeniería o la Facultad de Ingeniería precisen indagar.

1.6 Estructura del trabajo de investigación

Este trabajo de investigación está compuesto de VI capítulos. Se parte desde las necesidades de las redes 5G, así como la tecnología empleada para lograr su implementación y sus principales escenarios de uso. Para posteriormente abordar a las redes ópticas como principal medio que solventarán los requerimientos de las redes 5G. A fin de explicar el proceso de la implementación de la red óptica y su relevancia como solución de tecnología 5G.

En el segundo capítulo *Redes 5G* se da un panorama general de lo que es 5G, junto con la descripción de la arquitectura C-RAN. También se incluye el tema central de este trabajo, que es el *fronthaul* y se describen las variantes tecnológicas de las señales de radio: la analógica y la digital. En este capítulo se incluye el estado del arte del *fronthaul* el cual incorpora una recopilación de trabajos y experimentos sobresalientes del *fronthaul* óptico.

En el tercer capítulo *Fronthaul Pasivo* se habla sobre las tecnologías ópticas que permiten cumplir con las demandas impuestas en las redes 5G, principalmente sobre WDM y se hace énfasis en la importancia que tienen las redes pasivas actualmente y como su auge es fundamental para el despliegue de este tipo de redes. En este capítulo también se explican las diferencias entre un *fronthaul* activo y un *fronthaul* pasivo y porque el pasivo resulta atractivo como solución en la arquitectura C-RAN.

En el cuarto capítulo *Desarrollo Experimental* se describe la estructura de la red, desde el diseño que se siguió a partir de los requerimientos para poner a prueba la solución planteada hasta la configuración realizada en el *fronthaul* óptico pasivo. En este capítulo se detallan los elementos de la red, así como los parámetros a caracterizar que validarán la eficiencia de la red y se describen las herramientas de medición y los métodos a seguir para comprobar el desempeño de la red.

En el quinto capítulo *Resultados y análisis* se detallan los resultados de las pruebas realizadas con las herramientas de medición, así como los cálculos de presupuesto de potencia y de dispersión, para verificar el alcance en distancia máxima que el enlace es capaz de alcanzar limitado por la atenuación y la dispersión sin incluir ningún elemento activo. En este capítulo también se muestran los resultados de las pruebas realizadas con el OSA para comprobar la transmisión de los canales DWDM multiplexados verificando la calidad de la señal a través del OSNR.

En el sexto capítulo *Conclusiones* se enlistan las acciones más sobresalientes y la relevancia que tienen sobre el trabajo en general. También, se aborda puntualmente cada acción, dificultad o resultado obtenido y se analiza para finalmente tener conclusiones que indican si es favorable o desfavorable. En el caso desfavorable también se brinda una alternativa para mejorar el rendimiento. En este capítulo se incluye el trabajo a futuro que se puede derivar de este trabajo de investigación.

Finalmente, fuera del tema principal de este trabajo, pero estrechamente relacionado, se incluye un apéndice, en el cual se detallan tecnologías inmersas en las redes 5G. El apéndice resulta relevante, pues esta tecnología tiene que ser capaz de converger con el *fronthaul* para una implementación completa de una red *fiber-wireless* de 5G.

Capítulo 2. Redes 5G

5G comprende a la 5ta generación de redes de telefonía celular y hace referencia al conjunto de estándares y tecnologías aplicadas que hacen posible la evolución de las redes celulares con la introducción de nuevos servicios y aplicaciones, también introduce nuevos conceptos que sirven como referencia hacia una calidad en el servicio en las redes de telecomunicaciones.

En este capítulo se abarcan los conceptos básicos y el estado del arte de este trabajo, desde sus inicios hasta la época actual. Se describen las generaciones de las redes celulares, destacando sus modulaciones y la tecnología principal que utilizan. Se describen las características esperadas para 5G, así como los principales escenarios de uso. Se menciona la arquitectura en la que estarán basadas estas redes y sus distintas configuraciones. Finalmente se da una introducción teórica de la propuesta como solución a la red principal de transporte de las redes 5G, el *fronthaul*.

2.1 Antecedentes de las redes celulares y el *fronthaul*

La evolución de las redes celulares está marcada a través de generaciones, las cuales se definen por revoluciones o avances tecnológicos importantes en sus periodos. A continuación, se enumeran las características más sobresalientes de cada generación:

1. En la primera generación se introdujo el concepto de las células de telecomunicaciones, se modula en frecuencia modulada (FM, *Modulated Frequency*) y se utiliza el acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) para evitar interferencias [17].
2. En la segunda generación la digitalización del servicio es considerado una revolución tecnológica, ya que se modula en transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*) y en modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*), se utiliza el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) y/o el acceso múltiple por división de código (CDMA, *Code Division Multiple Access*) para evitar interferencias; esto permite la introducción del servicio de mensajes cortos (SMS, *Short Message Service*) [18].
3. La tercera generación se enfocó en la transmisión de datos y es considerada una evolución tecnológica porque se utiliza la modulación de amplitud en cuadratura 16 (16QAM, *16 Quadrature Amplitude Modulation*) para incrementar la tasa de transmisión; en esta generación se introduce el concepto de teléfonos inteligentes (*smartphones*) [19].
4. La cuarta generación se enfoca solamente en la transmisión de datos, puesto que es tratada a la voz como datos, ya que la red está basada en transmisiones de paquetes del protocolo de internet (IP, *Internet Protocol*). Esta generación es considerada revolucionaria por la utilización del acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). Se utiliza el concepto de MIMO en las antenas de las radio-bases para mejorar el alcance y/o aumentar las tasas de transmisión [20].

La tabla 1 [21] resume las generaciones con el rango del espectro, la nomenclatura de los sitios celulares, el funcionamiento del núcleo de la red y el principal tipo de tráfico que transportan. Con el paso del tiempo las tecnologías anteriores a 5G se dejarán de usar, por lo que la utilización del espectro pasará a reutilizarse en estas nuevas redes.

Anteriormente en el Sistema global para las comunicaciones móviles (*GSM, Global System for Mobile communications*) de 2G no existía el *fronthaul*, ya que los componentes que conforman a las radio-bases se encontraban en un mismo equipo compacto y la interconexión del equipo se hacía simplemente por la parte posterior del equipo (*backplane*), para portadoras de 200 kHz [22]. En la arquitectura D-RAN predominante en 3G, el *fronthaul* es básicamente una conexión de un cable, generalmente de cobre de unos cuantos metros, ya que los componentes que conforman a las radio-bases se encuentran en un mismo sitio, sólo que ahora modulares, esto dio paso a la introducción de los BBU y RRH. Posteriormente se introdujo la fibra óptica como principal medio para el *fronthaul*, debido a la llegada de protocolos como la Interfaz común de radio pública (CPRI, *Common Public Radio Interface*), la cual demandaba más ancho de banda que un cable coaxial pudiera proveer. En la evolución de 3G a 4G surge el concepto del *fronthaul* como una red de transporte, debido a la completa centralización de la red [23].

Tabla 1 Generaciones de telefonía celular [21].

	1G	2G	3G	4G	5G
NOMBRE		GSM/GPRS	UMTS/HSPA	LTE	NEW RADIO
ESPECTRO:	Banda baja: 900 MHz	Banda baja: 900 MHz	Banda baja: 900 MHz	Banda baja: 800 MHz	Banda baja: 700 MHz
		Banda media: 1.8 GHz	Banda media: 2.1 GHz	Banda media: 1.8 y 2.1 y 2.6 GHz	Banda media: 3.5 GHz
					mmWave: 26 GHz
ESTACIÓN BASE:		BTS	Nodo B	eNodo B	gNodo B
NÚCLEO DE RED:	CS	CS + PS	CS + PS	EPC	NGCN
	La arquitectura se basa en la conmutación de circuitos.	La arquitectura se basa en la conmutación de circuitos y paquetes.	La arquitectura se basa en la conmutación de circuitos y paquetes.	La arquitectura se basa en la conmutación de paquetes.	Next Generation Core Network basado en SDR y Cloud.
	Transporta voz	Transporta voz, SMS y datos	Transporta voz, SMS y datos	Transporta voz IP, SMS y datos	

2.2 ¿Qué es 5G?

La estandarización de 5G comenzó con la creación de las normas de telecomunicaciones móviles internacionales-2020 (IMT-2020, *International Mobile Telecommunications-2020*) en mayo de 2015, en donde se definieron las aplicaciones y las características puntuales de la tecnología 5G. IMT-2020 fue creado por el Sector de Radiocomunicaciones de la ITU (ITU-R) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) [24]. En un informe presentado por IMT-2020 se describen los requerimientos principales que deben de poseer las redes 5G. En la tabla 2 [25] se informan las características de una red 5G, así como sus principales escenarios de uso.

Tabla 2 Requerimientos de una red 5G impuesto por IMT-2020 [25].

Capacidad	Descripción	Requerimientos 5G	Escenario de uso
Velocidad máxima en DL	Tasa de transmisión de datos	20 Gb/s	eMBB
Velocidad máxima en UL		10 Gb/s	eMBB
Velocidad en UE en DL	Tasa de transmisión durante al menos el 95 % del tiempo en uso	100 Mb/s	eMBB
Velocidad en UE en UL		50 Mb/s	eMBB
Latencia	Tiempo de comunicación de E2E	4 ms	eMBB
		1 ms	URLLC
Movilidad	Velocidad máxima aplicando QoS	500 km/h	eMBB/URLLC
Densidad de conexiones	Número total de dispositivos por unidad de área	10 ⁶ /km ²	mMTC
Eficiencia de energía	Datos enviados y/o recibidos por unidad de consumo de energía	Igual que en 4G	eMBB
Capacidad de tráfico en área	Tráfico total en el área de cobertura	10 Mbps/m ²	eMBB
Eficiencia máxima del espectro de enlace descendente	Rendimiento por unidad de ancho de banda inalámbrico y por celda de red	30 b/s/Hz	eMBB

3GPP ha estado fuertemente relacionado con la estandarización de 5G, ya que ha publicado dos etapas que permitirán el despliegue ordenado de 5G y está próximo a publicar una tercera etapa. Estas publicaciones han sido muy bien recibidas, puesto que la ITU-R las ha aprobado como el estándar oficial de 5G [26]. Esto permitirá una convergencia a nivel mundial en estas redes. En la figura 4 [27] se ilustran las fechas con el número de *Release* correspondiente a 5G que 3GPP ha anunciado.

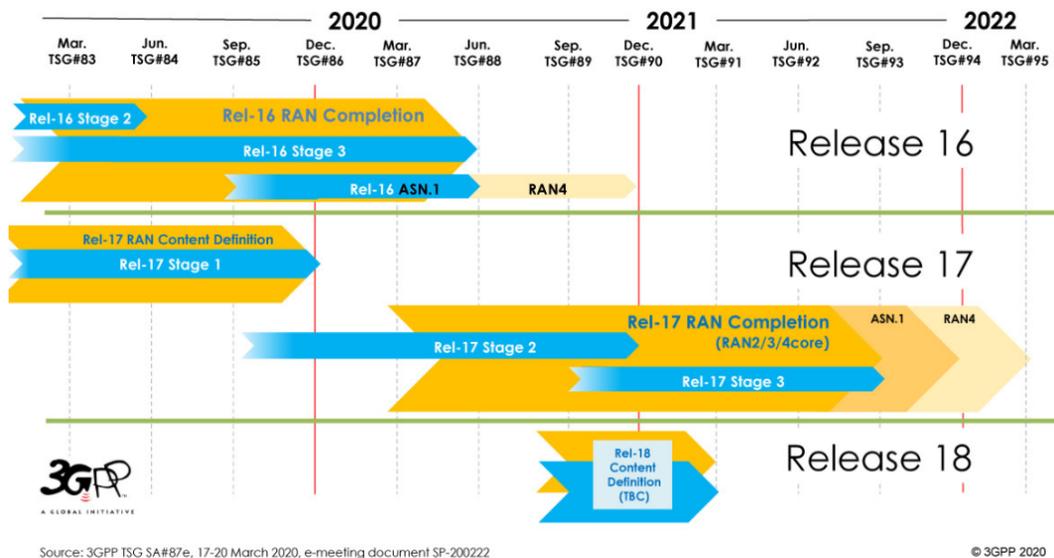


Figura 4 Calendario de 3GPP respecto a 5G [27].

La primera etapa corresponde al *Release 15*, el cual describe las especificaciones técnicas tempranas y la arquitectura a seguir, así como los conceptos que describen a 5G y la convergencia con las redes existentes de telefonía celular; es en este *Release 15* donde se define la arquitectura del nuevo radio (NR, *New Radio*).

Las arquitecturas NR descritas por 3GPP en el *Release 15* comprenden una red 5G basada en la infraestructura de las redes 4G NSA, que carece o será incapaz de ofrecer los nuevos servicios de 5G, pero que gozarán de las características de 5G, es decir, en ellas sólo los servicios de 4G son soportados, pero serán llevados hacia la baja latencia y a las altas tasas de datos. Por lo que, se advierte que la arquitectura NSA es un preámbulo hacia 5G. NSA también se denomina E-UTRA - NR de conexión dual (EN-DC, *E-UTRA - NR Dual Connectivity*). En la figura 5 [28] se especifican los componentes e interfaces que concibe a esta red; en ella se puede apreciar que la red aún tiene componentes de LTE como lo es la entidad de gestión de movilidad (MME, *Mobility Management Entity*) y la puerta de enlace de servicio (SGW, *Serving Gateway*) que ayudan al intercambio de tráfico de usuario y el tráfico de control entre el móvil y el núcleo de la red respectivamente [29]. En esta arquitectura la conectividad dual significa que es posible conectar el UE a dos tipos de nodos. En este caso, el Nodo B evolucionado (*eNodeB/eNB, evolved Node B*) es primario y el *eNodeB* de próxima generación (*en-gNodeB/en-gNB, next-generation eNodeB*) es el secundario, es decir, el nodo de red de radio 5G en-gNB solo se usa para funciones en el plano de usuario o de datos, mientras que el plano de control aún lo gestiona el eNB.

Esta arquitectura de red está pensada para utilizarse en lugares en donde el despliegue completo de 5G no sea lo suficientemente rentable y exista una red heredada de 4G, ya que se pueden escalar los servicios, dándole más tiempo de vida útil a la red.

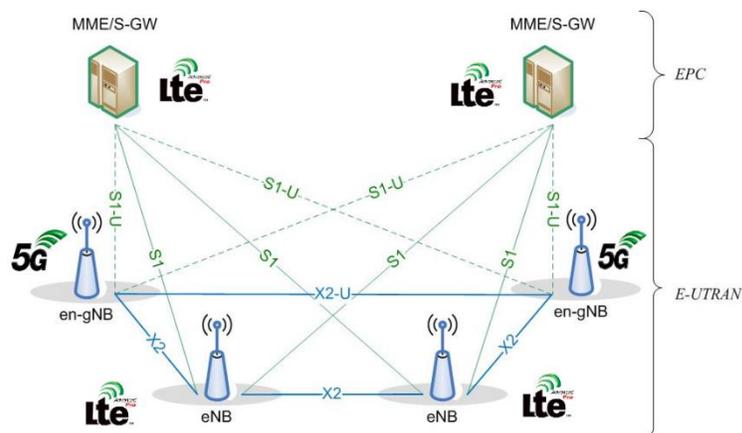


Figura 5 Arquitectura NSA [28].

La otra arquitectura propuesta por 3GPP es el desarrollo de 5G sobre una infraestructura específica para estas redes SA. En esta arquitectura se exploran nuevas interfaces y protocolos que definen a una red 5G completa, es decir, con todos los servicios y aplicaciones completos que 5G ofrece sin que exista alguna restricción. Estas aplicaciones se describen más adelante en el apartado: Principales escenarios de uso en 5G. En la figura 6 [28] se pueden notar las interfaces específicas para 5G, además de los componentes de función de gestión de la movilidad y acceso (AMF, *Access and Mobility Management Function*), la función de plano de usuario (UPF, *User Plane Function*) y las terminales gNodeB.

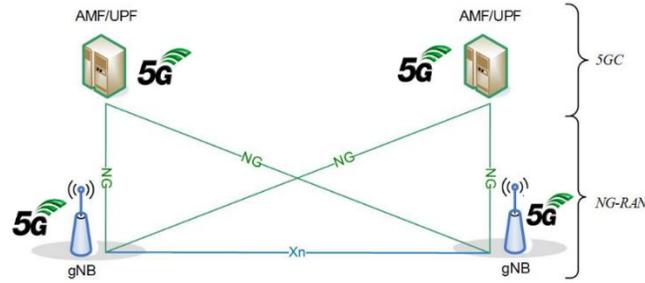


Figura 6 Arquitectura SA [28].

Una característica sobresaliente de 5G es un marco denominado “Arquitectura basada en servicios” (SBA, *Service-Based Architecture*), donde los elementos de la arquitectura se definen en términos de funciones de red (NF, *Network Functions*) en lugar de entidades de red “tradicionales”. Al implementar una red SBA, los servicios operan con granularidad más fina que en las redes heredadas, lo que permite que los servicios individuales se actualicen con un impacto mínimo en otros servicios, proporcionando beneficios operativos, como la reducción de los tiempos de prueba e integración, resultando en la reducción del tiempo de comercialización para la instalación de correcciones de errores y la implementación de nuevas funciones de red y aplicaciones para los ISP [30].

Con el accionamiento de SBA se introduce una nueva forma de operar de las redes de telecomunicaciones, que es la red en capas o rebanadas (NS, *Network Slicing*), la cual busca englobar a los dispositivos con tráfico con características similares, para asignarlos a una misma red lógica [31]. NS funciona a partir de instancias de NF, para que la red de manera lógica y agrupada brinde los recursos necesarios, por ejemplo: recursos informáticos, de almacenamiento y de red, es decir, un segmento de red desplegado [32]. Los segmentos de red pueden ofrecer el mismo servicio, pero para diferentes conjuntos de usuarios. La figura 7 [33] muestra un ejemplo de la implementación de un SBA sobre NS, ya que se dividen a los usuarios según los servicios, para después distribuir los recursos de la red con base en las necesidades del servicio.

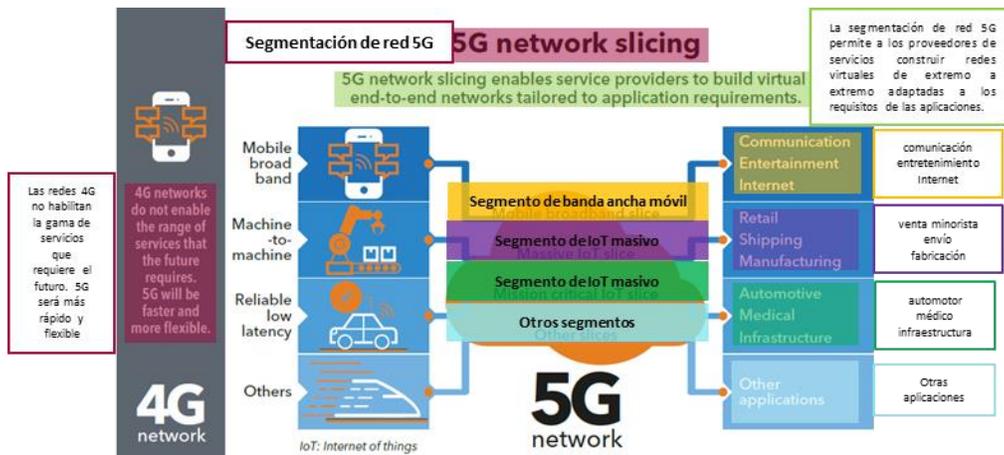


Figura 7 Diagrama de una red 5G con SBA implementando NS [33].

2.2.1 Principales escenarios de uso en 5G

Como se mencionó previamente, SBA es clave para la optimización de la red de acuerdo con los escenarios de uso que ofrece 5G. La ITU, organización que regula y estandariza las redes de telecomunicaciones a nivel mundial, ha definido a través de IMT-2020 tres escenarios principales que destacarán en las redes 5G: banda ancha móvil mejorada (eMBB, *enhanced mobile broadband*), comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC, *massive machine-type communications*) y comunicaciones ultra confiables de baja latencia (URLLC, *ultra-reliable low-latency communications*).

2.2.1.1 Banda ancha móvil mejorada (eMBB, *enhanced mobile broadband*)

eMBB soporta conexiones estables con velocidades de datos pico muy altas, así como velocidades moderadas para usuarios en el borde de las celdas con amplia cobertura. Este servicio es considerado una extensión de 4G, además de que es caracterizado por comprender a dispositivos activos por periodos prolongados de tiempo con una ocupación de grandes cargas útiles; sí bien estos dispositivos manejan grandes cantidades de información, también manejarán grandes cantidades de recursos, por lo que se ha planeado dejar una confiabilidad de un BER en el orden de 10^{-3} [34].

eMBB es equivalente a mayor capacidad en el acceso de banda ancha, ya que debe estar disponible en áreas densamente pobladas, tanto en interiores como en exteriores, como centros urbanos, edificios de oficinas o lugares públicos como estadios o centros de conferencias, así mismo el acceso de banda ancha debe estar disponible en todas partes para brindar una experiencia de usuario consistente, que permitirán mayor movilidad de los usuarios, es decir, el servicio estará en vehículos en movimiento, incluidos automóviles, autobuses, trenes y aviones [35].

eMBB apunta a velocidades de datos pico de hasta 20 gigabits por segundo (Gbps, *gigabits per second*) en sentido descendente DL y 10 Gbps en sentido ascendente UL para admitir nuevas aplicaciones, como la transmisión de alta velocidad de películas 4K u 8K de ultra alta definición (UHD, *ultra high-definition*) [36].

2.2.1.2 Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC, *massive machine-type communications*)

mMTC admite una gran cantidad de dispositivos de Internet de las cosas (IoT, *Internet of things*), que solo están activos esporádicamente y envían pequeñas cargas útiles de datos, además de que normalmente usan tasas de transmisiones fijas. Este escenario mantiene conectados una gran cantidad de dispositivos mMTC a punto de acceso determinado, pero en un momento dado solo un subconjunto de ellos que es aleatorio se activa e intenta enviar sus datos. La gran cantidad de dispositivos mMTC potencialmente activos hace que no sea factible asignar recursos eficientemente a dispositivos mMTC individuales, por lo que, es necesario proporcionar recursos que se puedan compartir mediante acceso aleatorio. El BER objetivo que se ha marcado es típicamente bajo, en el orden de 10^{-1} [34]. El principal requisito de rendimiento para un servicio de red mMTC es admitir una alta densidad de conexión, de hasta 1 millón de dispositivos por km cuadrado, que es 10 veces la cantidad máxima posible con 4G LTE [37].

Un ejemplo atractivo de mMTC es la base de una ciudad inteligente (*Smart-city*), la cual tiene sensores que recopilan información en calles, edificios, dispositivos públicos y personales; todos estos dispositivos se encuentran interconectados y envían sus reportes entre ellos, puesto que

analizan y retroalimentan a la infraestructura para afectar cambios en la operación de cada uno de ellos. Algunos ejemplos en concreto son: gestión de residuos, gestión de tráfico y estacionamiento, sensores ambientales para el control de la calidad del aire y del agua, así como vallas publicitarias electrónicas y estaciones de carga para vehículos eléctricos [38].

2.2.1.3 Comunicaciones ultra confiables de baja latencia (URLLC, *ultra-reliable low-latency communications*)

URLLC admite transmisiones de baja latencia de pequeñas cargas útiles con muy alta confiabilidad desde un conjunto limitado de terminales, que están activos de acuerdo con patrones típicamente especificados por eventos externos [34]. Las cualidades de estos escenarios residen en el tráfico intermitente y previsto con un acceso de los dispositivos mucho más pequeño que en mMTC, es decir, el tráfico de los dispositivos ya no es aleatorio, sino que puede ser calculado; es por lo que una transmisión URLLC puede y debe localizarse a tiempo. Esto se logra utilizando múltiples recursos espaciales o de frecuencia. La tasa de transmisión de URLLC es relativamente baja y el requisito principal es garantizar un alto nivel de confiabilidad, con un BER generalmente inferior a 10^{-5} , a pesar de las pequeñas longitudes de bloque [39].

Algunos ejemplos en particular de URLLC son: el acceso remoto a desastres naturales, atención médica, comunicaciones militares, comunicaciones industriales y aplicaciones automotrices, todas las cuales requieren alta precisión. Es por lo que, en estos escenarios, la latencia es un requisito muy estricto, ya que en comunicaciones de extremo a extremo (E2E, *end-to-end*) estas aplicaciones exigen un retardo de no debe de sobrepasar 1 ms [40].

2.3 Red de acceso de radio centralizada (C-RAN)

Las redes 4G marcaron un hito en el incremento tanto en el número de usuarios, como en las tasas de transmisión y en la utilización del espectro. Es así como los proveedores de servicios de internet (ISP, *Internet Service Provider*) necesitan una densificación de estaciones RAN para cubrir con las demandas de 4G, por lo tanto, los gastos en CAPEX y OPEX que tienen que solventar los ISP no resultan rentables para el despliegue y el funcionamiento de la red.

C-RAN es una arquitectura diseñada y desplegada principalmente para redes de acceso 4G LTE, aunque en ella pueden coexistir tecnologías de 2G y 3G. C-RAN nace a partir de las problemáticas de las RAN tradicionales, que es el costo excesivo en el despliegue de las estaciones base (BTS/BS, *base station*) y la baja tasa de utilización de estas.

C-RAN es una arquitectura que optimiza los recursos de red para aminorar el OPEX y el CAPEX, esto es gracias a su bajo consumo de energía, su alta eficiencia espectral y su plataforma abierta, que permite compartir recursos como una verdadera red, además de que admite diferentes estándares y protocolos que permiten la convergencia con nuevas tecnologías, es decir, le permite una evolución fluida, lo que se traduce como una inversión a futuro.

2.3.1 Arquitectura C-RAN

La idea primordial de C-RAN es la disgregación de los dos elementos más sobresalientes de una radio-base, que son: el BBU y el RRH; para ubicar puntos lejanos de acceso inalámbrico de forma estructurada, que corresponden a las RRH y compartir recursos de procesamiento y energía en un sitio común, es decir, la centralización de las BBU. Esto es ventajoso, porque comparándola con la RAN tradicional, la BS sería el RRH y viéndolo desde el punto económico, el despliegue se limitaría

en demasía, porque la inversión significativa sólo sería en la parte del BBU y no en cada RRH, como en las BS tradicionales. Además, los ISP pueden implementar y actualizar rápidamente su red, ya que solo se necesitan instalar nuevos RRH y conectarlos a la centralización de BBU para expandir la cobertura de la red. También si la carga de la red aumenta, el operador solo necesita actualizar el *hardware* (HW) del grupo de BBU para adaptarse a la mayor capacidad de procesamiento.

En la figura 8 [41] se pueden apreciar los 3 principales elementos de la arquitectura C-RAN, que son: las BBU, los RRH y la red de transporte óptico. Es de suma importancia destacar que la arquitectura C-RAN es modular y configurable. Esto es gracias a que las funciones de los BBU y los RRH pueden compartirse entre sí, es decir, parte del procesamiento de banda base se puede mover a la RRH para reducir la cantidad de datos transmitidos a través de la red de transporte física. Por ejemplo, un prefijo cíclico (CP) se puede mover de la BBU a la RRH, reduciendo así la velocidad de datos en la red de transporte física. De la misma forma, funcionalidades del RRH pueden implementarse en la BBU. Por ejemplo, se pueden integrar los convertidores analógico-digital (DAC, *digital-analog converter*) y los convertidores digital-analógico (ADC, *analog-digital converter*) para que simplemente el RRH module y envíe la señal RF.

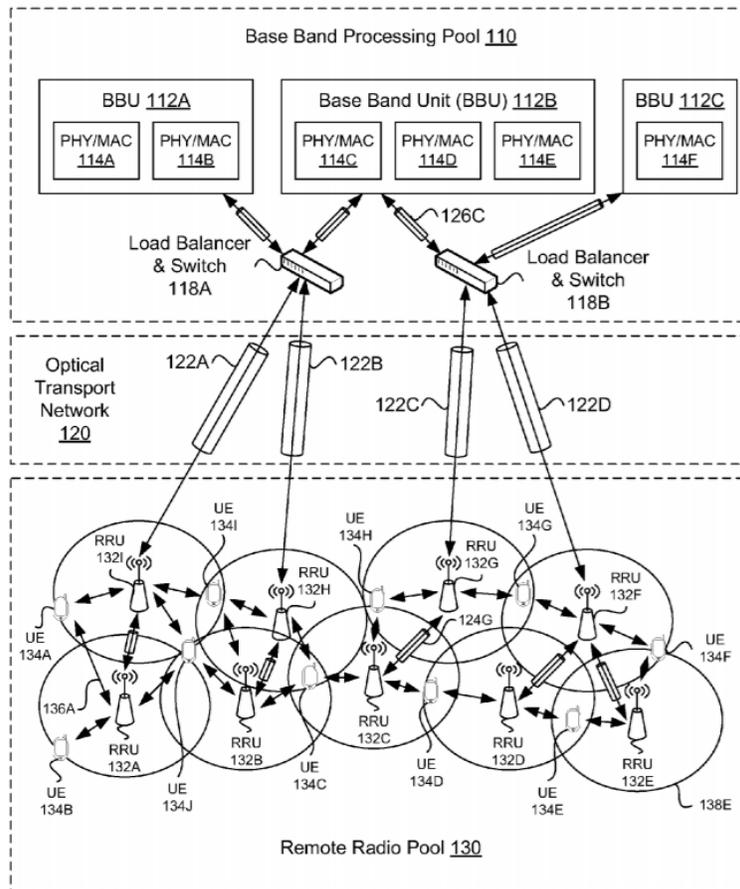


Figura 8 Vista general de una arquitectura C-RAN [41].

2.3.1.1 Cabecera de radio remota (RRH, *Radio Remote Header*)

Los RRH se encuentran ubicados en el punto de acceso de la red, principalmente los RRH hacen los procesos de conversión de las señales electroópticas hacia señales RF y viceversa que reciben y/o emiten las radio-bases, estas señales son digitales. Los RRH controlan la potencia de la señal radiada para modificar el área de cobertura de una antena, es decir, el *beamforming*; también hacen el acondicionamiento para señales UP y DL, además de que aquí se puede llevar a cabo la implementación de MIMO.

En la figura 9 [42] se muestra un diagrama de bloques de un RRH, donde se aprecian los componentes internos que le permiten funcionar adecuadamente. En la parte derecha del diagrama, tenemos las antenas, las cuales están conectadas a un duplexor, el cual permite separar las señales de transmisión (Tx) y recepción (Rx), es decir, permite compartir la antena tanto para señales transmitidas como para señales recibidas. En la parte de Rx, al ser señales emitidas por UE que normalmente manejan señales de potencia bajas, es necesario tener amplificadores de bajo ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*) para normalizar la señal a una potencia adecuada con un SNR aceptable, esto es también porque son señales atenuadas, debido a que ya se han propagado por el medio. Por otro lado, en Tx es necesario amplificar la señal RF para lograr una buena cobertura hacia los UE, por lo que está compuesto de un modulador controlado por un oscilador local, que se encuentra conectado a un amplificador de potencia (PA, *Power Amplifier*), el cual normalmente posee un filtro para la transmisión en frecuencias centradas.

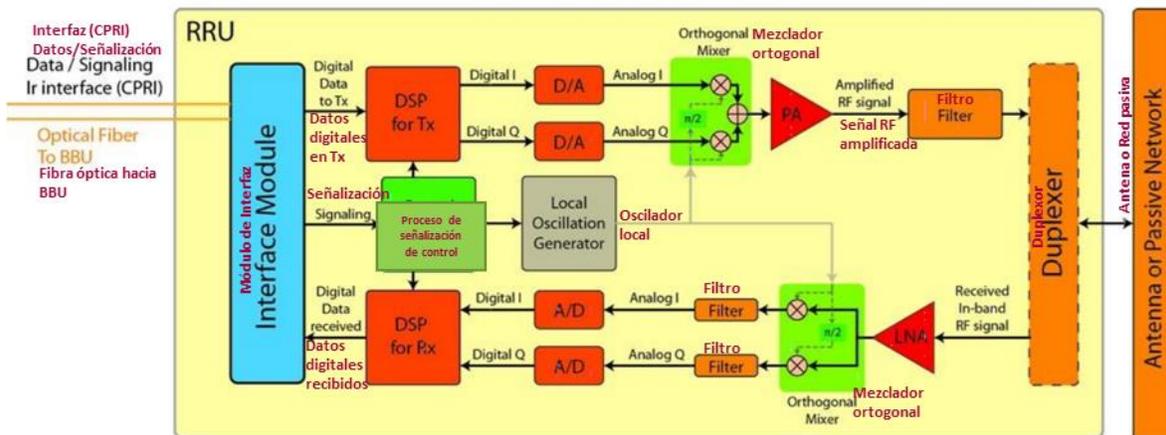


Figura 9 Diagrama de bloques de un RRH [42].

Las señales que se envían y se reciben en redes con esta arquitectura son señales en fase y cuadratura (IQ, *In-phase - Quadrature*), son llamadas así, porque modulan una señal, pero duplicada y desfasada 90° de la original, como se muestra en la figura 10 [43]. La utilización de señales IQ es porque con una simple modulación de amplitud de I y Q, es posible crear una modulación compleja en la suma resultante; de la misma forma, todo esto funciona para la demodulación. La modulación IQ es muy utilizada en SDR, porque estas señales IQ pueden generarse y analizarse fácilmente por *software* (SW), además que su implementación en conjunto crea un sistema de bajo costo [44].

La RRH también cuenta con módulos DAC y ADC; los cuales se emplean para la recepción y el envío hacia los BBU sobre el *fronthaul* de fibra óptica.

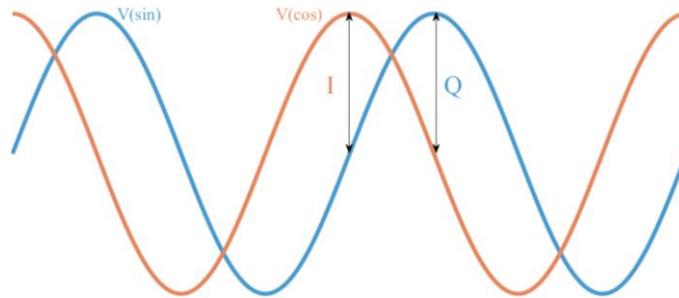


Figura 10 Fase de las señales IQ [43].

Las conexiones de un RRH se muestran en la figura 11 [45], en el cual destacan la interfaz hacia la matriz de antenas, comúnmente de cable coaxial y la interfaz de fibra óptica hacia las BBU. Normalmente las RRH cuentan con una interfaz de mantenimiento local (LMT, *Local Maintenance Terminal*) a través de un puerto Ethernet que utiliza TCP / IP y que admite líneas de comando TELNET.

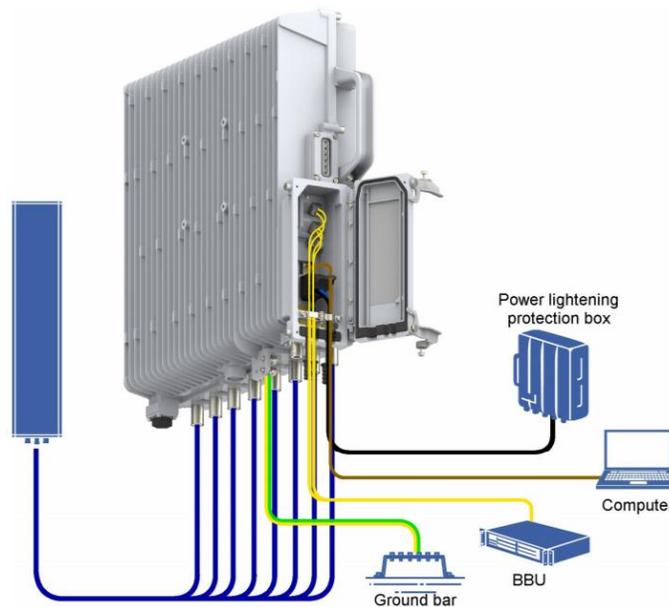


Figura 11 Conexiones externas al RRH hacia la BBU, su gestor y alimentación [45].

Por otro lado, el SW de las RRH incluye la gestión de canales RF, así como funciones de operación, administración y mantenimiento (OAM, *Operation, Administration and Maintenance*) proporcionando: gestión de configuración, gestión de versiones, estadísticas de rendimiento, gestión de pruebas, gestión de seguridad, prueba de diagnóstico, control del sistema y procesamiento de comunicaciones. Generalmente utilizan una arquitectura con plataforma de radio definida por software (SDR, *Software Defined Radio*), lo que permite proporcionar funciones como: gestión de programación, gestión de memoria y gestión de temporizador.

Entre las características que se pueden considerar para determinar la calidad que un RRH posee, destacan: la conservación de energía, utilización de multi-portadoras con *beamforming* y MIMO, potencia de salida alta en las antenas y una interfaz óptica de alta velocidad para la transmisión en el *fronthaul*.

2.3.1.2 Unidad de banda base (BBU, *Baseband Unit*)

Banda base se refiere a la señal de información en su frecuencia original, es decir, antes de modularse. En este caso, la señal banda base son las señales IQ. La banda base también se refiere a una señal sin multiplexar, es decir, la banda base puede ser un canal único sin multiplexar en un sistema de multiplexado como WDM. En este trabajo de investigación, los canales WDM independientes son considerados banda base; aunque principalmente se tratará como banda base a las señales IQ.

De la definición anterior, se puede deducir que una BBU es una unidad que procesa la banda base en sistemas de telecomunicaciones y puntualmente en esta arquitectura a las señales IQ, que son provistas por y para los RRH.

La BBU gestiona la conexión de la red de telecomunicaciones, administra el sistema y los protocolos LTE, proporciona la interfaz física entre la estación base y la red central, también proporciona la interfaz hacia el RRH y el reloj para el sincronismo del sistema. Las BBU procesan y transfieren los paquetes de datos de enlace UL y DL, además de que realizan sincronizaciones con el sistema de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*) [46]. En resumen, una BBU actúa como el núcleo de una estación base.

En la figura 12 [46] se muestra un diagrama de bloques con los módulos principales que componen a una BBU.

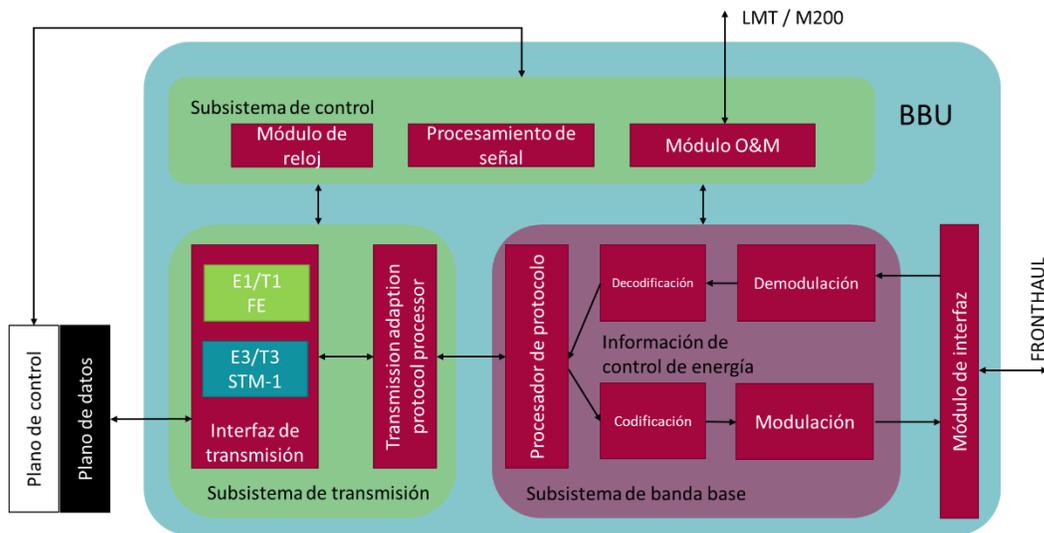


Figura 12 Componentes internos de una BBU [46].

2.3.1.2.1 Módulos BBU

La BBU se caracteriza por ser de diseño modular, tamaño pequeño, alta integración, bajo consumo de energía y de fácil implementación. Sus funciones están divididas en 4 módulos, los cuales son: el módulo de transporte, el módulo de banda base, el módulo de control y el módulo de energía.

El módulo de transporte es el encargado de proveer las interfaces físicas para la comunicación al sistema de operación y soporte (OSS, *Operation & Support System*), al LMT y a los puertos que interconectan radio-bases, así como a los recursos de redes heredadas.

El módulo de banda base procesa datos de la banda base de UP y DL, aquí se llevan a cabo los procesos de codificación y decodificación; después de codificar las señales, se mapean hacia el canal de transporte, para determinar el canal y se forman las tramas (*frame*). Además de que dependiendo de la opción de CPRI, en este módulo también se puede llevar el proceso de modulación y demodulación, también admite la interfaz CPRI.

El módulo de control proporciona funciones de operación y manteniendo (OM, *Operation and Maintenance*) como: administración de configuración, administración de equipos, monitoreo de desempeño, procesamiento de señalización y conmutación entre “activo” y “en espera”. Proporciona el reloj de referencia que permite el ajuste de fase y frecuencia. La BBU logra esto a través de la unidad de procesamiento y transmisión de LTE

El módulo de energía está compuesto por la unidad de interfaz universal de energía y entorno (UPEU, *Universal Power and Environment Interface Unit*) que convierte la energía de alimentación principal de la BBU, hacia una alimentación aceptable para las tarjetas que se montan en ella. Normalmente de -48 V o +24 V CC a +12 V CC. En este módulo también se encuentra la unidad de ventilador (*FAN*), en donde se controla la velocidad del ventilador, se monitorea la temperatura de la unidad FAN y se disipa el calor en la BBU.

2.3.2 Redes definidas por software en C-RAN

C-RAN es una arquitectura diseñada para tener grandes prestaciones con una alta rentabilidad, por lo que se le atribuye que sea flexible, modular, altamente integrable, escalable y que sea adaptable a nuevas tecnologías. La estructura desacoplada de SDN sirve como una solución para administrar la red con más flexibilidad y facilidad. La utilización de SDN con una arquitectura centralizada como lo es C-RAN proporciona gran control en la red que ayuda a lograr una utilización eficiente de los recursos y un alto rendimiento. SDN es posible gracias a la existencia cada vez más generalizada de dispositivos programables e inteligentes en la red.

SDN es un concepto que busca disociar las funciones de red del HW y convertirlo en una tarea netamente del SW, obteniendo una red virtualizada, de manera que un mismo equipo pueda ejecutar tareas diversas dependiendo de los requisitos de la red y del SW que tenga instalado. SDN hace a la red muy flexible, ya que al tener las funciones de red completamente en el SW es posible compartir los recursos empaquetando estas funciones en un HW o varios HW y desde un controlador decidir el momento en el que se ejecutarán las tareas; de modo que podemos tener la mayor parte del tiempo a los elementos de red funcionando, incluso si en la radio-base no hay tráfico local, puesto que estos recursos se podrían compartir con radio-bases remotas que necesiten mayor procesamiento, es decir, SDN tiene la capacidad de adaptar sus parámetros de red sobre la marcha en función de su entorno operativo, volviéndose una red dinámica [47].

El desarrollo de SDN comenzó con las redes activas que introdujeron la capacidad de programar algunos elementos de red a través de interfaces y con la separación del plano de datos y el plano de control de las redes telefónicas; aunque la introducción del protocolo OpenFlow en 2008 hizo un auge para SDN [48]. OpenFlow es un controlador SDN, que básicamente es la aplicación que actúa como un punto de control estratégico en SDN. Actualmente existen diversos protocolos en SDN y pueden influir en la arquitectura general de la red. Por ejemplo, mientras OpenFlow intenta centralizar completamente las decisiones de reenvío de paquetes, otro protocolo como la interfaz al sistema de enrutamiento (*i2rs, Interface to the Routing System*) divide la toma de decisiones

aprovechando los protocolos de enrutamiento tradicionales como: abrir primero el camino más corto (OSFP, *Open Shortest Path First*) o el protocolo de puerta de enlace de frontera (BGP, *Border Gateway Protocol*), para ejecutar el enrutamiento distribuido y permitir que las aplicaciones modifiquen las decisiones de enrutamiento.

En la figura 13 [49] se puede apreciar un diagrama de bloques de la arquitectura SDN, la cual consta de tres capas diferentes: capa de aplicación (*application plane*), capa de control (*control plane*) y capa de infraestructura o de datos (*data plane*). Estas capas se comunican a través de dos interfaces de programación de aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) diferentes; la primera de ellas es la API norte (*Northbound API*) que interconecta a la capa de aplicación y a la capa de control, mientras que, la segunda es la API sur (*Southbound API*) que interconecta a la capa de control con la capa de datos.

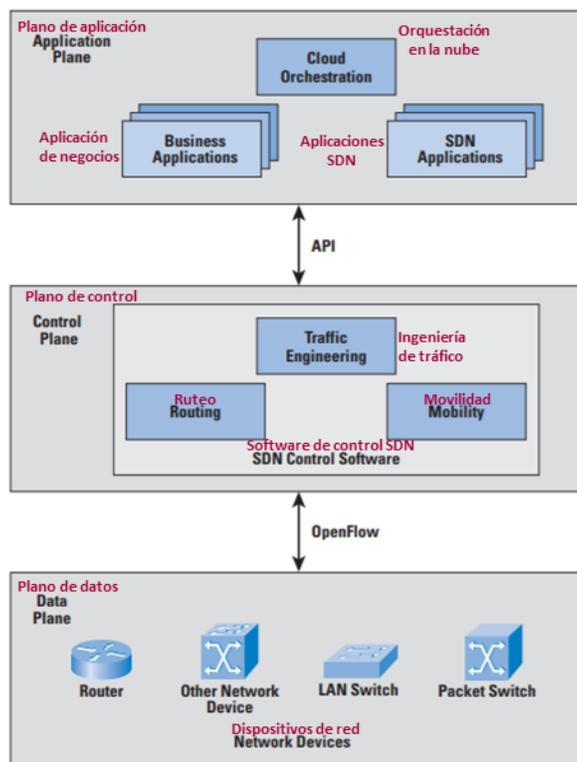


Figura 13 Diagrama de bloques de la arquitectura SDN [49].

La capa de infraestructura o de datos está conformada por los dispositivos de red como enrutadores (*routers*), conmutadores (*switches*) y puntos de acceso (AP, *Access Point*). En este plano fluye la carga útil de datos (*payload*) y su función principal es reenviar los paquetes de acuerdo con las reglas y/o políticas asignadas. Los elementos de red que conforman esta capa pueden ser tanto físicos como virtuales y coexistir entre ellos.

La capa de control consta de uno o más servidores que en conjunto fungen como un controlador SDN. Esta es la capa que actúa como mediador entre la capa de datos y la capa de aplicación. El controlador central es responsable de gestionar todo el flujo de tráfico y únicamente toma decisiones sobre enrutamiento (*routing*), reenvío de flujo, caída de paquetes a través de la programación declaración de políticas y comprobaciones de seguridad [49].

La capa de aplicación toma un rol muy importante en SDN, puesto que es la responsable de introducir las aplicaciones comerciales hacia la red, es así, que se encarga de la seguridad y la implementación del cortafuegos (*firewall*); esta capa al ser el contacto directo con los servicios que ofrecen los ISP mantiene sesiones seguras hacia las aplicaciones comúnmente alojadas en servidores de la nube (*cloud computing*) que se encuentran estratégicamente cercanos a los usuarios para disminuir la complejidad del transporte y para cumplir requisitos como latencia o cuellos de botella en tráfico masivo. Las aplicaciones y los servicios que se ejecutan en la parte superior de las redes 5G deberán tener en cuenta los recursos y la red para aprovechar al máximo la capacidad de programación de la red subyacente.

La API norte proporciona una interfaz de comunicación entre el ISP y el controlador SDN; esta comunicación la da el administrador de red a través de lenguajes de programación como: c, c++, Python, etc. Esta interfaz se programa a partir de las aplicaciones que la red necesite, por lo que la red se torna personalizada y por ende se propicia la optimización de la red. La función básica de la API norte incluye la gestión automática y el intercambio de datos entre sistemas. La API sur es la que inició el auge de la implementación de SDN, aquí se proporcionan los accesos de los nodos terminales de la red hacia el controlador SDN. Comúnmente se utiliza OpenFlow como protocolo intermediario, aunque como se mencionó anteriormente existen muchos más. La API sur sirve como herramienta del administrador de red para descubrir y monitorear la topología completa, que a su vez le permite definir el flujo de la red [50].

2.3.3 Topologías C-RAN

Con los beneficios que ofrece una red centralizada y con la combinación de SDN en la misma, C-RAN abre nuevas topologías que prometen crecer la eficiencia de la red. Esto está directamente relacionado con el posicionamiento de las BBU y de la manera que se interconectan en la red; ya que C-RAN cuenta con las topologías tradicionales que todas las redes de telecomunicaciones cuentan, las cuales son: en cascada, en anillo y en árbol. Sin embargo, C-RAN junto con SDN ofrece: hotel de BBU (*BBU hotel*), grupo de BBU (*BBU pool*) y BBU en la nube (*BBU Cloud*); las cuales son variantes de cooperación entre las BBU y las RRH. En la figura 14 [51] se muestra un diagrama de las diferentes formas de interconexión de las BBU y las RRH, en el orden previamente mencionado, partiendo de izquierda a derecha.

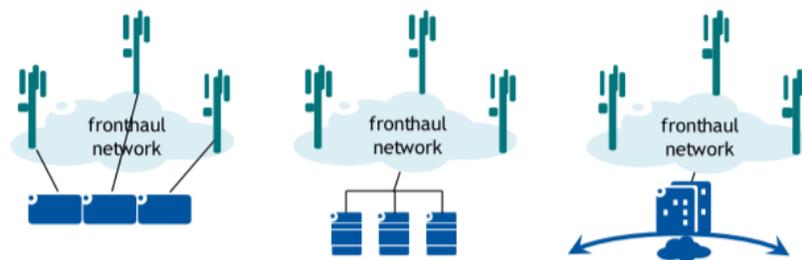


Figura 14 Interconexión de las BBU y las RRH utilizando diferentes topologías [51].

2.3.3.1 BBU Hotel

Esta es considerada la forma tradicional de interconexión, ya que se asume como una conexión punto a punto (*P2P, Point-to-Point*), es decir, para cada BBU le corresponde una RRH y viceversa. En este tipo de interconexión los recursos de las BBU están estrictamente reservados para una RRH, por lo que un BBU Hotel solamente se limita a distribuir las funciones de red entre un par de

dispositivos, es decir, una BBU con una RRH. Un BBU Hotel es considerado un preámbulo hacia una red C-RAN completamente flexible y centralizada, ya que BBU Hotel se limita únicamente al posicionamiento físico de los equipos, sin algún tipo de compartimiento de recursos entre más dispositivos de la red. En esta configuración se comparte el medio para el envío de información, pero no recursos internos de su electrónica interna en los dispositivos de red.

2.3.3.2 BBU pool

Una de las variantes más llamativas para la implementación temprana de las C-RAN es el BBU pool. Esta configuración comparte recursos entre todos los dispositivos de red centralizados, brindando una red altamente flexible. A diferencia del BBU Hotel, el BBU pool no es considerada una red P2P, sino una red punto a multipunto (P2MP, *Point-to-MultiPoint*), ya que el sitio de las BBU se considera un solo punto, tanto físico como lógico. La característica más sobresaliente de esta nueva topología es que convierte a la C-RAN en una red dinámica y en una red más confiable, donde los recursos se optimizarán todo el tiempo. En esta configuración las BBU están interconectadas entre sí, formando un clúster de BBU cooperante que brinda recursos a un grupo de RRH. Para lograr esta topología se necesitan de nuevos protocolos y algoritmos que se encuentran en vías de desarrollo.

2.3.3.3 BBU Cloud

La última opción propuesta para C-RAN es el arreglo de BBU Cloud, la cual promete funciones de procesamiento de las BBU en servidores centralizados, que además puedan compartir sus recursos de manera flexible en diferentes ubicaciones físicas de BBU, es decir, su funcionamiento implica una centralización más completa que respalde el funcionamiento de las BBU más cercanas al acceso de las RRH. Este concepto está enfocado a crear un núcleo de procesamiento, el cual pueda compartir recursos como si fuera una topología *full-mesh*. Esta configuración es la meta final que actualmente se le ha impuesto a C-RAN, ya que esta configuración es equivalente a crear una capa superior de procesamiento, la cual compartirá recursos con los BBU pool ya definidos para un grupo en específico de RRH. Esta configuración apunta hacia dejar libre de procesamiento a todos los RRH y únicamente dejar la electrónica de RF, lo cual en general significa mayor reducción de OPEX y CAPEX, además de que una vez definida esta red, será mucho más escalable y rentable que cualquier otra configuración previamente descrita [51].

2.4 Estado del arte del fronthaul

A partir de la introducción de CPRI en el mercado para el control de interfaz óptica en el *fronthaul* en redes 4G, se definieron 2 vertientes principales en el *fronthaul*, la primera es el *fronthaul* basado en tecnología digital y la segunda es el *fronthaul* basado en tecnología analógica; la primera recibe el nombre de radio digital sobre fibra (D-RoF, Digital Radio over Fiber), mientras que la segunda es denominada radio analógico sobre fibra (A-RoF, Analog radio over Fiber). El principio básico de estas dos variantes es transportar a través de los enlaces de fibra de *fronthaul* la señal de radio “nativa”. La diferencia de D-RoF sobre A-RoF es que se utiliza un enfoque digitalizado de la versión de banda base de la señal, en señales digitales IQ como se muestra en la figura 15 [52].

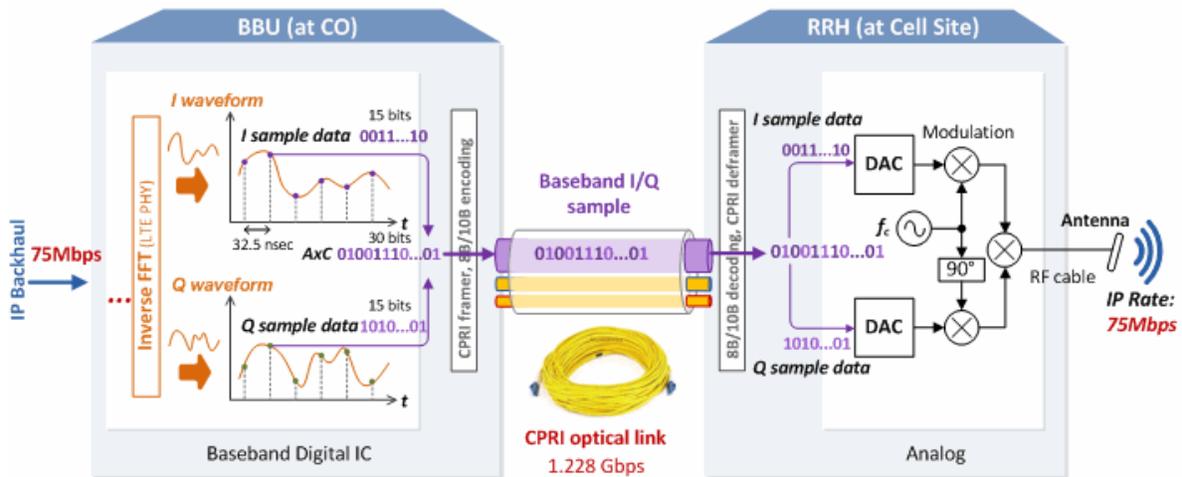


Figura 15 Fronthaul basado en D-RoF [52].

El apogeo y el despliegue de las redes 4G ha marcado como tendencia D-RoF, dejando de un lado a A-RoF, por lo que se puede decir que 4G en su mayoría, sino es que totalmente está basado en D-RoF. La problemática entonces que surge con D-RoF o el reciente interés por A-RoF es que la implementación del esquema actual de D-RoF es insuficiente para atender los requerimientos planteados para las redes 5G. Esto es debido a que la digitalización de las señales conlleva un uso demasiado ineficiente del ancho de banda, como un ejemplo más práctico para describir este problema tenemos que: en 4G normalmente se tienen anchos de banda de 20 MHz en cada canal inalámbrico, mientras que la digitalización de las señales se realiza a 30.72 M-muestras/segundo a una resolución de 16 bits. Estos valores hacen que nuestro canal inalámbrico le exija al *fronthaul* entregar tasas de 983 Mb/s, además al agregar las cabeceras de CPRI para el control y la señalización, la tasa de bits bruta a transportar en el *fronthaul* es de 1.228 Gb/s por cada canal inalámbrico de 20 MHz, que al cabo de cuentas, el canal inalámbrico entrega tasas inferiores a 100 Mb/s. Por lo tanto, para poder utilizar el esquema actual de la digitalización de manera funcional, tenemos que por lo menos incrementar 10 veces la tasa de transmisión en *fronthaul* por cada canal inalámbrico de 20 MHz que tengamos en el sistema [53]. Esto evidentemente es un problema, ya que para 5G se espera la utilización de MIMO masivo y la utilización de ondas milimétricas (*mmWave*), que en última instancia significa la densificación de canales inalámbricos y la utilización de anchos de banda considerablemente superiores, de mínimo 100 MHz, hasta un 1GHz o más [54]. En la figura 16 [55] se puede apreciar los dos espectros principales para 5G, el denominado sub-6 GHz y el espectro mmWave.



Figura 16 Espectro de ondas milimétricas propuesto para 5G [55].

El problema con el *fronthaul* es que ya sea con A-RoF o D-RoF existen complicaciones, ya que con A-RoF se puede lograr una alta eficiencia espectral, pero es susceptible al ruido y a las no linealidades propias del medio óptico. Por otro lado, D-RoF puede lograr una alta fidelidad de la señal mediante el uso de bits de cuantificación alta, pero tiene una eficiencia espectral baja [56].

2.4.1 Radio digital sobre fibra (D-RoF, Digital Radio over Fiber)

Como propuesta de la optimización del D-RoF, surge CPRI mejorado (eCPRI, *enhanced CPRI*), el cual es la división funcional de los elementos del BBU, por lo que ahora se definen 3 componentes principales en la arquitectura celular de telecomunicaciones de 5G, que son: la unidad de radio (RU, *Radio Unit*), la unidad central (CU, *Central Unit*) y la unidad distribuida (DU, *Distributed Unit*), para lo cual tenemos que el RU es el equivalente al RRH, mientras que el conjunto del CU y DU es el equivalente al BBU. En la figura 17.a [57] se puede apreciar la transformación de CPRI hacia eCPRI, mientras que en la figura 17.b [57] se ve el diagrama general de una arquitectura con eCPRI.

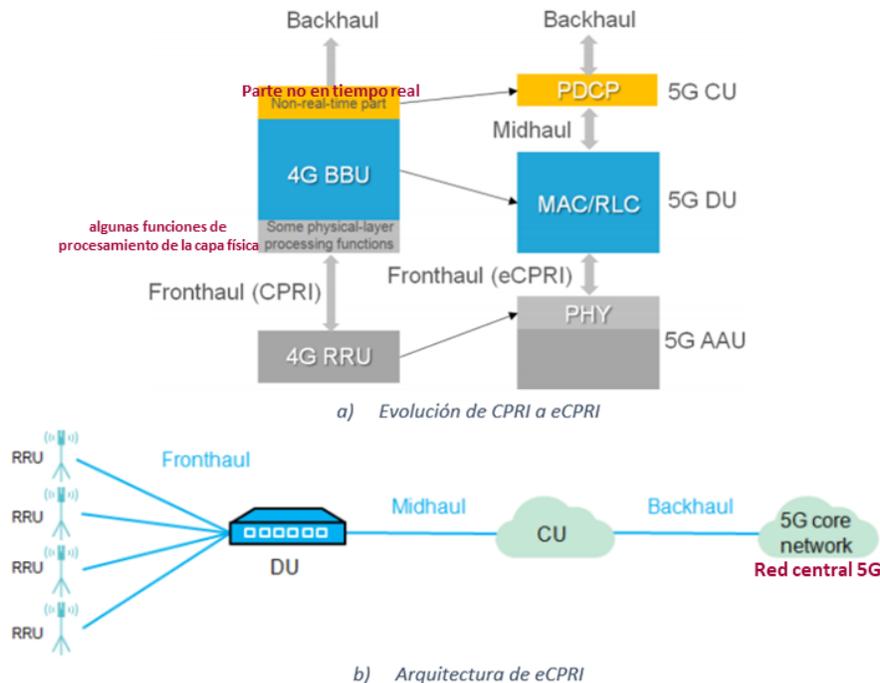


Figura 17 Diagramas de arquitectura de eCPRI [57].

eCPRI admite el protocolo de ethernet y descompone la pila de protocolos de banda base en las siguientes capas: control de recursos de radio (RRC, *Radio Resource Control*), protocolo de convergencia de paquetes de datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*), control de enlace de

radio (RLC, *Radio Link Control*), control de acceso al medio (MAC, *Medium Access Control*) y capa física (PHY, *physical*) como se muestra en la figura 18 [58]; todo esto es utilizando la terminología de acceso de radio terrestre universal evolucionado (E-UTRA, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*) [58]. El gran beneficio que brinda eCPRI es que, cuanto mayor sea la división, menor será la tasa de bits que se transportará, esto quiere decir que mientras menos funciones realice el RRH, menores tasas de transmisión se le exigirán al *fronthaul*.

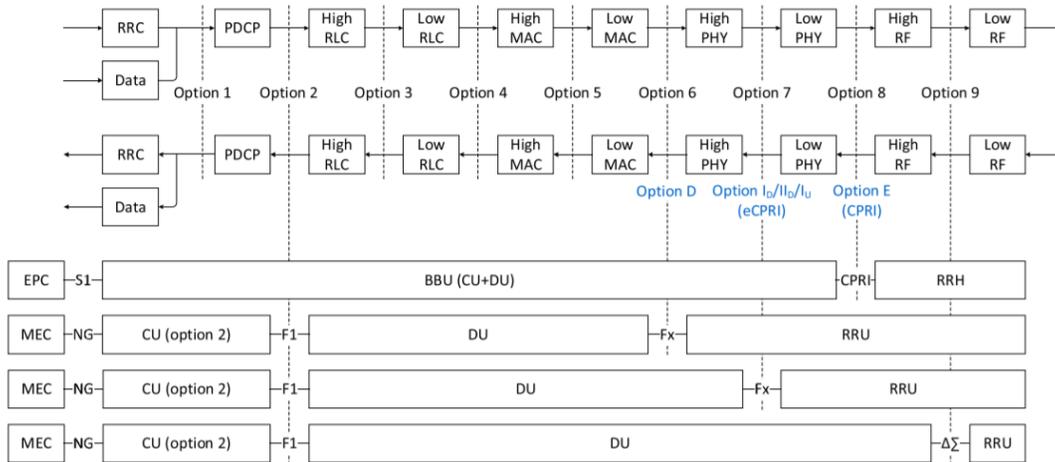


Figura 18 División funcional de eCPRI [58].

La separación de los BBU en unidades modulares da lugar a una nueva red de fibra óptica, denominada *fronthaul* II o en ocasiones *midhaul*. Pero esta disgregación del BBU no es suficiente para los estándares planteados en 5G; por lo que se necesitan propuestas en conjunto con eCPRI. Una de ellas es la resolución de cuantificación adaptable, en la que se aplica una resolución completa durante el período de carga baja, mientras que, para el caso de carga alta, se realiza una resolución estricta eliminando los bits de cuantificación menos significativos para aumentar la capacidad del enlace [53].

Una ventaja de eCPRI es la integración, puesto que el desarrollo de eCPRI funciona mediante el principio de las redes definidas por *software* (SDN, *Software-defined networking*), el cual es un enfoque de la red que permite controlarse de manera inteligente y centralizada, utilizando aplicaciones de *software*. Como se puede apreciar en [59], donde se implementa un módulo de procesamiento eCPRI en una matriz de puertas lógicas programable en campo (FPGA, *Field-Programmable Gate Array*).

Sin duda alguna, un desarrollo tecnológico importante se describe en [60], que consiste en un transceptor óptico de semiconductores de óxido metálico complementario (CMOS, *complementary metal-oxide-semiconductor*), el primero en la industria que utiliza el formato multi-tono discreto (DMT, *Discrete Multi-tone*). Con este circuito integrado de aplicación específica (ASIC, *Application Specific Integrated Circuit*), se han demostrado transmisiones en tiempo real de 200 Gb/s y 400 Gb/s a más de 20 km en banda O y banda C; además de que brinda la compatibilidad para redes convergentes 4G/5G, es decir, admite tanto CPRI como eCPRI.

2.4.2 Radio analógico sobre fibra (A-RoF, Analog radio over Fiber)

La tecnología de radio analógica es muy atractiva cuando se trata de la utilización del medio, ya que se han realizado varias experimentaciones en donde se demuestran tasas muy altas en el *fronthaul*, como es el caso de [61], en donde se comparan tasas de 147 Gb/s equivalentes a un enlace eCPRI, gracias a la implementación de un sistema de antenas distribuidas.

Como se mencionó previamente los problemas intrínsecos del medio óptico son la principal desventaja en la utilización de A-RoF, como lo es el comportamiento no lineal de los módulos de conversión optoelectrónicos, pues generan productos armónicos y de intermodulación, que a su vez generan distorsiones no lineales [62]. La naturaleza dispersiva de la velocidad de grupo (β_2) del medio de fibra afecta a los enlaces A-RoF al introducir atenuación de potencia debido a los múltiples componentes que pueden tener las señales ópticas; incluso el uso de amplificadores ópticos debe evitarse debido a la reducción de SNR relacionada con el ruido de emisión espontánea amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) [63].

Para mitigar los efectos negativos en la transmisión de A-RoF en el *fronthaul*, diversos grupos de investigación han hecho sus propuestas tecnológicas y demuestran la viabilidad que tiene la utilización de A-RoF como tecnología principal en el medio de transporte. Una característica que tienen en común muchos de estos trabajos de investigación es el uso de sistemas heterodinos, que convierten la señal principal, estandarizada en el espectro de mmWave, hacia una señal intermedia o más baja; a esta técnica se le denomina frecuencia intermedia sobre fibra (IFoF, *Intermediate Frequency-over-Fiber*), lo cual es una variante de A-RoF [64].

Otro ámbito que está tomando relevancia, es la generación de ondas mmWave asistida con fotónica, ya que se supera la limitación de ancho de banda de los dispositivos eléctricos para altas frecuencias [65]. En la figura 19 [66] se ilustra el proceso de la generación de ondas mmWave a través de la fotónica. Se ocupan dos señales ópticas separadas a una frecuencia f_s , la cual está en el orden del espectro mmWave; la frecuencia inferior es usada como un oscilador local (LO, *local oscillator*), mientras que la señal superior es la señal que se radio-propagará. Después del acoplamiento óptico (OC, *Optical Coupler*), se obtiene una señal óptica de onda mmWave a una frecuencia f_s . El fotodetector (PD, *photodetector*) funciona como un circuito heterodino, el cual realiza la conversión señal óptica a señal eléctrica, para posteriormente transmitirla a través de la antena.

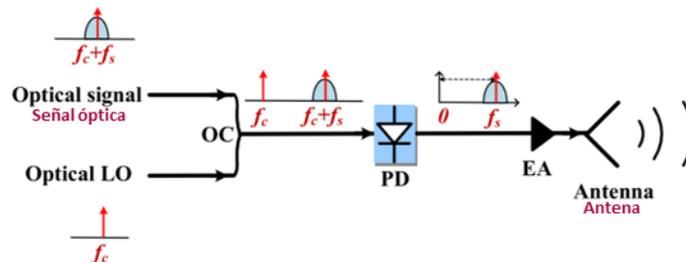


Figura 19 Esquema básico de un generador de ondas mmWave asistido por fotónica [66].

Un claro ejemplo de que A-RoF es una opción viable para las redes 5G, se describe en [66], pues al utilizar varios métodos como: generación de mmWave asistido por fotónica, detección coherente heterodina combinada con DSP avanzado, MIMO inalámbrico con multiplexación de polarización óptica, modulación de portadora múltiple óptica, multiplexación de polarización de antena, multiplexación de frecuencia mmWave múltiple y modelado probabilístico de constelaciones (PS,

Probabilistic Constellation Shaping); se logró una transmisión de hasta 1.056 Tb/s con portadoras de 124 GHz y 150.5 GHz con modulaciones de 64 QAM. Esto es muy relevante para A-RoF, ya que dependiendo de la aplicación o demanda específica de la red, se puede utilizar la técnica que más convenga.

Se han propuesto diseños novedales de equipamiento óptico a fin de cumplir con los estándares de 5G y lograr una convergencia con redes 4G. Un elemento puntual es un transmisor de longitud de onda múltiple, el cual está integrado monolíticamente para sistemas RoF de NR-5G multibanda, que es capaz de operar simultáneamente en los modos SA y NSA, es decir, para una red 5G convergente con 4G o para una red en su totalidad de tecnología 5G. El novedoso circuito fotónico integrado, que integra ocho láseres de retroalimentación distribuida sintonizables y directamente modulados, tiene como objetivo reducir la complejidad y el espacio del transmisor, lo que permite soluciones 5G compactas, de alto rendimiento y bajo costo para frecuencias de hasta 10 GHz [67].

2.4.3 Tendencias de la tecnología en el *Fronthaul*

Varios grupos de investigación han adoptado las soluciones descritas en las secciones anteriores, sin embargo, se puede ver una tendencia hacia las soluciones de la tecnología analógica, ilustrado en la tabla 3. Una de las tecnologías más sobresalientes de esta recopilación es Fi-Wi, ya que integra tecnologías propias de las redes ópticas con tecnologías inalámbricas, es decir, tecnologías como PON o WDM serán transparentes, así como OFDM, que se aplica en la parte inalámbrica. Fi-Wi busca integrar las ventajas de la fibra óptica y el medio inalámbrico, puesto que la fibra óptica se caracteriza por brindar grandes anchos de banda, que se traducen en una alta transmisión de datos, mientras que su contraparte inalámbrica es la mejor para alcanzar cualquier lugar, brindando una amplia cobertura y alta movilidad de manera eficiente.

Como es de esperarse, en esta recopilación aparecen las redes PON, ya que tienen la ventaja de reducir considerablemente el CAPEX y el OPEX, pero a costa de limitar el presupuesto de potencia (*Power Budget*), que se traduce en la distancia final que puede alcanzar la red. Aunque para efectos prácticos, el *fronthaul* no es una red de largo alcance (*long-reach*), sino que se limita a alrededor de 20 km, distancia que fácilmente se puede cubrir con la implementación de una red PON. Una de las ventajas más notorias de las redes PON es la sencilla integración con tecnologías de transporte, como lo WDM, lo que hace que PON sea aún más atractiva para implementar el *fronthaul* de las redes de nueva generación.

En el afán de seguir incrementando la capacidad de la red de *fronthaul* se han propuesto redes basadas en SDM, si bien algunas de las propuestas han empleado fibras de pocos modos (FMF, *Few Mode Fiber*) o multimodo (MMF, *Multi Mode Fiber*), en general se prefiere emplear las fibras multinúcleo (MCF, *Multi Core Fiber*). Dichas fibras no solamente permiten establecer una mayor cantidad de canales, sino que también brindan la posibilidad de segmentar una red atendiendo el tipo de tecnología de acceso a la red (RAT, *Radio Access Technology*) y del escenario de uso en 5G.

Algunas de las tecnologías implementadas en otros sistemas de comunicaciones han sido estudiadas y extrapoladas a las redes 5G con fines demostrativos o para investigar la factibilidad de implementación y su desempeño, como es el caso de potencia sobre fibra (PoF, *Power over Fiber*), la cual está infundada en la tecnología de potencia sobre ethernet (PoE, *Power over Ethernet*). La idea es proporcionar una señal de potencia que permita alimentar un dispositivo remoto, en este caso se propone realizarlo a través de la transmisión de una señal óptica de alta potencia y

realizando una conversión óptica-eléctrica en el receptor remoto. Una tecnología que se ha propuesto es la comunicación óptica por el espacio libre (FSO, *Free-Space Optical communication*), la cual ocupa el medio inalámbrico para la propagación de la luz visible o infrarroja; este tipo de tecnología no está pensada para ser de principal uso, sino en escenarios donde se privilegie la economía y rapidez del despliegue, sobre la capacidad y disponibilidad de la red 5G.

Tabla 3 Recopilación de implementaciones en el fronthaul con sus principales características.

Año	Referencia	Arquitectura	Banda RF (distancia)	Lambda (distancia)	UL / DL	BW	Modulación (Waveform)	Throughput	uso de DSP	Tx	Propuesta
2016	[68]	A-RoF + SDM D-RoF + SDM	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Por primera vez se propone usar SDM en MCF homogéneas para el <i>fronthaul</i> .
2017	[69]	A-RoF (IFoF)	28 GHz (1.7 GHz - 2.7 GHz)	U-1550 nm D-1310 nm 20km	UP - DL	8 x 125 MHz	64-QAM OFDM	1.5 Gb / s en UE	-----	DML	-----
2018	[70]	RoF + RoFSO + FiWi	24 GHz a 26 GHz	1549 nm	UP - DL	100 MHz	64-QAM	LTE-A	No	Modulación y detección directa	Los autores indican que es la primera vez que se propone un sistema que emplea las siguientes tres tecnologías de manera simultánea: fibra óptica, FSO y RF free-space link.
2018	[71]	A-RoF + FiWi A-RoF + SDM + FiWi A-RoF + WDM + FiWi		1533 nm a 1542 nm							Se presenta una red FiWi convergente PtMP (Point to Multi-Point) para 3 casos de uso.
2019	[72]	A-RoF (IFoF)	V-band (60 GHz) 5m	7 km	UP - DL	6 x 1.2 GHz	SC 16QAM	6x4 = 24 Gbps	No	DFB + MZM	
2019	[73]	A-RoF + (WDM)	2 GHz - 12.5 GHz	@1550 nm		100 MHz OFDM	OFDM 64-256 QAM	CPRI ~0.78 Tb/s	-----	EML	Técnica: filtered Gaussian phase dither
2019	[74]	A-RoF	1.6 GHz	1556.016 nm	UP	FSR-6 GHz	64-QAM	4.3 Gbps	-----	CWL	-----
2019	[12]	A-RoF + uDWDM-PON	4 GHz	1545 nm 25 km		~3.375 GHz ~4.125 GHz	32-QAM OFDM UFMC FBMC GFDM	10 Gbps	-----	TLS + MZM	-----
2019	[75]	D-RoF + SDM D-RoF + WDM D-RoF + WDM + SDM A-RoF (IF) + SDM A-RoF (IF) + WDM A-RoF (IF) + WDM + SDM	n258: De 24.25 GHz a 27.5 GHz	1550 nm	UP - DL	100 MHz OFDM	OFDM 64QAM	Total: UP: 31.7 Gbps DL: 55.1 Gbps	-----	MZM DD-MZM	Se presentan varias opciones, aunque sólo se analizan un par de ellas sin dar tanto detalle, sin embargo, señalan las referencias dónde uno puede encontrar más al respecto.
2019	[13]	A-RoF + WDM-PON + FiWi	788 MHz 3.5 GHz (Outdoor) 26 GHz (Indoor)	Alrededor de 1560 nm	UP - DL	100 MHz 200 MHz 400 MHz 800 MHz	OFDM F-OFDM GOFDM 16-QAM 64-QAM 256-QAM	4.41 Gbps	El DSP genera formas de onda OFDM, F-OFDM y GOFDM; utilizado para aplicar DPD (Digital Pre-Distortion)	DD-MZM	Mencionan que proponen la primera implementación FiWi que cumple con las especificaciones de la 3GPP (Release 15) para una frecuencia de 26 GHz.

2019	[76]	Power over Fiber (PoF)	-----	Datos: 1550 nm PoF: 808 nm 940 nm 1300 nm 1480 nm	-----	-----	-----	2.6 Gbps	No	SFP	Se presenta un estudio donde se analiza PoF. Estudian la eficiencia energética de PoF cuando se emplean: PoF, MMF, SMF y MCF, estas últimas 2 sólo las mencionan brevemente.
2019	[77]	RoMCF (Radio over Multi-core Fiber) SDM - Multi RAT	Múltiples bandas: 2G, 3G, 3.9G y 4G	1555.75 nm 150 m	UP - DL	-----	QPSK 8 PSK 16 QAM 32 QAM	-----		MZM	Se propone emplear SDM en una fibra óptica multinúcleo (MCF), cada uno núcleo albergará una tecnología de acceso por radio (RAT).
2020	[78]	A-RoF (IFoF)	28 GHz	1550 nm	UP - DL	1 GHz	TDD	9 Gb / s			
2020	[66]	ARoF (IFoF)	W-band 94 GHz 2.5km		UP - DL		PDM-8QAM	54 Gbps	DSP avanzado	ECL + MZM	Detección coherente heterodina combinada con DSP avanzado
2020	[79]	ARoF (IFoF)	D-band 130 - 150 GHz (1m)	1550 nm 25km			QPSK 16QAM	4-Gbaud	algoritmo de módulo constante (CMA), frecuencia estimación de compensación (FOE) y estimación de compensación de fase (POE)	CW by ECL + single-drive MZM + push-pull MZM	Generación de señal vectorial SSB de onda mm
2020	[80]	ARoF + DRoF	2–10 GHz	1550 nm 20 km	UP	288 MHz	QPSK	10 GBaud	No	(MZM) polarizado en cuadratura	Multiplexación No-Ortogonal
2020	[81]	ARoF (IFoF)	135 GHz 3m	1551.35 nm 10 km			PAM8	60-Gbps	ecualizadores: CMMA (cascaded multi-modulus algorithm), DNN y J-DNN (joint deep neuron network)	2 ECL + MZM	
2020	[82]	ARoF + FIWI	3.5 GHz (Outdoor) 26 GHz (Indoor)	1560 nm	UP - DL	400 MHz	OFDM F-OFDM GOFDM 16-QAM 64-QAM	1.65 Gbps	Se usa DSP para generar la señal de outdoor: OFDM, F-OFDM y GOFDM.	DFB-Laser + DD-MZM Direct detection	Se propone un sistema multibanda 5G para emplearse en el escenario indoor y outdoor de eMBB, el indoor trabaja a una frecuencia de 26 GHz (con 400 MHz de ancho de banda), mientras que la outdoor trabaja a 3.5 GHz.
2020	[83]	ARoF + CWDM + FSO	8 km + 55m 2.12 GHz (DL) 1.72 GHz (UL) 2.68 GHz (DL) 2.56 GHz (UL) 3.5 GHz	1510 nm 1530 nm 1550 nm 1570 nm 1590 nm	UP - DL	5 MHz (4G) 100 MHz (5G)	64-QAM	248 Mbps (4G)		SFP	De acuerdo a los autores es la primera demostración experimental de una red 4G/5G que emplea DRoF y ARoF sobre una fronthaul híbrido fiber-FSO (Free-Space Optics)

2.5 Fronthaul

Con la implementación de la arquitectura C-RAN en las redes de telefonía celular surge una red de transporte que interconecta los elementos fundamentales de las radio-bases, que son la RRH y la BBU. Esta red de transporte se denomina: *fronthaul*, la cual tiene como principal medio de transmisión a la fibra óptica.

Como se vio en secciones anteriores, C-RAN es una arquitectura rentable en redes de telefonía celular y esencialmente cuando se trata de redes altamente densas [84], esto es en gran medida gracias a las bondades de la fibra óptica como principal medio de transporte en C-RAN, que es el *fronthaul*. Aunque con la implementación de redes más densas, junto con las aplicaciones inmersas en 5G, C-RAN requiere enlaces *fronthaul* de capacidad extremadamente alta para interconectar RRH y BBU; es por ello que se han abierto numerosas líneas de investigación para relajar los requisitos impuestos al *fronthaul*, de ahí la relevancia de D-RoF y A-RoF.

En la figura 20 [85] se puede apreciar que el *fronthaul* es utilizado para unir tanto a la red de acceso distribuida conformada por los RRH, como a la red de procesamiento de las BBU en un punto centralizado.

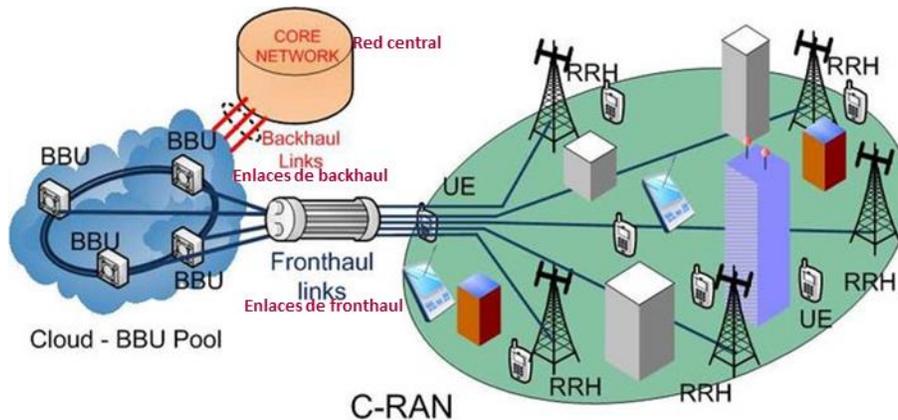


Figura 20 Enlace fronthaul como principal medio de transporte en C-RAN [85].

Una característica sobresaliente en el *fronthaul* es que, a diferencia de los enlaces comunes de las redes de telecomunicaciones, la señal no va modulada ni codificada, sino que la señal se envía sin acondicionamiento, es decir, el *fronthaul* envía la propia señal de radio, comúnmente digitalizada; de ahí que el enlace *fronthaul* esté basado en RoF y concretamente en D-RoF para redes comerciales. El *fronthaul* tiene 3 protocolos que garantizan la interoperabilidad entre BBU y RRH de diferentes proveedores y fabricantes; el primero y el más popular es CPRI creado en 2003, este es un estándar de acuerdo mutuo (MSA, *Mutual Standard Agreement*) creado por una asociación de la industria, conformada por: Ericsson AB, Huawei Technologies Co. Ltd, NEC Corporation, Alcatel Lucent y Nokia Networks [86]; el segundo es la iniciativa de arquitectura de estación base abierta (OBSAI, *Open Base Station Architecture Initiative*) el cual también es un MSA de: Hyundai, LG Electronics, Nokia, Samsung y ZTE [87]; el tercero es la interfaz de equipo de radio abierta (ORI, *Open Radio equipment Interface*) creado por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) [88], organización que obtuvo relevancia al estandarizar la telefonía móvil GSM.

El *fronthaul* en 4G no fue estandarizado por completo, puesto que estos 3 protocolos dejan las especificaciones de las capas más altas a cargo de los propios proveedores, resultando que la interconectividad se logre sólo si los sistemas pertenecen al mismo proveedor. El éxito de CPRI en la implementación de estas redes se debe a que el consorcio de las compañías que desarrollaron CPRI son líderes en el mercado mundial de este tipo de equipo de red; por lo que, al no tener regulaciones completas en capas superiores, los proveedores más pequeños tienen que implementar el mismo equipo [89], fomentando la utilización de CPRI.

2.5.1 Interfaz común de radio pública (CPRI, *Common Public Radio Interface*)

El estándar CPRI se implementa sobre el enlace de *fronthaul* de la arquitectura C-RAN y provee la interconexión de las BBU con las RRH. CPRI manda señales digitales IQ en banda base a través de la fibra óptica.

En la figura 21 [90] se puede apreciar una red completa de telefonía celular, en donde se encuentra la red de acceso inalámbrico hacia los UE, conformado por los RRH que están conectados por la red de transporte óptica, es decir el *fronthaul* basado en D-RoF con CPRI como protocolo hacia las BBU, las cuales pueden estar conectadas de manera independiente, en grupo o virtualizadas; posteriormente se encuentra el backhaul que conecta esta red C-RAN hacia el núcleo de la red. Es importante notar que en C-RAN el tráfico es mediante D-RoF, es decir, señales en banda base sin modulación; mientras que en el backhaul y en el núcleo de la red, las señales transmitidas son paquetes IP como en la mayoría de este tipo de redes. Otro punto sobresaliente es que CPRI no le da relevancia a la interconexión física de la red de *fronthaul*, por lo que el diseñador de la red es libre de escoger cualquier método o tecnología que le sea más beneficiosa a la red; un ejemplo es la tecnología WDM.

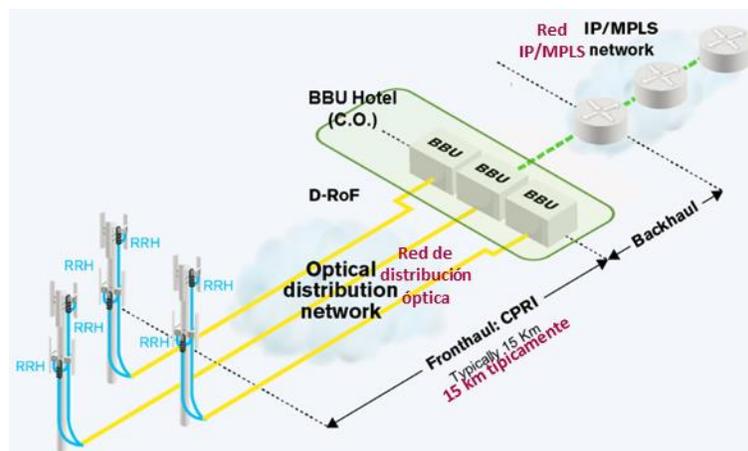


Figura 21 Red de telefonía celular basada en C-RAN con tecnología D-RoF [90].

CPRI comparte la idea de SDN con la separación de planos, donde los datos y el control se tratan como flujos diferentes. CPRI está compuesto del plano de datos y el de control, además de que el plano de control se encuentra subdividido en el plano de control/mantenimiento y el plano de sincronismo del sistema. El plano de datos transporta a la carga útil como flujo de señales digitales IQ en banda base, es decir, tramas básicas de CPRI (*CPRI basic frame*). El plano de control existe a través de subcanales CPRI y esta información es enviada como palabras de control en los *CPRI basic frame*.

La figura 22 [91] muestra la separación de los planos de datos y los planos de control con sus subplanos, es importante notar que la capa de funciones de LTE sólo tiene un impacto en la creación de la información en el plano de datos y este es excluido del plano de control, el cual se encuentra dividido por el control, la administración en general y la sincronización del sistema. Esta figura también indica la estructura un *CPRI basic frame*, donde se aprecia que la información del plano de control viaja como cabecera de la trama de información.

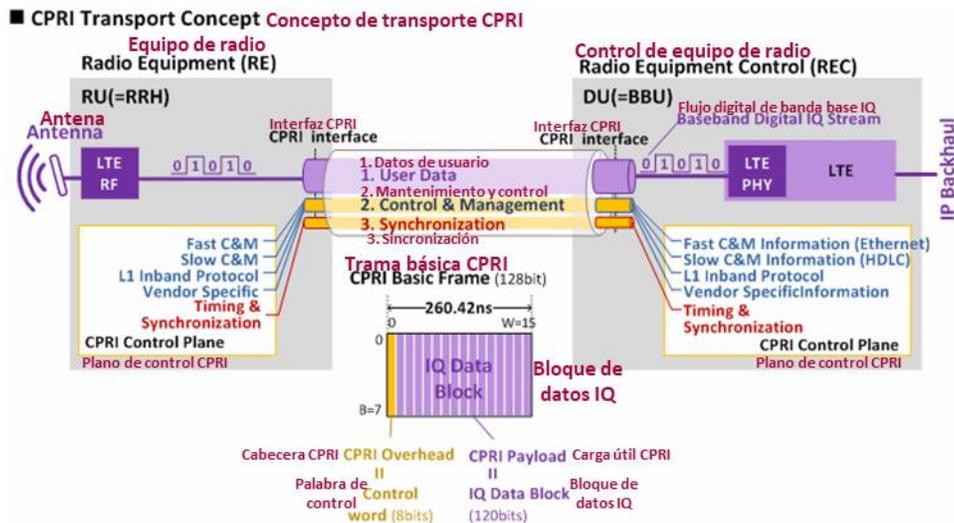


Figura 22 Planos en CPRI [91].

2.5.1.1 Estructura del Frame CPRI

CPRI forma tramas para mandar la información a través del *fronthaul*. La formación de estas tramas sigue 4 pasos desde las señales RF hasta la formación del flujo IQ.

La figura 23 [92] muestra los pasos a seguir para la formación de una trama CPRI, los cuales son: el muestreo (*sampling*), el mapeo (*mapping*), el agrupamiento (*grouping*) y el entramado (*framing*).

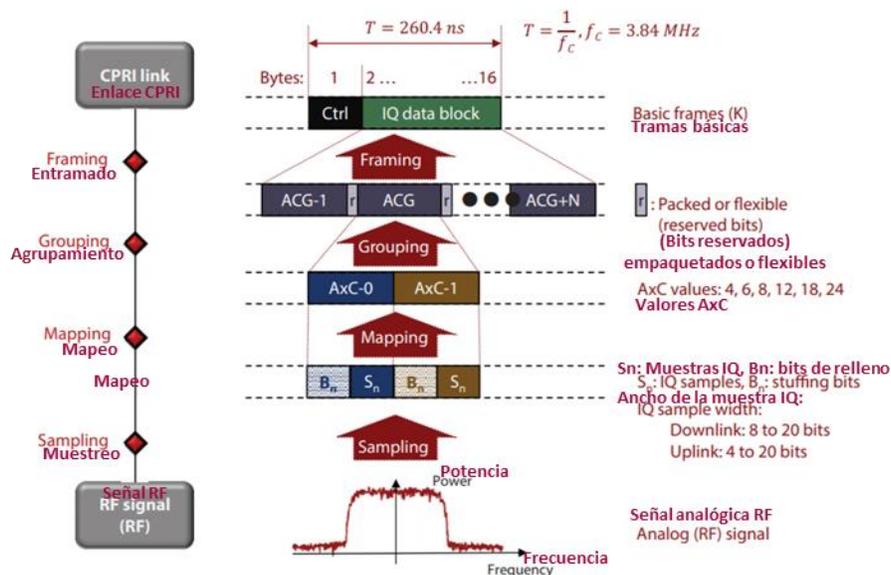


Figura 23 Formación de tramas CPRI [92].

2.5.1.2 Muestreo

Las señales RF que se envían a través de las antenas de las RRH y los UE son convertidas en flujo digital CPRI. La etapa de muestreo no sólo se refiere a muestrear la señal, sino que involucra en general el proceso de la digitalización de la señal RF. CPRI utiliza una resolución de 15 bits, lo que significa que tiene 32768 niveles diferentes en la amplitud de la señal RF.

En la figura 24 [92] se puede apreciar como la señal IQ en el dominio analógico de RF es muestreada y agrupada en un flujo de información de 3.84 Mbps que corresponde a un contenedor de portador de antena (AxC , *antennacarrier*).

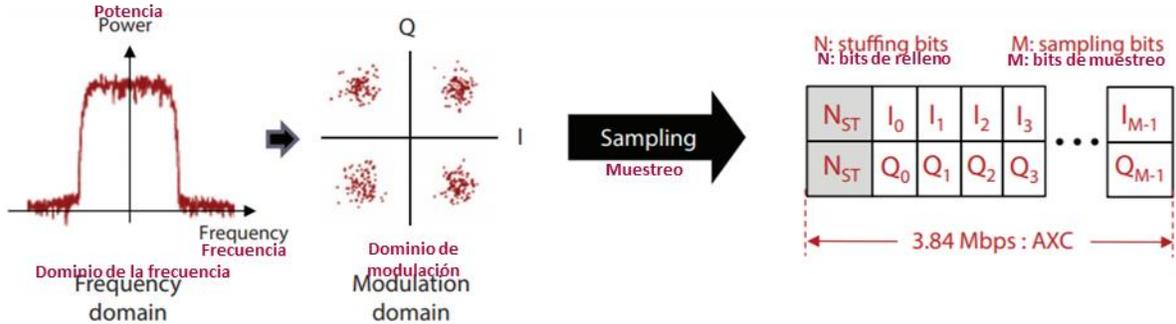


Figura 24 Muestreo CPRI [92].

Las señales IQ en el dominio RF son muestreadas basándose en múltiplos de 3.84 MHz. En caso de que el flujo digitalizado sea menor a 3.84 Mbps, se le agregan bits de relleno N_{ST} para hacer cuadrar el tamaño del contenedor AxC .

2.5.1.3 Mapeo

El mapeo en CPRI tiene que ver con el ancho de banda variable que maneja LTE, ya que, según el ancho de banda dispuesto por LTE, será el número de contenedores AxC asignados a ese flujo. El mapeo ordena a los bits que se generaron en el muestreo de manera consecutiva y cronológica, es decir, sigue el principio primero en entrada, primero en salida (FIFO, *first-in first-out*).

En la figura 25 [92] se puede notar que el ancho de banda del canal LTE a utilizar es de 10 MHz, para lo cual la señal que se muestrea es de 15.36 MHz, así que teniendo como base 3.84 Mbps, se necesitan en total 4 contenedores AxC . Es importante destacar que el flujo se asigna con FIFO, resultando en el mapeo de la señal muestreada como un flujo continuo del bit siguiente en cada contenedor AxC . En LTE el ancho de banda máximo es de 20 MHz, lo que le corresponde a una señal de muestreo de 30.72 MHz y 8 contenedores AxC en total para el ancho de banda máximo.

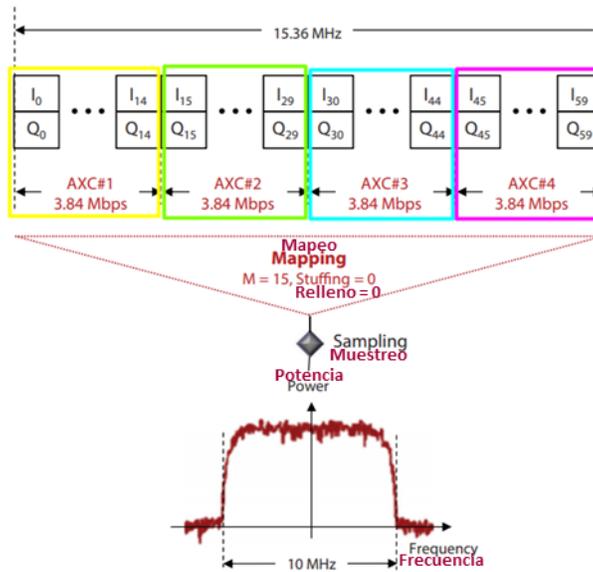


Figura 25 Mapeo CPRI [92].

2.5.1.4 Agrupamiento

Una vez definido el número de contenedores AxC por el mapeo, estos son agrupados dentro de un grupo AxC. Esta etapa es importante para sistemas con MIMO, puesto que MIMO transmite múltiples señales a la misma frecuencia de la portadora y CPRI trata el flujo de datos de cada antena como si se trata como una portadora independiente.

En la figura 26 [92] se muestra el seguimiento del agrupamiento con el ejemplo anterior de una señal LTE de 10 MHz que había generado 4 contenedores AxC. Estos 4 en conjunto formarán un grupo, que tendrá un identificador. En el ejemplo se puede apreciar que el agrupamiento se puede hacer con un espaciamiento que reserva bits para usos especiales por el administrador de red; este es el caso de la derecha, mientras que en el de la izquierda no hay bits de reserva y el agrupamiento se lleva tal cual con los contenedores.

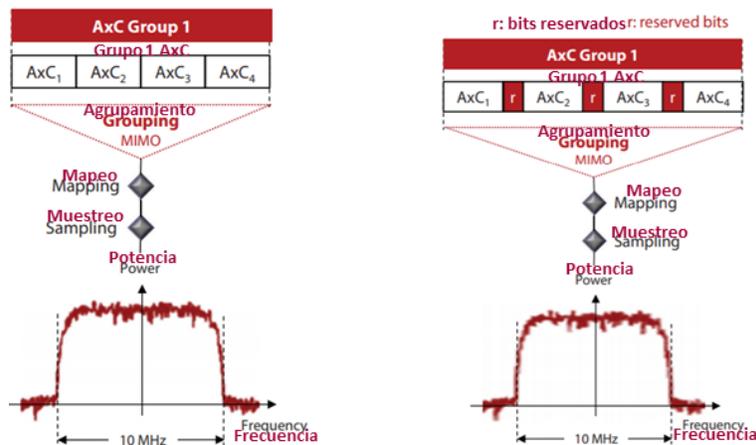


Figura 26 Agrupamiento CPRI [92].

2.5.1.5 Entramado

La duración de una trama básica CPRI está dada por la ecuación 1, la cual es el inverso de la frecuencia de muestreo.

$$t_{CPRI} = \frac{1}{f_{muestreo}} \quad (1)$$

La frecuencia de muestreo base de CPRI es de 3.84 MHz, por lo que al sustituir este valor en la ecuación 1, se obtiene que la trama básica CPRI tiene una duración de 260.4 ns.

La estructura de una trama básica de CPRI está formada de 128 bits, pues se compone de 16 palabras de 8 bits cada una. 15 de estas palabras son de información provenientes de LTE, mientras que una es la cabecera de la trama, que proviene del plano de control. El llenado de la trama se muestra en la [figura 27 \[92\]](#), donde se puede ver que primero van las palabras de control como cabecera de la trama y en seguida va la información de LTE; es importante notar que no es completamente “cuadrada”, sino que la longitud de la trama se va agregando a la siguiente palabra cuando el grupo sobrepasa la longitud de palabra asignada. Se tienen dos ejemplos de llenado de la trama, en dónde se muestra la configuración MIMO, la cual está dada por diferentes antenas. El sistema nombra al flujo de datos de cada antena con diferente número agrupación y al vaciar estos flujos se aprecia que son puestos en la trama CPRI en orden del número de agrupación y que en caso de que la agrupación termine y aún exista espacio en la palabra, el siguiente flujo de agrupación ocupará ese lugar. A cada antena le corresponde un flujo de agrupación, por lo que, si hubiera más antenas haciendo MIMO, el llenado de las tramas sería continuo hasta agotar la trama o los grupos AxC de cada antena MIMO.

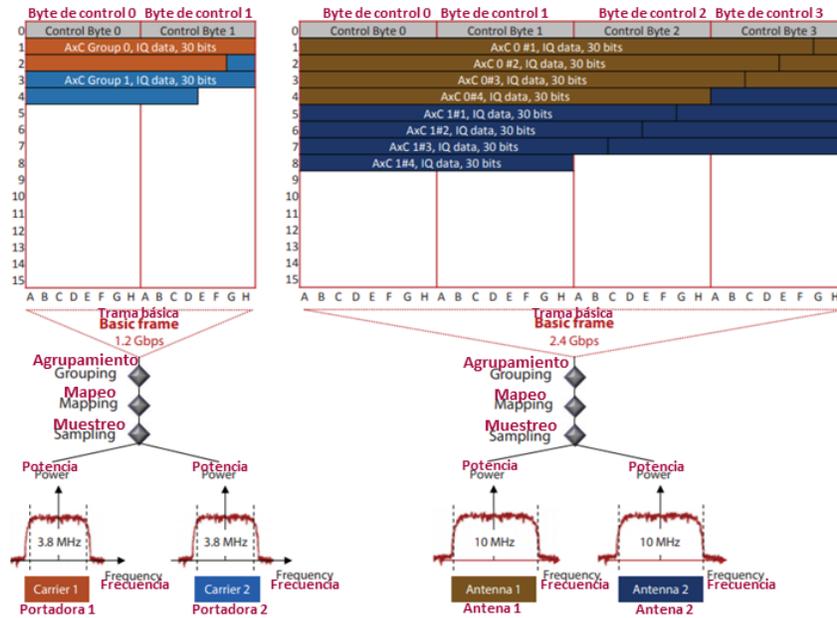


Figura 27 Llenado de tramas CPRI [92].

2.5.1.6 Trama de Radio

El entramado en *Wireless* se compone de las tramas de radio, el cual se forma con la unidad básica de la trama CPRI. 256 tramas básicas CPRI forman una hiper trama y 150 hiper tramas forman una trama de radio. En la figura 28 [93] se muestra el diagrama de las tramas de radio, las cuales tienen una duración fija a 10 ms. Este es el tiempo resultante de 38400 tramas básicas CPRI que son las que contiene la trama de radio. La figura 28 [93] también contiene las diferentes velocidades de línea a las que CPRI se encuentra estandarizado.

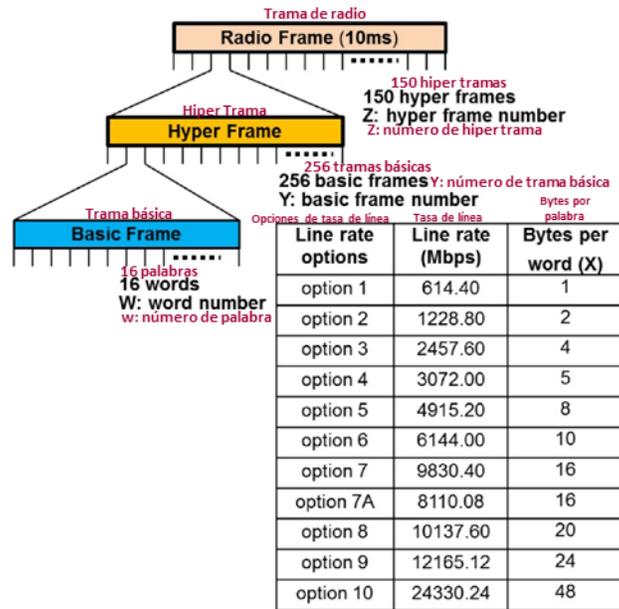


Figura 28 Opciones de velocidad de línea en CPRI [93].

2.5.2 Velocidad de línea en CPRI

CPRI define diferentes velocidades de línea que proporcionan flexibilidad para adaptarse a diferentes anchos de banda que la señal pueda tener. Las velocidades de línea están basadas en el sistema universal de telecomunicaciones móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) a 3.84 MHz de 3G [94], esto es para brindar compatibilidad con redes heredadas.

Dentro las tramas CPRI existen nomenclaturas para determinar las partes de la trama, en la tabla 4 se muestran todas las nomenclaturas que existen.

Tabla 4 Nomenclatura de la trama CPRI.

Nomenclatura	Descripción
B	Indica el bit (0 a 7)
W	Indica la palabra (0 a 15)
Y	Indica el byte dentro de una palabra (0 a 3)
X	Número de la trama básica (0 a 255)
Z	Número de la hiper trama (0 a 149)
Z, X, Y	Definición de las palabras de control

Las velocidades de línea están dadas por el número de bytes dentro de cada palabra (Y). En la figura 29 [95] se muestran 3 ejemplos de diferentes velocidades en línea de CPRI, el primero de ellos corresponde a la base de 614.4 Mbps, en el cual se puede apreciar un valor de Y = 0, que indica una longitud de palabra de 8 bits y como se muestra en su costado derecho, la lectura de esta trama sólo se hace de izquierda a derecha, empezando con la cabecera de control.

El segundo ejemplo corresponde a la velocidad de 1.228 Gbps, el cual se logra duplicando la longitud de las palabras, correspondiente a Y = 1, que indica una longitud de 16 bits; en su costado se puede notar que la lectura se da pasando por cada palabra con todas las Y, es decir, empieza en la palabra W = 0 en Y = 0, posteriormente pasa a W = 0 en Y = 1, de esta forma lee una palabra completa para enseguida pasar a la siguiente, así consecutivamente hasta terminar en W = 15 y en Y = 1.

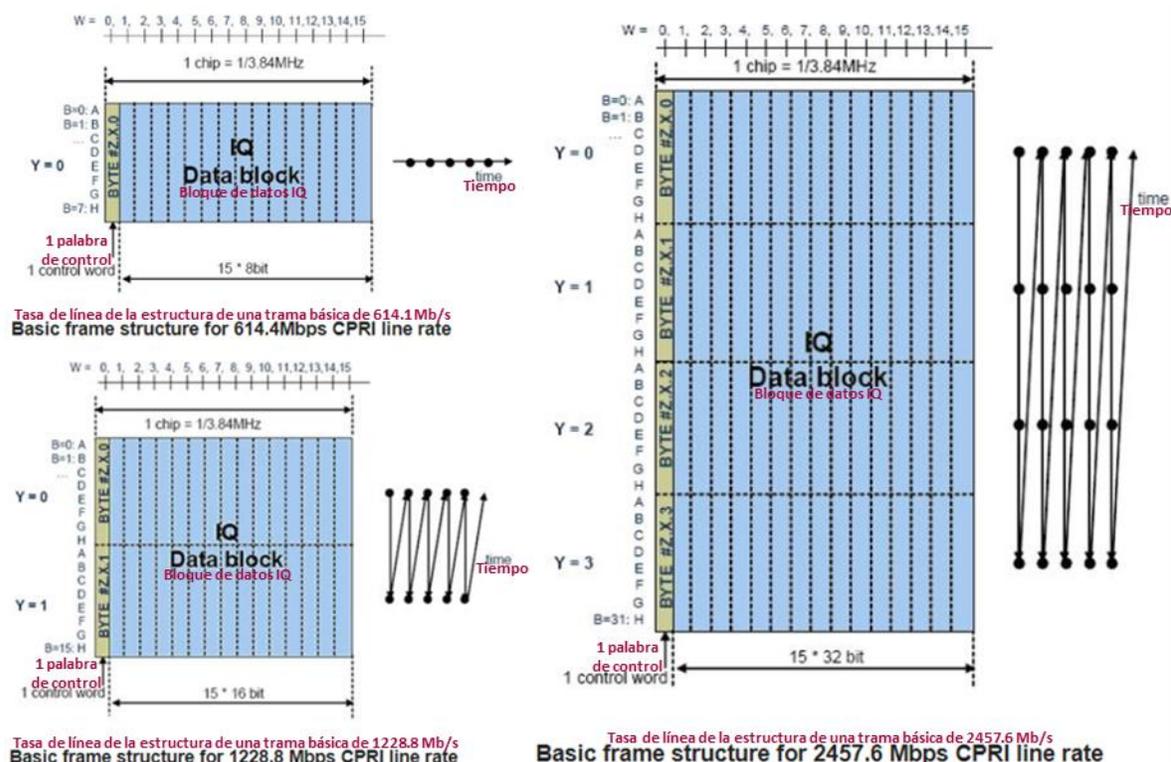


Figura 29 Ejemplos de velocidades de línea CPRI [95].

El último ejemplo expuesto da lugar a la opción 3 de CPRI que es de 2.457 Gbps, como se puede notar, ahora la longitud de cada palabra corresponde a una longitud de 32 bits y la lectura de la trama es similar al ejemplo anterior, primero se lee completamente una palabra con todas las componentes Y que tenga, para después pasar a la siguiente palabra y así consecutivamente hasta completar las 16 palabras.

Es importante destacar que la duración de la trama básica de CPRI siempre se mantiene fija y que la velocidad de línea cambia en función de la longitud de la palabra. CPRI negocia la velocidad de la línea automáticamente y permite una reconfiguración dinámica basada en el ancho de banda utilizada en la antena, la cual es determinada por LTE.

2.5.3 Capacidad en el *fronthaul*

El *fronthaul* como red de transporte óptico forma parte de un sistema más grande, que es el sistema de telecomunicaciones de telefonía móvil en la parte de acceso. El *fronthaul* como parte de este sistema, transporta señales RF con tasas acopladas según las RRH y los UE del medio inalámbrico, por lo que el *fronthaul* resulta un intermediario entre la información de los UE y las aplicaciones alojadas en el núcleo de la red. Es importante analizar la información que el *fronthaul* realmente envía a través de la fibra. La ecuación 2 muestra la capacidad requerida en el *fronthaul* dependiendo de la configuración y del ancho de banda del canal que se esté ocupando.

$$B_{CPRI} = 2 S A f_s b_s (CW) (LC) \quad (2)$$

Donde:

- S Número de sectores
- A Número de antenas
- f_s Frecuencia de muestreo (para 20MHz \rightarrow 30.72MHz, múltiplos de 3.84Mhz)
- b_s Número de bits por muestra (15 IQ)
- CW Palabra de control $\left(\frac{16}{15}\right)$
- LC Tasa de codificación $\left(\frac{10}{8}, \frac{66}{64}\right)$

Analizando las equivalencias que se tienen con el medio inalámbrico y el *fronthaul*, se tienen que para LTE un ancho de banda máximo es de 20 MHz, lo que corresponde una frecuencia de muestreo de 30.72 MHz; esto es equivalente a 75 Mbps de información IP por antena en el sistema [52], que es realmente el tipo de tráfico que aceptan los UE y el núcleo de la red.

Realizando un ejemplo para tener una clara comparación, se supondrá un sistema de acceso MIMO 8x8 con el ancho de banda más grande permitido en LTE con una configuración común trisectorial y con una tasa de codificación típica de 10/8. Aplicando la fórmula general de la capacidad del *fronthaul* de la ecuación 2, se obtiene una capacidad requerida de 29.491 Gbps en el *fronthaul*, en comparación con la tasa IP de 1.8 Gbps total transmitida.

El *fronthaul* tiene una utilización de más de 15 veces la tasa real que le llega a los UE y al núcleo de la red. Ahora, con el ancho de banda mínimo en 5G y con la implementación de tecnologías de MIMO masivo, la capacidad del *fronthaul* requerirá más de 1 Tbps en varias de sus configuraciones.

Capítulo 3. Fronthaul Pasivo

El empleo de la fotónica en el ámbito de las telecomunicaciones ha revolucionado el mundo actual, pues su uso presenta ventajas muy significativas referentes a su categoría, que son las comunicaciones guiadas. Su detonación se ha producido gracias a la invención de la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (láser, *light amplification by stimulated emission of radiation*) y a la fibra óptica [96]. En la figura 30 [97] se pueden ver los avances ópticos más significativos que marcaron las bases para el uso a gran escala de las comunicaciones ópticas.

En este capítulo se describe detalladamente la propuesta principal de este trabajo de investigación como solución a la red de transporte de las redes 5G, el *fronthaul* óptico pasivo. Se expone la tecnología capaz de admitir las tasas requisitadas para las aplicaciones de 5G y sus elementos principales que permiten su despliegue. Finalmente, se da una comparación entre el *fronthaul* óptico activo y pasivo, resaltando las ventajas y desventajas de la utilización de cada uno.



Figura 30 Línea de tiempo de las comunicaciones ópticas [97].

Durante el establecimiento de la óptica como tecnología fiable para su uso comercial y su despliegue masivo, los sistemas ópticos han sido optimizados por técnicas que aprovechan la naturaleza del medio y el comportamiento de la luz como señal portadora de información. La técnica que sirve como punto de partida para implementar redes robustas y escalables es WDM, puesto que WDM aprovecha eficientemente el espectro, brindando beneficios como el incremento de canales y usuarios, así como la tasa de transmisión e incluso distancias con la integración de elementos como

amplificadores ópticos. También PON es destacable, ya que es el último hito en redes de acceso, puesto que ha hecho viable la utilización de fibra óptica como medio principal en el despliegue de nuevas redes; por lo que al surgir una nueva población es mucho más conveniente implementar una red basada en fibra que en cable coaxial o par trenzado. Tanto WDM como las redes pasivas son tecnologías adecuadas para implementarse en el *fronthaul* y satisfacer las necesidades en las comunicaciones ópticas en redes 5G, ya que ofrecen grandes prestaciones a un bajo gasto general.

3.1 Multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*)

La multiplexación por longitud de onda se refiere a que señales múltiples, representadas como canales con diferente frecuencia de portadora, pueden compartir un mismo medio; por lo que en el medio compartido se tendrá una señal combinada que es creada a partir de señales individuales, donde al final de la línea de transmisión o en cualquier punto deseado es posible recuperar cualquier componente que originó a la señal combinada. De esta forma se obtiene una transmisión simultánea de varios canales de información que permite un uso más eficiente del ancho de banda del sistema.

Para que la multiplexación sea posible, es necesario el uso de multiplexores (MUX) y demultiplexores (DEMUX), que son dispositivos que combinan y/o dividen los canales que pasan a través de ellos; en esencia los MUX y los DEMUX realizan la misma función, sólo que en sentido contrario. En la figura 31 se muestra un diagrama de un sistema WDM con los principales elementos, que son el MUX y el DEMUX. Cuatro señales con frecuencia de portadoras diferentes entran al MUX, el cual combina las señales y las transmite a través de la fibra óptica, posteriormente al final de la línea de transmisión se encuentra un DEMUX que recupera las señales originales; utilizando así, una sola fibra óptica para la transmisión de 4 canales diferentes. Por lo tanto, para este ejemplo, la capacidad del sistema se ha incrementado 4 veces.

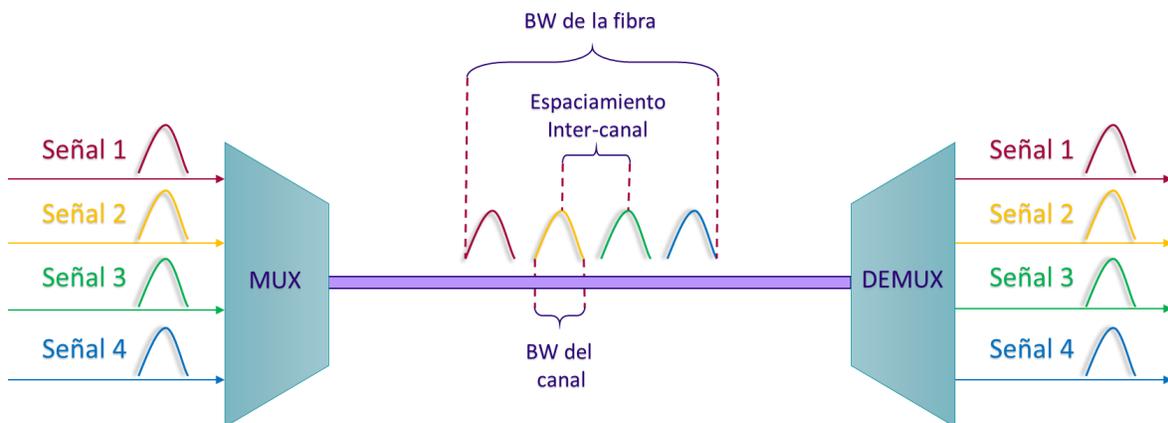


Figura 31 Sistema WDM.

Con el ejemplo anterior se puede inferir que la capacidad de un sistema WDM está en función del número de canales y de la velocidad de cada canal. Por lo que, el desarrollo en concreto para maximizar el potencial de un sistema WDM, se encuentra en incrementar la velocidad de transmisión y en reducir el ancho espectral de cada canal para aumentar el número de canales en un mismo ancho de banda. Este desarrollo se encuentra en dos áreas, la velocidad de transmisión

está en la parte electrónica, mientras que el incremento del número de canales es totalmente óptico.

Las señales de los sistemas WDM son portadoras de luz que transportan la información que se desea transmitir, cada portadora se comporta y se puede representar como cualquier onda electromagnética, es decir, tiene componentes como: amplitud, fase, frecuencia y longitud de onda. Es muy común que en WDM se diferencien los canales a través de la longitud de onda de la portadora, las cuales se denominan lambdas (λ), aunque también es muy habitual que se diferencien por la frecuencia de operación de la portadora. Aún, cuando se trabaje en términos de λ o de frecuencia es importante notar que cada uno de ellos tiene su equivalencia, las cuales se muestran en las ecuaciones 3 y 4. La equivalencia de frecuencia a lambda es:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Mientras que la equivalencia de lambda a frecuencia es:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

También existen maneras simplificadas de reconocer los canales en un sistema WDM, comúnmente se expresa a través de dos números y está ligado a la frecuencia de operación de la portadora. Para pasar de la manera simplificada a valores de frecuencia, se le tiene que agregar el prefijo 19 y se lee en THz. Un ejemplo de esta manera simplificada son los canales 28, 30, 32 y 34; al agregarles el prefijo, el primer número toma el valor de las unidades, mientras que el segundo pertenece a los decimales, es decir, que el canal 28 equivale a la frecuencia de portadora de 192.8 THz, el canal 30 corresponde a 193.0 THz, el canal 32 opera a la frecuencia 193.2 THz y el canal 34 opera a 193.4 THz, de esta forma resulta más cómodo nombrar a los canales. Cabe mencionar que esto aplica únicamente para los rangos de operación de lambdas alrededor de 1550 nm.

3.1.1 Bandas de comunicación óptica

Las bandas de comunicación en la fibra óptica se definieron a partir de las pérdidas que se presentan en la misma, ya que la atenuación en el medio es la que dicta el alcance que se puede lograr entre puntos intermedios y finales del sistema de telecomunicaciones. La importancia de la fibra óptica para su uso masivo y comercial surgió a partir de que se lograra una atenuación menor de los 5 dB/Km que se presentan en un medio guiado metálico.

A partir de los cálculos de la atenuación, aparecieron las ventanas de operación óptica, que son las frecuencias que presentan menos pérdidas en la propagación de la fibra óptica; en ellas se encuentran las bandas de comunicación óptica. Estas ventanas ópticas se determinan a partir de la absorción intrínseca, la absorción extrínseca, las pérdidas por la dispersión espacial, como lo es Rayleigh y Mie, así como, las pérdidas por las no linealidades como lo son: la estimulación Brillouin y la estimulación Raman. Todos estos fenómenos que causan la atenuación de las señales en la fibra óptica se muestran en la figura 32 [98]. La potencia perdida se transforma en calor en la fibra. La absorción intrínseca es causada por los componentes del vidrio y la absorción extrínseca es causada por impurezas no deseadas. La dispersión transfiere parte de la potencia contenida en un modo de propagación a otro modo, además de que, la potencia en una cierta lambda se puede transfiere a

sus longitudes de onda contiguas [98]. Por lo que, siguiendo el principio de conservación de la energía, este proceso produce una atenuación en la longitud de onda que cedió la potencia.

También existen diferentes factores de atenuación en los sistemas basados en fibra óptica, como son: conectores, empalmes, adaptadores y curvaturas que puede sufrir la fibra óptica. Pero ninguno de estos factores es determinante para la definición de las ventanas ópticas ni las bandas de comunicación óptica.

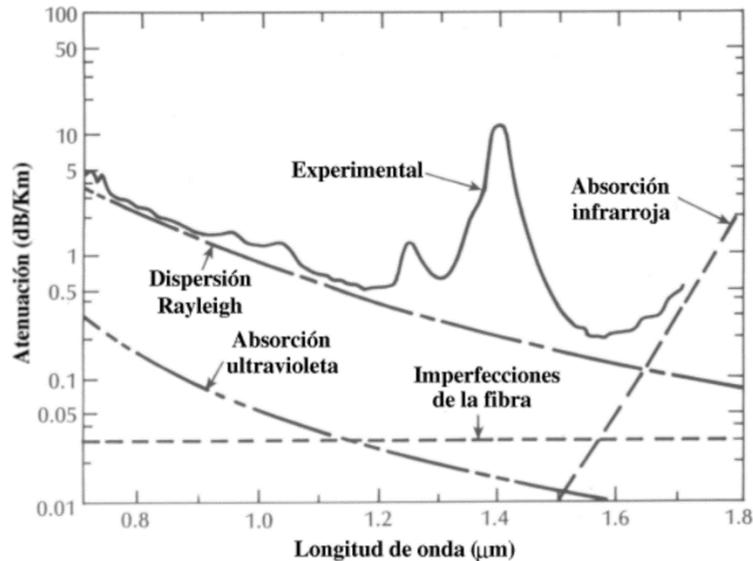


Figura 32 Atenuación en la fibra óptica [98].

Actualmente existen 5 ventanas ópticas, la primera de ellas históricamente se localizó en 850 nm, esto es debido a que inicialmente las fuentes de transmisión se componían principalmente de fuentes LED y láseres fabricados a partir de arseniuro de galio (GaAs). Posteriormente que se definiera la segunda ventana óptica que se localiza en el rango de 1310 nm, es cuando se empiezan a definir las bandas de comunicación óptica. En la figura 33 [99] se pueden apreciar todas las bandas de operación de las comunicaciones ópticas, estas bandas recaen en los valores mínimos de atenuación que presenta la fibra que es desde los 1260 nm hasta los 1675 nm.

La ventana que presenta menor atenuación es la tercera ventana, que es la que utiliza WDM y se encuentra en el rango de 1550 nm. Esta es una ventana favorable para este tipo de sistemas, ya que presentan la ventaja de que los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) funcionan en este intervalo de longitudes de onda. Por lo que al contar con menores atenuaciones y con amplificadores, los sistemas WDM pueden alcanzar distancias muy grandes.

La segunda y tercera ventana son las más utilizadas comercialmente, mientras que la primera se encuentra en desuso para sistemas de telecomunicaciones actuales de gran escala, por sus grandes atenuaciones en la fibra. Si bien la tercera ventana es la que alcanza mayores distancias sin repetidores, la segunda ventana utiliza componentes que son mucho más baratos, además de que sus aplicaciones son ideales para utilizarse en redes de corto y mediano alcance. La cuarta y la quinta ventana óptica se agregaron debido a la alta demanda de sistemas de transporte, donde el número de canales no era suficiente para la capacidad requerida. La cuarta ventana está ubicada en el rango de 1565 nm a 1625 nm muy cerca de la tercera ventana, mientras que la quinta ventana óptica está

ubicada entre la segunda y tercera ventana óptica, en los rangos de 1360 nm y 1460 nm. Como se puede notar, estas últimas dos bandas son contiguas a la tercera ventana, ya que, al ubicarse en esos rangos de frecuencia, los sistemas WDM que requieran mayor agregación de canales utilizarán estas bandas.

Atenuación típica de la fibra óptica

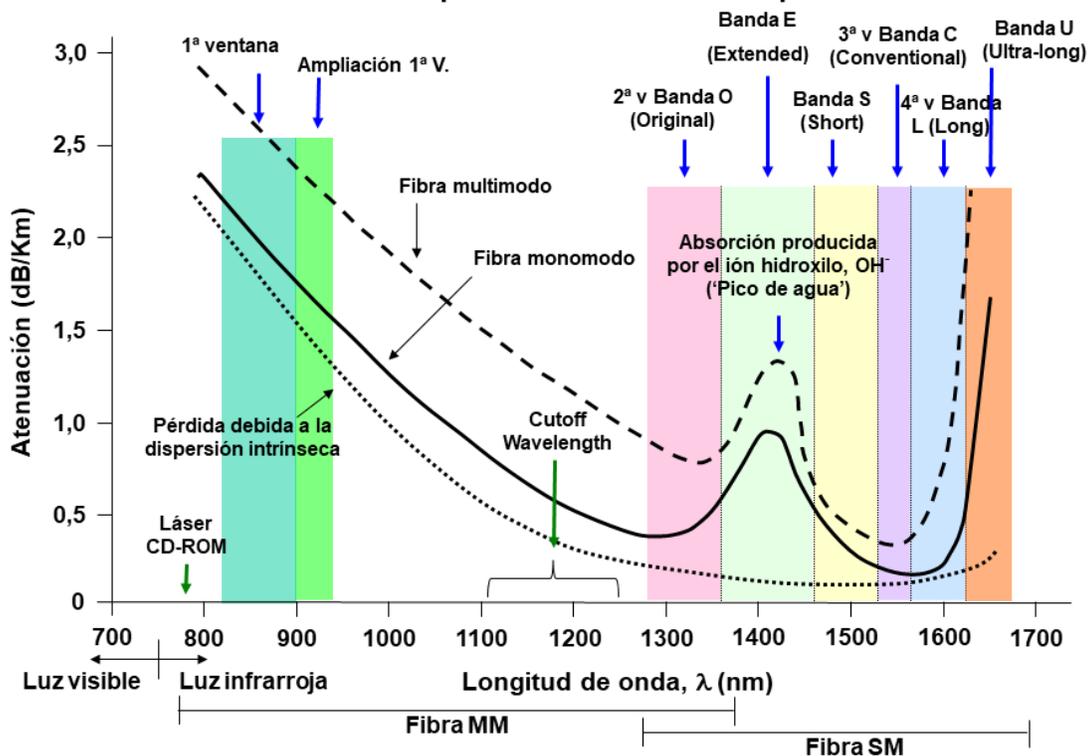


Figura 33 Bandas de comunicación óptica [99].

En la tabla 5 se muestran las bandas de frecuencia de operación con su respectiva ventana óptica y los límites de longitudes de onda y frecuencia a la que pertenecen, además del ancho de banda que posee cada una.

Tabla 5 Bandas de comunicación óptica.

Banda de frecuencia	Ventana óptica	Intervalo		Ancho de banda (THz)
		nm	THz	
-	1	770-910	398.6 - 329.6	60
(O) Banda original	2	1260-1360	237.9-220.4	17.5
(E) Banda extendida	5	1360-1460	220.4-205.3	15.1
(S) Banda de longitud de onda corta	-	1460-1530	205.3-195.9	9.4
© Banda convencional	3	1530-1565	195.9-191.6	4.4
(L) Banda de longitud de onda más larga	4	1565-1625	191.6-184.5	5.7
(U) Banda de longitud de onda de gran longitud	-	1625-1675	184.5-179.0	6.1

3.1.2 Categorías WDM

WDM es ampliamente usado en redes de transporte, donde su principal objetivo es transmitir información a tasas relativamente grandes con la mayor distancia posible, ya que estas redes se usan para interconectar ciudades, países y continentes; por lo que WDM es utilizado por diferentes ISP y administradores de red. Por esta razón se requieren estandarizaciones y regulaciones, que permitan una convergencia global con redes integrables.

Es bien sabido que cuando una tecnología se encuentra en desarrollo, existen gran cantidad de desafíos para lograr su optimización y en el caso de WDM, se traduce en la reducción del ancho de banda de los canales individuales, en mejorar las fuentes láser de transmisión para alcanzar frecuencias nominales puntuales, en los filtros ópticos que delimitan a los canales, en la amplificación de potencia para lograr mayores distancias sin que la señal se vea afectada y en el costo implicado en la implementación de este tipo de sistemas.

WDM introdujo dos tecnologías con el mismo principio de funcionamiento, pero con características diferentes, que son: multiplexación por división de longitud de onda gruesa o ligera (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*).

3.1.2.1 Multiplexación por división de longitud de onda gruesa o ligera (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*)

CWDM se caracteriza por ser la opción más económica de WDM, debido a que utiliza componentes ópticos de menor complejidad, lo que hace que su capacidad sea limitada, al mismo tiempo que la distancia que alcanza. CWDM desempeña su papel idóneo en redes donde las distancias largas no son requeridas, más precisamente en donde no se requiera el uso de amplificaciones para lograr una distancia meta muy larga. Por lo que CWDM es práctico en redes con distancias máximas de alrededor de 100 km, es decir, en redes metropolitanas, que siguen siendo redes de transporte, pero de corta distancia.

La ITU ha puesto una reglamentación hacia CWDM donde define las frecuencias de portadoras que utiliza cada canal, esto lo ha especificado en la recomendación ITU-T G.694.2 la cual fija 18 canales con λ s en el intervalo desde 1270 nm hasta 1610 nm. Cada canal ocupa un ancho de banda de 20 nm, lo que equivale a un espaciamiento de frecuencias de 2.5 THz. En la figura 34 [100] se puede apreciar la representación de los 18 canales de CWDM y la banda óptica que ocupa cada uno.

La elección del espaciamiento de 20 nm en la ITU-T G.694.2 fue especialmente elegido para que los componentes del sistema se abarataran, es decir, exigir una baja complejidad en los transmisores y en los filtros ópticos; además de que asegura una cantidad adecuada de canales para redes de transporte de corto alcance.

Si bien los filtros ópticos son una gran herramienta para tener señales con frecuencias estables y con un pequeño ancho de banda, los láseres son los principales responsables de generar señales con frecuencias estables y pequeños anchos de línea (*linewidth*). Existen diversos fenómenos que hacen oscilar a un láser y desenfocar su frecuencia nominal de operación, un fenómeno ampliamente conocido es el ruido termal, el cual se ha solucionado a través de enfriamiento Peltier o termistores, es decir, la solución se traduce a la agregación de elementos que mejoran la operación del láser, pero que aumentan el costo de este. Una vez más la elección del espaciamiento inter-canal en ITU-T G.694.2 beneficia a la parte económica, puesto que, para 20 nm de

espaciamiento, no es necesario el uso de láseres complejos o de la agregación de sistemas de enfriamiento, debido a que, si existieran variaciones en la onda central, el láser se mantendrá dentro del rango de los 20 nm.

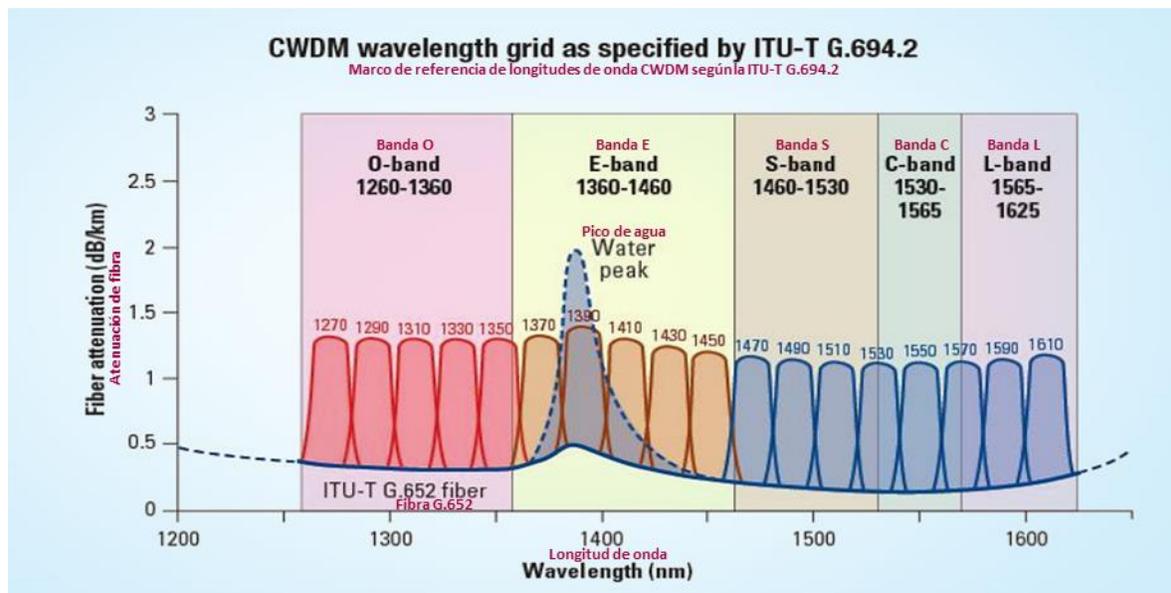


Figura 34 Canales de CWDM en las bandas de comunicaciones ópticas [100].

3.1.2.2 Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing)

DWDM utiliza un ancho de banda menor en cada canal de transmisión comparado con CWDM, lo que le permite tener una mayor densificación de canales en el sistema. Para lograr canales con espaciado inter-canal más reducidos se requiere que los transmisores cuenten con un mecanismo de control que les permita cumplir con los requisitos de estabilidad de frecuencia para mantenerse dentro del canal, sin invadir canales vecinos, evitando interferencias.

Al igual que la ITU estableció los canales para CWDM, la ITU publicó una recomendación del espaciado inter-canal en DWDM a través de la ITU-T G.694.1, en la cual se destaca que la frecuencia central es 193.1 THz, es decir, en 1550 nm. A partir de esta frecuencia se puede partir hacia frecuencias más bajas o hacia frecuencias más altas. Inicialmente la ITU-T G.694.1 estableció un espaciado de 100 GHz entre cada canal, equivalente a 0.8 nm, dejando la posibilidad de la utilización de un espaciado inter-canal de 200 GHz para sistemas menos densos, que corresponde a 1.6 nm. Con el incremento de la demanda de este tipo de sistemas y con la constante introducción de aplicaciones basadas en las redes de telecomunicaciones, se llegó a una nueva versión de la ITU-T G.694.1, la cual establece nuevos valores de espaciados inter-canal, que son: 50 GHz, 25 GHz y 12.5 GHz.

Para obtener los rangos de longitudes de onda a partir del rango de frecuencias de los canales es necesario emplear la ecuación 5, la cual aplica únicamente para rangos de frecuencia mucho más pequeños que la frecuencia central del canal, como lo es el caso de DWDM, puesto que las frecuencias centrales están en el rango de THz y los espaciados inter-canal son del orden de GHz.

$$|\Delta\nu| = \left(\frac{c}{\lambda^2}\right) |\Delta\lambda| \quad (5)$$

Es importante destacar que para el orden de 1550 nm o en 193.1 THz en frecuencias centrales, el espaciamiento de 100 GHz equivale a 0.8 nm, por lo que, los valores actuales de espaciamiento de 50 GHz, 25 GHz y 12.5 GHz corresponden a 0.4 nm, 0.2 nm y 0.1 nm respectivamente.

En febrero de 2012, la recomendación de la ITU-T G.694.1 introdujo el espaciamiento inter-canal flexible (*flexible grid*), lo que básicamente consiste en que el mismo ISP o administrador de red segmentará el ancho de banda para formar los canales como más les convenga, es decir, que se pueden armar anchos de canal de 37.5 GHz conformado por un espaciamiento de 25 GHz y uno de 12.5 GHz [101]. La introducción de este concepto trae redes más flexibles, creando combinaciones de canales utilizables cuando se convenga, por lo que en un mismo sistema pueden convivir canales fijos como lo son los de 100 GHz y canales de 87.5 GHz, por ejemplo. Algo destacable en la utilización de flexible grid es que se están utilizando canales conformados por múltiplos de 6.25 GHz, o sea, que se va a una división más baja del espectro, que corresponde a 0.05 nm. En la figura 35 [102] se muestra un ejemplo de canales DWDM utilizando flexible grid. Se puede notar que en un mismo sistema DWDM coexisten canales con diferente ancho de banda sin que se interfieran entre ellos.

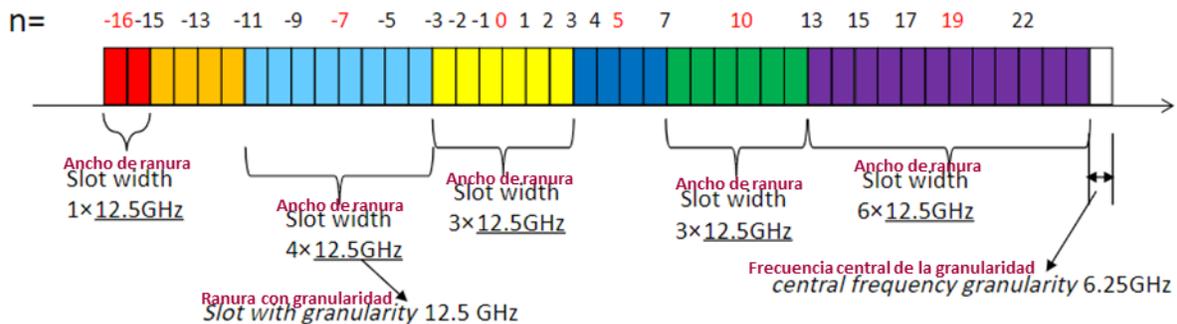


Figura 35 Canales DWDM con flexible grid [102].

Al tener espaciamientos inter-canal más pequeños que CWDM, se necesitan mejores filtros ópticos. Estos filtros pueden ser los mismos filtros de películas delgadas (TFF, *Thin-Film Filter*) con mayor cantidad de películas u otro tipo de filtros como filtros basados en rejilla de fibra de Bragg (FBG, *Fiber Bragg grating*) o filtros basados en rejilla de guía de ondas en arreglo (AWG, *Arrayed waveguide grating*).

3.1.3 Componentes WDM

Existen diversos dispositivos que hacen que WDM sea una red robusta y confiable, puesto que brindan caminos ópticos de respaldo, mecanismos de enrutamiento óptico y herramientas que facilitan su diseño y despliegue, haciendo a las redes ópticas muy flexibles en relación con la demanda actual y al crecimiento de esta con demandas que puedan surgir. La base de estos dispositivos son elementos ópticos fundamentales, que tienen un funcionamiento básico, pero que en conjunto forman elementos más complejos que benefician a la red WDM.

3.1.3.1 Elementos ópticos fundamentales

Sin duda, un elemento muy utilizado en las redes ópticas son los acopladores/divisores (*splitter*), ya que este elemento es capaz de unir y/o dividir la potencia de una misma señal por diferentes caminos ópticos. Este elemento es muy utilizado en redes PON, ya que aquí cumple la función de hacer el broadcast, que se necesitan en mensajes de *downstream*, es decir de la terminal de línea óptica (OLT, *Optical Line Terminal*) hacia las terminales de red óptica (ONT, *Optical Line Terminal*), así como enviar todos los mensajes de *upstream* de varios usuarios hacia la oficina central, es decir, de varias ONT hacia la OLT. También, a través del acoplador es posible diseñar interferómetros Mach-Zehnder (MZI, *Mach-Zehnder interferometer*), los cuales tienen diversas funciones, pero que en el caso de WDM pueden ser la base de los MUX. En la figura 36 [103] se muestra un acoplador óptico 1:2, el cual puede sumar la potencia de dos señales y/o separar la potencia de una señal en dos partes; esto es posible gracias a la ley de reciprocidad que sigue la luz.

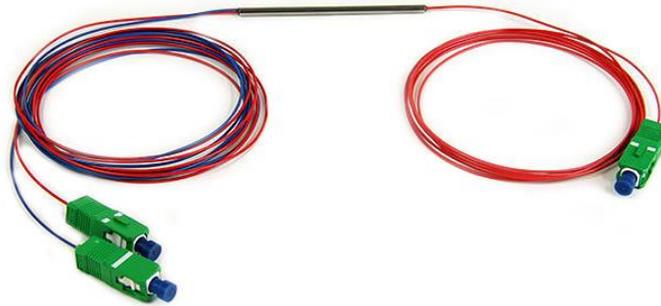


Figura 36 Acoplador óptico 1:2 [103].

Los acopladores ópticos pueden tener diferentes transferencias de energía, con el ejemplo anterior se podrá tener la mitad de la potencia en una rama y la otra mitad en la otra rama o también se podría tener el 90 % de la señal en una rama, mientras que en la segunda rama se tenga el 10 % restante. Esto se logra a través de la longitud del acoplador, por lo que en el proceso de fabricación se tendrá que realizar con el diseño que más convenga.

Otro elemento bastante útil en las redes ópticas es el atenuador, ya que reduce los valores de potencia de la señal de una forma controlada. Los atenuadores en WDM son utilizados como ecualizadores de potencia del enlace, para tener los mismos niveles de potencia en todos los canales de la señal WDM multiplexada. Como se revisó en el apartado de las bandas de comunicación óptica, la fibra sufre atenuaciones de diferente magnitud según la λ de operación, por lo que en WDM una señal compuesta se verá afectada con la distancia recorrida, así como la amplificación que pueda recibir. Sin embargo, en redes ópticas en general, los atenuadores son utilizados para reducir la potencia óptica y de esta forma acondicionar la señal antes de que sea leída o procesada por un elemento que sea sensible a la potencia; el ejemplo más común es en un receptor, debido a que los receptores tienen un umbral máximo de potencia aceptada, el cual si se sobrepasa puede dejar de funcionar correctamente o inclusive dañar al equipo. La figura 37 [104] muestra diversos tipos de atenuadores ópticos con diferentes entradas y salidas. Estos atenuadores son de valores fijos, aunque también existen atenuadores de valores variables.

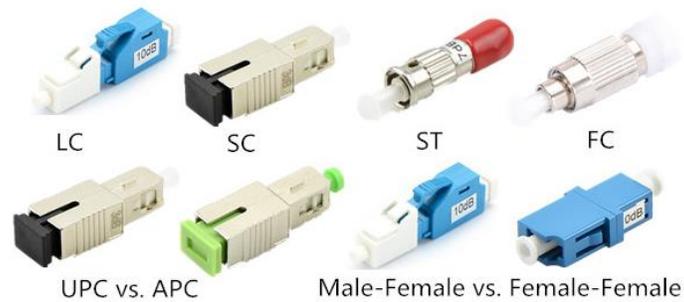


Figura 37 Atenuadores ópticos [104].

El aislador óptico (*isolator*) es un elemento que mejora el rendimiento de las redes ópticas, el cual mantiene la OSNR en sistemas WDM y evita errores de transmisión. Este elemento puede considerarse equivalente al diodo en la electrónica, ya que permite únicamente el paso de la luz en una sola dirección. Ya que evita la propagación de la señal ocasionada por la pérdida de retorno óptica (ORL, *Optical Return Loss*), lo cual es una señal reflejada por los componentes acoplados al medio de la señal propagada. La imagen 38 [105] muestra el funcionamiento del aislador, el cual está conformado por dos polarizadores de luz un rotador de Faraday; se puede apreciar que únicamente la señal de entrada (señal azul) tiene una transmisión completa, mientras que la señal originada por la ORL, es decir, la señal indeseada (señal roja), no es transmitida.

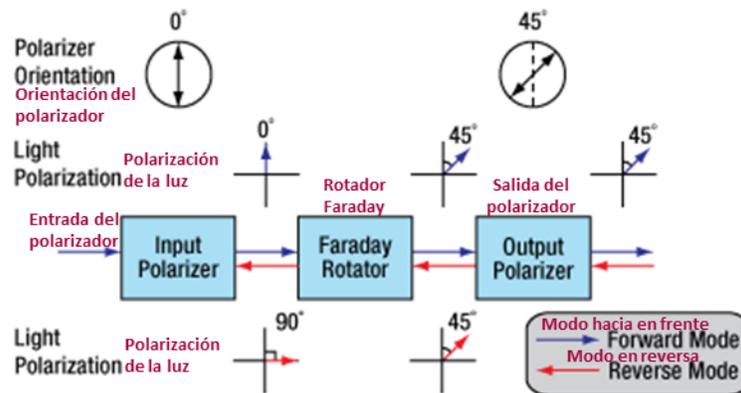


Figura 38 Funcionamiento de un aislador óptico [105].

Existen algunos casos, donde el uso del aislador es imprescindible en la red, ya que el ORL puede ocasionar inestabilidad en el transmisor, además de ruido en el receptor. Especialmente, estos aisladores son utilizados cerca de amplificadores y fuentes de transmisión, ya que por la reciprocidad de la luz es posible agravar el sistema más fácilmente.

Por último, el circulador óptico es un elemento que dirige las señales que entran en él a través de los puertos del propio circulador de manera secuencial. A partir de este elemento se pueden diseñar filtros, multiplexores o módulos que compensan la dispersión (DCM, *Dispersion Compensation module*), por lo que resulta bastante útil. En la figura 39 [106] se puede apreciar el funcionamiento básico de un circulador óptico, se puede apreciar que la señal que entra en un puerto es dirigida al puerto consecutivo. En este caso la señal que entra en el puerto 1 es redirigida al puerto 2, mientras que la señal entrante en el puerto 2 es direccionada al puerto 3, de igual forma la señal entrante en

el puerto 3 es dirigida al puerto 4 y así consecutivamente hasta que el último puerto dirija su señal de entrada hacia el puerto 1; por lo que se puede apreciar que hay un camino secuencial. Los circuladores ópticos se diseñan con el número de puertos según las necesidades de su aplicación, sin embargo, es común que los circuladores ópticos tengan 3 o 4 puertos.

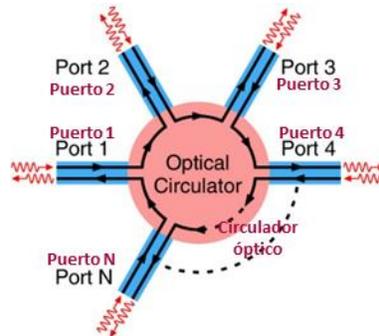


Figura 39 Diagrama de un circulator óptico [106].

3.1.3.2 Interferómetro Mach-Zehnder

Los MZI son muy populares en las comunicaciones ópticas, debido a sus extensas implementaciones en las redes. Los MZI funcionan con la medición del desplazamiento de fase relativo entre dos fuentes coherentes, es decir, que dentro del MZI se desfasan las señales y este desfase se puede utilizar para aplicaciones específicas [107]. En redes de telecomunicaciones los MZI pueden ser diseñados para fungir como multiplexores, moduladores, sensores o incluso switches, por lo que para WDM son muy útiles.

Un MZI básico está compuesto de dos acopladores en serie con un arreglo de 2:2 de 3 dB. El primer acoplador funciona como combinador, mientras que el segundo acoplador funciona como divisor; estos acopladores están unidos con dos hilos de fibra de diferente longitud, la diferencia entre estos dos hilos está seleccionada con el periodo de la señal, para provocar interferencias destructivas y constructivas. La figura 40 [107] muestra un multiplexor de 2 canales creado a partir de un MZI, se puede apreciar que los canales entran al acoplador, el cual manda 2 señales combinadas con los 2 canales con la mitad de potencia por dos caminos ópticos diferentes; por la diferencia de distancia en las ramas del MZI, se produce una interferencia destructiva hacia la salida 1, mientras que en la salida 2 se presenta una interferencia constructiva. Lo que resulta en que la recuperación de potencia completa de la señal.

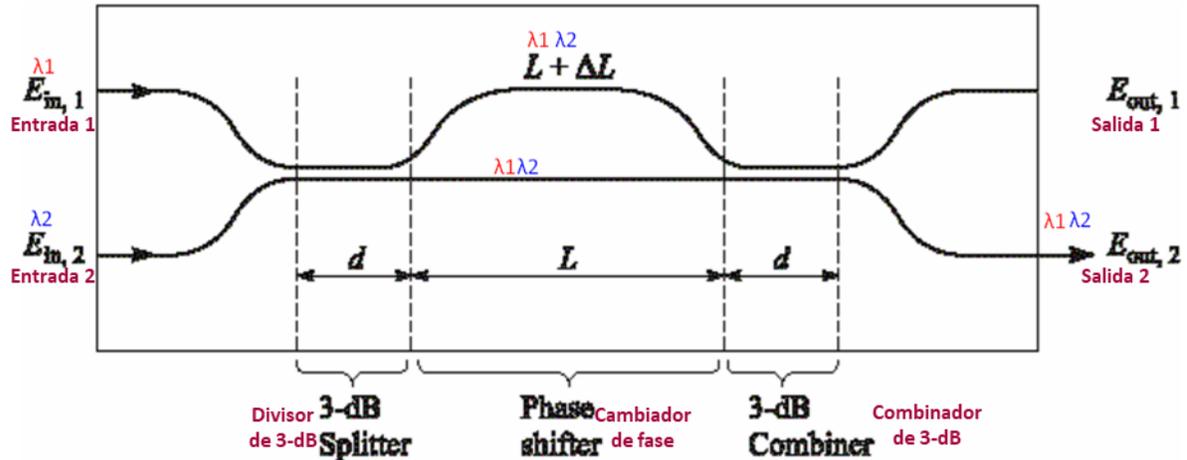


Figura 40 MUX a partir de un MZI [107].

3.1.3.3 Filtros ópticos

Los filtros ópticos son de gran relevancia en los sistemas WDM, ya que ellos permiten el paso sólo a la luz que tenga ciertas propiedades; concretamente para WDM, los filtros ópticos son los que seleccionan las frecuencias de los canales en el sistema, además de que tanto en el transmisor como en el receptor se puede seleccionar la señal con la frecuencia nominal del canal, por lo que gracias a los filtros ópticos es posible evitar interferencias entre canales llevando a WDM a un funcionamiento óptimo. Los filtros ópticos funcionan a través de la absorción de ciertas longitudes de onda o también pueden funcionar con las propiedades reflectivas de la luz.

Los filtros ópticos por sí solos son muy útiles, aunque en combinación con otros elementos pueden formar componentes que tienen funciones específicas en la red. Los filtros ópticos pueden ser la base de multiplexores, también pueden utilizarse como módulos DCM, además de que los filtros ópticos pueden formar módulos funcionales para el enrutamiento óptico en redes WDM, creando una nueva capa lógica a partir de una capa física óptica. Existen diferentes tipos de filtros ópticos, sin embargo, los filtros ópticos más utilizados en sistemas WDM son los filtros TFF, FBG y recientemente los AWG.

3.1.3.3.1 Filtros de películas delgadas (TFF, Thin-Film Filter)

CWDM utiliza TFF, los cuales están compuestos por capas delgadas de materiales sobre un sustrato, con propiedades ópticas diferentes, especialmente, en su índice de refracción; esta diferencia de índices de refracción ocasiona que la luz que incide en este filtro cambie de dirección con cada capa que atraviesa, generando interferencias internas. Por lo que la configuración de las capas internas hará que las componentes de la señal se reflejen, se transmitan o se absorban en el filtro. De esta forma obtenemos que las frecuencias que se requieren pasarán a través del filtro y las restantes serán reflejadas por el filtro. La figura 41 [108] muestra un diagrama del funcionamiento de un TFF, en ella se puede apreciar que la señal incidente (amarilla) tiene dos componentes, las cuales el TFF las divide en la señal transmitida (roja) y la señal reflejada (azul). Es preciso señalar que la señal reflejada y la señal transmitida no necesariamente deben de tener una sola frecuencia, sino que pueden ser señales compuestas de varias frecuencias, es decir, se puede seleccionar una frecuencia central y dependiendo de la cantidad de películas tanto en la pila reflexiva como en la pila del espaciador el ancho de banda del filtro cambiará; entre más películas tenga el filtro, el ancho de

banda será menor. Por lo que, al necesitar un ancho de banda más reducido, como es el caso de DWDM, se necesitarían agregar más capas de las películas, lo que aumentaría el costo del dispositivo, así como su complejidad. Con esta comparación, se aprecia que CWDM y DWDM son tecnologías que operan con el mismo principio, pero que CWDM requiere requisitos menos estrictos, considerándose como la versión económica de WDM.

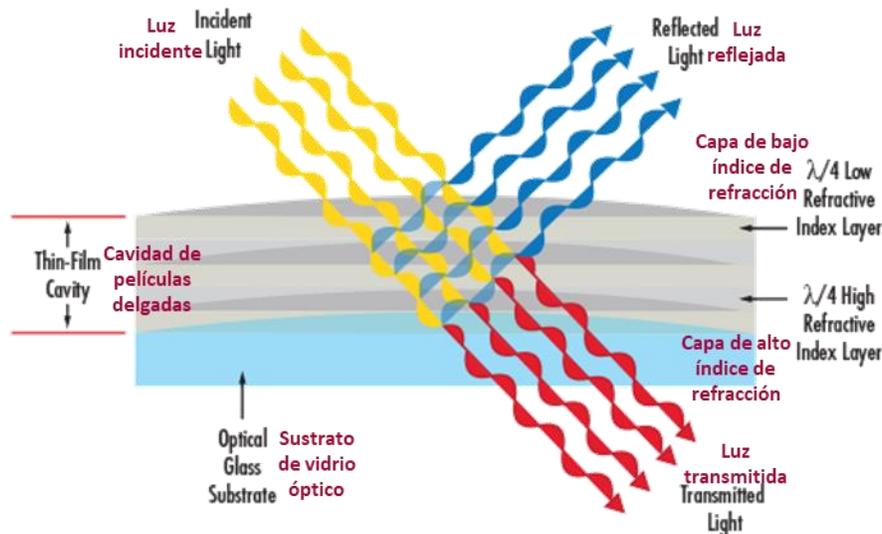


Figura 41 Diagrama de funcionamiento de un TFF [108].

3.1.3.3.2 Filtros basados en rejilla de fibra de Bragg (FBG, *Fiber Bragg grating*)

Los filtros FBG están basados en rejillas que ocupan una región pequeña en el núcleo de la fibra óptica. El funcionamiento de la FBG se basa en la reflexión de Fresnel, que le permite a la luz reflejarse o refractarse cuando pasa a través de la FBG. Esta rejilla se conforma de cambios en el índice de refracción en zonas bien definidas de la fibra, que le permiten reflejar longitudes de onda específicas.

La selección de la longitud de onda que componen a la señal reflejada (Λ_B) por la FBG está dada por la ecuación 6:

$$\Lambda_B = 2n\Lambda \quad (6)$$

Donde:

- Λ_B Es la longitud de onda reflejada por la rejilla de Bragg [nm]
- n Es el índice de refracción del núcleo de la fibra
- Λ Es el periodo del cambio del índice n en la rejilla [nm]

Esto quiere decir que gracias al periodo que se le grabe a la FBG, será la longitud de onda que filtre. La figura 42 [109] muestra el funcionamiento de un filtro FBG, para la cual el periodo está seleccionado de tal modo que se transmite la señal completa a través de la FBG, exceptuando la componente relacionada con el periodo de la FBG, ya que esta es reflejada y se puede recuperar del mismo lado por donde entra la señal antes de ser filtrada.

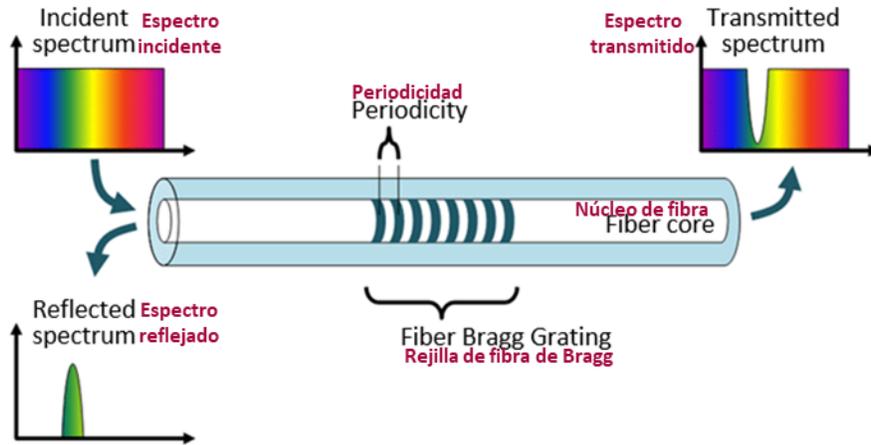


Figura 42 Funcionamiento de un filtro FBG [109].

3.1.3.3.3 Filtros basados en rejilla de guía de ondas en arreglo (AWG, *Arrayed waveguide grating*)

Un AWG es considerado la generalización de un MZI, puesto que se puede considerar como un arreglo de MZI trabajando en paralelo. Un AWG típicamente está formado de tres partes, las cuales son dos regiones de propagación libre (FPR, *Free Propagation Region*) y una matriz de guías de onda, la cual son hilos de fibra de distinta longitud específica para lograr patrones de interferencias de las señales propagadas en la región libre, justo como un MZI.

El filtro AWG es muy llamativo en el empleo de las comunicaciones ópticas, ya que es compacto y altamente integrable dentro de la red. Aunque tienen diversos problemas como el cruzamiento de canales (*X-talk*) no adyacentes, además de un bajo rendimiento en su producción (*yield*), ya que, de los totales fabricados, muchos se encuentran con errores de funcionamiento. La figura 43 [110] muestra el diagrama de funcionamiento de un AWG, en la cual se encuentra funcionando como un DEMUX. La señal de entrada multiplexada pasa primero a través de una FPR, donde el tamaño de su haz se expande debido a la difracción. Luego, la señal expandida se acopla en una matriz de guías de ondas de diferente longitud, los campos que salen de la matriz de guías de ondas están desfasados e interfieren en el segundo FPR, provocando que a la salida del AWG se encuentren los canales individuales de la señal multiplexada, ya que en cada punto de la salida se hace una interferencia destructiva para todos los elementos de la señal, exceptuando el canal de la señal seleccionado, ya que en ese punto en específico se hace la interferencia constructiva para ese canal. En la figura se aprecian los canales recuperados y se están representados con un color.

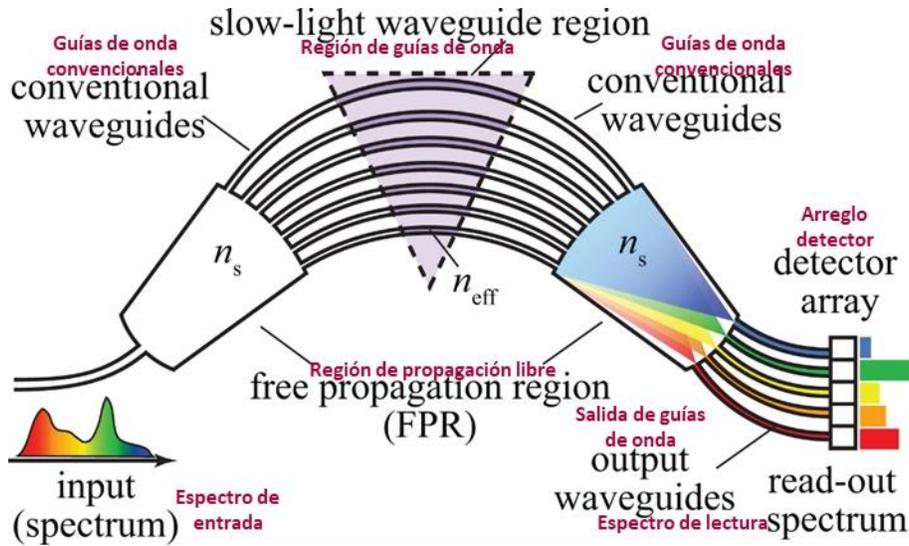


Figura 43 Diagrama de funcionamiento de un AWG [110].

3.1.4 Rendimiento de WDM

Inicialmente WDM era muy atractivo para los ISP por el incremento de la tasa de transmisión que le da a un sistema con su implementación, sin embargo, WDM posee otras características que lo hacen muy integrable en sistemas ya existentes. Una de estas características vitales de WDM es la transparencia derivada de utilizar la luz como portadora de información. La transparencia de WDM se refiere a que no importa el formato que tengan sus redes convergentes, ya que WDM entregará en los puntos finales el mismo formato utilizado, evitando interferencias entre formatos; incluso si en el sistema existen canales con diferentes formatos entre ellos, WDM no se inmuta por la diferencia, sino que se integra sin ninguna dificultad adicional a la implementación. En la figura 44 [111] se muestra un diagrama en el que diferentes formatos se envían y se reciben en un mismo sistema WDM.

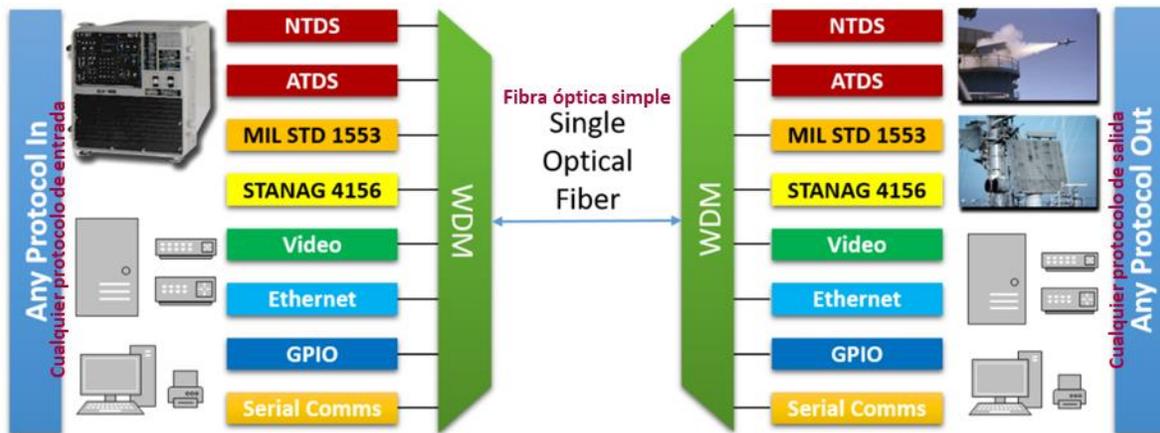


Figura 44 Transmisión de señales con diferentes protocolos a través de una red WDM (Transparencia WDM) [111].

La transparencia funciona porque los canales son tratados como si fueran enlaces punto a punto, es decir, que aun cuando se están transmitiendo diferentes canales por la misma fibra física, cada canal es recuperado por los receptores, que gracias a los filtros ópticos y a sus propiedades de recepción,

solo les es posible recibir una cierta frecuencia de portadora, eliminando de su rango de visión a los canales correspondientes a diferentes longitudes de onda; creando de esta forma la ilusión de tener enlaces punto a punto.

Otra ventaja derivada de la utilización de la luz como señal portadora es que se crea una nueva dimensión para la manipulación del sistema, concretamente para el enrutamiento. Al comienzo de WDM surgieron los módulos funcionales multiplexores ópticos de agregación y eliminación (OADM, *Optical Add/Drop Multiplexer*), que funcionan para extraer ciertos canales en puntos intermedios y transmitir una nueva señal, mediante el mismo canal extraído previamente. Estos dispositivos inicialmente sólo funcionaban con rutas predeterminadas y fijas, aunque posteriormente aparecen los OADM reconfigurables (ROADM, *Reconfigurable OADM*) los cuales ya permiten redefinir los canales que se van a extraer y agregar. La figura 45 [112] muestra un diagrama de funcionamiento de un OADM, el cual extrae dos canales en un sitio, que corresponden a la frecuencia de portadora roja y a la azul, para posteriormente agregar canales de la misma frecuencia extraída. Los demás canales que no se necesitan extraer en el sitio, simplemente pasan a través del OADM. La calidad de los OADM la determinan los filtros ópticos integrados en el módulo, ya que ellos seleccionan las frecuencias que se extraerán y se agregarán al enlace de comunicación.

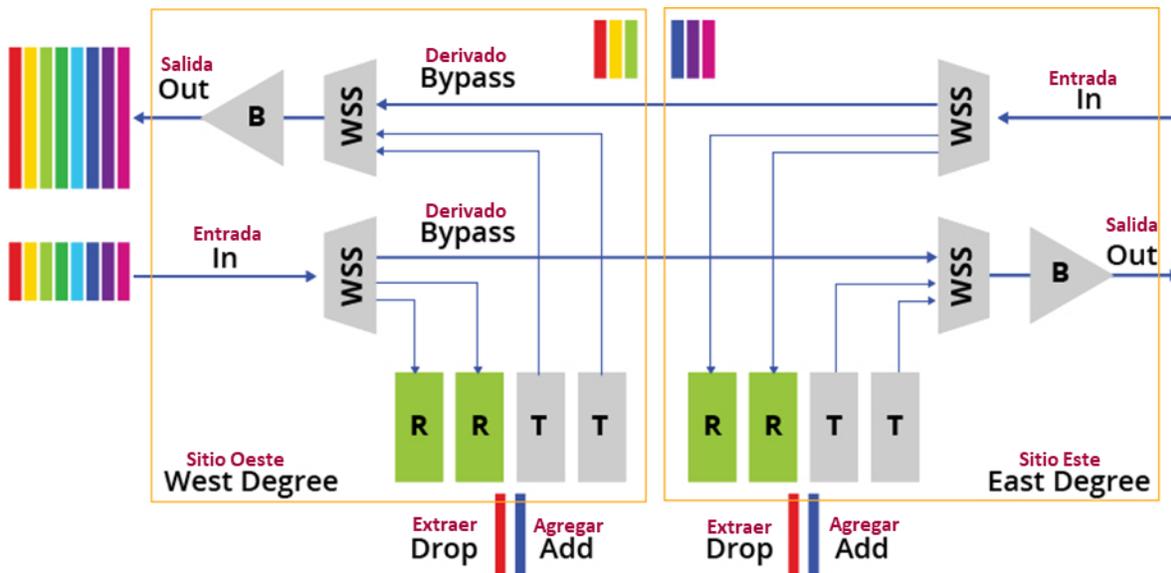


Figura 45 Diagrama de funcionamiento de un OADM [112].

WDM también se caracteriza por alcanzar grandes distancias de transmisión entre puntos de la red. Estas distancias están delimitadas por el coeficiente de atenuación del medio, la cual determina la atenuación de la fibra por cada kilómetro desplegado en el enlace. Típicamente la fibra mayormente utilizada es la que cumple con la recomendación de la ITU G.652, que entre otras cosas dictamina que la atenuación tiene que ser menor a 0.35 dB/Km en λ de operación alrededor de 1550 nm [113], que es donde WDM opera. También, factores como el tipo de modulación utilizado, afectan el alcance que se puede obtener en el enlace; así como, la calidad de los transmisores y receptores ópticos, ya que la potencia transmitida tiene que estar dentro de los valores de la sensibilidad (*sensitivity*) del receptor; aunque generalmente se podría dar un rango de entre 60 km y 100 km de alcance sin la necesidad de un amplificador. WDM alcanza grandes distancias por hacer

uso de amplificadores ópticos, ya que ellos permiten recuperar la potencia de la señal en el enlace a valores óptimos en el que el receptor los puede recibir adecuadamente.

Los amplificadores ópticos abrieron una puerta a la utilización comercial para los sistemas completamente ópticos, ya que como se mencionó previamente, el alcance máximo está alrededor de los 100 km de distancia; por lo que, si se necesitaban enlaces más largos, era necesario pasar al dominio eléctrico para amplificar la señal y posteriormente volver a pasar la señal al dominio óptico para mandar la señal por la fibra óptica. El mayor problema de este procedimiento se presenta en WDM, ya que se le tienen que agregar los MUX y DEMUX, para recuperar los canales individuales de la señal y amplificarlos individualmente, por tanto, implica la conversión óptica-eléctrica-óptica en cada canal, elevando el costo de cada punto de amplificación en función del número de canales WDM. Los amplificadores ópticos, quitan los MUX y DEMUX que se utilizan en la amplificación WDM tradicional, ya que ellos amplifican la señal compuesta de todos los canales, sin la necesidad de conversiones de dominio.

Concretamente los EDFA fueron los impulsores de la comercialización de la tecnología DWDM, ya que el erbio (Er, *Erbium*) posee entre sus propiedades, las características ideales para la amplificación de la banda C, es decir, que sus niveles de energía de amplificación corresponden a las frecuencias de operación de los canales DWDM. La figura 46 [114] muestra un diagrama de bloques del funcionamiento de un EDFA, en él se aprecia como una señal óptica de 1550 nm entra al EDFA, la cual posteriormente es acoplada con una señal de bombeo óptica de alrededor de 980 nm. Esta señal de bombeo le transfiere su energía a la señal DWDM a través de los procesos de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada que se llevan a cabo en el medio activo, que es la fibra dopada con erbio. Finalmente, la señal es filtrada en las frecuencias de la banda C para eliminar el ruido fuera de la banda (*out-band noise*) y residuos de la señal de bombeo o alguna otra componente indeseada fuera de los rangos de DWDM, por lo que a la salida del EDFA se obtiene la señal con las mismas características iniciales, pero con una mayor potencia óptica.

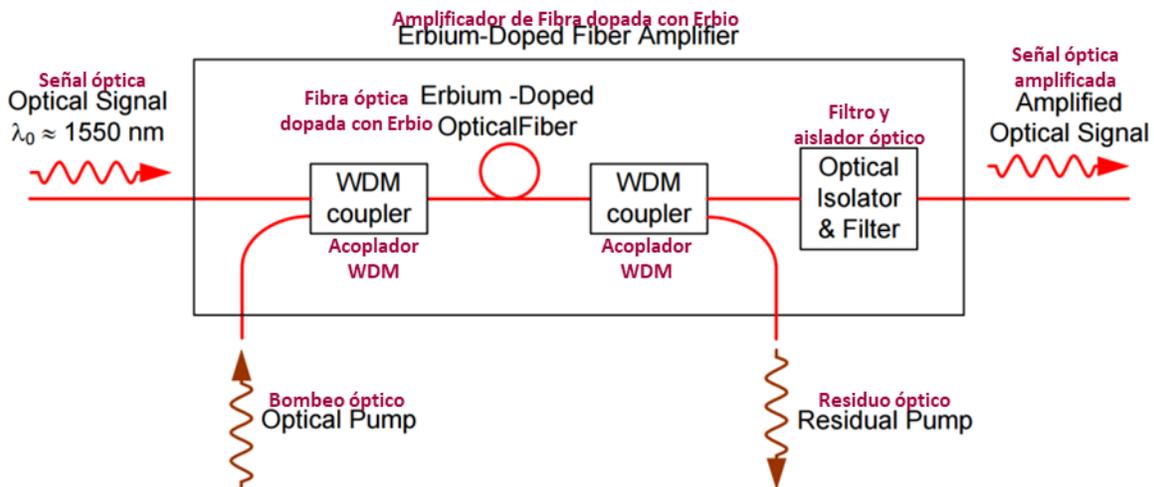


Figura 46 Diagrama de bloques de un EDFA [114].

El éxito comercial de DWDM lo llevó a demandas de tasas de transmisión cada vez mayores, así como a cubrir distancias más grandes, por lo que DWDM se ha extendido de la banda C, ocupando canales fuera del rango de amplificación de los EDFA, ya que los EDFA están delimitados por el

mismo medio activo que origina la amplificación, que es el erbio. Existen otros amplificadores ópticos que funcionan fuera de la banda C y que en general pueden funcionar en cualquier parte del espectro óptico; el más aceptado en el ámbito de las telecomunicaciones es el amplificador RAMAN, ya que ofrece mayores prestaciones. Actualmente los sistemas WDM cuentan con una amplia región de amplificación, gracias a la combinación de EDFA y RAMAN; a esto se le denomina una amplificación híbrida.

Los amplificadores RAMAN se denominan así, por su principio de funcionamiento, que es la dispersión Raman estimulada (SRS, *Stimulated Raman Scattering*), la cual consiste en generar un fotón a la frecuencia de la señal a partir de un fotón de bombeo. Los RAMAN en general poseen varias ventajas sobre los EDFA, como lo es su flexibilidad espectral, ya que pueden operar prácticamente en cualquier banda óptica, además de tener un perfil de ganancia más plano que los EDFA, logrando anchos de banda más amplios de alrededor de unos 6 THz. Una de las diferencias más significativas de los amplificadores EDFA y RAMAN es la distribución de amplificación, ya que los EDFA amplifican sólo en el medio activo, es decir, su ganancia de amplificación está concentrada en la fibra dopada, por lo que, al salir de ella, la amplificación deja de suceder, mientras que los RAMAN amplifican a lo largo de la fibra óptica, distribuyendo de manera más uniforme la potencia óptica. La figura 47 [115] muestra una diferencia de la distribución de la potencia óptica entre EDFA y RAMAN. Se puede apreciar la amplificación puntual de los EDFA y su predisposición a los efectos no lineales por las altas potencias concentradas en la fibra, contrario a los RAMAN que son menos propensos a los efectos no lineales por su distribución de potencia a lo largo de la fibra.

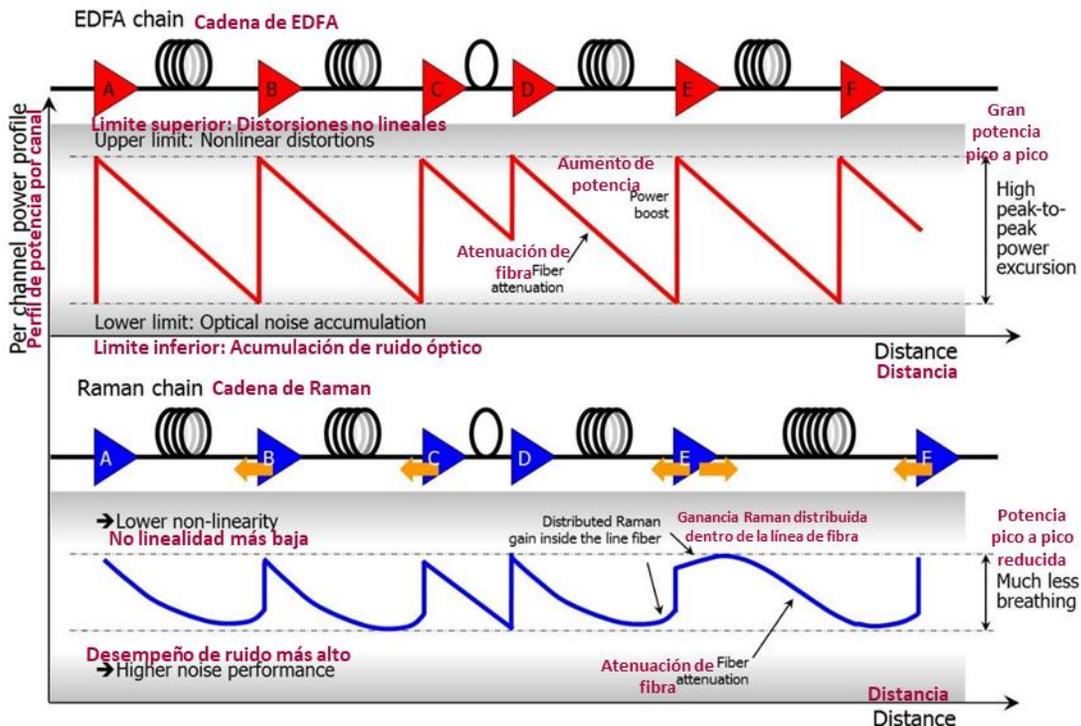


Figura 47 Distribución de la potencia óptica. EDFA vs RAMAN [115].

3.2 Fronthauling con WDM

Revisando la arquitectura de las redes 4G/5G de telecomunicaciones, se aprecia un incremento importante de la tasa de transmisión en la red troncal que intercomunican a las redes de acceso con las de transporte, que es el *fronthaul*. El diseño que se ha planteado en que los equipos transmitan en banda base, beneficia a la parte electrónica, puesto que se reducen los tiempos de procesamiento y los recursos computacionales que se utilicen, aunque la parte de la transmisión se requirita más estrictamente. Las primeras soluciones fue el migrar a un medio óptico, ya que el sistema se beneficia del gran ancho de banda, de las grandes distancias y de la gran velocidad que la fibra óptica ofrece. Esta solución es muy bien recibida en 4G, ya que el *fronthaul* basado en fibra óptica es una respuesta a las altas tasas que requiere CPRI con sus bajas tasas reales de transmisión, ya que la eficiencia espectral de CPRI es muy baja, requiriendo mínimo una velocidad 10 veces mayor en el *fronthaul* a la velocidad que transmite en los UE.

Si bien es cierto que se están desarrollando alternativas para hacer más eficiente la tasa de transmisión en el *fronthaul*, es decir, que están reemplazando el D-RoF en el que pertenece CPRI por tecnología completamente analógica en A-RoF y que además están invirtiendo esfuerzos en el desarrollo de eCPRI, el cual promete tener mejores prestaciones que su tecnología base en CPRI, para mantener la infraestructura de D-RoF; hay que tener en cuenta que los requisitos seguirán aumentando con las redes 5G, ya que los principales escenarios de uso como eMBB, uRLLC y mMTC apuntan a la digitalización de todos los servicios, por lo que 5G es una puerta al desarrollo de ciudades inteligentes que estarán basadas en redes de telecomunicaciones.

Por lo anterior, es lógico tener que hacer más eficiente el *fronthaul* en términos espectrales y de igual forma es imprescindible aumentar la tasa de transmisión en él, independientemente de la solución que se adopte, ya sea A-RoF, D-RoF o un híbrido entre ellas dos. Estudiando las tecnologías que existen en las redes ópticas de telecomunicaciones, se encuentra que WDM puede jugar un papel muy importante en el incremento de tasas y distancias de transmisión, además de otras ventajas revisadas previamente; por lo que WDM y concretamente DWDM se postula como tecnología indispensable para cumplir los requisitos impuestos en el *fronthaul*.

Para redes meramente comerciales que necesiten dar servicios a un público masivo el uso de DWDM será necesario, aunque para redes menos demandantes se podrá utilizar CWDM sin inconvenientes funcionales para esos sistemas en específico, sin embargo, al querer escalar la red, esta estará limitada y muy probablemente será necesario utilizar DWDM para satisfacer las necesidades de una red más grande. Por esta razón, es más atractivo para los ISP implementar DWDM desde el inicio del diseño de las redes ópticas.

DWDM tiene la ventaja de ser una tecnología bien establecida que está muy permeada tanto en las redes comerciales, como en el ámbito de la investigación, por lo que constantemente se encuentra en aras de desarrollo, que se ve reflejado en mejoras de construcción del equipo óptico, tanto en procesos de construcción, como en mejoras de la eficiencia en su diseño, que se traducen en abaratamiento del equipo y en elevar su calidad. Por lo que, utilizar DWDM en el *fronthaul* es asegurar un respaldo por la industria y la academia, ya que esta tecnología tiene una vida útil en los próximos años.

Al considerar que WDM es transparente a formatos de modulación y codificación, se puede asumir que WDM no está fijo a un protocolo en particular, por lo que es multifacético y puede brindar

diferentes velocidades o densidades espectrales según el sistema. De esta forma, diversos grupos de investigación han desarrollado velocidades exorbitantes, integrando elementos o modificando algunos otros, como en [116], donde alcanzan una velocidad de transmisión de 640 Gb/s por cada canal WDM a través de 6400 Km. Esto lo logran utilizando nuevos formatos de modulación, como lo es la adecuación probabilística de doble polarización en modulación de amplitud en cuadratura 16-aria (PS-DP-16QAM, *Probabilistically Shaped Dual-Polarization 16-ary*) y utilizando DSP avanzado; formando un sistema de 5 canales con un espaciamiento de 125 GHz y una tasa máxima de 3.2 Tb/s.

A parte de la velocidad neta en los sistemas WDM, también se trabaja en la parte de la seguridad y el cifrado, como en [117], donde la señal WDM se encripta simulando ruido, debido al efecto del ensanchamiento espectral por la codificación privada de fase caótica (PCPS, *Private Chaotic Phase Scrambling*), que es una encriptación que brinda seguridad en la capa física de los sistemas, específicamente en la capa óptica, con la especial ventaja de funcionar en los sistemas WDM vigentes y con una implementación relativamente barata, que actúa en la red con baja latencia de procesamiento a una alta velocidad de transmisión.

También existen investigaciones para mejorar la eficiencia de los elementos fundamentales que componen a WDM, como en [118], donde se diseñaron multiplexores en cascada basados en MZI, en silicio sobre un aislante, el cual experimentalmente presenta mayor tolerancia a la variabilidad de fabricación.

Los ejemplos anteriores son algunos de muchos otros, puesto que la tecnología WDM cuenta con una amplia comunidad que mejora y ataca los principales inconvenientes de utilizar WDM, por lo que la selección de esta tecnología en un sistema se puede interpretar en escalabilidad hacia el futuro, ya que estos esfuerzos afrontan desafíos actuales y/o que puedan surgir.

Atendiendo a los requisitos puntuales que afronta el *fronthaul*, se puede observar una gran diferencia entre 4G y 5G, esta es la utilización de MIMO masivo en 5G, contra un MIMO tradicional de 4G, dado que MIMO es un multiplicador de usuarios y de distancias en la parte inalámbrica de la red, al utilizarlo de forma masiva, la capacidad requerida se ve muy diferenciada entre 4G y 5G. La implementación de MIMO masivo será beneficiosa en las metas de 5G y DWDM es una tecnología ideal para soportar en la parte óptica la transmisión de este sistema; ya que cada portadora en MIMO masivo puede emparejarse con una portadora en DWDM, con la ventaja de tener anchos de banda variables, según sea la demanda. Además de variar la tasa de transmisión según sea la modulación que se utilice o el DSP que se implemente.

Considerando que los principales escenarios en 5G son variados en diferentes requisitos como lo son la latencia, la confiabilidad, la tasa de transmisión o las conexiones masivas, DWDM es una solución óptima para todos ellos, ya que trata a cada canal como si fueran enlaces independientes debido a la transparencia que proporciona el dominio óptico en el régimen lineal, además de que manda la información de todos los canales en el mismo intervalo de tiempo, por lo que no hay retrasos adicionales al procesamiento de los equipos de red. Asimismo, DWDM cumple notablemente con el concepto de *Network Slicing*, en el que se divide a la red lógicamente según el escenario de uso, obteniendo diferentes topologías lógicas en una misma topología física; ya que es posible asignar pequeños anchos de banda para canales con escenarios destinados a mMTC, logrando una gran cantidad de canales en el sistema. De la misma forma, para escenarios eMBB que

requieren tasas de transmisión muy altas, es posible la asignación de canales con grandes anchos de banda y lograr los requisitos impuestos en este escenario. Como es de notarse, DWDM puede integrar estos escenarios en el mismo sistema, por la característica de una grid flexible.

Una vez definida como principal tecnología en el *fronthaul* a WDM, es importante conocer sus variantes, para tener claro las ventajas y desventajas de implementar cada una. Principalmente existen dos variantes y su diferencia radica en los elementos intermedios, así como en las frecuencias de operación de portadoras en los transmisores y receptores. Los dos tipos de *fronthaul* son el activo y el pasivo.

3.2.1 *Fronthaul* DWDM activo

El elemento principal de un sistema WDM son los MUX y DEMUX, ya que ellos son los encargados de unificar y separar los canales en una sola señal multiplexada que viaja a través de la fibra, ahorrando tendidos de fibra para cada canal. Sin embargo, el elemento fundamental en el *fronthaul* óptico activo es el transpondedor, el cual realiza conversiones de longitudes de onda en ambos extremos de los MUX.

Comúnmente los transmisores y receptores en las comunicaciones ópticas operan en longitudes de onda de 1310 nm, aún si es utilizado DWDM, ya que para transportar cada señal de los transmisores a un canal de DWDM alrededor de 1550 nm se utilizan los transpondedores. Posterior a la conversión de longitud de onda de cada canal, ya es posible hacer la multiplexación para el envío de todos los canales en una misma señal a través de un hilo de fibra óptica. Cabe aclarar que, si se multiplexan señales de la misma longitud de onda, la señal multiplexada resultará ser la interferencia de todas las señales en ella, por lo que la recuperación de cada señal original será imposible.

Generalmente a los componentes ópticos que trabajan en longitudes de onda de 1310 nm u 850 nm, se les denomina como grises, ya que no pueden formar parte de un sistema WDM sin acondicionamiento previo, el cual es la conversión de su señal de 1310 nm a una frecuencia válida para WDM. Coloquialmente WDM es conocido como un sistema coloreado, puesto que cada longitud de onda puede representarse como un color diferente. Así, a la acción de conversión de longitudes de onda que realiza un transpondedor de WDM, coloquialmente se le conoce como colorear al canal.

La figura 48 muestra la arquitectura de un *fronthaul* óptico activo basado en WDM. Del lado izquierdo se tienen a las RRH, que brinda el acceso inalámbrico hacia la red, cada RRH está conectada a través del *fronthaul* óptico activo hacia las BBU que realizan el procesamiento general de la red. Como se puede apreciar, los equipos de red que son las BBU y las RRH tienen como transmisores y receptores ópticos a los transceptores conectables de factor de forma pequeña plus (SFP+, *Small Form-factor Pluggable plus*). Estos SFP+ tienen integrado tanto al receptor como al transmisor y trabajan en la lambda de 1310 nm, es decir, cada uno de los SFP+ de cada componente de la red es idéntico, por lo que se pueden sustituir fácilmente entre ellos sin alguna alteración en el diseño de la red. En esta arquitectura se ha considerado un sistema P2P, es decir, para cada RRH le corresponde una BBU y viceversa, así que a la RRH-1 le corresponde la BBU-1, al igual que la RRH-2 le corresponde la BBU-2, por lo que siguiendo con esta norma llegamos a que la RRH-n le corresponde la BBU-n. Esta correspondencia se determina por la frecuencia de operación del canal, es decir, aunque todos los elementos de red operen a 1310 nm, cada par de elementos de red tendrá que convertir su frecuencia de operación a una en común y diferente entre otros pares de elementos

de red, logrando colorear el canal para su utilización en WDM y al mismo tiempo evitando interferencias por trabajar con frecuencias de operación iguales.

Al ver a la figura 48 en sentido *upstream*, se tiene que los transpondedores de las RRH reciben la señal a 1310 nm y la convierten a una frecuencia válida de DWDM, pero que son diferentes entre ellas, posteriormente se multiplexan en una sola señal para ser enviadas por un mismo hilo de fibra; al final del recorrido de la fibra, un DEMUX recupera cada canal, que es devuelto a la frecuencia de 1310 nm para que el SFP+ de cada BBU correspondiente pueda recuperar la señal de su RRH asignada.

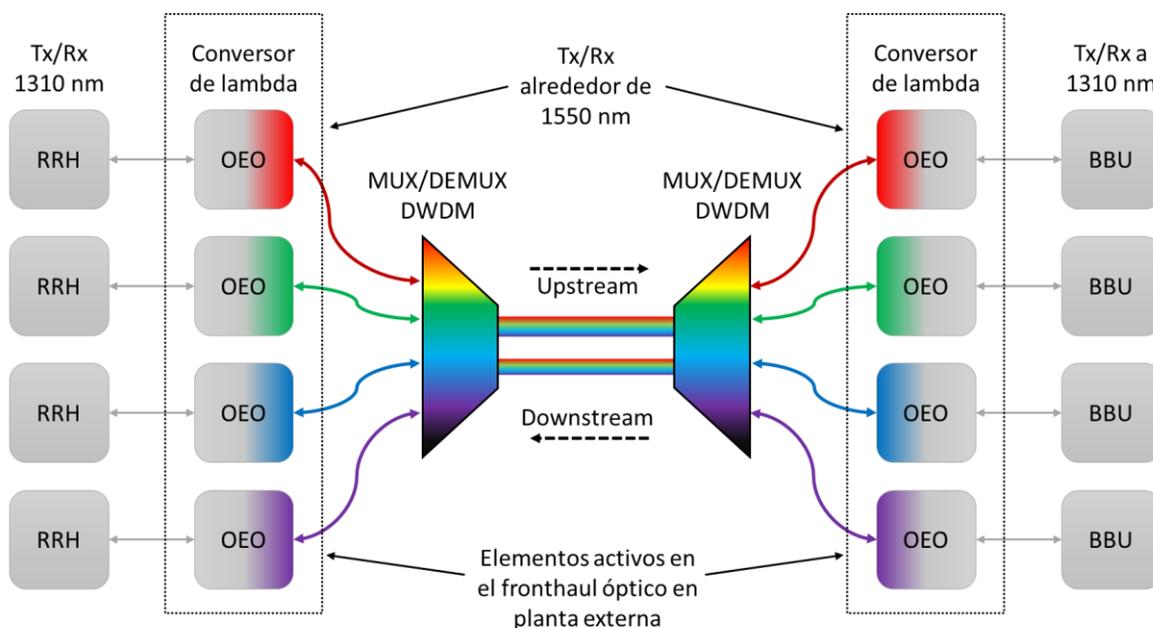


Figura 48 Arquitectura de un fronthaul WDM activo.

La parte activa de un *fronthaul* se refiere entonces a las conversiones de longitudes de onda que se hacen dentro del sistema para colorear los canales y que sea posible la multiplexación sin que existan interferencias entre ellos. Generalmente existen dos tipos de convertidores de longitudes de onda, uno es el optoelectrónico, el cual recibe la señal en el dominio óptico y la convierte hacia el dominio eléctrico, para posteriormente transformarla nuevamente a dominio óptico, pero en una longitud de onda diferente. El segundo de ellos se trata de un convertidor de longitud de onda totalmente óptico, el cual hace la conversión de longitud de onda sin la necesidad de pasar la señal al dominio eléctrico.

Un convertidor optoelectrónico en su forma más sencilla es un dispositivo conformado por un transmisor, un bloque de reloj con recuperación de datos y un transmisor [119]. Este dispositivo actúa como si fuera un punto final de la red, al igual que un punto inicial, por lo que requiere de fuentes de potencia para que le brinden energía y pueda realizar sus funciones. La figura 49 muestra un diagrama de bloques de sus componentes fundamentales, en él se aprecia que tanto en la entrada como en la salida se está trabajando en el dominio óptico, pero con diferentes longitudes de onda, mientras que el procesamiento interno es totalmente eléctrico.



Figura 49 Diagrama de bloques de un transpondedor optoelectrónico.

Tanto el receptor como el transmisor deben de coincidir con la modulación utilizada en el sistema, por consiguiente, la complejidad de un transponder optoelectrónico está ligada directamente con la modulación ocupada en el sistema, además de que no todos los transpondedores podrían ocuparse en cualquier sistema, por lo que las diferentes modulaciones en los sistemas ópticos resultan en una limitante en la flexibilidad de los transpondedores. Es importante señalar que generalmente las modulaciones en los sistemas ópticos tradicionales consisten en modulaciones de intensidad y detección directa (IM/DD, *Intensity Modulation / Direct Detection*), que son las modulaciones en amplitud con formatos como: sin regreso a cero (NRZ, *Non Return to Zero*) o con regreso a cero (RZ, *Return to Zero*), los cuales eran utilizados ampliamente; pero con el desarrollo de nuevos formatos y modulaciones, se encuentran en desuso por una baja eficiencia espectral respecto a los nuevos.

El bloque intermedio del transpondedor optoelectrónico tiene la función de extraer el reloj de la señal proveniente del receptor y reformarlo para realizar la lectura en el tiempo correcto de cada símbolo de la señal, es decir, que en la parte eléctrica se interpreta la señal recibida comportándose al mismo tiempo como una nueva fuente de información que necesita retransmitirse.

En el transmisor del transpondedor se modula la señal eléctrica que previamente se recogió como fuente de información en la señal óptica, esta modulación tiene que ser igual a la modulación utilizada en el receptor del sistema para que la señal captada pueda leerse correctamente, la nueva modulación se tiene que hacer con la nueva frecuencia de operación de la portadora óptica, logrando así, la conversión de longitud de onda. Es de esta forma como se puede apreciar que un transponder optoelectrónico trabaja con los principios de un repetidor con el agregado de interpretar la señal y modularla en una nueva frecuencia de operación.

Es común que los transpondedores optoelectrónicos comerciales cuenten con técnicas como: reamplificación, remodelación y resincronización, las cuales se conocen como tecnología 3R, logrando que la distancia de transmisión de la señal óptica pueda ser mayor que antes, puesto que aprovechan el punto de la conversión de longitud de onda como un punto de regeneración y amplificación de la señal.

Los transpondedores optoelectrónicos se definen a través de su electrónica, puesto que esta determina los límites de operación; ya que la velocidad de transmisión de un sistema puede verse afectado si la tasa de transmisión es más grande que la velocidad del procesamiento del transpondedor, dado que se pueden presentar cuellos de botella si la electrónica no es lo suficientemente rápida. Esto último, aplica más para sistemas de modulación coherentes, donde el procesamiento exige mayor complejidad y los tiempos de procesamiento son mayores que en sistemas IM/DD.

La otra alternativa para lograr conversiones de longitudes de onda y colorear canales en WDM, es la utilización de convertidores de longitudes de onda totalmente ópticos, los cuales trabajan con

amplificadores ópticos de semiconductor (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*), ya que los SOA tienden a tener altas no linealidades que les permiten desarrollar procesos físicos de conversión de longitud de onda como: la modulación por cruzamiento de ganancia (XGM, *Cross Gain Modulation*), modulación por cruzamiento de fase (XPM, *Cross Phase Modulation*) y el mezclado de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*). Dichos procesos permiten una conversión de longitudes de onda altamente eficientes. Los SOA se comportan no linealmente gracias a la saturación. La ganancia de un SOA se satura a medida que se le aumenta el nivel de potencia óptica, por lo que es posible modular la ganancia del amplificador con una señal de entrada y a partir de ahí, realizar los procesos para la conversión de longitud de onda [120].

Básicamente la conversión de longitud de onda a través del SOA se da porque la saturación permite grabar en el material a la densidad de portadores que se determina por la entrada de la señal modulada, es decir, que la señal de la λ_s inicial graba su información en el material, por lo que el SOA le transmite esta información a una segunda señal, que originalmente es de onda continua, con la frecuencia de operación de salida. Para que el SOA realice XGM dos señales deben de insertarse en el SOA, que son: la señal de bombeo y la señal a ser convertida, también llamada sonda. La señal de bombeo debe de estar modulada en amplitud, mientras que la sonda es una señal de onda continua. La figura 50 [121] muestra el funcionamiento de un convertidor de longitud de onda a través de un SOA que realiza XGM, en la cual se pueden apreciar dos casos de configuración, en el primero se realiza únicamente la conversión de longitud de onda, mientras que en el segundo se conserva tanto la primera señal como la señal convertida.

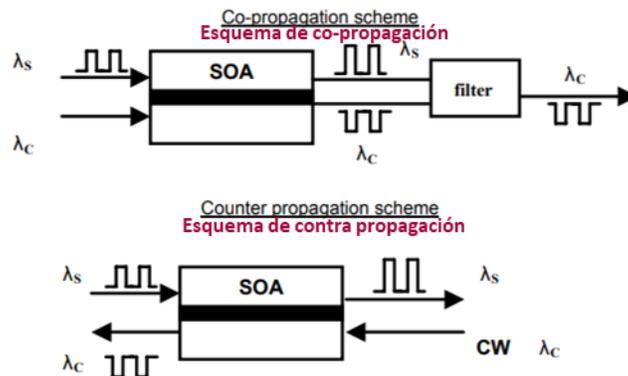


Figura 50 SOA en configuración XGM [121].

Cuando la señal de bombeo está en un estado de baja potencia, el SOA se encuentra en la región lineal, por lo que no se saturará y le dará ganancia sin saturación a la sonda. En niveles altos de la señal de bombeo, es decir, de alta potencia, el SOA se saturará y la señal de la sonda experimentará una ganancia menor. El resultado es una transferencia de energía inversa a la señal de entrada, por lo que XGM actúa como un inversor, pero sobre una nueva longitud de onda. Posteriormente se le puede acoplar un filtro para únicamente permitir la transmisión de la señal con las frecuencias deseadas como en el primer caso o seguir una configuración que permita tener ambas señales, como es el segundo caso.

XGM se considera eficiente en conversiones de longitud de onda, pero tiene el inconveniente de degradar la relación de extinción (XR, *Extinction Ratio*), por lo que su uso se ve limitado en cascada, ya que puede limitar la distancia de transmisión del sistema. Una alternativa para evitar la

disminución de XR es la utilización de XPM, también conocido como interferómetro de conversión de longitud de onda basado en XPM.

XPM se basa en la relación del índice de refracción en la región activa del SOA con su densidad de portadores, de esta forma una señal de entrada que agota la densidad de la portadora modulará el índice de refracción, logrando con esto, una modulación en fase a la señal de onda continua con una nueva longitud de onda de operación. La figura 51 [121] muestra la configuración de un interferómetro basado en XPM, en la cual se acoplan tanto la señal de entrada y la señal de onda continua operando en la frecuencia de conversión, para posteriormente pasar por el interferómetro con SOAs en ambas ramificaciones; en la salida se tiene un acoplador que gracias a las interferencias y el proceso no lineal de los SOAs, la señal de onda continua contendrá la información de la señal original, con la ventaja de escoger la salida con la señal invertida o la no invertida.

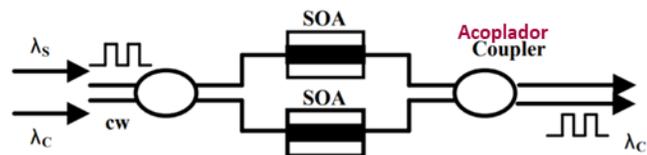


Figura 51 SOA en configuración XPM [121].

En XPM, la luz se divide en dos caminos con SOA, para que exista un cambio de fase relativo. Así, cuando se acoplan los dos caminos, se producirán interferencias constructivas y destructivas en relación con la diferencia de fases entre ambas ramificaciones. En XPM es posible escoger entre la salida inversora y no inversora, a través de ajustar la corriente de inyección en los dos SOA o sintonizando la fase en la guía de onda con elementos externos.

Los convertidores de longitud de onda totalmente ópticos no están limitados en velocidad como los transpondedores optoelectrónicos, que se ven restringidos por su velocidad de procesamiento, ya que los SOA tienen gran no linealidad y relajación ultra rápida, es decir, que entran y salen de los puntos de saturación en tiempos muy cortos, que se traduce en la conversión de longitudes de onda a tasas extremadamente altas.

Básicamente, existen dos tipos de convertidores de longitudes de onda, los optoelectrónicos y los completamente ópticos (*All-optical wavelength conversion*) descritos anteriormente. Sin embargo, los convertidores optoelectrónicos comercialmente son más utilizados que los convertidores completamente ópticos, puesto que, el principio de su funcionamiento ofrece funciones extra que brindan beneficios a la red, como mayor alcance en distancia y flexibilidad. Este segundo atributo es bien recibido en las redes comerciales, puesto que comúnmente en redes de fibra óptica de corto alcance ya se ha implementado fibra multimodo. En este tipo de casos, el convertidor optoelectrónico se integra óptimamente, puesto que aparte de realizar la conversión hacia una longitud admitida en WDM, también le es posible realizar la conversión de fibra multimodo a monomodo. Esto lo logra debido a que el convertidor optoelectrónico puede admitir diferentes transceptores ópticos, es decir, diferentes SFP+. Tomando en cuenta que diferentes SFP+ pueden transmitir diferentes protocolos en su modulación como: CPRI, Ethernet o el protocolo de canal de fibra (FCP, *Fibre Channel Protocol*); un convertidor optoelectrónico también es capaz de hacer conversiones de protocolos [122].

Como se puede apreciar, la principal característica del *fronthaul* WDM activo es el convertidor de longitudes de onda, ya que este proceso requiere energía para lograr el funcionamiento.

3.2.2 *Fronthaul* pasivo

El diseño de las redes de telecomunicaciones suele estar hecho con base en el cableado estructurado, pues este le da una óptima organización que le brinda la mayor eficiencia a la red planteada. En el cableado estructurado se pueden dividir las redes en dos tipos muy generales, las cuales son: planta interna y planta externa. Estas dos generalizaciones son redes que se encuentran ya sea dentro o fuera de edificios respectivamente. El *fronthaul* óptico por la ubicación que toman sus componentes se encuentra dentro de estas dos categorías. Sin embargo, el *fronthaul* toma mayor relevancia en la planta externa, puesto que, visto desde la parte de: inversión, mantenimiento y operación, el *fronthaul* demanda mayores recursos en planta externa comparado con la planta interna.

La diferencia entre una red pasiva y una red activa es el consumo de energía en su planta externa, ya que una red pasiva no tiene consumo de energía a diferencia de la activa, por lo que una red pasiva puede operar sin tener algún tipo de alimentación aparte de la que recibe en su planta interna. Revisando el funcionamiento del *fronthaul* WDM activo, se puede apreciar que el consumo de energía lo recibe el conversor de longitud de onda, por lo que en el *fronthaul* WDM pasivo, este elemento desaparece, obteniendo una planta externa completamente pasiva.

Al no tener el conversor de longitud de onda, el *fronthaul* pasivo debe de ser diseñado de manera diferente para evitar las interferencias que solucionaba el transpondedor; por lo que el coloreado del canal se hace desde el transmisor, es decir, la frecuencia de operación de WDM se selecciona en cada transmisor y no se cambia en ningún punto intermedio de la red hasta que le llega al receptor, por consiguiente, el receptor también debe operar en la frecuencia del canal WDM seleccionado. Estos transmisores y receptores de igual forma que en el *fronthaul* activo están contenidos en los SFP+, pero los que se utilizan en el *fronthaul* pasivo se denominan como SFP+ WDM, ya que operan en frecuencias admitidas en WDM. Además, estos SFP+ WDM son más específicos, ya que indican si trabajan con CWDM o DWDM, es decir, que su nombre correcto es SFP+ CWDM o SFP+ DWDM, según sea el caso.

Con este diseño del *fronthaul*, se eliminan los transpondedores intermedios de la red, reduciendo el CAPEX y el OPEX, ya que se reducen los elementos intermedios de la red, además de que se ahorran los gastos del consumo de energía. Dejando como único elemento intermedio de la red al MUX, que es un elemento totalmente pasivo.

Como se mencionó previamente, el transmisor y el receptor funcionarán en la frecuencia de algún canal WDM, por lo que habrá pares de SFP+ WDM en elementos de cada extremo de la red. Al igual que en el *fronthaul* activo, cada BBU tendrá su respectiva RRH o viceversa, así que cada par de estos elementos tendrá un SFP+ WDM diferente en frecuencia entre los pares para evitar interferencias. La figura 52 muestra un *fronthaul* óptico WDM pasivo, donde cada canal WDM está representado con un color diferente. Es de relevancia notar que el canal está coloreado de inicio a fin. Como ejemplo, se tiene al canal 1 que conecta a la RRH-1 con la BBU-1; este canal se multiplexa con los demás canales en el MUX para ser transmitido a lo largo de un solo hilo de fibra como una sola señal, posteriormente en la demultiplexación se recuperan los canales con sus frecuencias originales, por lo que, el canal 1 llega con la frecuencia del canal WDM.

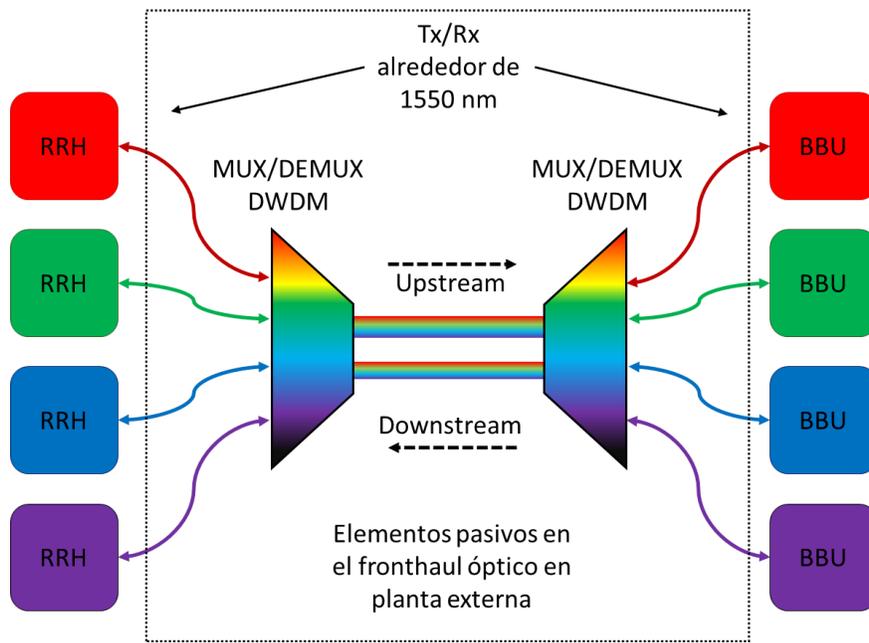


Figura 52 Fronthaul WDM pasivo.

Entonces, se puede apreciar que los elementos más importantes en el *fronthaul* WDM pasivo son los SFP+ WDM, ya que ellos eluden las conversiones de longitudes de onda, en consecuencia, no existen elementos activos dentro del *fronthaul*.

Estrictamente, una red totalmente pasiva no contiene amplificadores, ya que ellos recuperan los niveles de potencia de la señal a través de una fuente de energía, por lo que el principal inconveniente de este tipo de redes son las atenuaciones que sufre la señal en el medio y en los elementos pasivos. Una herramienta sumamente importante en el diseño de las redes pasivas son los presupuestos de potencia (*Power Budget*), ya que ellos determinan los niveles de potencia aceptables de la señal transmitida para su adecuada recuperación en el receptor.

Para realizar un presupuesto de potencia es necesario tener la hoja de especificaciones técnica de todos los componentes que se utilizarán en el enlace, así como tener claro qué elementos compondrán a la red, la cantidad de ellos y conocer su ubicación exacta de cada uno dentro del enlace. Comúnmente el presupuesto de potencia se calcula en decibeles, ya que brinda comodidad en las relaciones de ganancia y pérdidas, puesto que cada elemento pasivo tiene pérdidas de inserción, es decir, que genera pérdidas de la potencia óptica al acoplarse con el medio. Estas pérdidas no son valores fijos o absolutos, sino que son relativos según su potencia; por lo que el decibel indica la relación entre la potencia de entrada con la potencia de salida, en este caso, la relación es de la señal con la potencia original antes de acoplarse con el elemento y la señal que sufrió pérdidas en la potencia después de acoplarse a algún elemento pasivo. Por la definición de los decibeles y las propiedades de los logaritmos, es posible trabajar con sumas y restas en el presupuesto de potencia. Convencionalmente las relaciones de las pérdidas de potencia se manejan con restas, mientras que las relaciones de ganancia se representan con sumas.

El presupuesto de potencia se realiza según las circunstancias de la red, ya que, en el despliegue inicial, la ventaja principal es que se pueden elegir todos los elementos de la red, principalmente a los transmisores y receptores que más convenga, mientras que, en una red heredada, la

infraestructura de red ya está en su mayoría y sólo bastaría realizar algunas modificaciones para acondicionarla a las nuevas necesidades. Históricamente, las redes de telecomunicaciones al evolucionar en generaciones han mantenido sus redes heredadas, realizando modificaciones para lograr convergencias entre generaciones o incluso montando la nueva generación en la infraestructura heredada, por lo que 5G no es la excepción y se espera que predominen las redes 5G en la infraestructura de 4G sobre una infraestructura diseñada en su totalidad para redes 5G. Con esta premisa, se puede deducir que el presupuesto de potencia se realizará en su mayoría para redes con transmisores y receptores ya instalados en la red, por lo que será de prioridad mantenerlos y modificar en lo posible únicamente a los elementos intermediarios.

Para evitar inconvenientes en el funcionamiento de la red, es de importancia realizar el presupuesto de potencia considerando el peor de los escenarios, es decir, considerar que los elementos presentan siempre la mayor atenuación, así como si el transmisor siempre operara con la menor potencia posible o que el receptor captara la menor potencia de su umbral. Además, se debe de incluir un margen de pérdidas por algún elemento indeterminado, como lo son las variaciones del comportamiento de las piezas ópticas debido al deterioro a lo largo del tiempo o al crecimiento de la red, de esta forma se prevén posibles cortes de servicio y se le da una vida útil más larga al enlace.

Las redes pasivas tienen una distancia finita dentro del funcionamiento óptimo, en consecuencia, es crucial conocer la distancia máxima, ya que, si el enlace requiriera una distancia mayor, la red pasiva ya no sería estrictamente pasiva, puesto que se necesitaría implementar amplificadores para que la potencia óptica permita alcanzar la distancia requerida. El presupuesto de potencia es una herramienta que puede obtener la distancia máxima de un enlace al emplearse con la siguiente fórmula:

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{(Tx_{m\acute{i}n} - Rx_{m\acute{i}n} - M) - (A) - (A_E * N_E) - (A_C * N_C)}{A_{fibra}} \quad (7)$$

Donde:

$D_{m\acute{a}x}$	Distancia máxima del enlace pasivo [Km]
$Tx_{m\acute{i}n}$	Potencia mínima en el transmisor [dBm]
$Rx_{m\acute{i}n}$	Sensibilidad mínima en el receptor [dBm]
M	Margen de potencia [dB]
A	Atenuaciones de los componentes [dB]
A_E	Atenuación de empalme [dB]
N_E	Número de empalmes en el enlace
A_C	Atenuación de conector [dB]
N_C	Número de conectores en el enlace
A_{fibra}	Coefficiente de atenuación en la fibra óptica [dB/Km]

En el caso del *fronthaul* WDM pasivo, las atenuaciones de los componentes equivaldrían a las pérdidas ocasionadas por el MUX y el DEMUX. Como se puede notar en la ecuación 7, el coeficiente de atenuación de la fibra es la que influye en gran parte de determinar la mayor distancia que puede alcanzar el enlace pasivo, sin embargo, hay que recordar que DWDM opera en la banda C, rango de alrededor de 1550 nm, donde se presentan las menores atenuaciones en el medio de todo el espectro óptico. Por lo que, escoger DWDM sobre CWDM resulta en alcanzar mayores distancias en el enlace.

Un parámetro fundamental para considerar en el desempeño del *fronthaul* y en cualquier enlace es el BER, que es la relación del número de bits recibidos erróneamente con el número total de bits enviados. Este parámetro indica cuando un bit debe de ser retransmitido a causa de alguna pérdida, por lo que, lo mejor para una red es que el BER se encuentre lo más bajo posible, es decir, evitar retransmisiones, ya que esto afecta directamente la velocidad del enlace. La principal causa del BER en enlaces ópticos es la baja relación de señal óptica con el ruido (OSNR, *Optical Signal to Noise Ratio*). Esto está relacionado directamente con la potencia y en conjunto con la distancia. Comúnmente en los sistemas actuales de telecomunicaciones se emplean técnicas que ayudan a la reducción del BER, estos métodos se conocen como correcciones de errores hacia adelante (FEC, *Forward Error Correction*). Implementar FEC en los enlaces trae ventajas como disminuir la potencia en el transmisor, disminuir la sensibilidad en el receptor, reducir el BER y/o aumentar la distancia máxima de un enlace. Por lo que, en el caso del *fronthaul* pasivo resulta conveniente aplicar algún FEC o DSP que permita lograr distancias más largas.

El diseño completo de las redes 5G implica la densificación de antenas en áreas reducidas, dejando redes de *fronthaul* con distancias relativamente cortas, a distancias máximas de 20 km. Aunado a esto las comunicaciones ópticas en los últimos años han desplegado redes PON, las cuales operan en un rango de entre 10 km y 60 km sin ningún tipo de alimentación de energía intermedia, por lo que la utilización de tecnología pasiva en el *fronthaul* resulta bastante atractiva, ya que hay antecedentes de redes comerciales que alcanzan distancias similares a lo requerido en el *fronthaul* con prestaciones similares.

De lo anterior, se puede resumir que un *fronthaul* WDM pasivo es la opción más viable en términos de funcionamiento y gastos de CAPEX y OPEX; ya que se restan los elementos activos y se abarata la red. Asimismo, se cumplen con los requisitos impuestos tanto en capacidad como en distancia; por lo que WDM pasivo cuadra con lo estipulado con 5G, además de que con técnicas de FEC o con la agregación de DSP se puede mejorar el rendimiento general de la red. Únicamente, se debe tener en cuenta que, si en un futuro se quiere escalar la distancia de la red, la limitante sería la distancia máxima calculada por el presupuesto de potencia, por lo que muy probablemente se le tendría que adicionar un amplificador o en su defecto reemplazar el SFP+ WDM con potencias más altas en transmisión y rangos de aceptación más bajas en el receptor.

Capítulo 4. Desarrollo experimental

Con el propósito de cumplir los objetivos impuestos para este trabajo de investigación, se ha diseñado una red de *fronthaul* para obtener resultados que pueden analizarse desde la implementación, la cual brinda mayor certeza para una proyección y un desarrollo de una red formal de *fronthaul*.

Este capítulo presenta el diseño que se va a seguir para la implementación del *fronthaul* óptico pasivo. También presenta y describe los elementos de red que la componen, así como el material necesario para su implementación como conectores o componentes que a priori no son tan determinantes para la red, pero sí imprescindibles. En este apartado también se describe el procedimiento experimental necesario para una implementación exitosa, así como las pruebas que evalúan el desempeño de la red y determinan la viabilidad de transformar la red prototipo a una red completamente funcional con aplicaciones en los principales escenarios de uso para una red 5G con soporte para la tecnología 4G.

4.1 Estructura de la red

La red de fibra óptica planificada para un *fronthaul* pasivo es parte de un prototipo de red con características capaces de soportar servicios y escenarios de 4G/5G. El diseño de la red está basado en la arquitectura C-RAN. El cual separa a los BBU de los RRH del mismo sitio físico. Estos dos elementos se encuentran interconectados mediante una red denominada *fronthaul*, la cual puede tener como medio el cobre, la fibra óptica o el medio inalámbrico.

La configuración de C-RAN pensada para este trabajo de investigación es la de Hotel BBU, la cual consiste en crear un espacio físico centralizado compuesto de BBU, mientras que los RRH se encuentran en otro punto diferente esparcidos para crear un clúster capaz de cubrir un área más grande. La configuración de Hotel BBU establece que los recursos de cada BBU se asignarán a un RRH en específico, sin la posibilidad de intercambiar recursos entre RRH o BBU, es decir, a cada RRH le corresponde un BBU. Por lo que se puede interpretar como si se tuviera un enlace lógico punto a punto entre cada uno de los BBU con cada uno de los RRH.

Como parte de la propuesta de este trabajo de investigación, se ha elegido a la fibra óptica como medio principal para el *fronthaul*, ya que de los tres medios mencionados anteriormente es el más indicado para solventar las características que el *fronthaul* debe de poseer para cumplir con los requisitos de la tecnología 4G/5G explicados en el capítulo 2 de este trabajo de investigación.

Aunado a la selección del medio, la principal tecnología óptica elegida para que el *fronthaul* funja su función como red de transporte en C-RAN es WDM, puesto que brinda capacidades como flexibilidad, transparencia y gran capacidad. WDM es muy conveniente como tecnología en un *fronthaul* óptico, debido a que WDM brinda la capacidad de simular conexiones lógicas punto a punto, que corresponden a la configuración seleccionada en C-RAN, la cual es BBU Hotel. Con WDM se podrá seleccionar para cada canal un par de dispositivos terminales en la red del *fronthaul* óptico pasivo, es decir, un canal óptico conectará un BBU a un RRH. De esta forma se define que el límite de BBU y RRH está directamente relacionado con el número de canales que el sistema WDM soporte.

Al ser un diseño para un prototipo de *fronthaul* óptico pasivo, dos canales son suficientes para corroborar si es viable la solución pasiva y escalarlo a más canales para brindar un servicio más

robusto, sin embargo, se ha optado por incluir en una primera instancia 4 canales DWDM. Se ha escogido DWDM sobre CWDM por los mayores beneficios que ofrece, principalmente por el estrecho espaciado inter-canal que tiene comparado con CWDM y por la utilización predominante en nuevas redes de telecomunicaciones ópticas. Esta diferencia es crucial, debido a que anteriormente se determinó que el número de canales delimitaba el número de BBU y RRH con la que el sistema puede contar. Por lo que, para una proyección hacia una red formal, CWDM es insuficiente, mientras que DWDM gracias a sus avances y concretamente a su flexible grid puede cumplir una función óptima para el propósito del *fronthaul*. Además, se tiene que recordar que los esfuerzos de la academia como de la industria para mejorar DWDM siguen vigentes y es posible que en el futuro se reduzca aún más el espaciado inter-canal de DWDM, lo cual en CWDM es improbable, puesto que los canales son fijos y no son flexibles o particionales como lo son en DWDM.

En las redes comerciales de transporte óptico de tecnología WDM comúnmente se utilizan espaciados de 100 GHz, aunque esto no es absoluto, ya que varía el espaciado inter-canal según los requerimientos de capacidad de la red óptica. Al tener una red pensada para 4 canales DWDM, el espaciado espectral puede ser un poco más relajado, por lo que para esta red se ha considerado un espaciado inter-canal de unos 200 GHz. Una vez definido el espaciado espectral, hay que elegir el rango en el que se encontrarán los canales, para esto se ha seleccionado a los canales nones empezando desde el 29 y llegando hasta el 35. La tabla 6 muestra a los canales seleccionados para el *fronthaul* óptico pasivo, los cuales son: 29, 31, 33 y 35. En ella también se muestra su frecuencia y su longitud de onda correspondiente.

Tabla 6 Canales seleccionados para el *fronthaul* óptico pasivo.

Canal	Frecuencia [THz]	Lambda [nm]
29	192.90	1554.13
31	193.10	1552.52
33	193.30	1550.92
35	193.50	1549.31

Al ser una red experimental con fines de investigación sobre su rendimiento y cualidades para una implementación que atienda necesidades específicas e innovadoras. Esta red no tiene destinos fijos, es decir, no es imprescindible que los puntos finales se encuentren en un sitio en específico, pero por su naturaleza experimental sí debe de cumplir con una distancia mínima y de ahí determinar la viabilidad de su alcance, para posteriormente establecer el rango de distancia en el que la red puede operar óptimamente y cuáles serían los umbrales en los que la señal o el servicio resultaría degradado en función de la distancia. Por esta razón, se ha considerado un *fronthaul* de distancia variable, el cual tendrá la capacidad de crecer o decrecer la distancia para analizar cómo es que la distancia puede influir en el sistema, además de determinar que fenómeno en concreto es el que afecta directamente al servicio o a la señal óptica.

Para puntos finales del *fronthaul* se han seleccionado a las dos entidades participantes del trabajo de investigación: el Instituto de Ingeniería (IINGEN) y la Facultad de Ingeniería (FI); ambas instituciones pertenecientes a la UNAM, ubicadas en Ciudad Universitaria. El primer punto en el

IINGEN se ubica en el edificio 18 en el laboratorio de Telecomunicaciones, mientras que el segundo punto de la FI corresponde al laboratorio de Radiofrecuencia en el edificio Luis G. Valdés Vallejo.

Gracias a la información recibida por parte de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (DGTIC) de la UNAM sobre la distribución de su red subterránea y a través de la apertura de tapas y registros, se identificó la ruta que seguiría la fibra óptica para la interconexión de las dos instituciones. La figura 53 muestra la ruta planeada, en ella se puede apreciar que en planta interna se realizará un cableado superficial o a través de canaletas, mientras que en la planta externa el cableado será por vías subterráneas.

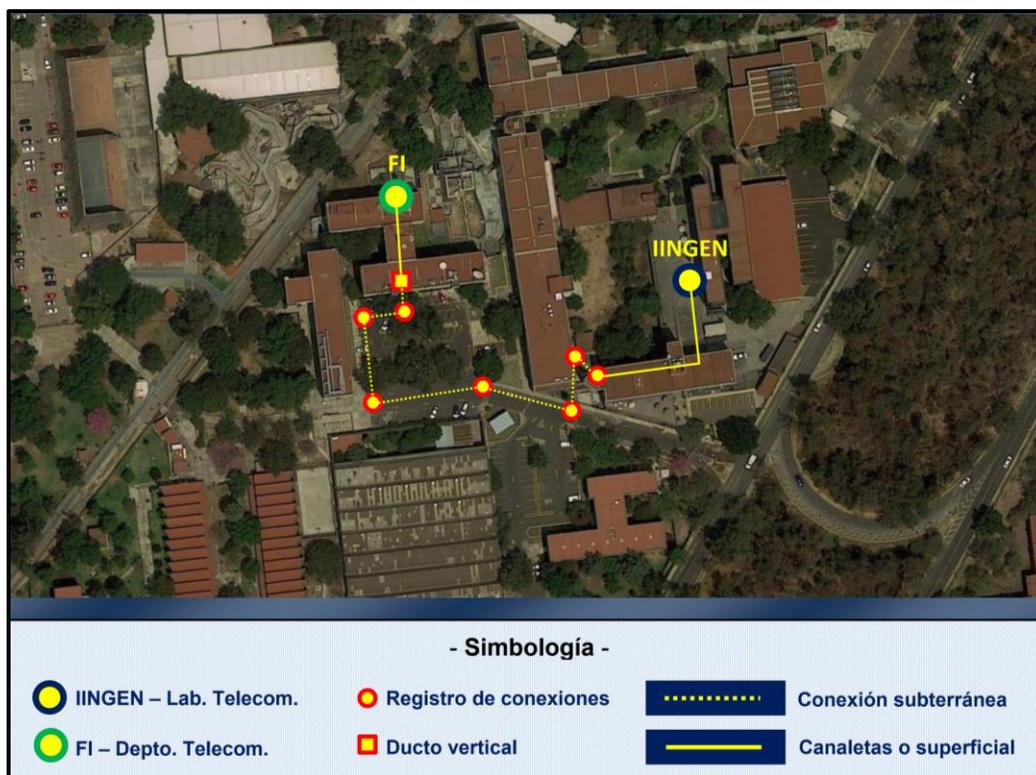


Figura 53 Ruta planeada de la fibra para el fronthaul óptico.

La estimación de la longitud mínima del enlace fue de 340 metros, esta cantidad puede aumentar fácilmente debido a que la estimación realizada no contempla los enrollamientos y, además, los tramos se consideraron como líneas rectas. El cálculo de distancia mínima se realizó sumando las distancias entre cada registro de conexiones. La figura 54 muestra la ruta planeada para el tendido de fibra con la distancia mínima requerida indicada en cada tramo de registro a registro, de igual forma la distancia necesaria dentro de la planta interna, tanto para el IINGEN como para la FI.

Es importante recordar que el *fronthaul* óptico se ideó de distancia variable, por lo que el cable de fibra óptica debe empalmarse para superar la distancia mínima de 340 m, asimismo se deben de darle adaptaciones como conectores que permitan integrar o eliminar distancia. Por esta razón, el cable óptico debe de contener los hilos necesarios para caracterizar diversos escenarios.

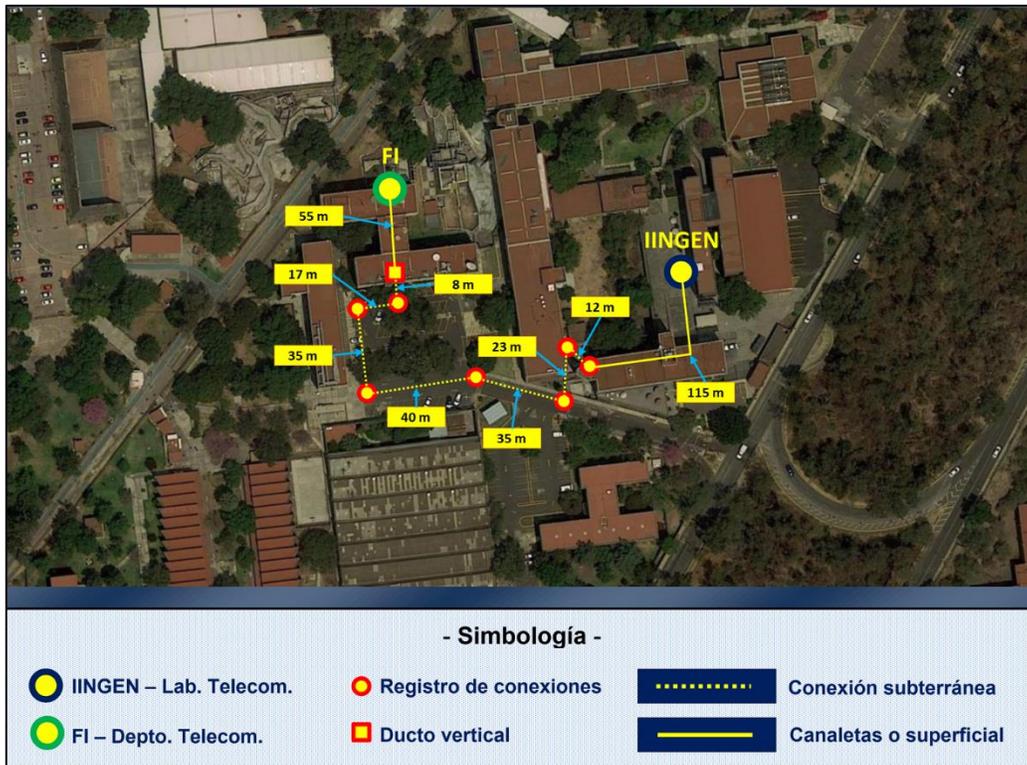


Figura 54 Estimación de distancia mínima por tramo para el tendido de fibra óptica.

En función de la capacidad, costo, tolerancia a ambientes externos y características de transmisión, se decidió emplear un cable de fibra óptica de 48 hilos de la marca YOFC, siendo cada uno de estos hilos una fibra óptica monomodo fabricada bajo la norma internacional ITU-T G.652.D, la cual resulta adecuada para realizar transmisiones WDM. La tabla 7 muestra las principales características del cable óptico seleccionado.

Tabla 7 Características principales del cable de fibra óptica seleccionado.

Marca	YOFC (Yangtze Optical Fibre and Cable)
Tipo	Cable de fibra óptica
Hilos	48 hilos de fibra óptica
Norma	ITU-T G.652.D
Atenuación promedio	0.34 dB/Km @ 1310 nm 0.22 dB/Km @ 1550 nm
Zona de cero dispersión	1300 nm a 1324 nm
Características especiales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El cable puede instalarse en exteriores: es resistente a la exposición directa del sol y a las variaciones de temperatura. ▪ Baja atenuación por <i>water peak</i>.
Aplicaciones	Redes metropolitanas y de acceso.

4.1.1 Elementos de red

Aclarando la arquitectura, el medio, la tecnología, los canales y la ruta del *fronthaul* para la red 4G/5G; es indispensable seleccionar el equipamiento que hará posible el funcionamiento de la red sobre la infraestructura previamente elegida. Como parte de los objetivos de este trabajo de investigación experimental, se planeó dar una vista general de la viabilidad de desarrollar redes 4G/5G basadas en redes de *fronthaul* ópticas pasivas, por lo que dentro de las variantes de *fronthaul* óptico, se selecciona la opción pasiva encima de la activa. Esto influye en que elementos de red estarán presentes en su implementación.

Retomando la arquitectura C-RAN y considerando el *fronthaul* pasivo, se tiene que los principales elementos de red en este trabajo de investigación son: BBU, RRH y MUX/DEMUX; descritos anteriormente en el apartado *Fronthaul Óptico* mostrados en la figura 52.

La red 4G/5G que utilizará el *fronthaul* óptico pasivo está basada en tecnología SDR, la cual permite tener gran flexibilidad en la red, ya que en un mismo HW se le pueden cargar varios protocolos o cambiar parámetros dependiendo de las necesidades de la red. Al utilizar SDR, los BBU pueden ser computadoras dedicadas con los suficientes recursos como para llevar a cabo el procesamiento de las señales que la red transmite en ella. De igual forma, los RRH pueden ser implementados por computadoras que tengan terminales inalámbricas para el acceso al usuario.

El elemento principal de la tecnología óptica en el *fronthaul* pasivo es el MUX/DEMUX, ya que este elemento a través de un enlace físico crea enlaces lógicos de cada canal del sistema. Al ser un *fronthaul* pasivo, el uso de convertidores de longitudes de onda queda descartado, ya que la señal de extremo a extremo trabaja en la misma frecuencia a diferencia de cualquier sistema WDM activo, por lo que los transmisores y receptores deben de ser capaces de emitir señales en la frecuencia previamente seleccionada de los canales DWDM, así como los receptores deben de ser aptos para su transmisor correspondiente.

Considerando que los elementos de red funcionarán con tecnología SDR, además de las necesidades del HW que cada elemento necesita, los elementos seleccionados son: periférico de radio de *software* universal (USRP, *Universal Software Radio Peripheral*) como RRH, mientras que para los BBU se seleccionaron computadoras capaces de montar estaciones de trabajo (*Workstations*).

Para la selección del MUX/DEMUX, basta con seleccionar cualquier MUX/DEMUX que funcione en la frecuencia de los canales seleccionados. Es verdad que los filtros del MUX/DEMUX introducen pérdidas de la potencia óptica y que hay pérdidas capaces de afectar el rendimiento del sistema, sin embargo, el *fronthaul* en redes 5G no supera los 20 km, por lo que a priori un MUX/DEMUX no proporcionará tantas pérdidas para afectar de manera significativa al *fronthaul*.

4.1.1.1 Periférico de radio de *software* universal (USRP, *Universal Software Radio Peripheral*)

Se seleccionaron los USRP debido a que brindan gran accesibilidad, puesto que la mayoría de estos dispositivos cuentan con HW de código abierto. Por lo que sus esquemas y controladores están disponibles gratuitamente para su descarga y su modificación según se necesiten, esto da paso a crear prototipos e implementar sistemas inalámbricos con procesamiento de señales personalizado.

Generalmente los USRP se componen de una placa base que proporciona los siguientes subsistemas: generación y sincronización de reloj, FPGA, ADC, DAC, interfaz de procesador host y

regulación de energía; componentes básicos necesarios para el procesamiento de señales en banda base. Como parte de la interfaz de comunicación al usuario y al sistema, los USRP cuentan con un *front-end* modular, el cual realiza operaciones analógicas como conversión ascendente / descendente, filtrado y en general acondicionamiento de señales. La herramienta que comúnmente se utiliza en los USRP es el paquete de *software* GNU Radio para crear sistemas de radio personalizados que son definidos por *software*.

El modelo seleccionado para la red 4G/5G es el USRP x310. En la tabla 8 [123] se muestran las características más sobresalientes del USRP.

Tabla 8 Principales características del USRP seleccionado como RRH [123].

RRH	USRP x310
FPGA	Xilinx Kintex-7 XC7K410T
ADC	14 bit 200 MS/s
DAC	16 bit 800 MS/s
Rango de frecuencia	DC - 6 GHz
Ancho de banda	Hasta 160 MHz
Interfaces	Múltiples interfaces de alta velocidad (Dual 10G, PCIe Express, Express Card, Dual 1G)
Front-end	Dos ranuras de placa secundaria de RF de ancho de banda amplio

Una de las razones principales de la selección del x310 como RRH es que posee una tarjeta de red capaz de soportar tecnología óptica con velocidades seleccionables de 1 Gbps y 10 Gbps a través del protocolo Ethernet. La figura 55 muestra el diagrama del panel trasero del USRP x310 con un puerto dual 1G/10G ETH, al cual se le introducirán SFP+ para la transmisión y recepción de señales ópticas.

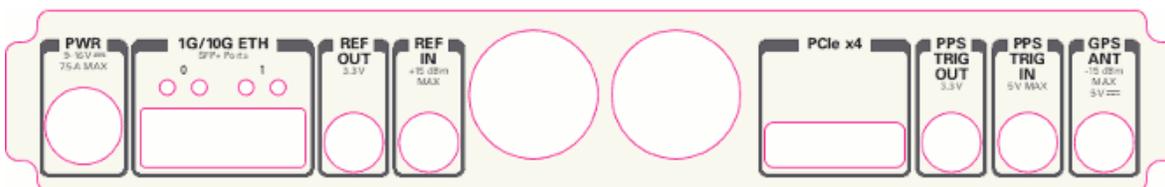


Figura 55 Panel trasero del USRP x310.

Para favorecer la mayor tasa de transmisión y el mejor rendimiento del sistema, el puerto de 10 GigE es el que se preferirá por encima de los demás en la red del *fronthaul*. La tabla 9 muestra el total de las interfaces que posee el USRP x310 con la velocidad de muestreo con la que cada interfaz funciona, en ella también se indica si es necesario algún componente extra para poder utilizar la interfaz. También se indica que para utilizar el puerto 10 GigE se necesita de un elemento adicional con el que el USRP x310 no trae incluido, el cual es el SFP+. Además de que su tasa de muestreo corresponde a 200 M-muestras/segundo.

Tabla 9 Resumen de rendimiento de la interfaz.

Interfaz	Throughput (MS/s @ 16-bit)	Objetivo	Componentes adicionales
1 Gigabit	25 MS/s	Desktop/Laptop	Componentes incluidos
10 Gigabit	200 MS/s	Desktop	SFP+ 10 GigE
PCI-Express (PCIe, 4 lane)	200 MS/S	Desktop	PCI-Express Desktop Kit
Express Card (PCIe, 1 lane)	50 MS/s	Laptop	ExpressCard Kit

La parte frontal del USRP x310 cuenta con el HW necesario para conectar antenas que permiten la comunicación con el usuario final correspondiente a los UE. La figura 56 muestra al USRP x310 visto desde el panel frontal, en la figura se puede apreciar que posee dos agrupaciones de 2 antenas cada una, por lo que este radio permite la configuración MIMO 2x2.



Figura 56 USRP x310 visto desde el panel frontal.

4.1.1.2 Estaciones de trabajo (Workstations)

Para la emulación de la red 4G/5G se ha seleccionado a la plataforma srsLTE, la cual es una biblioteca LTE de alto rendimiento para aplicaciones SDR. La biblioteca admite tanto eNB, como UE, además srsLTE es altamente modular y tiene dependencias mínimas entre módulos o externas. La biblioteca se implementa en C y se puede usar bajo licencias comerciales y de código abierto [124].

srsLTE está optimizado para sistemas operativos como Ubuntu, por lo que la selección de la estación de trabajo debe de soportar este sistema operativo, además de cumplir requisitos mínimos de HW y SW para el procesamiento digital de los módulos que emulan a la BBU y a las señales en banda base que se intercambian con el RRH. La única recomendación que srsLTE sugiere es que la frecuencia del procesador se encuentre alrededor de 4 GHz, además de que tenga los mayores recursos posibles.

Las estaciones de trabajo seleccionadas para fungir como BBU son computadoras DELL® 3630 Tower Precision, las cuales cuentan con una frecuencia de su procesador que va de 3.8 GHz a 4.7 GHz, además de contar con memoria RAM DDR4 UDIMM NON-ECC de 16 GB, lo que las hacen muy adecuadas para cumplir con las tareas que srsLTE demanda. La figura 57 muestra una DELL® 3630 Tower Precision que se utilizará como estación de trabajo para emular una red 4G/5G con srsLTE sobre Ubuntu.



Figura 57 DELL® 3630 Tower Precision.

De igual forma, la interfaz en su tarjeta de red cobra mucha relevancia, puesto que una de las características que necesitan los equipos de red en esta implementación en específico es la transmisión en el medio óptico para el *fronthaul* pasivo. Por lo que para adaptar estas computadoras se le integraron tarjetas de red Ethernet Intel® X520-LR2, la cual tiene dos puertos SFP+ y opera con el estándar 10GBASE-LR. Este estándar indica que la tarjeta acepta a transceptores ópticos capaces de transmitir a 10 Gb/s a una distancia de 10 km. Para que la DELL® 3630 Tower Precision sea capaz de transmitir a través de esta tarjeta de red, es necesario instalarle el controlador ixgbe, versión 5.1.0-k. La figura 58 muestra la tarjeta de red instalada en las computadoras que se utilizarán como BBU para que sea posible interconectarlas dentro del *fronthaul* óptico pasivo con los elementos de red de tecnología de transmisión óptica.



Figura 58 Tarjeta de red Ethernet Intel® X520-LR2.

4.1.1.3 MUX/DEMUX

El elemento más característico de una red óptica pasiva es el MUX/DEMUX, ya que este acopla varios canales en un solo hilo de fibra óptica, además de ser capaces de separar en canales individuales una señal previamente multiplexada. Todo lo anterior lo hacen sin ningún tipo de alimentación, es decir, son elementos ópticos pasivos.

Como se vio en el apartado 3.1 *Multiplexación por longitud de onda* el MUX/DEMUX funciona a partir de filtros, el cual selecciona ciertas frecuencias ya sea para separarlas de la señal o para integrarlas a una misma. Estas frecuencias alrededor de 1550 nm se les denominan canales DWDM [101], por lo que estas frecuencias en realidad son las portadoras de los canales del sistema DWDM. Para esta implementación es necesario elegir un MUX/DEMUX que seleccione a las frecuencias correspondientes de los canales nores que previamente se seleccionaron y que se encuentran descritos en la tabla 6.

El MUX/DEMUX seleccionado para esta implementación corresponde a un MUX/DEMUX que está integrado a un sistema óptico PL-1000TE, el cual es un dispositivo óptico capaz de albergar elementos modulares. El PL-1000TE puede incluir: multiplexores ópticos, transpondedores optoelectrónicos, amplificadores ópticos, switches ópticos y elementos de protección de este, como ventiladores y fuentes de energía de respaldo.

El PL-1000TE tiene 7 tipos de puertos para el flujo de datos y 2 tipos de puertos para la alimentación eléctrica, la figura 59 muestra las conexiones físicas.

Los puertos de datos no ópticos son:

- **CONTROL:** Permite gestionar el funcionamiento del PL-1000TE, su conector es hembra tipo D de 9 pines con interfaz DCE asíncrono RS-232, destinado a la conexión directa a un terminal de supervisión.
- **ALARM:** Es un conector hembra tipo D de 9 pines que se utiliza para conectarse al sistema de alarma externo (por ejemplo, un buzzer) del cliente.
- **ETH:** Es una interfaz Ethernet 10/100 Base-T con conector RJ-45. El puerto se puede conectar mediante un cable LAN estándar a cualquier tipo de puerto Ethernet 10/100 Base-T.

Los puertos de datos ópticos son:

- **LINK:**
 - **Uplink:** Requiere fibra monomodo de 2 mm, conectores LC/UPC con SFP/SFP+. Cada puerto tiene dos conectores ópticos: uno para la entrada de recepción y el otro para la salida de transmisión. Este puerto corresponde a CWDM/DWDM.
 - **Service:** Mismas especificaciones que el Uplink, además de también admitir fibra multimodo. Este puerto opera a 850 nm o 1310 nm.
- **MNG:**
 - Acepta módulos SFP ópticos o de cobre.
 - Acepta fibra monomodo, multimodo o UTP.
 - Acepta CWDM, DWDM y lambdas de 850 nm y 1310 nm
 - Conector LC/UPC o RJ45

- MUX/DEMUX: Conectores multifibra Pull Off (MPO) de fibra monomodo.
 - COM: Es el puerto de interconexión entre los PL-1000TE. Es el puerto de transporte multiplexado. Su conector es LC/UPC dúplex fijo.

Los puertos de alimentación son:

- DC: Se suministra con un conector dedicado para el cableado.
- AC: Conector IEC320 C5 estándar de tres clavijas 3ª

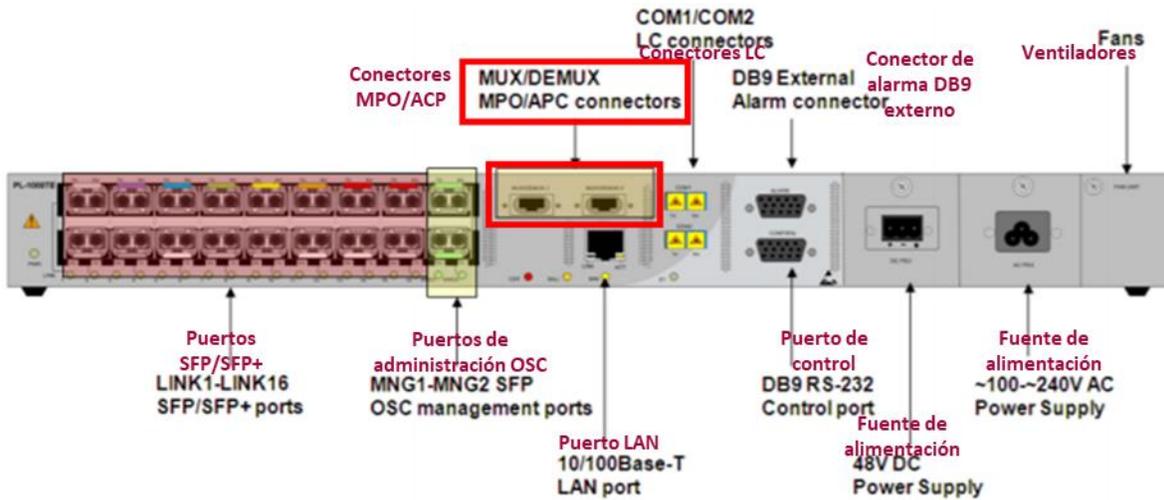


Figura 59 Diagrama de puertos en el PL-1000TE.

El PL-1000TE es propiamente un equipo de tecnología DWDM, sin embargo, por sus componentes modulares es claro que es un dispositivo diseñado para trabajar de manera activa, como “convencionalmente” lo harían las redes comerciales. Para fines de este trabajo de investigación y para satisfacer los objetivos, la utilización del PL-1000TE se limitará a su MUX/DEMUX, por su puesto, al ser un elemento pasivo, la alimentación del PL-1000TE no es necesaria por su configuración para este trabajo de investigación.

El MUX/DEMUX que posee el PL-1000TE es capaz de multiplexar 8 canales DWDM espectralmente espaciados 100 GHz, estos canales van desde el 28 hasta el 35. La tabla 10 muestra los 8 canales con su respectiva frecuencia y longitud de onda. Al ser 8 canales disponibles, queda la posibilidad de incrementar la capacidad del sistema propuesta al doble, sin embargo, para cubrir los objetivos de este prototipo sólo se utilizarán los canales nones DWDM.

Tabla 10 Canales DWDM del MUX/DEMUX del PL-1000TE.

Canal	Frecuencia [THz]	Lambda [nm]
28	192.8	1554.940
29	192.9	1554.134
30	193.0	1553.330
31	193.1	1552.524
32	193.2	1551.720
33	193.3	1550.928
34	193.4	1550.120
35	193.5	1549.325

4.1.1.4 Componentes

Los elementos de red son fundamentales para integrar el *fronthaul*, sin embargo, para la transmisión óptica a parte de las tarjetas de red, es necesario conectarles transceptores ópticos, que son los encargados de la transmisión y recepción de luz en las longitudes de onda correspondientes a los canales previamente seleccionados. Al igual estos transceptores indican la distancia máxima que se puede alcanzar en el enlace.

También dentro de la planta interna, es decir, dentro del IINGEN y de la FI hay que realizar un cableado entre los dispositivos que harán posible la transmisión entre los sitios. Los conectores y los cables ópticos son el medio que permiten la transmisión entre equipos de red en una red óptica. Si bien no son propiamente el medio principal de transmisión, es decir, no es el enlace que recorrerá la distancia meta como red de transporte, sí son los que permiten la interconexión entre los equipos de un mismo sitio. Por lo que es importante identificar el tipo y el lugar indicado al que corresponde cada uno de ellos.

4.1.1.4.1 Transceptores conectables de factor de forma pequeña plus (SFP+, *Small Form-factor Pluggable plus*)

Los SFP+ son transceptores ópticos que permiten a los dispositivos de red transmitir y recibir luz, estos SFP+ tienen puertos internos, los cuales admiten conectores tipo LC. Cada SFP+ admite diferentes tipos de lambdas, estas están indicadas mediante etiquetas en el mismo SFP+. Los SFP+ estarán insertados en cada equipo de red perteneciente al *fronthaul* óptico, ya que los SFP+ son los que les brindan la capacidad a los equipos de red conectarse a una red óptica.

Los SFP+ tienen una memoria eléctricamente programable y borrable de sólo lectura (EEPROM, *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) que les permite guardar los protocolos y estándares para hacer el emparejamiento de los que se conectan entre sí. Estos como una analogía serían como un lenguaje en común entre los SFP+, es decir, estos protocolos les permiten comunicarse entre ellos. Además, esta misma EEPROM contiene los estándares que rigen a los controladores de la tarjeta de red para que el usuario pueda hacer uso del SFP+ desde el dispositivo de red, en resumen, la EEPROM del SFP+ indica la compatibilidad que el SFP+ puede o no tener en los dispositivos, según su tipo y su tarjeta de red.

Generalmente, cualquier par de SFP+ puede comunicarse entre ellos, sin embargo, esto es más complicado cuando se trata de la comunicación del SFP+ y la tarjeta de red, ya que los protocolos para sistemas ópticos no WDM y sistemas WDM son diferentes, haciendo necesaria la utilización de transpondedores optoelectrónicos para la comunicación entre ambas tecnologías que, aunque sea transmisión en luz, utilizan protocolos diferentes. La razón por la que se complica esta comunicación es que normalmente los protocolos utilizados en los dispositivos terminales de la red utilizan protocolos de sistemas no WDM y no admiten transceptores WDM. Por lo que, para esta implementación se necesitan SFP+ WDM capaces de albergar en su EEPROM características similares a las de un SFP+ no WDM.

Considerando que los elementos de red que se utilizarán son percibidos como elementos terminales, los SFP+ seleccionados en una red convencional tendrían que ser grises, es decir, ya sea de 850 nm o de 1310 nm. Para solucionar este problema existen SFP+ con características físicas ópticas de WDM y con características lógicas ópticas fuera de WDM. Es decir, en su EEPROM se registran características y protocolos no WDM, mientras que su transmisor y receptor ópticos

funcionan en la frecuencia y con características a las que un SFP+ WDM trabajaría. Este tipo de SFP+ resultan bastante útiles, ya que evitan la utilización del convertidor de longitud de onda, que en la arquitectura de *fronthaul* óptico activo es el transpondedor optoelectrónico y por lo tanto la utilización de este tipo de SFP+ permite que el *fronthaul* óptico pasivo se pueda implementar.

Los SFP+ seleccionados cumplen con la característica anterior, además, para garantizar una compatibilidad con las tarjetas seleccionadas previamente, en su EEPROM se les ha grabado la compatibilidad con tarjetas de red fabricadas por Intel, estos SFP+ son fabricados por *Solid-Optics* sus parámetros tanto en transmisión como en recepción se encuentran descritos en las tablas 11 y 12 respectivamente para el canal 29.

Tabla 11 Parámetros ópticos en el transmisor SFP+ de Solid-Optics CH29.

Transmisor				
Parámetros	Mín.	Típico	Máx.	Medida
Optical wavelength	1554.03	1554.13	1554.23	nm
Optical extinction ratio	6	-	-	dB
Side mode suppression ratio	30	-	-	dB
Spectral width	-	-	1	nm
Optical transmit power	-1	-	5	dBm

Tabla 12 Parámetros ópticos en el receptor SFP+ de Solid-Optics CH29.

Receptor				
Parámetros	Mín.	Típico	Máx.	Medida
Optical wavelength	1480	1554.13	1580	nm
Los hysteresis	0.5	-	-	dB
Los assert	-30	-	-	dBm
Los de-assert	-	-	-27	dBm
Receiver max. Sensitivity	-	-	-24	dBm
Damage threshold	-6	-	-	dBm
Optical return loss	-12	-	-	dB

Es muy importante interconectar los SFP+ con sumo cuidado, ya que deben de emparejarse correctamente las lambdas de operación, puesto que el sistema no recibirá la información adecuada, además de posibles daños en los equipos. La figura 60 muestra un SFP+ DWDM que se utilizarán en el sistema, este SFP+ corresponde al canal 29.



Figura 60 SFP+ DWDM Solid-Optics CH-29.

Al tener en cuenta que los SFP+ DWDM utilizan protocolos diferentes a los SFP+ no WDM que convencionalmente irían en los dispositivos de red, se decidió tener una alternativa a los SFP+DWDM de *Solid-Optics*. Se optó por tener dos canales funcionando con SFP+ de *Solid-Optics* y otros dos canales de SFP+ DWDM fabricados por *Smart-Optics*. La tabla 13 muestra los parámetros principales tanto en el transmisor como en el receptor del SFP+ de *Smart-Optics*.

Tabla 13 Parámetros ópticos del SFP+ de *Smart-Optics*.

Parameter	Value
Transmitter data:	
Output power	Min: -1.0dBm ¹⁾ Max: +4.0dBm ¹⁾
Transmit wavelength	192.10 - 196.00THz (G.694.1)
Receiver data:	
Minimum input power	-15.0dBm ¹⁾²⁾
Overload (max power)	-1.0dBm ¹⁾²⁾
Wavelength range	1480nm – 1580nm
LOS assert	Min -29dBm
LOS de-assert	Max -17dBm
DDM	Yes
MSA compliance	SFF-8431, -8432, -8472
¹⁾ Average power. ²⁾ @ 10.3Gbps, BER 1x10 ⁻¹² , PRBS 2 ³¹ -1, back-to-back.	

Al igual que los de SFP+ DWDM anteriores, los SFP+ DWDM de *Smart-Optics* tienen en su EEPROM grabada la compatibilidad con tarjetas Intel. La tabla 14 muestra los canales del *fronthaul* con el respectivo fabricante de cada SFP+ DWDM.

Tabla 14 SFP+ DWDM.

Canal	Fabricante
29	<i>Solid-Optics</i>
31	<i>Smart-Optics</i>
33	<i>Solid-Optics</i>
35	<i>Smart-Optics</i>

Cabe mencionar que los SFP+ DWDM con compatibilidad en dispositivos terminales, que en este proyecto de investigación son los USRP y las workstations, son los elementos más importantes o representativos del *fronthaul* óptico pasivo, ya que, gracias a estos, es posible prescindir de un convertidor de longitud de onda. Según el diseño de la red, el *fronthaul* contará con 4 canales, los cuales se pueden representar con cada par de SFP+ DWDM. La figura 61 muestra todos los SFP+

DWDM con EEPROM grabada como SFP+ de 1310 nm o 850 nm que se utilizarán en cada canal para componer al *fronthaul* óptico pasivo.

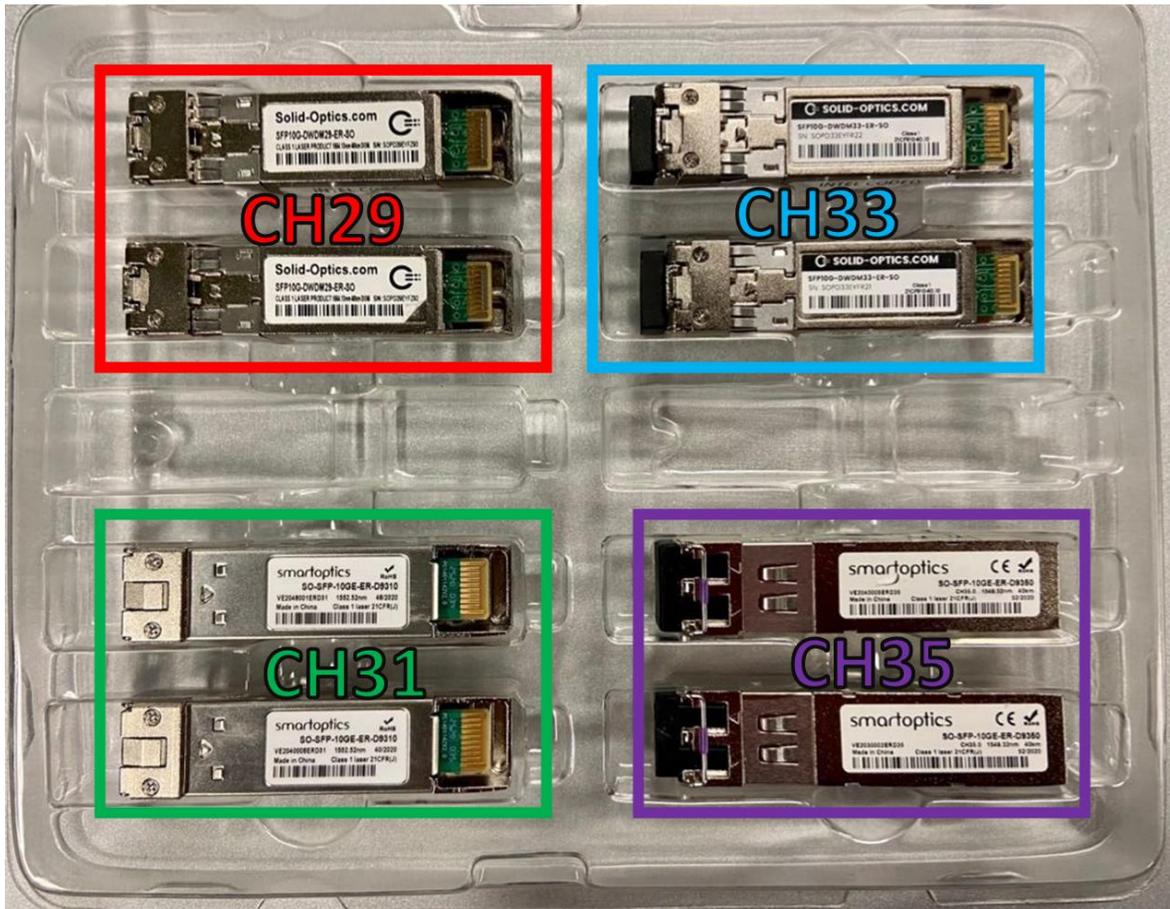


Figura 61 SFP+ DWDM seleccionados para el *fronthaul* óptico pasivo.

4.1.1.4.2 Cable Ribbon

El cable principal del PL-1000TE es el cable *ribbon* el cual es full-dúplex, tiene en sus terminales la entrada MPO y en el otro lado cuenta con conectores LC/UPC. Las conexiones MPO son dos, estas van hacia el MUX y DEMUX respectivamente. Mientras que los conectores LC/UPC están destinadas a los puertos LINK DWDM del PL-1000TE, los cuales corresponden a los puertos del convertidor de longitud de onda optoelectrónico. También un conector LC/UPC está destinado al puerto OSC, con la finalidad de monitorear al sistema. Aunque para esta arquitectura en donde sólo se utiliza el MUX/DEMUX del PL-1000TE, que además es pasiva, no se utilizarán los puertos del convertidor de longitud de onda, sino que estas terminales LC/UPC se conectarán directamente a los SFP+ que están dentro de los dispositivos de red, es decir, a los USRP y a las computadoras como estaciones de trabajo.

El cable *ribbon* dirige las señales DWDM hacia el MUX/DEMUX para multiplexar y demultiplexar los canales del sistema; esta es la razón de su bi-entrada MPO, ya que permite una conectividad full-dúplex. El cable *ribbon* del PL-1000TE tiene 9 salidas con conectores LC/UPC, ya que este equipo posee la habilidad de transmitir 8 canales de datos y un canal de supervisión. La figura 62 muestra una fotografía del cable ribbon, con sus respectivos conectores.



Figura 63 Conectores LC/UPC a LC/UPC dúplex.

4.2 Implementación del *fronthaul*

A partir del primer boceto de la red planeada, se han seleccionado los elementos de la red, así como sus componentes y conectores que permitirán la implementación de esta. La figura 64 muestra el diseño de la red con sus elementos seleccionados en la ubicación elegida para cada grupo de elementos. Se puede apreciar que los RRH estarán en la FI, mientras que las BBU estarán en el IINGEN, por lo que de esto se puede deducir que los UE tienen que estar del lado de la FI, mientras que el EPC se encontrará en el IINGEN.

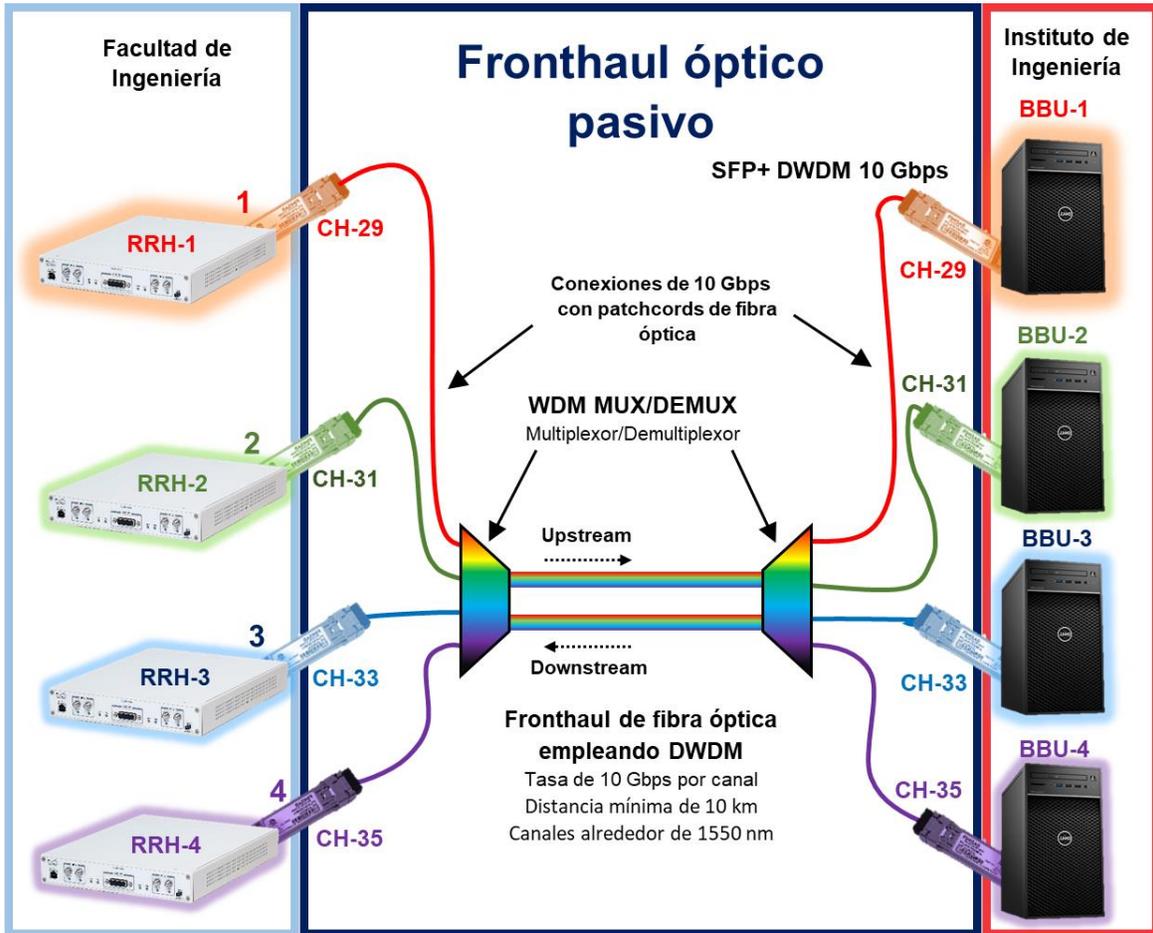


Figura 64 Diseño del *fronthaul* óptico pasivo con los componentes seleccionados.

En el diagrama de la figura 64, se aprecia que los MUX/DEMUX del PL-1000TE son parte de la planta externa, es decir, el *fronthaul* óptico pasivo propiamente, sin embargo, esto no quiere decir que los MUX/DEMUX estarán ubicados al exterior, sino que estarán ubicados en los extremos de la planta interna de cada institución, preparados para salir a la planta externa. Es importante recordar que los SFP+ insertados en los elementos de red sí forman parte de la planta interna y estos son elementos activos, además de que se considera a una red pasiva como tal cuando en su planta externa no existen elementos activos.

Como se propuso originalmente, el *fronthaul* debe de tener una distancia variable mínima de 10 km, no obstante, para obtener diversos resultados y conclusiones se ha decidido anexar más distancia al *fronthaul*, debido a que, en las redes pasivas basadas en fibra óptica, la distancia es el parámetro

más afectado por la atenuación acumulada al no tener algún tipo de amplificación o realimentación intermedia en la planta externa.

4.2.1 Tendido de fibra óptica

Gracias a la planeación realizada fue posible comunicar ambas instituciones sin la necesidad de requerir empalmes intermedios, lo que brinda un enlace con mejores prestaciones, ya que la probabilidad de falla y el nivel de atenuación crecen al realizar un empalme. Además, al instalar el cable de manera íntegra, se reducen los factores que pudieran perturbar la medición y el análisis del enlace.

La figura 65 muestra una fotografía tomada a las afueras del Instituto de Ingeniería, donde se inició el tendido de la fibra hacia ambos extremos del enlace (IINGEN y FI). Además, se aprecia el carrete de cable de fibra óptica que se instaló.



Figura 65 Inicio del tendido del cable de fibra óptica.

La figura 66 muestra a un conjunto de estudiantes de licenciatura de la FI que cursan los últimos semestres de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la FI y que actualmente realizan su servicio social en la empresa ALMA LABS, junto con expertos y técnicos de esta misma empresa, los cuales apoyaron con el tendido del cable. De manera específica, se observa cómo introducen una guía, también conocida como cobra, para facilitar el desplazamiento del cable de fibra a través de los ductos de la red de la DGTIC.



Figura 66 Tendido del cable de fibra óptica.

Uno de los inconvenientes que experimentamos fue la presencia de un ducto obstruido, por lo que fue necesario levantar parte del pavimento del estacionamiento de la FI para poder introducir de manera adecuada el cable de fibra al edificio Luis G. Valdés Vallejo, lugar en que se encuentra ubicado el Laboratorio de Radiofrecuencia de la FI. Una vez que se instaló la fibra se procedió a restaurar el pavimento. Las actividades anteriormente mencionadas se ilustran en el conjunto de fotografías que conforman la figura 67.



Figura 67 Dificultades experimentadas en el tendido del cable de fibra óptica.

El tendido del cable en las instalaciones del IINGEN fue relativamente sencillo dado que ya se contaba con la infraestructura necesaria, es decir, un sistema de canaletas que conectaba directamente el exterior del Edificio 12 del IINGEN con el Laboratorio de Telecomunicaciones, parte de dicho sistema de canaletas se muestra en la figura 68.



Figura 68 Sistema de canalización presente en el Edificio 12 del IINGEN.

Por otro lado, la instalación en el edificio Luis G. Valdés Vallejo fue un tanto más compleja, ya que una parte del tendido se alojó en el interior (figura 69.a), posteriormente se subió a través de un ducto (figura 69.b) hasta la azotea (figura 69.c) donde se trasladó hasta la parte superior del Laboratorio de Radiofrecuencia (figura 69.d).



Figura 69 Instalación del cable de fibra óptica en el edificio Luis G. Valdés Vallejo de la FI.

De esta forma fue posible establecer un enlace entre el Laboratorio de Telecomunicaciones del IINGEN y el Laboratorio de Radiofrecuencia de la FI. La figura 70 muestra un plano simplificado del enlace IINGEN – FI, en él se pueden apreciar las longitudes aproximadas de cada tramo excluyendo los enrollamientos de la fibra, además se incluyen una serie de fotografías que facilitan la identificación de cada punto de interés.



Figura 70 Plano simplificado del enlace IINGEN – FI.

La estimación de la longitud mínima del enlace fue de 340 metros, esta cantidad puede aumentar fácilmente debido a que la estimación realizada no contempla los enrollamientos y, además, los tramos se consideraron como líneas rectas.

4.2.2 Construcción del enlace de fibra óptica para el *fronthaul*

Una vez tendida la fibra óptica entre el IINGEN se identificaron los hilos internos del cable de fibra óptica, en su interior se encuentran 4 cables principales, los cuales tienen 12 hilos cada uno, resultando en un cable de fibra óptica de 48 hilos. Cada cable interno está identificado mediante un color diferente. La tabla 15 muestra el número que se le asignó a cada cable, su color y el número de hilos.

Tabla 15 Identificación de los cables internos del enlace IINGEN – FI.

IINGEN - FI		
N° de cable	Color	N° de hilos
1	Azul	12
2	Verde	12
3	Café	12
4	Naranja	12

Recordando que una red basada en fibra óptica necesita de 2 hilos para establecer conexiones full-dúplex, se asignaron pares de hilos de fibra para tener un enlace de comunicación completa. Considerando lo anterior, cada cable interno puede proporcionar 6 enlaces de fibra óptica individuales. La tabla 16 muestra la asignación de los hilos según el color de su recubrimiento para una comunicación full-dúplex.

Tabla 16 Asignación de hilos de fibra según su color.

IINGEN - FI / Full-dúplex		
N° de par	1er hilo	2do hilo
1	blanco	negro
2	morado	verde
3	naranja	cian
4	azul	rosa
5	amarillo	café
6	gris	rojo

A partir de la decisión de tener un *fronthaul* de longitud variable, se hicieron adaptaciones al cable de fibra óptica tendido para tener diferentes longitudes en el enlace. Para el cable 1 de color azul, se determinó que sería un cable de añadidos, es decir, la longitud original de la fibra iba a corresponder a cada enlace posible para este cable, lo que resulta en 6 enlaces con la longitud más corta posible en esta implementación. Para lograr acondicionar el primer cable, basta con proporcionar en cada uno de sus extremos conectores LC/UPC, ya que estos servirán como conectores mecánicos facilitando la conexión y desconexión de cada enlace, según se requiera modificar la longitud. La figura 71 muestra el diagrama de configuración para el primer cable de color azul con la unión de conectores LU/UPC mediante empalmes y cada hilo asignado al enlace correspondiente.

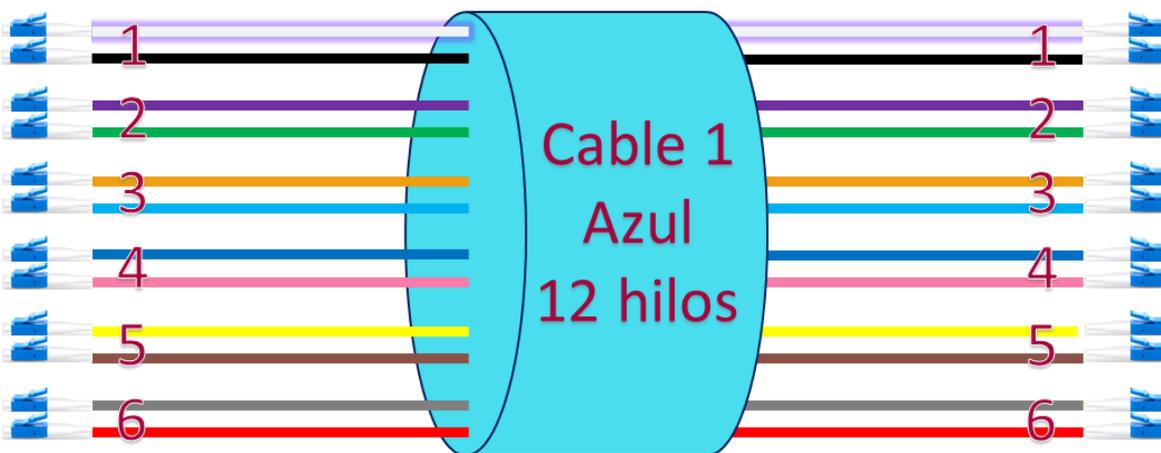


Figura 71 Configuración del cable 1 azul del enlace IINGEN – FI.

Para los otros 3 cables restantes, se decidió dejarlo como un enlace único, pero seccionado para tener 4 salidas equidistantes, por lo que es necesario realizar empalmes entre los pares de hilos. Se tomó la decisión de cerrar los enlaces de fibra en la Facultad de Ingeniería y tener la posibilidad de variar la longitud del enlace en el Instituto de Ingeniería. En la Facultad de ingeniería se tendrán 3

empalmes por cada cable interno, la tabla 17 muestra los empalmes con cada enlace full-dúplex resultante de los hilos contenidos en el cable interno, en ella se aprecia, que el 1er enlace se empalmaría con el 2do, el 3ro con el 4to y el 5to con el 6to.

Tabla 17 Empalmes correspondientes a la Facultad de Ingeniería de los cables internos: 2, 3 y 4.

Empalmes en FI	
1er enlace	2do enlace
1	2
3	4
5	6

Para completar los 4 enlaces equidistantes, es necesario empalmar también en lado del Instituto de Ingeniería, para ello se ha elegido intercalar entre empalmes y conectores mecánicos. La tabla 18 muestra el resultado de la intercalación.

Tabla 18 Empalmes correspondientes al Instituto de Ingeniería de los cables internos: 2, 3 y 4.

Empalmes en IINGEN			
1er enlace		2do enlace	
N° de cable	N° de enlace	N° de cable	N° de enlace
2 - verde	2	2 - verde	3
2 - verde	6	3 - café	1
3 - café	4	3 - café	5
4 - naranja	2	4 - naranja	3

Una vez seleccionados los enlaces full-dúplex de los cables internos 2, 3 y 4; bastaría con incorporar conectores LC/UPC a las puntas restantes. La tabla 19 muestra las conexiones necesarias para proporcionar el enlace con la mayor longitud posible de los cables internos 2, 3 y 4.

Tabla 19 Conectores correspondientes al Instituto de Ingeniería de los cables internos: 2, 3 y 4 para una utilización completa.

Conectores en IINGEN			
1er enlace		2do enlace	
N° de cable	N° de enlace	N° de cable	N° de enlace
2 - verde	4	2 - verde	5
3 - café	2	3 - café	3
3 - café	6	4 - naranja	1
4 - naranja	4	4 - naranja	5

Para una mayor comprensión de la configuración, la figura 72 muestra un diagrama de los cables internos 2, 3 y 4 con sus respectivos enlaces, conectores y salidas del enlace, así como el inicio y el final del enlace en su máxima longitud posible.

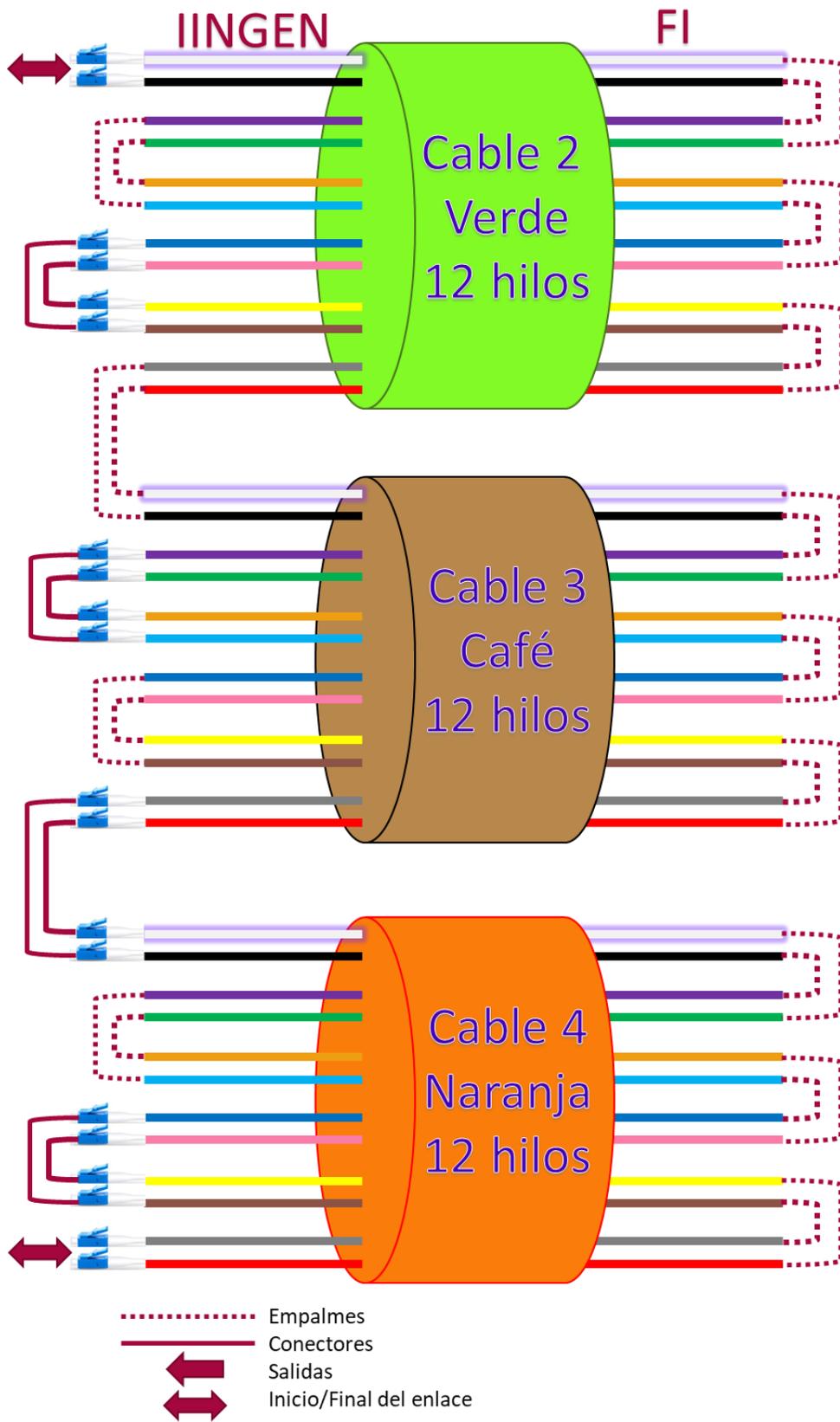


Figura 72 Configuración de los cables: 2, 3 y 4 del enlace IINGEN – FI.

El procedimiento que se realizó para empalmar cada enlace descrito anteriormente fue de 4 pasos, el cual consiste en remover el recubrimiento de los hilos de fibra, mediante pinzas para pelar cable de diferentes diámetros, obteniendo al final una abertura para una fibra monomodo de 9 μm . Después de tener el hilo descubierto, se realiza el corte recto, para que los hilos de fibra puedan acoplarse entre ellos de manera uniforme y se reduzcan las posibles pérdidas de potencia. Posterior al corte, los hilos de fibra óptica se llevan a una empalmadora que funciona a través de un arco eléctrico, para que los fusione. Por último, con una manga para empalmes, se refuerza el empalme; ya que esta posee una barra rígida capaz de proteger al empalme de dobleces que pueden quebrar a la fibra. La figura 73 muestra la instrumentación necesaria y un acercamiento al arco eléctrico que fusiona los hilos de fibra óptica para cada empalme realizado.

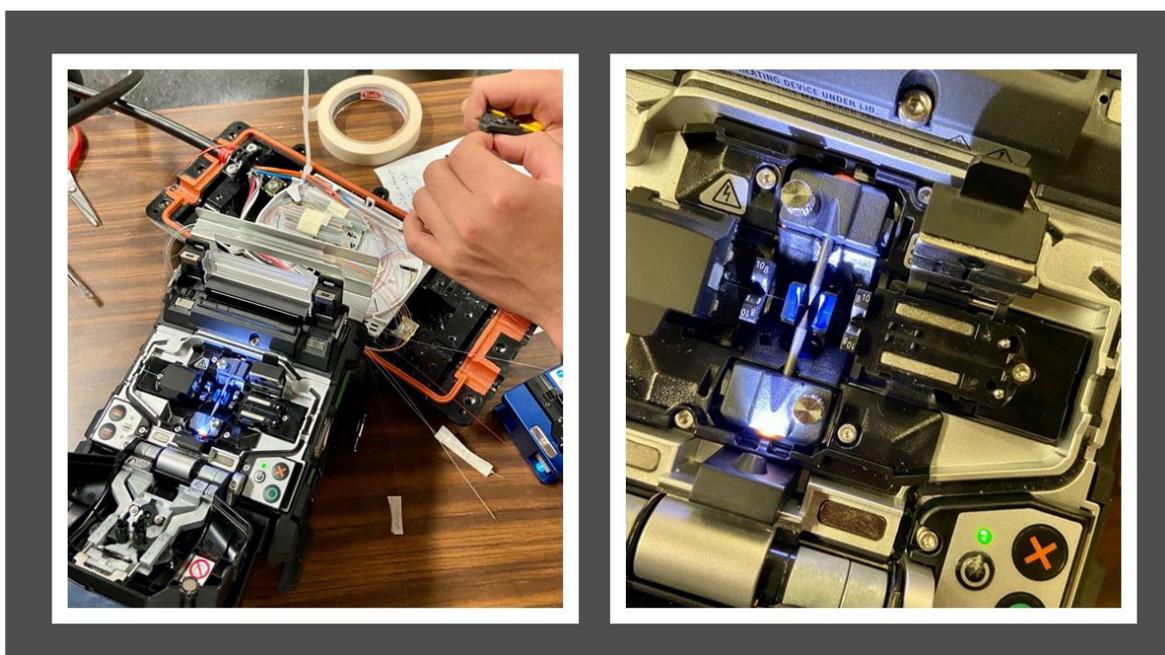


Figura 73 Instrumentación necesaria para empalmes.

Una vez realizados los empalmes, los cables de fibra óptica se acomodaron en *racks* para un manejo óptimo y una mejor organización, permitiendo facilidad al cambiar la distancia. La figura 74 muestra los *racks* en los que se acomodaron las partes terminales de los enlaces. La figura 74.a muestra los puntos de inicio, salida 1, salida 2, salida 3, salida 4 y final de los cables internos 2, 3 y 4. La figura 74.b muestra como los puntos anteriores están acomodados en el *rack* perteneciente al Instituto de Ingeniería, al lado izquierdo de estos puntos, se encuentra el cable 1 color azul, compuesto de los enlaces cortos para añadir. Finalmente, en la figura 74.c se puede observar el *rack* con los empalmes correspondientes a la Facultad de Ingeniería.

Al tener esta configuración dentro de los *racks*, bastaría con unos cables de conexión (*patch-cord*, *jumpers*) de fibra óptica de poca distancia para agregar o quitar distancia al *fronthaul* óptico pasivo.

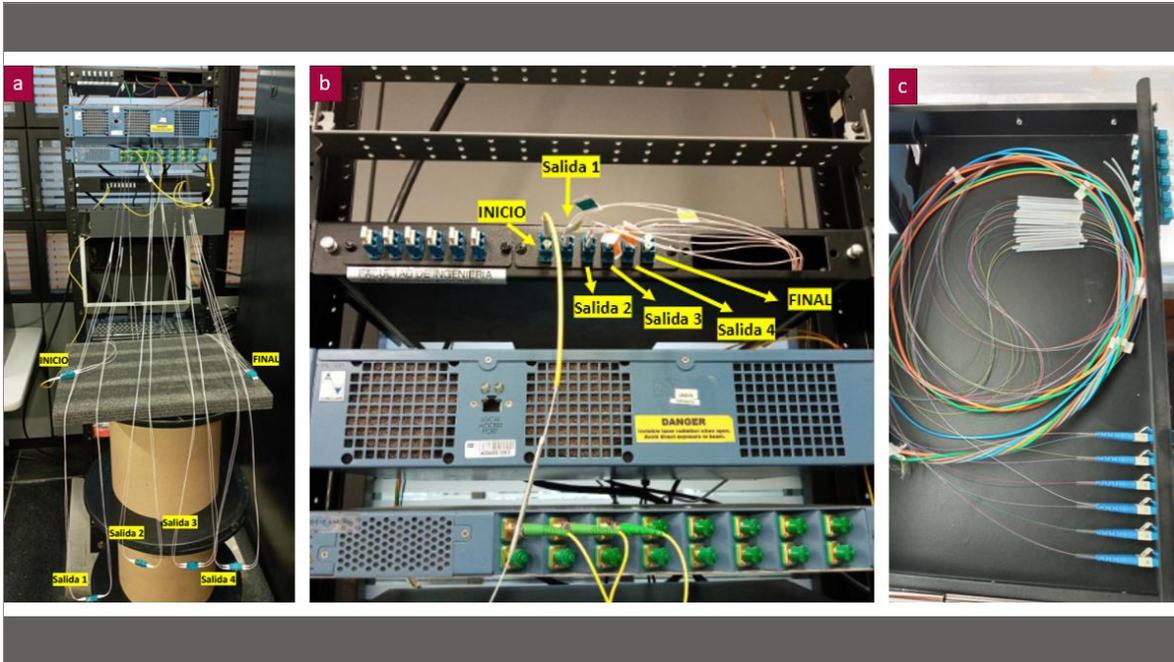


Figura 74 Adecuación del cable de fibra óptica acondicionada para un fronthaul variable.

Es importante tener los conectores limpios, en buen estado y con los hilos de fibras libres de dobleces o curvaturas excesivas, puesto que cualquiera de estos factores puede causar grandes atenuaciones, incluso si los empalmes están bien realizados. La figura 75 muestra los hilos de fibra óptica dentro del rack perteneciente al IINGEN, los cuales se colocaron con sumo cuidado para evitar factores que pudieran causar atenuación en la señal.

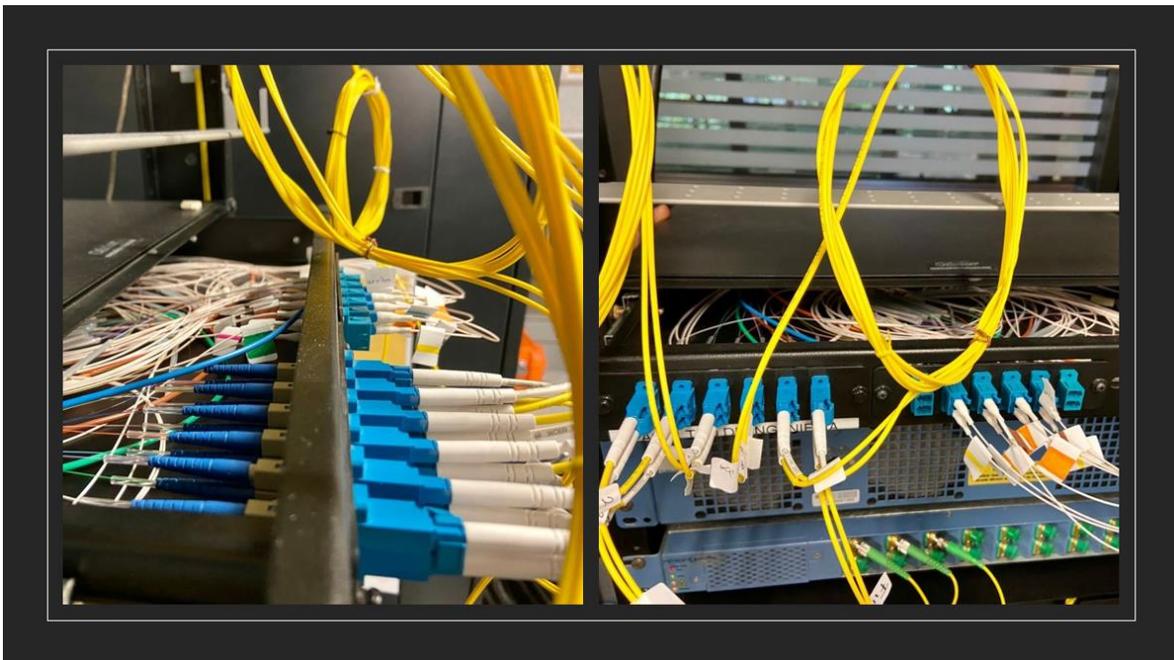


Figura 75 Colocación de la fibra dentro del rack del IINGEN.

Al tener preparado el enlace tendido entre IINGEN – FI, se prosiguió a anexar un carrete de aproximadamente 330 m, el cual tiene 4 cables internos útiles con 12 hilos cada uno, por lo que resulta en un cable de fibra óptica de 48 hilos, capaz de alcanzar una distancia aproximada de 8 km en configuración full dúplex, ya que al requerir una comunicación full-dúplex, la distancia máxima del enlace resulta de empalmar 24 hilos.

Al observar el carrete agregado, se puede notar que cada cable interno posee el mismo código de colores que la fibra tendida anteriormente. Considerando que el carrete sería una extensión del anterior y que, además, al anterior enlace ya se le hicieron modificaciones para tener un amplio rango para poder agregar o quitar distancia con más precisión, este nuevo enlace agregado, será en su totalidad fijo, es decir, no recibirá ninguna sección, dejándolo así libre de pérdidas en cuanto se refiere a conectores mecánicos ópticos. Sin embargo, aún es susceptible a pérdidas provocadas por la atenuación que los empalmes acumulados implican, ya que este enlace contará con 23 empalmes por sentido de propagación, lo que resulta en un total de 46 empalmes para una comunicación full-dúplex y dos conectores finales que servirán para agregar este nuevo enlace al *fronthaul* óptico pasivo.

Al ser un carrete que no se tenderá de un punto a otro, sino que se encontrará fijo en el Instituto de Ingeniería, se ha marcado el carrete con sus dos extremos como lado A y lado B según llegan a su caja de empalmes. Las tablas 20 y 21 definen como se realizarán los empalmes para que de los 48 hilos se obtenga un solo enlace full-dúplex. En el lado A, el hilo rojo se empalmará con el hilo blanco del siguiente cable, mientras que los empales del lado B siempre se mantendrán en el mismo cable de fibra óptica. Los conectores de inicio y final del enlace compuesto por el carrete completo se encontrarán en el hilo blanco del 1er cable y en el hilo rojo del último cable.

Tabla 20 Empalmes correspondientes al lado A del carrete.

Empalmes lado A (carrete)	
1er enlace	2do enlace
negro	morado
verde	naranja
cian	azul
rosa	amarillo
café	gris
rojo	blanco (siguiente)

Tabla 21 Empalmes correspondientes al lado B del carrete.

Empalmes lado B (carrete)	
1er enlace	2do enlace
blanco	negro
morado	verde
naranja	cian
azul	rosa
amarillo	café
gris	rojo

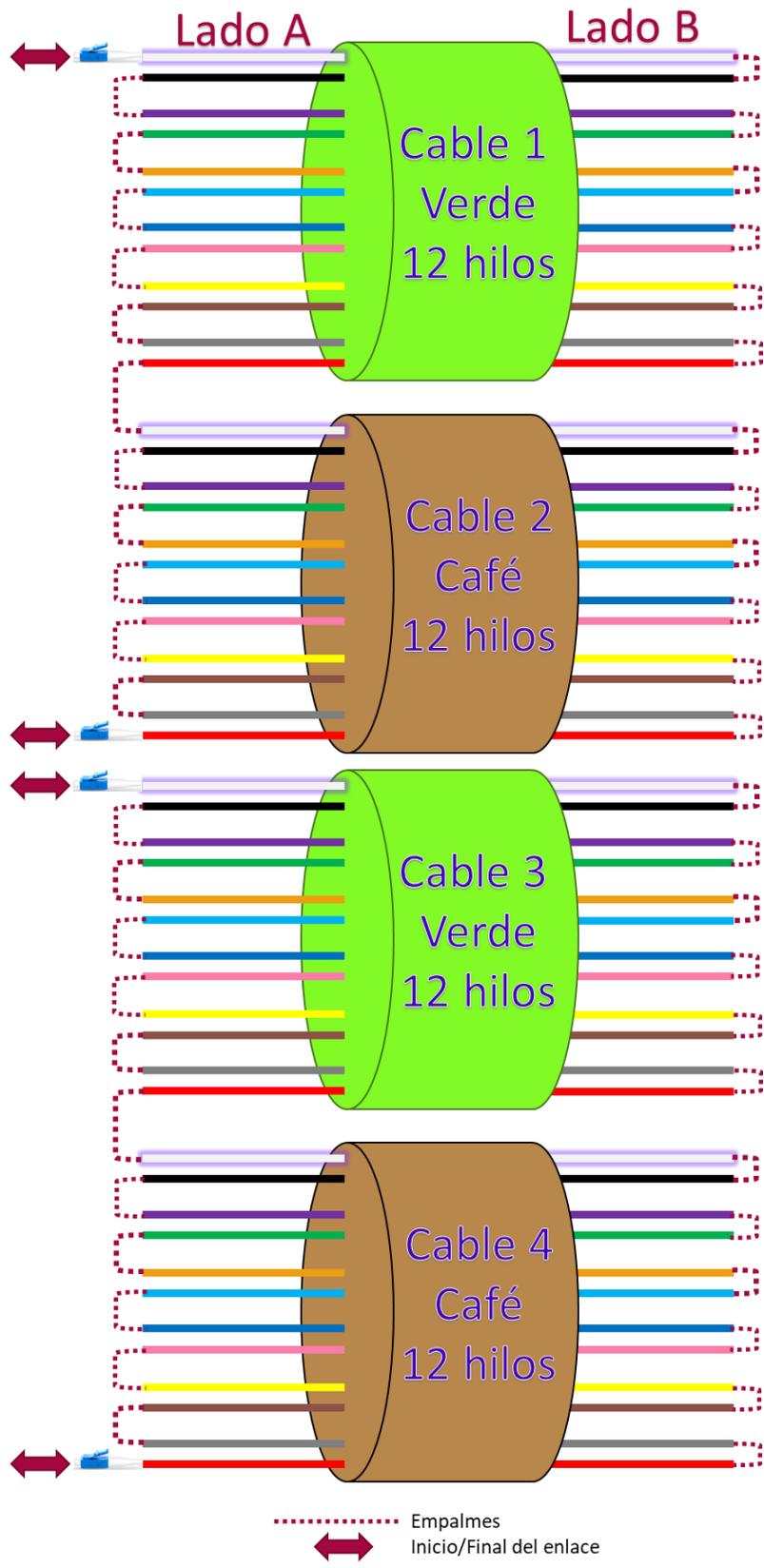


Figura 76 Configuración del carrete para una máxima longitud en full-dúplex.

Para mayor claridad, la figura 76 muestra un diagrama de la configuración que se ha seleccionado para el enlace del carrete, como se puede apreciar, se siguió el mismo orden del código de colores previo, sin embargo, cada enlace de un solo sentido viaja por cables separados, pero se debe de considerar sin inconvenientes, ya que cada cable tiene la misma longitud, por lo que para este trabajo de investigación le resulta indiferente.

Una de las razones por la cual se eligió esta configuración en vez de la pasada del cable de fibra óptica tendido, es que los empalmes no irán acomodados en un *rack*, sino en una caja de empalmes, la cual no ha sido diseñada para albergar los 46 empalmes que requiere el carrete, por lo que es de suma importancia el acomodamiento de estos empalmes, para garantizar comunicación con las menores pérdidas de potencia posibles. La figura 77 muestra los empalmes correspondientes al carrete libres de curvaturas excesivas dentro de su caja de empalmes.

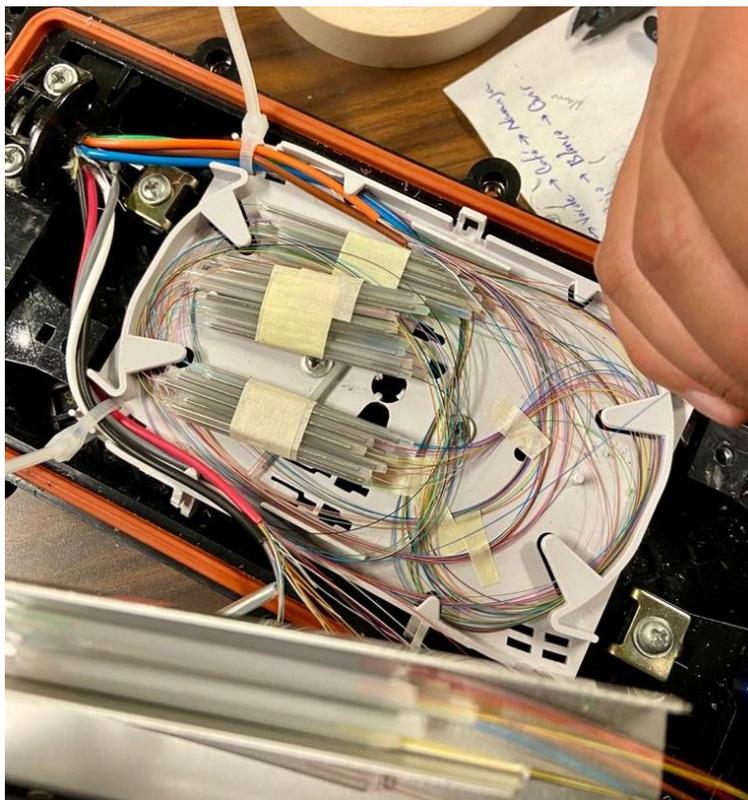


Figura 77 Caja de empalmes utilizada.

Teniendo todos los empalmes realizados tanto de la fibra tendida como los del carrete en el IINGEN, se puede decir que para la implementación del *fronthaul* óptico pasivo, se tienen 3 enlaces, de los cuales uno es fijo compuesto únicamente de empalmes, uno que servirá para afinar distancia, compuesto únicamente de conectores mecánicos y uno compuesto tanto de empalmes como de conectores mecánicos, capaz de agregar o quitar distancias más grandes. La figura 78 muestra la distribución y la construcción del enlace completo para el *fronthaul* óptico pasivo de longitud variable.

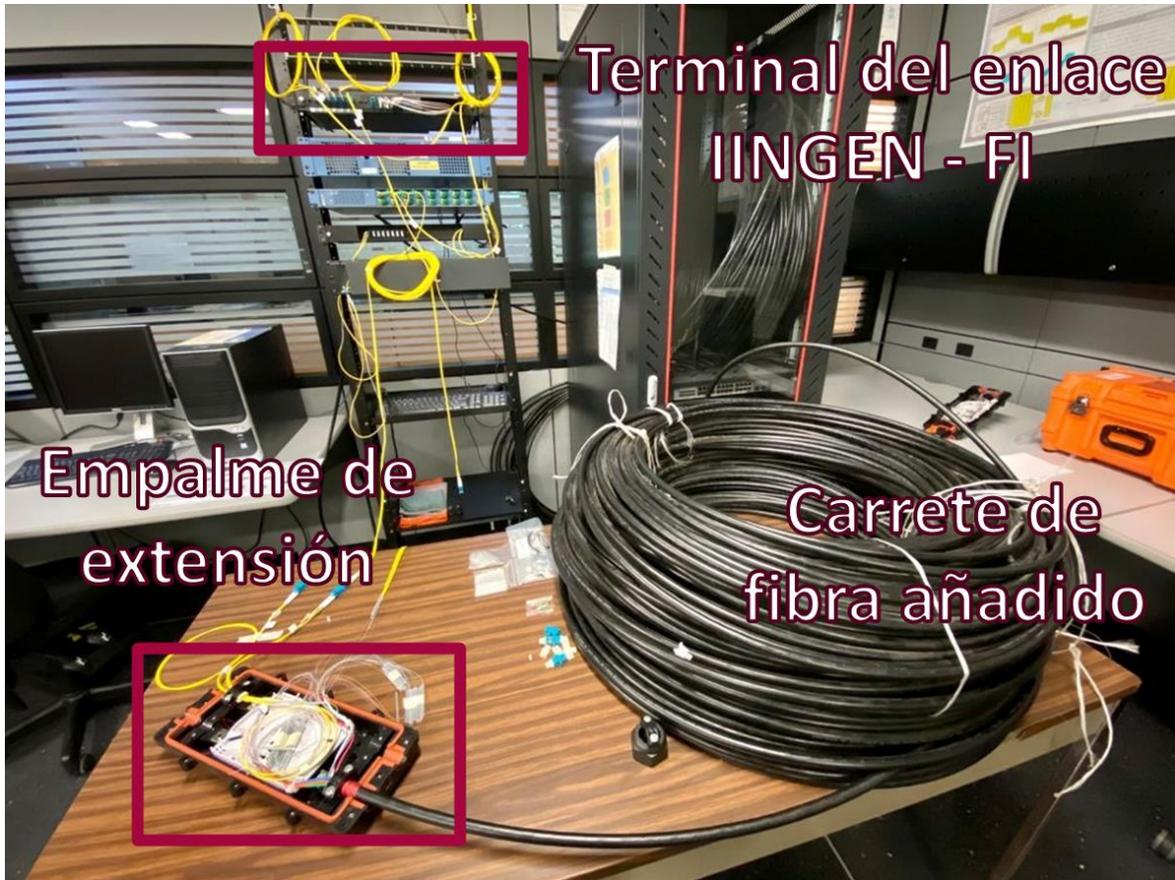


Figura 78 Enlaces de fibra óptica para el fronthaul óptico pasivo.

4.3 Parámetros ópticos que caracterizar en pruebas preliminares

Antes de implementar la red de *fronthaul* para montar los servicios de 4G/5G que soportará junto con la parte de Wireless, es importante conocer los parámetros y valores de desempeño óptico que los equipos individuales y en conjunto brindan, ya que así se es posible delimitar las capacidades que tendrá el *fronthaul* como medio principal de transporte en la red *fiber-wireless*.

Es de suma relevancia comprobar los valores nominales a los que operan los dispositivos ópticos, concretamente los SFP+, los transpondedores optoelectrónicos y los MUX/DEMUX. Ya que ellos determinarán en gran medida el funcionamiento del *fronthaul* óptico. Los parámetros que se medirán para determinar el desempeño son: potencia óptica en transmisores, frecuencia de operación y longitud de onda de cada SFP+, así como su ancho de línea (*linewidth*), además de la relación señal ruido óptico (OSNR, *Optical Signal-to-Noise Ratio*) y la relación de supresión de modo lateral (SMSR, *Side Mode Suppression Ratio*) de cada señal, además de su temperatura en operación.

Para conocer los valores reales del equipo óptico se utilizarán herramientas de medición que permiten comparar la magnitud que posee el mismo. De esta forma se puede obtener un diseño de la red mucho más fiable, puesto que se tendrá con precisión el valor de operación de cada parámetro de todo el equipo óptico.

4.3.1 Potencia óptica

En los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica, es común medir la potencia en decibeles (dB) o en decibeles relativos a un mili-watt (dBm), ya que son unidades relativas que brindan simplicidad en el cálculo y comparación de los niveles de las señales ópticas del sistema. La utilización de los decibeles como unidad de medida en la potencia óptica ofrece lecturas rápidas que determinan si hay atenuaciones o ganancias en función del signo resultante, además los cálculos son reducidos a sumas y restas, debido a que están basados en logaritmos y por lo tanto se rigen con sus reglas.

Generalmente para medir potencia óptica desde una fuente emisora de luz se utilizan los dBm, debido a que son valores absolutos que son arrojados desde un transmisor, por lo que se comparan con un mili-watt; mientras que los puntos intermedios son valores relativos comparados ya sea desde el transmisor, o desde cualquier punto de la red que se quiere analizar, dejando para esto las unidades de decibeles en vez de dBm. Con lo anterior, se puede decir que para las pérdidas por inserción de algún elemento pasivo en la red o para las ganancias como lo puede ser algún amplificador, las unidades serán los dB.

Una de las confusiones más comunes al trabajar con decibeles como unidad de medida es cuando el instrumento o el cálculo de la potencia arroja 0 dB o 0 dBm, puesto que se puede confundir como si no existiera potencia alguna, sin embargo, esto es una falacia, ya que un 0 en dB o en dBm indica que la potencia medida es igual a la potencia de referencia. Además, con resultados positivos se indica que la potencia medida es mayor a la de la potencia de referencia, por lo que habría una ganancia, mientras que, con una lectura o resultado negativo, la potencia medida es menor a la potencia de referencia, indicando una pérdida de potencia.

Las afirmaciones del párrafo anterior se obtienen a partir de las ecuaciones que determinan el cálculo de los dB con la potencia óptica o con la amplitud de la señal óptica. La ecuación 8 muestra

la obtención de la potencia en dB a partir de una referencia dada. La ecuación 9 muestra la obtención de dBm a partir de la comparación de la potencia de 1 mili-watt.

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in} [W]}{P_{ref} [W]} \right) \quad (8)$$

$$dBm = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in} [mW]}{1 mW} \right) \quad (9)$$

Donde:

P_{in} Potencia del punto medido

P_{ref} Potencia de referencia

4.3.2 Longitud de onda

La luz puede analizarse desde varias perspectivas según la física, una de ellas es que la luz es una onda electromagnética, por lo que posee los atributos de estas ondas. En las ondas periódicas, la longitud de onda o también denominada lambda (λ) es el espacio físico entre dos puntos donde la onda tiene su periodicidad, es decir, donde la onda empieza a repetirse.

La longitud de onda es importante en las ondas electromagnéticas, puesto a que además de otras cosas, las lambdas determinan si dos o más ondas que comparten el mismo medio en el mismo instante podrán o no interferirse entre ellas. La interferencia entre señales electromagnéticas está determinada por su frecuencia o por su longitud de onda; cuando dos señales inciden dentro de un mismo medio en un mismo instante de tiempo con la misma longitud de onda, éstas se interferirán, creando interferencias constructivas, destructivas y/o armónicos, en cambio, con señales incidiendo en un mismo medio al mismo tiempo, pero con longitudes de onda diferentes, estas no se interferirán; justo como en un sistema WDM. En un sistema de telecomunicaciones esta interferencia provoca ruido, lo cual puede derivar a la pérdida de información.

En sistemas de comunicaciones ópticos, las lambdas normalmente se refieren a canales WDM, puesto que, en estos sistemas, diferentes señales comparten un mismo medio, por lo que es importante mantener diferentes las lambdas, para así aprovechar el medio en común sin que se interfieran entre los canales del sistema. En enlaces donde las señales no comparten un medio en común, sino que una sola señal viaja por la fibra, la longitud de onda no es tan relevante por la interferencia; en estos casos, la longitud de onda se analizaría por factores como la dispersión o la atenuación en el medio.

Al ser una longitud en el espacio físico, las longitudes de onda de la luz se pueden medir en metros, sin embargo, por convención se suele medir en nanómetros (nm), debido a que esta unidad de medida proporciona dígitos más cómodos de interpretar y calcular.

4.3.3 Frecuencia

Las señales utilizadas en los sistemas de comunicaciones son representadas como pulsos o incluso como señales sinusoidales, puesto que permite un mejor análisis y comprensión. Al tener señales con estas características es notable indicar cuando se ha cumplido un ciclo de la señal. El número de ciclos que logra completar la señal óptica en un segundo la frecuencia que esa señal posee. Por lo que, la frecuencia es el inverso del periodo.

equivalentes entre frecuencia y longitud de onda, la cual es que 0.8 nm equivalen a 100 GHz aproximadamente. Esta equivalencia resulta de la ecuación 10:

Para $|\Delta\lambda| \ll \lambda^2$

$$|\Delta\nu| = \left(\frac{c}{\lambda^2}\right) |\Delta\lambda| \quad (10)$$

Donde:

- $\Delta\nu$ Intervalo de frecuencia
- $\Delta\lambda$ Intervalo de longitud de onda
- c Velocidad de la luz
- λ Longitud de onda

La equivalencia anterior resulta bastante útil, debido a las normas de la ITU impuestas a los sistemas DWDM dictan espaciamientos inter-canal como múltiplos de 100 GHz. En los sistemas ópticos de telecomunicaciones los láseres son las principales fuentes de luz utilizadas como transmisores, ya que se necesita de luz coherente para centrar los canales en los sistemas WDM. Como se mencionó en el *Capítulo 3. Fronthaul Pasivo* un sistema WDM comparte señales de diferentes longitudes de onda en un mismo medio óptico, sin que estas señales ocupen el espectro de los canales contiguos, evitando posibles interferencias inter-canal. Por lo que un ancho de línea más reducido a parte de poseer una mejor utilización de la potencia en su frecuencia central también determinará la calidad del sistema DWDM, ya que, al ser más estrecho, el impacto de la dispersión se ve reducido a través del enlace, además de que se pueden ocupar tasas de transmisión más altas antes de rebasar al umbral permitido del ensanchamiento del haz.

4.3.5 Relación de supresión de modo lateral (SMSR, *Side Mode Suppression Ratio*)

En un láser ideal, el pico de la densidad de potencia espectral principal contiene toda la potencia producida por el dispositivo, pero en realidad, la señal del láser implica modos laterales, que contienen potencia. La relación de supresión de modo lateral (SMSR) de un láser DFB describe la diferencia de amplitud entre el modo principal y el modo lateral más grande en decibelios. El SMSR es un criterio clave de aprobación o falla en la fabricación, ya que califica la eficacia con la que el láser elimina los modos laterales innecesarios

Un valor que es superior a 30 dB indica que la mayor parte de la potencia existe en el modo principal, lo cual es típico de los láseres de alto rendimiento, puesto que generan más potencia en el modo principal y, por lo tanto, tienen valores de SMSR más altos [125].

La potencia en un modo lateral consiste típicamente en la emisión espontánea amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) y su nivel está determinado por la tasa de emisión espontánea y por la diferencia entre la ganancia de umbral y la discriminación del modo, es decir, la pérdida de modo del modo lateral. Un rechazo de modo lateral alto normalmente requiere una potencia baja en el modo lateral y una potencia alta en el modo principal [126].

La figura 80 [127] muestra el espectro de la emisión de un láser, en ella se puede notar que el láser tiene una componente central con la mayoría de su potencia óptica, pero también por la emisión espontánea intrínseca del láser, aparecen varios modos laterales. El SMSR corresponde a la relación de potencia entre los modos laterales y la frecuencia nominal del láser. También es importante

generalmente, los sistemas DWDM son utilizados como medio de transporte en redes de áreas extensas, por lo que, tienden a ser redes de largas distancias, en consecuencia, se utilizan amplificadores ópticos que le brindan potencia a la señal, pero también degradan el OSNR; esta es la razón principal del porqué una red óptica tiene un número limitado de amplificadores ópticos y este número está determinado por el OSNR.

El OSNR se calcula a partir de la ecuación 11, la cual indica:

$$OSNR = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right) \quad (11)$$

Donde:

<i>OSNR</i>	Relación señal a ruido óptico [dB]
<i>S</i>	Potencia de la señal óptica [W]
<i>N</i>	Potencia del ruido [W]

Niveles altos de OSNR indican una buena calidad de la señal óptica, ya que el nivel de potencia de la señal y la del ruido se encuentran alejadas entre ellas. El OSNR se torna más relevante en el receptor, puesto que, bajos niveles de OSNR se traducen en que la señal del ruido es tan grande que el receptor no podrá detectar a la señal óptica de manera apropiada. Normalmente, el OSNR debe ser superior a 15 dB o 18 dB en el receptor, pero este valor dependerá de muchos factores como la velocidad de datos o la BER requerida. Uno de los métodos más aceptados para medir el OSNR es la interpolación lineal, el cual se toman los valores laterales del ruido para promediarse y restarse con la potencia central de operación del láser. La figura 81 [128] muestra la representación del método para medir el OSNR a través la interpolación lineal

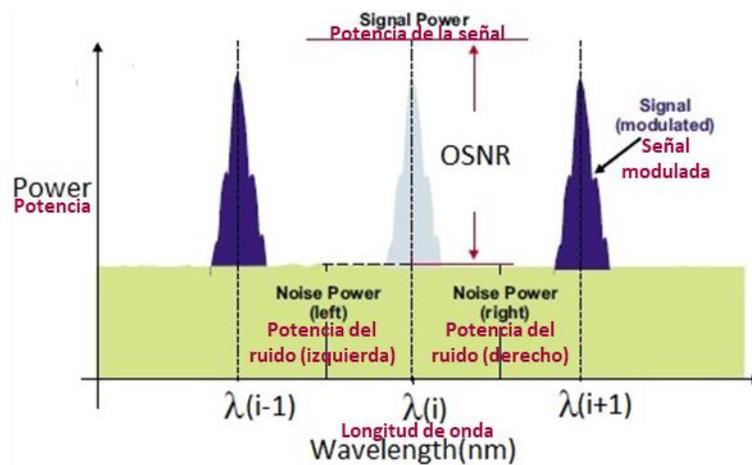


Figura 81 Representación del OSNR [128].

4.4 Herramientas de medición

Las herramientas de medición que se utilizarán para obtener los parámetros ópticos preliminares a la implementación del *fronthaul* para el prototipo de la red 4G/5G serán el medidor de potencia (*Power Meter*) para obtener la potencia óptica de cada SFP+ DWDM, el analizador de espectros óptico (OSA) el cual da con detalle el espectro óptico que contiene la fibra óptica y una aplicación web perteneciente al equipo de red óptico PL-1000TE, la cual se utilizará como comparativo a las demás herramientas de medición.

Una vez que la red del *fronthaul* se haya implementado, además de las herramientas de medición previamente mencionadas, también se utilizará el reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR, *Optical Time Domain Reflectometer*) para diagnosticar y certificar que la red de fibra óptica funcione apropiadamente.

4.4.1 Medidor de potencia

El medidor de potencia que se utilizará es de la marca JDSU el cual arroja los valores de la potencia tanto en dB como en dBm. Este medidor de potencia óptica permite seleccionar la longitud de onda central en el que el láser emite la señal óptica. Para este trabajo de investigación se centrará la λ en 1550 nm, puesto que este es el rango en el que las longitudes de onda de DWDM se encuentran centradas. Este medidor de potencia tiene un rango de potencia óptica que va de los +5 dBm como potencia máxima, hasta los -65 dBm como potencia mínima con una resolución de 0.01 dB.

La figura 82 muestra el medidor de potencia con sus elementos principales, así como sus indicadores. En ella también se puede apreciar que el medidor de potencia cuenta con un puerto que le permite realizar las lecturas, este puerto admite conectores FC (*Ferrule Connector*).



Figura 82 Indicadores y elementos del Power Meter.

En cuanto se refiere al cable de fibra óptica que se utilizará junto con el medidor de potencia óptica se ha seleccionado un cable simplex que contenga en sus extremos conectores FC a LC/UPC, puesto

al tipo de puertos tanto en el medidor de potencia, como en los SFP+ DWDM. La figura 83 muestra el cable necesario para las mediciones de potencia.



Figura 83 Cable simplex de fibra óptica FC a LC/UPC.

4.4.2 Analizador de espectro óptico

Una de las herramientas más útiles para el análisis de las redes o de cualquier sistema óptico es el analizador de espectro óptico (OSA), puesto que despliega la distribución de potencia de una fuente óptica en un intervalo de longitud de onda específico, el cual sirve para un análisis espectral de la señal o las señales existentes en una fibra óptica. Comúnmente se muestra esta distribución en un plano con la densidad de potencia espectral en el eje vertical y la longitud de onda en el eje horizontal.

El OSA al desplegar gráficamente la distribución de potencia espectral es útil para medir parámetros ópticos como la frecuencia y la lambda central de operación, además de calcular otros parámetros como el OSNR o el SMSR de una señal óptica; en sistemas DWDM es posible obtener el espaciado inter-canal, así como el ancho de línea que ocupa cada señal. Por lo que, el OSA no solamente sirve para la caracterización de los láseres de los SFP+ DWDM, sino que también es útil para caracterizar a los MUX/DEMUX, debido a que estos poseen filtros que afectan a la señal. Es importante mencionar que en este trabajo de investigación no se han considerado la utilización de amplificadores, puesto que el principal objetivo es implementar un *fronthaul* completamente pasivo, sin embargo, estos también pueden ser caracterizados por un OSA. Generalmente los elementos pertenecientes a una red óptica pueden analizarse a través de un OSA, al saber con exactitud su ubicación en la red, puesto que para su caracterización es necesario obtener sus espectros de la señal óptica antes y después de que la señal pase a través del elemento que se quiere analizar, por lo que la comparación de estos dos espectros indica como y que tanto el elemento de red óptico está afectando a la señal.

El OSA que se utilizará es de la marca Anritsu de modelo MS9740A, este acepta cables de fibra que se encuentran dentro de la norma ITU-T G.652. Al igual que el medidor de potencia, el OSA posee una entrada que admite conectores FC, por lo que, necesita el mismo cable FC a LC/UPC simplex. El rango de longitudes de onda que es capaz de medir va desde 650 nm a 1750 nm, por tanto, es capaz de medir las lambdas DWDM. En cuanto se refiere a potencia soportada, el OSA contiene un atenuador de protección en su entrada, haciéndolo apto para mediciones de hasta +23 dBm. La figura 84 muestra el OSA MS9740 que se utilizará tanto para caracterizar parámetros preliminares

a la implementación, como parámetros posteriores que determinarán el rendimiento del *fronthaul* óptico pasivo.



Figura 84 Analizador de espectro óptico (OSA).

4.4.3 Aplicación web PL-1000TE

El PL1000TE es un dispositivo óptico capaz de albergar elementos modulares. El PL-1000TE puede incluir: multiplexores ópticos, transpondedores optoelectrónicos, amplificadores ópticos, switches ópticos y elementos de protección de este, como ventiladores y fuentes de energía de respaldo. Además de los elementos de HW que el PL-1000TE posee, este contiene un aplicación web de administración y supervisión. Para este trabajo de investigación, se limitará el uso del PL-1000TE a los MUX/DEMUX que posee como parte de la red y a su aplicación web capaz de medir parámetros como potencia óptica en el transmisor, sensibilidad (*sensitivity*) en el receptor, frecuencia central, longitud de onda de la señal y temperatura de funcionamiento de los SFP+ DWDM.

El entorno que ofrece la aplicación basada en web del PL-1000TE es muy amigable con el administrador de red, pues brinda la información de los valores ópticos de forma ordenada. La figura 85 muestra la interfaz de la información óptica general con los valores de los parámetros de cada SFP+ DWDM insertado en los puertos del PL-1000TE. En ella se puede apreciar que indica el número de puerto en el que el SFP+ DWDM se encuentra asignado, si es de clase WDM, la longitud de onda central, la potencia óptica de la señal en el transmisor, la potencia mínima con la que puede llegar en el receptor, es decir, la *sensitivity* y la temperatura en tiempo real del SFP+ DWDM.

La aplicación web del PL-1000TE también puede mostrar la información por puertos individuales en vez de una vista general, sin embargo, esa ventana está diseñada para la administración de los puertos como parte de una red activa DWDM, por lo que la utilización de la aplicación web se limitará a la interfaz general de información óptica.

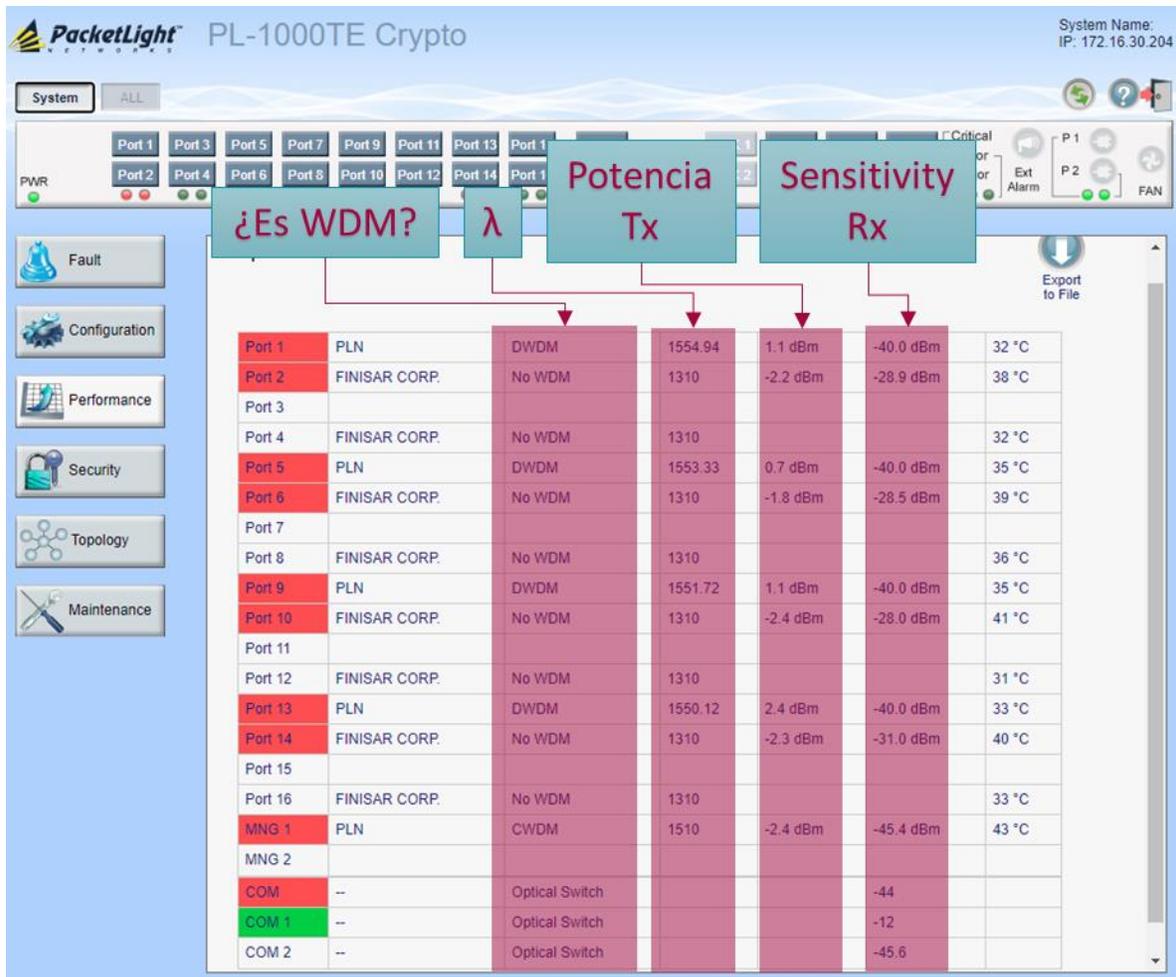


Figura 85 Interfaz de información óptica en la aplicación web del PL-1000TE.

4.4.4 Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo

Un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR) está compuesto de una fuente de luz con un fotodetector acoplados de tal forma en que la fuente de luz emite pulsos a través del enlace de fibra óptica, para que las reflectancias que sufran los pulsos debido a las impurezas del enlace puedan ser leídas por el fotodetector. Posteriormente estos datos son digitalizados y analizados para mostrarse como una gráfica con los eventos que el enlace presenta a lo largo del mismo. De esta manera es posible conocer si hay empalmes, conectores o algún factor que atenué a la señal a lo largo de la fibra óptica con precisión, puesto que la información es representada en un plano donde el eje vertical es la potencia de la señal, mientras que el eje horizontal indica la distancia.

La definición de las lecturas depende de la duración del pulso, entre más cortos sean los pulsos, más detalles obtendrá la gráfica. También un OTDR funciona mejor en distancias relativamente cortas, sin embargo, esto no quiere decir que no funcione en distancias largas, ya que depende de la calidad del OTDR y del enlace que se está midiendo; un valor promedio en dónde la mayoría de los OTDR funcionan adecuadamente es a 80 km. Para este trabajo de investigación esta distancia supera al objetivo, además, en la sección del estado del arte de este trabajo, se indica que un *fronthaul* óptico

para redes 4G/5G está alrededor de 10 km a 20 km de distancia, por lo que esta posible limitación no causa ningún inconveniente.

El OTDR que se utilizará en este trabajo es el modelo OTH-700 de la marca EXFO, el cual cuenta con 3 puertos para realizar los análisis de diferentes enlaces, la figura 86 muestra al OTDR, en ella se puede apreciar que los conectores que se acoplan al OTDR son tipo FC/APC.



Figura 86 Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR).

Recordando que los conectores que predominan en el enlace son tipo LC/UPC, se necesita un cable de fibra óptica que sus extremos tengan conectores FC/APC a LC/UPC, la figura 87 muestra el cable necesario para la utilización del OTDR.

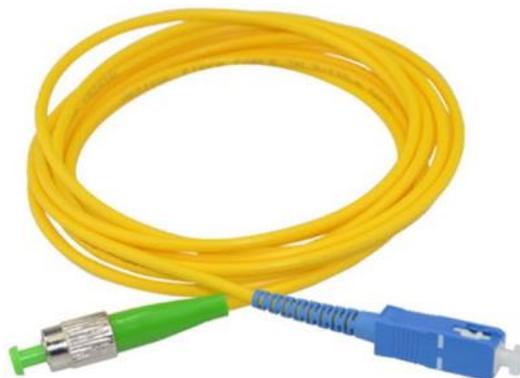


Figura 87 Cable de fibra óptica simplex FC/APC a LC/UPC.

Al ingresar a la interfaz gráfica para el usuario (GUI, *Graphical User Interface*) del OTDR, se puede observar un historial con los principales parámetros de las últimas mediciones que se han realizado con el OTDR. Para realizar una prueba nueva, es necesario seleccionar la opción *Ad Hoc* desde el menú *Manual Test*. La figura 88 muestra el historial de las últimas mediciones que el OTDR ha realizado, también se muestra la opción para iniciar una nueva medición.

16:19:44 NQMSfiber - Current Faults Welcome Daniel Enrique Ceballos Herrera!

Configuration Status Reporting Manual Test Ad Hoc About

OTH S/N:559326

Recent Faults							OTH Verification
	Last Update	Status	Type	Degradation (dB)	Position (km)	Position (km) (Min./Max.)	Optical Route/Test Setup
<input type="checkbox"/>	2021-06-09 00:00:44	Still there	Break	5.909	0.012	Min.: 0.000 Max.: 0.023	OTH:1 P003 Proactive maintenance at 1550.0 nm
<input type="checkbox"/>	2021-06-09 17:18:51	Changed	Degradation	15.468	0.562	Min.: 0.562 Max.: 1.160	OTH:1 P003 Monitoring at 1550.0 nm
<input type="checkbox"/>	2021-09-01 16:18:08	Still there	Break	23.17	7.187	Min.: 7.389 Max.: 8.129	OTH:1 P001 Monitoring at 1550.0 nm
<input type="checkbox"/>	2021-08-30 00:02:58	Still there	Break	21.041	7.187	Min.: 7.384 Max.: 8.121	OTH:1 P001 Proactive maintenance at 1550.0 nm
<input type="checkbox"/>	2021-08-31 00:00:17	Still there	Break	20.818	7.202	Min.: 7.371 Max.: 8.187	OTH:1 P002 Proactive maintenance at 1550.0 nm
<input type="checkbox"/>	2021-09-01 16:18:32	Still there	Break	20.679	7.202	Min.: 7.371 Max.: 8.203	OTH:1 P002 Monitoring at 1550.0 nm

Figura 88 Historial de mediciones del OTDR.

Al seleccionar la opción *Ad Hoc*, la GUI del OTDR mostrará una ventana con parámetros configurables, todos estos parámetros están por defecto para una lectura regulada con normas de la ITU G.562.D, la cual es la fibra instalada para este trabajo de investigación. El puerto reservado para estas pruebas es el puerto OTH:1 P003. Los únicos parámetros que se seleccionarán dependiendo del enlace a medir serán los que se encuentren en el apartado de configuración de adquisición (*acquisition settings*), en este apartado se cambiará la configuración a manual para poder determinar que la se seleccione una lambda de 1550 nm, con una resolución alta, un pulso de 10 nanosegundos y con una duración de 15 s de prueba; el rango se cambiará dependiendo de la distancia estimada de cada enlace. La figura 89 muestra la configuración que se utilizará para todas las mediciones del *fronthaul* óptico variable a excepción de la distancia estimada, la cual cambiará según el enlace.

16:21:30

Configuration Status

OTH S/N:559326

Optical Route

Select from existing routes
OTH:1 P003

Define a route manually

Acquisition Settings

Automatic settings

Manual settings

Wavelength: 1550.0 nm (B)

Resolution: High

Pulse: 10 ns

Range: 22 km

Duration: 15 s

Optical Route Settings

IOR: 1.4671

RBS: -81.87 dB/ns

Average helix factor: 0 %

Analysis Settings

Splice loss threshold: 0.02 dB

Reflectance threshold: -72 dB

End-of-fiber threshold: 4 dB

Actions

Default Start Stop

Figura 89 Configuración del OTDR.

4.5 Caracterización de componentes ópticos

Previo a la caracterización y obtención de los valores de cada uno de los parámetros de los elementos ópticos, es importante identificar cada uno de los SFP+ que formarán parte del *fronthaul* óptico pasivo, para este fin, se le ha dado un ID SFP+ a cada SFP+ a través de su número de serie. La tabla 22 muestra el emparejamiento de cada SFP+ del *fronthaul*.

Tabla 22 Identificación de los SFP+ DWDM.

ID SFP+	N° de serie
CH29 A	SOPD29EYFZ92
CH29 B	SOPD29EYFZ93
CH31 A	VE2048001ERD31
CH31 B	VE2040008ERD31
CH33 A	SOPD29EYFR21
CH33 B	SOPD29EYFR22
CH35 A	VE2040005ERD35
CH35 B	VE2030002ERD35

El ID SFP+ se eligió partiendo del canal que soporta seguido de la letra A o B. Los SFP+ que contengan la letra A se encontrarán ubicados en las estaciones de trabajo, mientras que los SFP+ correspondientes a las letras B, estarán insertados dentro de los USRP.

4.5.1 Potencia óptica en SFP+

Considerando las herramientas de medición con las que se cuentan, se han tomado dos diferentes mediciones de potencia óptica, la primera fue con el *Power Meter*, mientras que la segunda ha sido con el gestor interno del PL-1000TE. Ambas lecturas se han comparado con los valores nominales que promete el fabricante, a estas lecturas se les ha agregado el apartado en donde se determina si el SFP+ se encuentra dentro del rango de operación.

Ambas mediciones se hicieron insertando cada SFP+ DWDM en los puertos de red del equipo PL-1000TE. La figura 90 muestra un ejemplo de cómo se obtuvieron las lecturas con el *Power Meter*. Los resultados de estas mediciones se encuentran en la tabla 23 con su respectivo rango de operación nominal y si es que se encuentran funcionando en adecuadamente.

Tabla 23 Potencia óptica medida con el Power meter.

Potencia óptica [dBm]			
ID SFP+	Power Meter	Valor Nominal	¿Cumple?
CH29 A	0.43	-1 a 5	sí
CH29 B	0.62	-1 a 5	sí
CH31 A	1.23	-1 a 4	sí
CH31 B	1.69	-1 a 4	sí
CH33 A	1.04	-1 a 5	sí
CH33 B	0.44	-1 a 5	sí
CH35 A	1.91	-1 a 4	sí
CH35 B	2.03	-1 a 4	sí

Con los valores ordenados en la tabla 23 inicialmente con los valores nominales de los fabricantes se percibe que los SFP+ DWDM de *Solid-Optics* tendrán las mayores potencias puesto que su rango cubre 1 dBm más que los de *Smart-Optics*. Sin embargo, una vez encendidos emitiendo luz, los SFP+ DWDM con mayor potencia según el *Power Meter* corresponden a los de *Smart-Optics*. Cabe mencionar que aún con lo anterior, todos los SFP+ DWDM se encuentran dentro del rango de operación nominal, por lo que la diferencia anterior no representa inconvenientes.

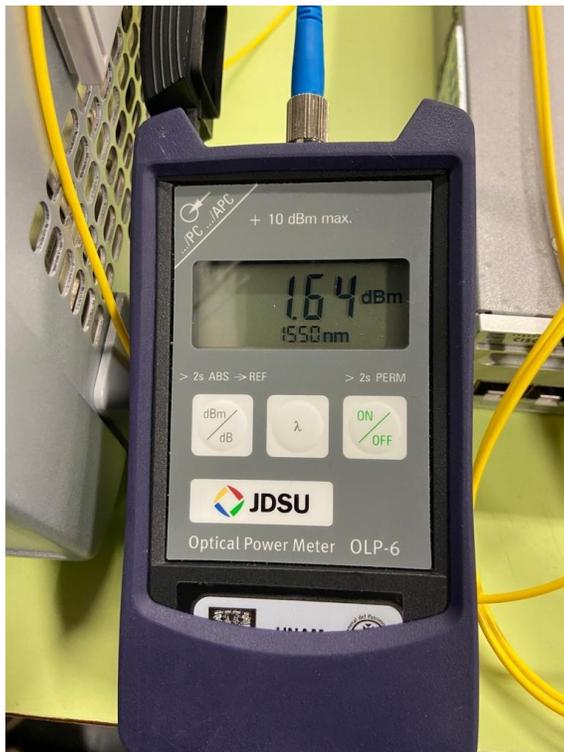


Figura 90 Lectura de la potencia óptica con el Power Meter.

Posteriormente, se midió la potencia óptica de cada SFP+ DWDM con el gestor interno del PL-1000TE para compararse con la potencia óptica nominal que cada fabricante brinda. La figura 91 muestra las lecturas del SFP+ CH29-A a través de la aplicación web del PL-1000TE, en ella se puede reconocer al SFP+ por su número de serie. Los valores medidos en el PL-1000TE de cada SFP+ DWDM se encuentran en la tabla 24.

Tabla 24 Potencia óptica medida con el PL-1000TE.

Potencia óptica [dBm]			
ID SFP+	PL-1000TE	Valor Nominal	¿Cumple?
CH29 A	0.6	-1 a 5	sí
CH29 B	1.1	-1 a 5	sí
CH31 A	1.1	-1 a 4	sí
CH31 B	1.5	-1 a 4	sí
CH33 A	0.6	-1 a 5	sí
CH33 B	1.3	-1 a 5	sí
CH35 A	1.5	-1 a 4	sí
CH35 B	1.8	-1 a 4	sí

En la tabla 24 se puede apreciar que existen variaciones, pero que todas las mediciones se encuentran dentro del rango de operación nominal, por lo que se puede confirmar que todos los SFP+ DWDM que son parte del *fronthaul* óptico pasivo se encuentran dentro de las condiciones normales de funcionamiento.



Figura 91 Lectura de la potencia óptica del SFP+ CH29-A a través del PL-1000TE.

Para finalizar la caracterización de los SFP+ DWDM en potencia óptica, se han comparado los valores medidos tanto en el *power meter* como en la aplicación interna del PL-1000TE, ya que existen pequeñas variaciones entre ellos. Se ha tomado el valor obtenido del *power meter* y se le ha restado el valor obtenido en la aplicación, los resultados de esta diferencia se encuentran en la tabla 25.

Tabla 25 Diferencia de lecturas en la potencia óptica de los diferentes instrumentos de medición.

Potencia óptica [dB]	
ID SFP+	Diferencia entre <i>Power Meter</i> y PL-1000TE
CH29 A	-0.17
CH29 B	-0.48
CH31 A	0.13
CH31 B	0.19
CH33 A	0.44
CH33 B	-0.86
CH35 A	0.41
CH35 B	0.23

Como es de apreciarse, estas diferencias son menores a 1 dB, relativamente mucho menor al rango que los propios fabricantes presentan en su hoja de especificaciones, puesto que en *Solid-Optics* el rango de potencia óptica en el transmisor es de 6 dB, mientras que en *Smart-Optics* este rango es de 5 dB.

4.5.2 Espectro óptico en SFP+

Para la caracterización completa de los SFP+ del *fronthaul*, es necesario medir los parámetros del espectro de cada SFP+, esto incluye: la frecuencia, la longitud de onda, el ancho de línea, el SMSR y el OSNR. Estas mediciones se harán con el analizador de espectro óptico (OSA), además se corroborarán con las lecturas de la aplicación interna del PL-1000TE.

En una primera instancia se realizó la medición de la frecuencia y la longitud de onda central del espectro emitida por los SFP+ DWDM correspondientes a las estaciones de trabajo. Para comprobar que estos operan dentro de los rangos nominales, se realizó una comparación mostrada en la tabla 26, la cual indica que todos los SFP+ DWDM de este sitio se encuentran dentro del rango especificado por el fabricante. La frecuencia se encuentra dentro de la banda convencional (banda C), la cual está centrada alrededor de los 193 THz o alrededor de $\lambda = 1550$ nm. Comúnmente las bandas ópticas se determinan a través de la longitud de onda y no tanto por la frecuencia, sin embargo, ambas lecturas son igual de funcionales, puesto que los canales DWDM se nombran típicamente por su frecuencia.

Tabla 26 Frecuencia y longitud de onda central de emisión de los SFP+ DWDM correspondientes a las Workstation.

USRP	Frecuencia [THz]		Longitud de onda [nm]		¿Cumple?
	Valor Nominal	OSA	Valor Nominal	OSA	
CH29-A	192.90	192.90	1554.13	1554.09	sí
CH31 -A	193.10	193.11	1552.52	1552.41	sí
CH33-A	193.30	193.30	1550.91	1550.91	sí
CH35-A	193.50	193.51	1549.31	1549.23	sí

Como se puede apreciar en la tabla 26, cada SFP+ DWDM correspondiente a las Workstation se encuentra muy cerca de la frecuencia central teórica, menor a 10 GHz de desplazamiento. Estas medidas afirman que son aptos para ocuparse como canales del sistema DWDM pertenecientes al *fronthaul* de este trabajo de investigación.

Se realizó el mismo procedimiento para cada SFP+ DWDM asignados a los USRP para la caracterización de su frecuencia y longitud de onda central. Los valores obtenidos se encuentran en la tabla 27, en ella se puede apreciar que la frecuencia central de estos SFP+ DWDM cumplen con las especificaciones requeridas. Por lo que, la comunicación entre los SFP+ DWDM en las estaciones de trabajo y en los USRP no tendría inconvenientes en cuestiones de longitud de onda o frecuencia central.

Tabla 27 Frecuencia y longitud de onda central de emisión de los SFP+ DWDM correspondientes a los USRP.

USRP	Frecuencia [THz]		Longitud de onda [nm]		¿Cumple?
	Valor Nominal	OSA	Valor Nominal	OSA	
CH29-B	192.90	192.89	1554.13	1554.18	sí
CH31 -B	193.10	193.11	1552.52	1552.43	sí
CH33-B	193.30	193.30	1550.91	1550.86	sí
CH35-B	193.50	193.50	1549.31	1549.24	sí

Las mediciones anteriores se obtuvieron encontrando el pico máximo en la densidad espectral que el analizador de espectro óptico (OSA) exhibe visualmente. La figura 92 muestra el espectro óptico correspondiente al canal 29, en ella se muestra que el pico es alcanzado en la frecuencia 192.91 THz.

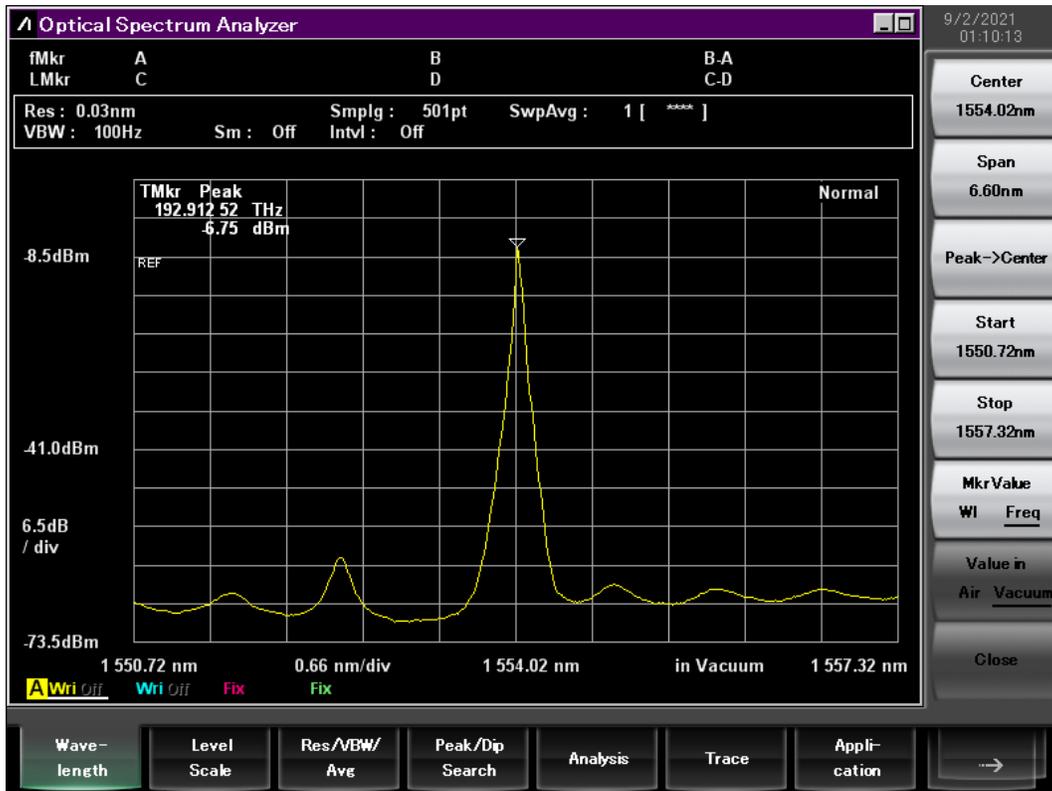


Figura 92 Espectro óptico del canal 29 mostrado en frecuencia.

La figura 92 muestra el pico máximo en frecuencia, sin embargo, en el analizador de espectro óptico (OSA) también es posible obtener la máxima densidad de potencia espectral en términos de longitud de onda. La figura 93 muestra el espectro óptico del canal 31, en la figura 93.a se aprecia la máxima densidad de potencia espectral en frecuencia, mientras que en la figura 93.b está representada en términos de λ .

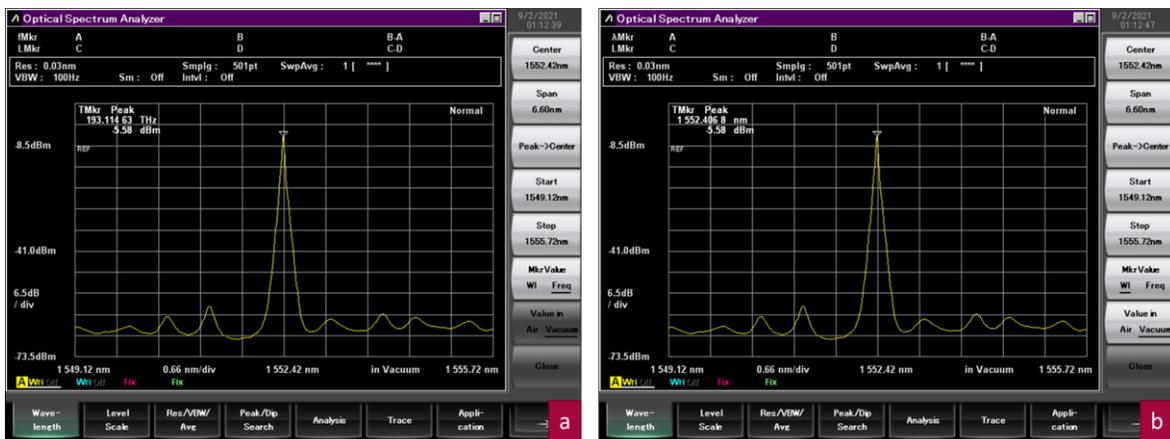


Figura 93 Espectro óptico del canal 31 mostrado en frecuencia y en λ .

Una de las características más sobresalientes de los SFP+ DWDM utilizados para este trabajo de investigación es su memoria EEPROM, puesto que esta le da la compatibilidad necesaria para establecer comunicación con las tarjetas de red de los equipos terminales, que son: las estaciones de trabajo y los USRP. El grabado que poseen es para brindar compatibilidad con tarjetas Intel, sin embargo, parte de esa compatibilidad indica que los SFP+ que se conecten a estas tarjetas de red deben de poseer láseres en la primera o segunda ventana de comunicación óptica, es decir, longitudes de onda en 850 nm y 1310 nm respectivamente.

Como se pudo notar con las pruebas anteriores, los láseres físicamente emiten longitudes de onda en la 3ra ventana óptica, correspondiente al sistema WDM que se quiere lograr, sin embargo, lógicamente se requiere que los SFP+ DWDM tengan en su EEPROM valores en la 1ra o 2da ventana óptica. Para verificar la longitud de onda lógica en su EEPROM de cada SFP+ DWDM, estos se insertaron al PL-1000TE según la tabla 28, para realizar una lectura general de los parámetros ópticos

Tabla 28 Asignación de puertos del PL-1000TE para medición de parámetros.

Puerto PL-1000TE	ID SFP+
Port 2	CH29 A
Port 4	CH31 A
Port 6	CH33 A
Port 8	CH35 A
Port 10	CH29 B
Port 12	CH31 B
Port 14	CH33 B
Port 16	CH35 B

Al leer las longitudes de onda dentro de la aplicación web del PL-1000TE, es posible notar que en su EEPROM se les ha grabado una longitud de onda en la primera o segunda ventana, para poder obtener compatibilidad con las tarjetas de red. Concretamente, los SFP+ DWDM de *Solid-Optics* tienen grabada en su EEPROM $\lambda = 850$ nm, mientras que los SFP+ DWDM de *Smart-Optics* una $\lambda = 1310$ nm. La figura 94 muestra la interfaz de la aplicación web del PL-1000TE con la información óptica completa de cada SFP+ DWDM, en ella se puede reconocer cada uno de los SFP+ DWDM atendiendo la asignación de la tabla 28. En la figura 94 no solamente se puede notar que lógicamente no se encuentran dentro de rangos WDM, sino que también la aplicación web indica que el proveedor es Intel, en vez de *Smart-Optics* o *Solid-Optics*. Esta demostración pone de manifiesto la importancia de realizar las mediciones y caracterización del equipo utilizado mediante equipo de medición independiente de la aplicación web, como es el OSA y el *power meter*. Solamente así se tiene la certeza de realizar las caracterizaciones correctas y que por ende el sistema óptico implementado operará de acuerdo con el diseño.

Con estos datos lógicos que arroja la aplicación web del PL-1000TE se puede inferir que todos los SFP+ DWDM pertenecientes a este proyecto de investigación poseen los atributos lógicos necesarios para establecer una conectividad entre las tarjetas de red Intel de los dispositivos terminales.

A través del analizador de espectro óptico (OSA) se midió el ancho de línea en configuración FWHM de cada SFP+ DWDM correspondientes a las estaciones de trabajo. El resultado se obtuvo tanto en

nanómetros como en giga-Hertz. La tabla 29 muestra que el ancho de línea de todos los SFP+ DWDM está debajo de los 0.038 nm que en frecuencia son 4.75 GHz.

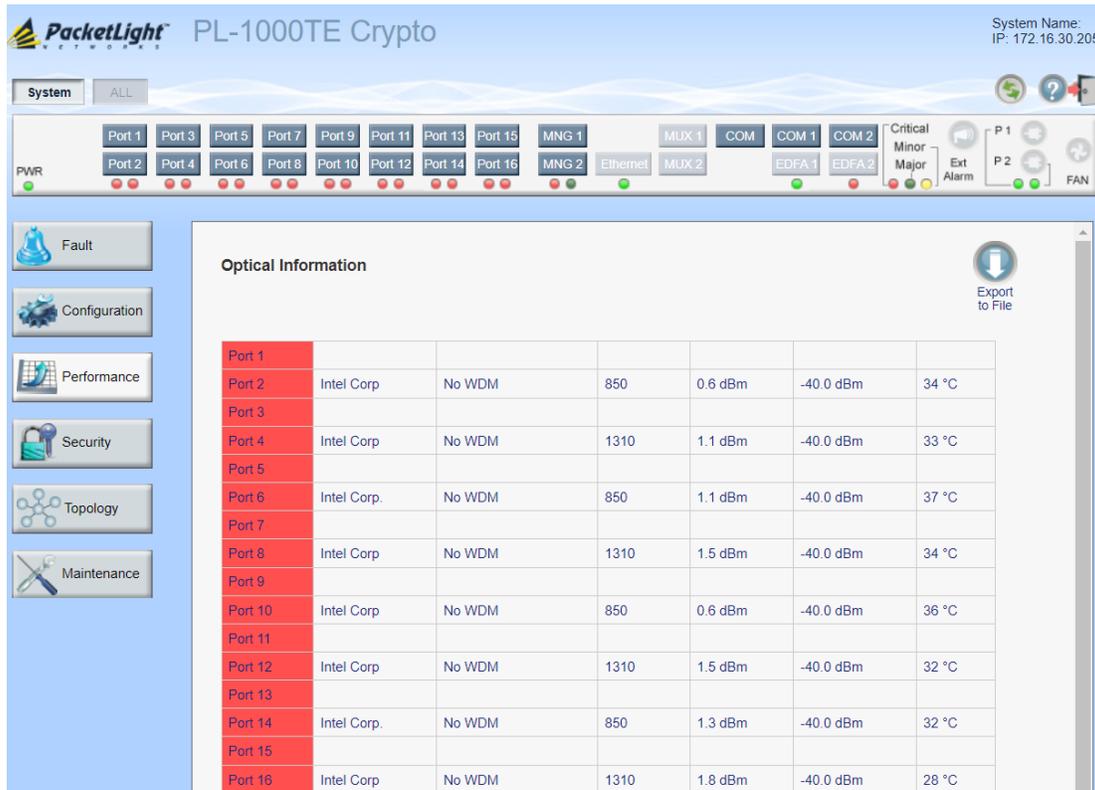


Figura 94 Información óptica de SFP+ DWDM a través de la aplicación web con información lógica diferente a la física.

Tabla 29 Ancho de línea de los SFP+ DWDM correspondiente a las estaciones de trabajo.

Workstation	Linewidth a 3dB	
	[nm]	[GHz]
CH29 A	0.038	4.750
CH31 A	0.033	4.125
CH33 A	0.038	4.750
CH35 A	0.030	3.750

Se repitió el procedimiento anterior para obtener el ancho de línea de los SFP+ DWDM correspondientes a los USRP. La tabla 30 muestra que los resultados obtenidos ligeramente mejores que los anteriores.

Tabla 30 Ancho de línea de los SFP+ DWDM correspondiente a los USRP.

USRP	Linewidth a 3dB	
	[nm]	[GHz]
CH29 B	0.031	3.875
CH31 B	0.032	4.000
CH33 B	0.029	3.625
CH35 B	0.034	4.250

Con el ancho de línea máximo de 4.75 GHz o de 0.038 nm se puede concluir que los anchos de línea de todos los SFP+ DWDM destinados para el *fronthaul* óptico pasivo del diseño planteado son aptos para su incorporación, ya que el diseño original cuenta con separaciones inter-canal de 200 GHz o de 1.6 nm, rango mucho mayor que el ancho de línea, por lo que no representaría afectaciones en sus canales contiguos en lo que respecta al ancho de línea.

Otro parámetro importante que se obtiene con el analizador de espectro óptico (OSA) es el SMSR, el cual se puede distinguir visualmente por ser los picos laterales de la densidad de potencia espectral de la frecuencia o longitud de onda central. Al tener dos valores diferentes de SMSR en cada canal DWDM es necesario identificarlos. Dejando como unidades de referencia en nanómetros a las diferentes componentes de la señal, se tendrá que el eje en λ empezará desde las longitudes de onda más cortas a las más largas, además de que se diferenciarán los SMSR en orden de aparición en el eje de las λ s, por lo que el SMSR1 tendrá una longitud de onda más corta que el de la frecuencia central, mientras que el SMSR2 tendrá una longitud de onda más larga que el correspondiente al de la frecuencia central. Visto ahora desde la frecuencia en vez desde la longitud de onda, al ser inversamente proporcionales, el SMSR1 poseerá una frecuencia más alta que la correspondiente a la que tiene la máxima densidad de potencia espectral, mientras que el SMSR2 se encuentra en una más pequeña.

En la figura 95 se muestra la identificación de los SMSR del canal 29, en el eje horizontal se puede apreciar que los valores están dados por la longitud de onda. Los puntos a partir de los que se mide el SMSR1 y el SMSR2 son los máximos contiguos desde el punto f_c , el cual es la frecuencia central de la señal, que es la que contiene la mayor densidad de potencia espectral.

Como se puede observar en cualquier figura que contenga la representación gráfica de la densidad espectral de los canales a través del analizador de espectro óptico (OSA), no importa si se obtienen los valores en términos de longitud de onda o en frecuencia, el eje horizontal se mantiene en λ , por lo que para fines prácticos el SMSR1 se puede nombrar como SMSR izquierdo y al SMSR2 como derecho, por la posición que ocupan con respecto a la frecuencia central.

De acuerdo con la identificación de SMSR anterior, se obtuvieron los valores tanto en decibeles y nanómetros, además de su equivalencia en GHz del SMSR1 de los SFP+ DWDM de las estaciones de trabajo. La tabla 31 muestra que el SMSR1 se encuentra alejado casi un canal de diferencia, tenido un rango de 166.5 GHz hasta de 182.25 GHz de la componente en la frecuencia central. También, en la tabla se puede observar que la relación de la densidad de potencia espectral de la frecuencia central con la del SMSR1 es mayor a 51 dB.

Tabla 31 Medidas del SMSR1 de los SFP+ DWDM en Workstation.

Workstation		SMSR1	
ID SFP+	[dB]	[nm]	[GHz]
CH29 A	54.69	1.458	182.250
CH31 A	52.41	1.162	145.250
CH33 A	51.48	1.332	166.500
CH35 A	55.70	1.439	179.875

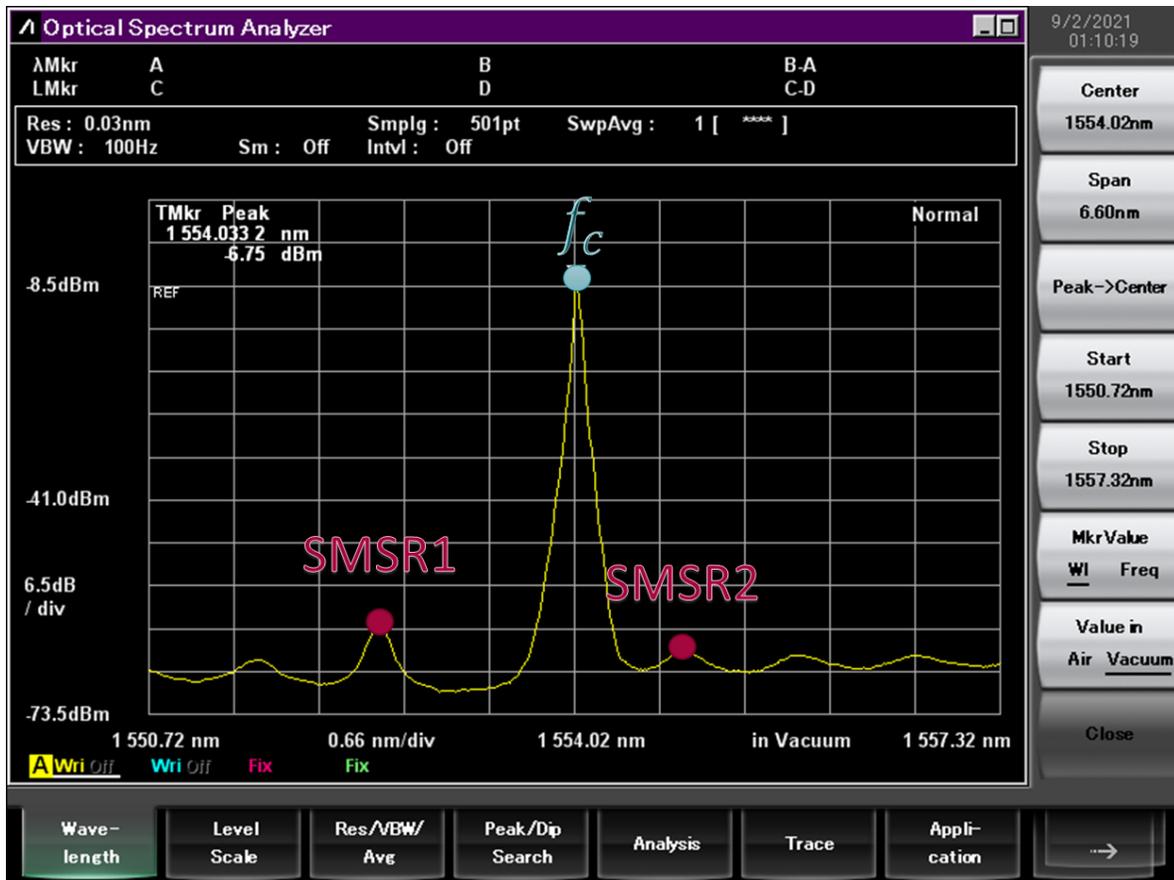


Figura 95 Identificación del SMSR en el canal 29.

Una vez obtenidos los SMSR1 de los SFP+ DWDM de las estaciones de trabajo, se repitió el procedimiento para la obtención de los SMSR de la derecha, es decir, el SMSR2. Los resultados de estas mediciones están en la tabla 32. Como se puede apreciar en las tablas 31 y 32, los valores de la relación de potencia son similares, sin embargo, en cuanto se a la separación espectral se refiere, los valores del SMSR1 tienden a estar más alejados que los valores del SMSR2.

Tabla 32 Medidas del SMSR2 de los SFP+ DWDM en Workstation.

Workstation	SMSR2		
	[dB]	[nm]	[GHz]
CH29 A	56.25	0.900	112.500
CH31 A	56.46	0.765	95.625
CH33 A	57.79	0.828	103.500
CH35 A	58.03	0.885	110.625

Posteriormente se prosiguió a obtener los valores de SMSR1 en los SFP+ DWDM respectivos de los USRP. Los resultados se encuentran almacenados en la tabla 33, en ella se puede apreciar que existe una similitud en cuanto a separación espectral y relación de densidad de potencia espectral de los SMSR1 medidos para los SFP+ DWDM de las estaciones de trabajo.

Tabla 33 Medidas del SMSR1 de los SFP+ DWDM en USRP.

USRP		SMSR1	
ID SFP+	[dB]	[nm]	[GHz]
CH29 B	52.60	1.512	189.00
CH31 B	54.67	1.490	186.25
CH33 B	54.52	1.458	182.25
CH35 B	52.31	1.530	191.25

Para terminar con la caracterización de los SMSR en los SFP+ DWDM del *fronthaul*, se realizaron las mediciones del SMSR2 de los SFP+ DWDM seleccionados para los USRP. La tabla 34 muestra los resultados, en ella se puede apreciar que al igual que los SFP+ DWDM correspondientes a las estaciones de trabajo, el SMSR2 se encuentra más cerca de la frecuencia central de la señal. En promedio son unos 90 GHz más cercano del SMSR1.

Tabla 34 Medidas del SMSR2 de los SFP+ DWDM en USRP.

USRP		SMSR2	
ID SFP+	[dB]	[nm]	[GHz]
CH29 B	56.63	0.792	99.000
CH31 B	56.61	0.871	108.875
CH33 B	57.58	0.846	105.750
CH35 B	56.43	0.845	105.625

Con las lecturas de ambos SMSR es posible deducir que, el SMSR1 tiende a tener más potencia que el SMSR2, además de que se encuentra espectralmente más alejado que el SMSR2. La figura 96 es una captura del analizador de espectro óptico (OSA) en la medición del SMSR1 del canal 31, el cual tiene una separación de 144 GHz referente a la frecuencia central y una diferencia de 52.413 dB con respecto de la máxima densidad de potencia espectral.

En todos los SMSR2 medidos en los SFP+ DWDM de diferentes canales tanto en estaciones de trabajo como en USRP, se obtuvieron relaciones de densidad de potencia espectral más grandes con respecto de la componente central que en los SMSR1, lo cual indica que los SMSR2 tienen menor densidad de potencia que los medidos en SMSR1. La figura 97 muestra una captura del analizador de espectro óptico (OSA) en la medición del SMSR2 del canal 35, en la cual se puede apreciar que la densidad de potencia del SMSR2 es menor a la del SMSR1.

Recordando que idealmente un sistema DWDM necesita canales estrechos y sin componentes adicionales a su frecuencia central, el SMSR es un problema que puede perturbar a los canales del mismo sistema. Sin embargo, también es indispensable recordar que el MUX/DEMUX funciona a través de filtros ópticos, los cuales tienen como preferencia a las componentes centrales de cada canal DWDM, por lo que las componentes de la señal en frecuencias alejadas de la componente central serán removidas por dichos filtros. Por tanto, es necesario caracterizar al MUX/DEMUX para tener precisión de que tanto o no afectaría el SMSR que contiene cada señal en sus canales.

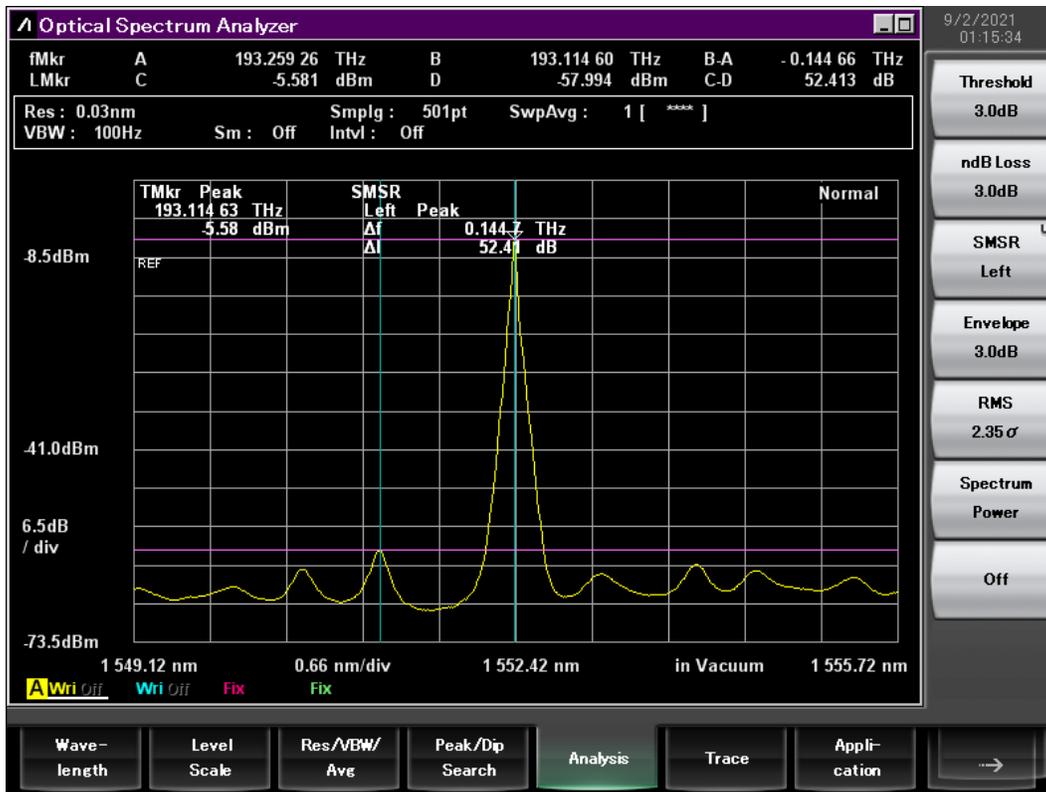


Figura 96 Lecturas del SMSR1 del canal 31.

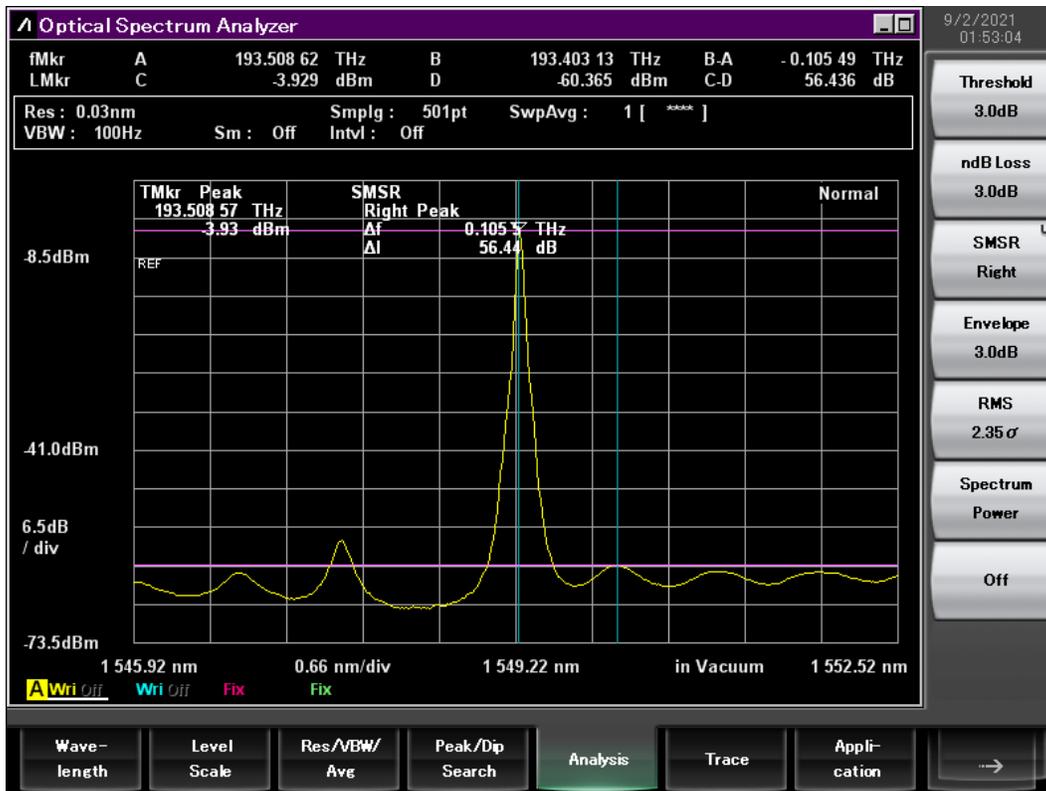


Figura 97 Lecturas del SMSR2 del canal 35.

Como último parámetro que caracterizar para las pruebas preliminares a la implementación en el *fronthaul* en los SFP+ DWDM es el OSNR inicial que estos poseen, ya que este nos indica la calidad del canal DWDM desde el transmisor. Conocer el OSNR en el lado del transmisor previene futuros problemas en la calidad de la señal, aunque el OSNR más crítico en un sistema de transmisión óptico es el OSNR en el extremo del receptor, ya que el OSNR de cualquier señal óptica se degrada al viajar a lo largo del medio óptico, así como su paso a través de distintos componentes, principalmente activos como son los amplificadores ópticos, sin embargo, en este trabajo de investigación al tener el diseño de una red pasiva se espera que el OSNR tanto en el transmisor como en el receptor sean similares al prescindir de elementos activos. Verificar que el OSNR se mantenga igual en cada uno de los puntos de la red es importante para corroborar que el sistema se mantiene en óptimas condiciones a lo largo del medio óptico.

Obtener el OSNR inicial servirá como punto referencial cuando se obtenga el OSNR en el lado del receptor. En la tabla 35 se encuentran albergados los valores del OSNR de los SFP+ DWDM medidos directamente en el transmisor con el OSA, en ella se puede apreciar que el OSNR de todos los canales del sistema en las estaciones de trabajo es superior a 58 dB.

Tabla 35 OSNR de los SFP+ DWDM en las Workstation.

Workstation	
ID SFP+	OSNR [dB]
CH29 A	58.90
CH31 A	58.43
CH33 A	58.47
CH35 A	58.79

Se repitió la medición del OSNR en el transmisor en los SFP+ DWDM pertenecientes a los USRP. La tabla 36 muestra las lecturas obtenidas a través del OSA, en ella se puede observar que los niveles del OSNR en el receptor de los SFP+ DWDM en los USRP son parecidas a los que se encuentran en las estaciones de trabajo.

Tabla 36 OSNR de los SFP+ DWDM en los USRP.

USRP	
ID SFP+	OSNR [dB]
CH29 B	59.06
CH31 B	60.36
CH33 B	58.82
CH35 B	59.45

Con el OSNR mayor a 58 dB en ambos extremos del enlace, la calidad de los canales tanto en *upstream* como en *downstream* es buena, ya que para la tasa de transmisión que los SFP+ DWDM poseen que es de 10 Gbps, el OSNR comúnmente en el lado del receptor tiene que estar arriba de los 15 dB o 18 dB [129], por lo que, los SFP+ DWDM utilizados en este trabajo de investigación tienen un amplio rango en su OSNR, convirtiéndolos en resilientes con los eventos que puedan perturbar el enlace.

La figura 98 muestra la medición del OSNR del canal 35, el cual presenta un piso de ruido irregular en las diferentes componentes de longitudes de onda, lo que puede causar diferencias de medición en el OSNR, no obstante, el rango de los niveles de la densidad de potencia espectral en el piso de ruido del canal 35 y de todos los canales de este sistema, concluye en niveles de OSNR favorables, por lo que, los sesgos que pudieran tener las mediciones como resultado de estas irregularidades no resultan relevantes para el propósito de este trabajo de investigación.

Un OSNR grande en el transmisor de todos los SFP+ DWDM, es un buen indicativo de que los canales podrán mantener la tasa de transmisión nominal, así como cubrir mayores distancias, sin embargo, es necesario medir el OSNR en el enlace multiplexado también, puesto que, esta señal multiplexada es la que recorrerá el enlace entero hasta su demultiplexación para posteriormente llegar a su receptor correspondiente.

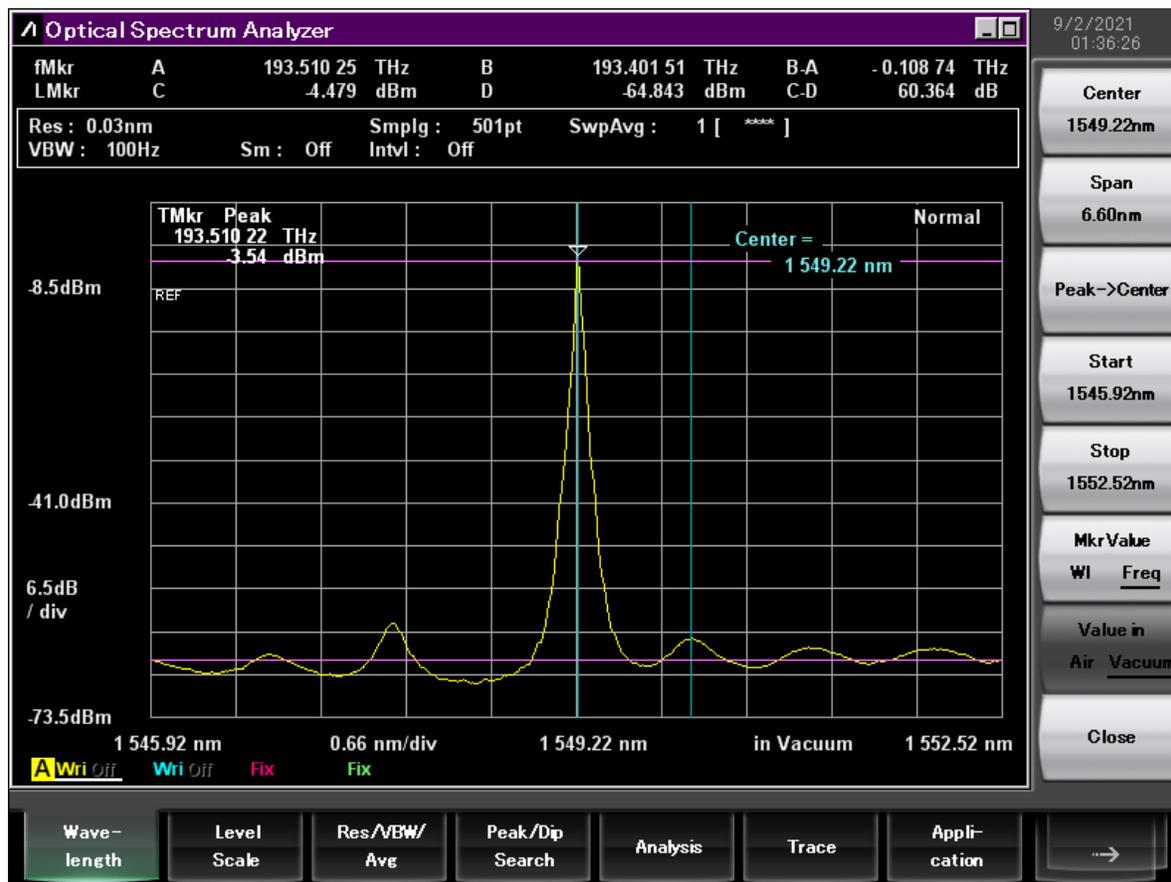


Figura 98 OSNR del canal 35.

4.5.3 Caracterización de MUX/DEMUX

El diseño de este *fronthaul* cuenta con 4 MUX/DEMUX, los cuales 2 servirán como MUX y otros 2 como DEMUX. Cada sentido del enlace, tanto en *upstream* como en *downstream* contará con un MUX y un DEMUX. Cada MUX/DEMUX funciona a partir de filtros que solo permiten el paso de frecuencias centrales con un cierto ancho de banda. La caracterización de los MUX/DEMUX consiste en que manera y cuanto afectan los filtros a una señal cuando pasa a través de estos.

Previo a la caracterización de los MUX/DEMUX es importante identificar cada uno de ellos. Los MUX/DEMUX se han nombrado de acuerdo con la función que realizan y a la ubicación donde se encuentran, por lo que el multiplexor en el sentido *upstream* se nombró MUX-UP, mientras que el demultiplexor en el mismo sentido se nombró DEMUX-UP. Se realizó la identificación en el sentido *downstream* con las mismas reglas, por tanto, el demultiplexor resulta ser DEMUX-DOWN, mientras que el multiplexor es MUX-DOWN. La figura 99 muestra la identificación de cada MUX/DEMUX con su nomenclatura asignada. Es importante recordar que el sentido tanto *upstream* como *downstream* está dado desde la perspectiva del usuario final de la red, el cual tendrá acceso a la red desde los USRP, por esta razón toda la información que se mande desde el USRP hacia las estaciones de trabajo se considerará de subida, mientras que la información que le llegue a los USRP se considerará de bajada.

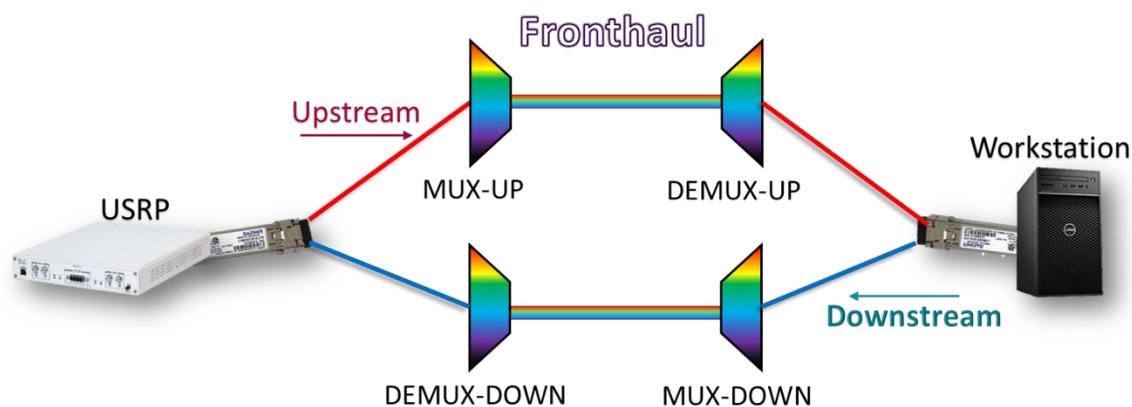


Figura 99 Identificación de cada MUX/DEMUX del fronthaul.

Todos los elementos pasivos en una red óptica generan pérdidas por inserción, la cual reduce la potencia de la señal óptica que atraviesa dicho elemento. La pérdida por inserción es la relación que existe entre la potencia óptica de salida con la potencia óptica de entrada, en este caso es la relación de la potencia resultante después del MUX/DEMUX con la potencia de la señal antes de pasar por el MUX/DEMUX.

Se caracterizaron los 4 MUX/DEMUX para cada canal. La tabla 37 contiene las pérdidas por inserción del MUX-UP y del DEMUX-UP, además por ser del mismo sentido, se ha agregado una columna más con las pérdidas totales del MUX/DEMUX en sentido *upstream*. En ella se puede apreciar que el MUX-UP tiene más pérdidas de inserción para el canal 31, mientras que el DEMUX-UP presenta las mayores pérdidas en el canal 29.

Tabla 37 Pérdidas por inserción del MUX/DEMUX de cada canal en sentido *upstream*.

Upstream	Pérdidas [dB]			
	Canal	MUX	DEMUX	MUX/DEMUX
CH29		5.20	3.12	8.32
CH31		5.32	2.11	7.43
CH33		4.36	2.79	7.15
CH35		4.00	1.18	5.18
Promedio		4.72	2.30	7.02

Considerando las pérdidas totales que tiene el MUX/DEMUX en sentido *upstream* el promedio de pérdidas por inserción está en 7.02 dB, presentando las menores pérdidas en el canal 35 el cual tiene 5.18, mientras que el canal 29 presenta las mayores pérdidas de potencia óptica, llegando hasta 8.32 dB.

Se repitió el procedimiento anterior para los MUX/DEMUX en sentido *downstream*. La tabla 38 muestra los valores obtenidos de las pérdidas por inserción para los MUX/DEMUX *downstream* para cada canal. En ella se puede notar que el MUX-DOWN es el que tiene las mayores pérdidas por inserción de los 2 pertenecientes al sentido *downstream*; mientras que el DEMUX-DOWN es el que menos pérdidas por inserción posee de todos los MUX/DEMUX del sistema.

Tabla 38 Pérdidas por inserción del MUX/DEMUX de cada canal en sentido *downstream*.

Downstream Canal	Pérdidas [dB]		
	MUX	DEMUX	MUX/DEMUX
CH29	5.98	1.41	7.39
CH31	4.97	1.41	6.38
CH33	4.93	1.72	6.65
CH35	5.08	2.04	7.12
Promedio	5.24	1.64	6.88

Comparando los 4 MUX/DEMUX solamente el DEMUX-DOWN presenta pérdidas por inserción aceptables para un sistema de DWDM de larga distancia, ya que para completar un sentido es necesario multiplexar y demultiplexar, lo cual indica que las pérdidas se irán acumulando. Con la combinación de cada par de MUX/DEMUX se obtiene que en sentido *upstream*, el promedio es de 7.02 dB, mientras que en *downstream* el promedio es de 6.88, pero que además al tomar los valores extremos entre ellos es posible notar que existe una diferencia considerable, ya que el canal 29 en sentido *upstream* es el que presenta mayores pérdidas con 8.32 dB, mientras que el canal 35 en sentido *upstream* es el que presenta las menores pérdidas con 5.18 dB.

Con una notable diferencia de 3.14 dB entre estos dos canales, el sistema se desbalancearía al pasar por los MUX/DEMUX. Sin embargo, el desbalance en la potencia óptica de un sistema DWDM tiene mayor relevancia cuando las distancias son relativamente grandes y además pasan a través de puntos de inserción y eliminación como un OADM. Sin duda, este desbalanceo es una desventaja indeseada en los sistemas DWDM, además de las pérdidas excesivas de los MUX/DEMUX en general, pero como se ha mencionado antes, este trabajo de investigación busca cubrir una longitud donde exista un rendimiento óptimo en la red de entre 10 km a 20 km. Con lo anterior, se tendría que evaluar la máxima distancia posible con el enlace de distancia variable.

Otro parámetro importante que caracterizar en los MUX/DEMUX es el espaciamiento inter-canal, ya que este indica si la frecuencia o la lambda de operación de cada canal se afectó o no al pasar a través de los filtros de los MUX/DEMUX. De acuerdo con el diseño inicial de esta red, cada canal tiene un espaciamiento espectral de 200 GHz, que en términos de longitud de onda corresponden a 1.6 nm. La tabla 39 muestra el espaciamiento inter-canal en sentido *upstream*, en ella se puede apreciar que los canales se encuentran dentro del rango de los 200 GHz con variaciones de +14 GHz a -14 GHz.

Tabla 39 Espaciamiento inter-canal en sentido upstream.

Upstream Canales	Espaciamiento	
	[GHz]	[nm]
29 - 31	214	1.61
31 - 33	186	1.61
33 - 35	210	1.60

Se repitió el mismo procedimiento para obtener el espacio inter-canal del sentido *downstream*. La tabla 40 muestra que estos espaciamientos se encuentran dentro del rango de los 200 GHz con variaciones de +20 GHz hasta -4 GHz.

Tabla 40 Espaciamiento inter-canal en sentido downstream.

Downstream Canales	Espaciamiento	
	[GHz]	[nm]
29 - 31	220	1.75
31 - 33	196	1.57
33 - 35	202	1.62

Considerando que el espaciamiento inter-canal del diseño inicial corresponde a 200 GHz, estas variaciones no suponen afectaciones en el sistema, por lo que las frecuencias y las longitudes de onda de los canales se mantienen centradas con sus valores iniciales al pasar a través de los MUX. La figura 100 muestra los canales multiplexados con su respectivo espaciamiento inter-canal, en ella se puede apreciar que se encuentran separados equitativamente con una separación de 200 GHz o de 1.6 nm.

Los MUX/DEMUX utilizados en este proyecto de investigación están compuestos por filtros que poseen un ancho de banda fijo. Los filtros ópticos idealmente permitirían el paso de toda la potencia de la señal óptica en la frecuencia central del canal o las componentes de su alrededor deseadas, mientras que, denegaría completamente el paso de la potencia óptica en las componentes de las frecuencias no deseadas, resultando en un ancho de banda completamente cuadrado. Experimentalmente el espectro del ancho de banda de los filtros ópticos va atenuando a las componentes indeseadas hasta denegar completamente el paso, por lo que, en vez de resultar cuadrado, resulta una disminución de potencia gradual. Los MUX/DEMUX también acoplan a las señales filtradas en una sola señal, formando señales multiplexadas con componentes principales, los cuales son los canales del sistema DWDM.

El acondicionamiento que reciben las señales de los canales DWDM, es decir, el filtrado, resulta útil para eliminar componentes que puedan causar interferencias o afectaciones a los canales de la señal multiplexada. Las figuras 100 y 101 muestran la señal multiplexada después de pasar a través de los MUX, en ellas se puede ver el efecto de los filtros, ya que, al combinar las señales filtradas, los componentes de los modos laterales que los láseres emitían han desaparecido, es decir, el SMSR. Por lo que, se puede inducir que los filtros ópticos de los MUX/DEMUX funcionan adecuadamente para los requisitos impuestos a este trabajo de investigación.

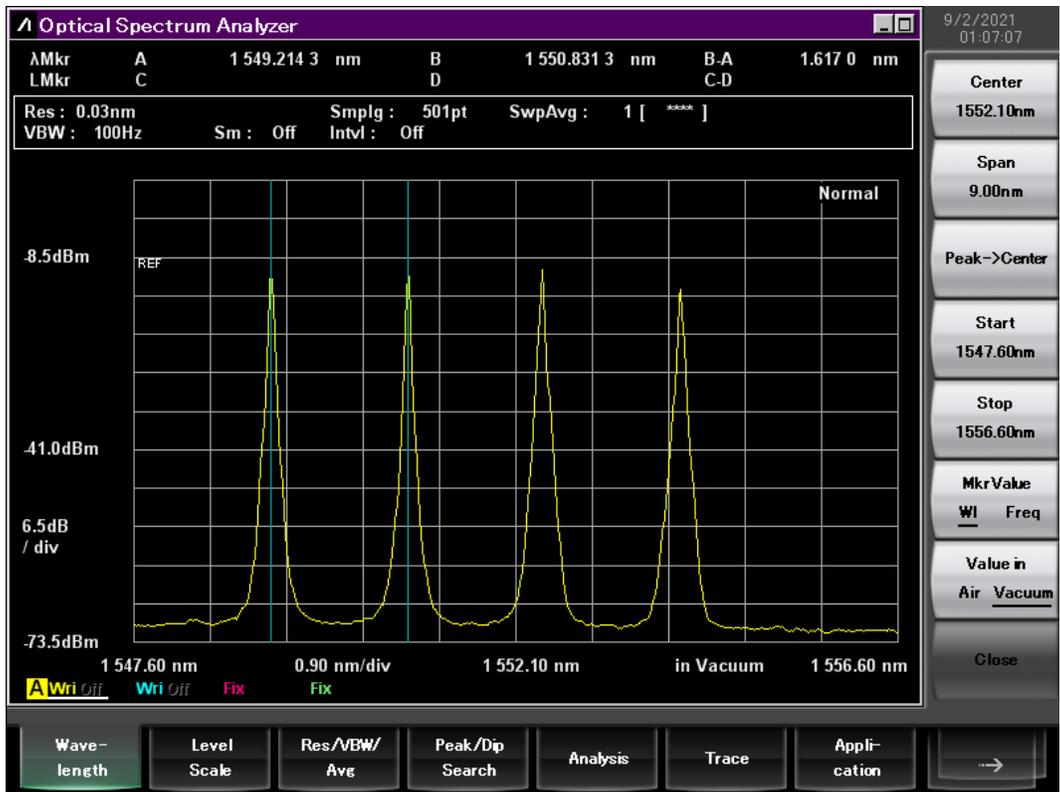


Figura 100 Espaciamiento inter-canal de los canales 33 y 35 en términos de lambda en sentido upstream.

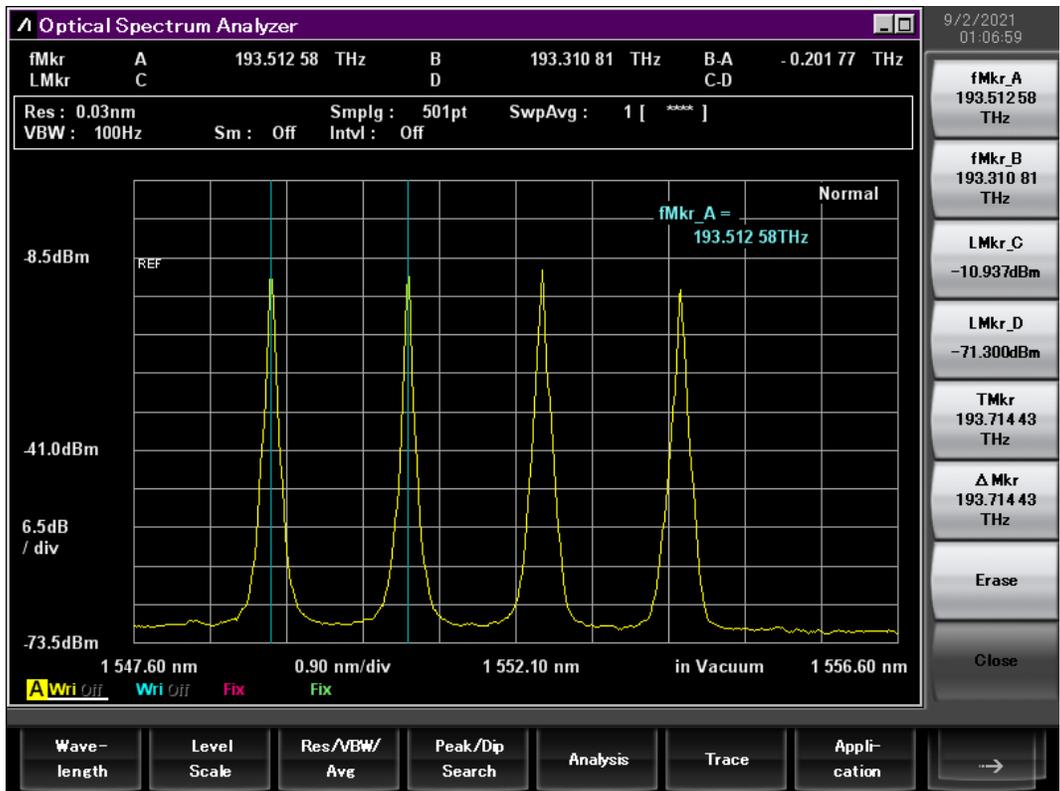


Figura 101 Espaciamiento inter-canal de los canales 33 y 35 en términos de frecuencia en sentido downstream.

Cómo último parámetro por caracterizar de los MUX/DEMUX es el OSNR. Principalmente el OSNR de una señal óptica es afectado por utilizar amplificadores ópticos, ya que ellos amplifican tanto la señal como el ruido. Mientras que, en elementos pasivos, tanto la potencia de la señal óptica como la potencia del ruido se atenúan al pasar a través de ellos, por lo que, teóricamente el OSNR de las señales multiplexadas y demultiplexadas se debe de mantener similar a como se emitió en el transmisor. La figura 102 muestra la señal multiplexada en sentido *upstream*, en ella se puede apreciar que el OSNR de la señal es de 61.07 dB, lo cual dicta que se mantuvo y sólo hubo reducción de potencia óptica, tanto en la señal como en el piso de ruido.

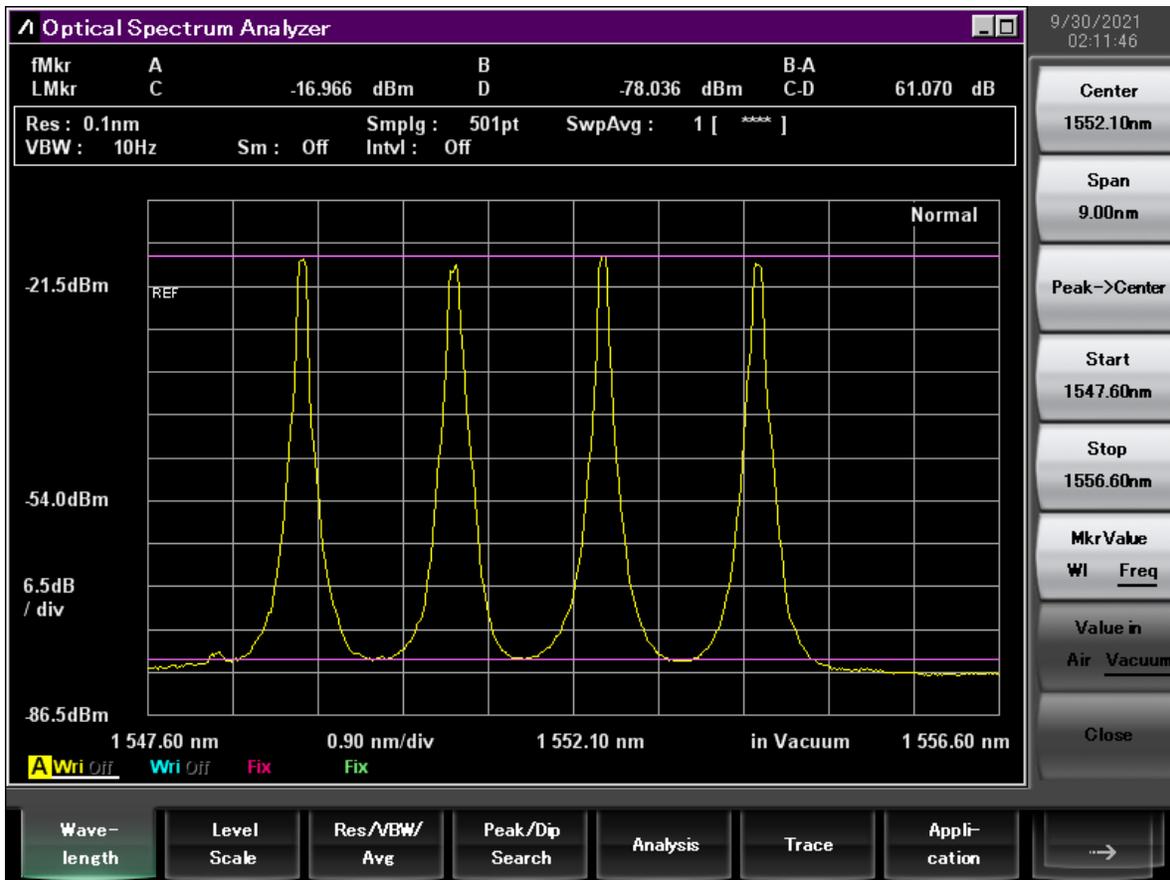


Figura 102 OSNR de la señal multiplexada.

Capítulo 5. Resultados y análisis

En las redes ópticas pasivas, la mayor afectación es la atenuación de potencia óptica, debido a pérdidas de inserción por los diferentes elementos pasivos que la red puede poseer, además de la atenuación propia de la fibra óptica. Un parámetro que ayuda a cuantificar los valores de pérdidas de potencia aceptables dentro de cualquier red óptica ya sea activa o pasiva es la sensibilidad (*sensitivity*) del receptor, puesto que este parámetro indica los niveles de potencia óptica más bajos que se pueden aceptar para una decodificación y un procesamiento exitoso.

Existen dos conceptos altamente relacionados entre ellos, el primero es el presupuesto de potencia (*Power Budget*) que se refiere a un rango de potencia óptica a la que el transmisor debe de operar para lograr una comunicación exitosa hacia el receptor, el cual debe de considerar todas las pérdidas a lo largo del enlace de fibra óptica; el segundo es el presupuesto de pérdidas (*Loss Budget*), el cual se realiza junto con el tendido de fibra óptica, ya que es la cantidad de pérdidas que debería tener el enlace de fibra óptica si se instala apropiadamente. Por lo que el primero es un cálculo de la potencia necesaria para el sistema con base en los valores de potencia óptica emitida en el transmisor y las pérdidas del enlace o con una perspectiva desde la potencia aceptada por la *sensitivity* del receptor y las pérdidas del enlace, incluyendo las penalidades de potencia en el que sistema puede incurrir, como penalidad de potencia por dispersión. Mientras que, el presupuesto de pérdidas se calcula sumando las pérdidas promedio estimadas de todos los componentes utilizados en el enlace para obtener la pérdida total estimada en los puntos finales.

En este capítulo se evaluarán las pérdidas del *fronthaul* óptico pasivo variable utilizando el OTDR. Se realizarán los cálculos de presupuesto de potencia con las diferentes longitudes posibles para determinar la eficiencia del enlace con sus diferentes combinaciones y se obtendrán las pérdidas específicas del *fronthaul* para definir si es o no una implementación viable hacia una red formal de tecnología 4G/5G.

5.1 Pruebas OTDR

Analizar el enlace a través del OTDR antes de levantar un servicio sobre la fibra es una buena práctica para garantizar un desempeño óptimo en la nueva implementación o agregado de la red. Utilizar el OTDR para caracterizar al enlace, brinda una descripción detallada sobre la distancia del enlace, además de las pérdidas y el tipo de estas que se encuentran en cada punto en específico del enlace medido.

Para este trabajo de investigación se han obtenidos 3 diferentes enlaces, los cuales han sido caracterizados con el OTDR, para tener mayor claridad sobre cada uno, se han identificado mediante sus características de recubrimiento, que resultan visualmente fáciles de identificar. La tabla 41 muestra la asignación de los ID Link de cada enlace.

Tabla 41 Identificación de los enlaces según su recubrimiento.

ID Link	Recubrimiento
1	Azul
2	Verde/Café/Naranja
3	Carrete añadido

Para que el OTDR arroje lecturas validas de cada enlace, es necesario ingresar una distancia estimada como parámetro. Los enlaces Link 1 y Link 2 se encuentran dentro del mismo cable de fibra óptica que está tendido entre el IINGEN y la FI, con la diferencia que el Link 2 es 3 veces más largo que el Link1; mientras que el Link 3 es un carrete añadido. En el capítulo 4 se ha estimado una distancia mínima de 340 m entre el IINGEN y la FI, sin embargo, no se han considerado enrollamientos o elevaciones de la fibra, por lo que la distancia final del tendido puede aumentar fácilmente. En tanto, para el carrete añadido se estima que tenga una distancia mínima de 300 m.

Se conectó el OTDR en el Link 1 estimando una distancia de 4 km, debido a que cuenta con 6 tramos de fibra óptica. La figura 103 muestra la traza del OTDR para el Link 1, en ella se puede apreciar que la distancia de este enlace es de aproximadamente 3.3 km de longitud.

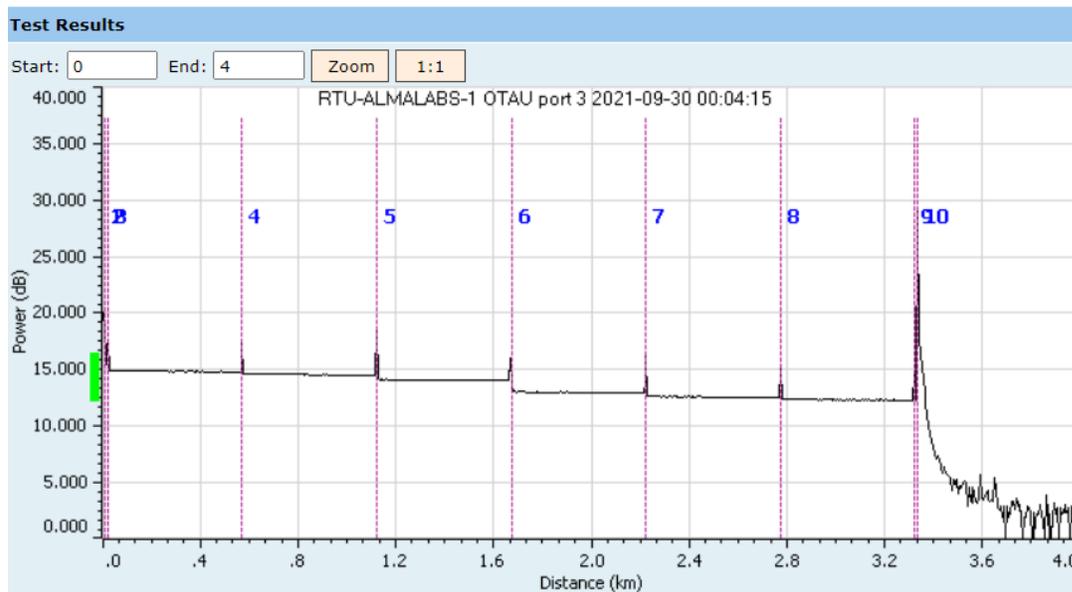


Figura 103 Traza del ID Link 1 en sentido upstream.

En la traza de la figura 103 se pueden observar 10 eventos registrados por el OTDR, sin embargo, por la alta resolución se deben de interpretar como 7 eventos únicamente, el primero de ellos es el acoplamiento que existe entre el OTDR y el enlace a través de conectores mecánicos. En la traza se puede apreciar que todos los eventos en este enlace son parecidos, puesto que, existe un pico de potencia más alto al del nivel próximo anterior seguido de una caída de potencia; a este tipo de eventos se les denomina: pérdidas por reflectancia.

Las pérdidas por reflectancia ocurren cuando el pulso emitido por el OTDR es reflejado ya sea por una impureza en la fibra o por un acople en la fibra óptica, los cuales funcionan como superficies reflejantes. Los reflejos producidos en el Link 1 son consecuencia de utilizar conectores mecánicos, ya que su superficie hace que parte del rayo de luz que está atravesando la fibra rebote, generando una saturación en el fotodetector del OTDR, lo cual es mostrado como un pico de potencia en la traza. La caída de potencia óptica se debe a que parte de la potencia óptica se pierde en la reflexión.

El final del enlace o una rotura de la fibra óptica se expresa en el OTDR como un evento reflexivo muy grande seguido de una pérdida de alrededor de -14 dB para conectores LC/UPC. En Link 1, esto sucede a los 3.3 km. Se descarta que sea un corte de la fibra y se confirma que es el final del enlace

por el hecho que en la traza se representan los 6 tramos de fibra óptica que el Link 1 posee a distancias equidistantes.

Los resultados de la traza obtenidos con el OTDR del Link 1 muestran un resumen detallado de los eventos existentes a lo largo del enlace, los parámetros más significativos para este trabajo de investigación es la distancia máxima del enlace, las pérdidas acumuladas con todos los eventos y el nivel de reflectancia que marca el final del enlace. La figura 104 muestra los detalles de los eventos medidos en Link 1, centrando la atención en los valores finales, se puede observar que la reflectancia de la potencia óptica llega a los -15.453 dB, valor que es cercano a los -14 dB correspondiente a los conectores LC/UPC que utiliza el final del enlace, con una distancia final de 3.334 km con pérdidas acumuladas de 3.384 dB.

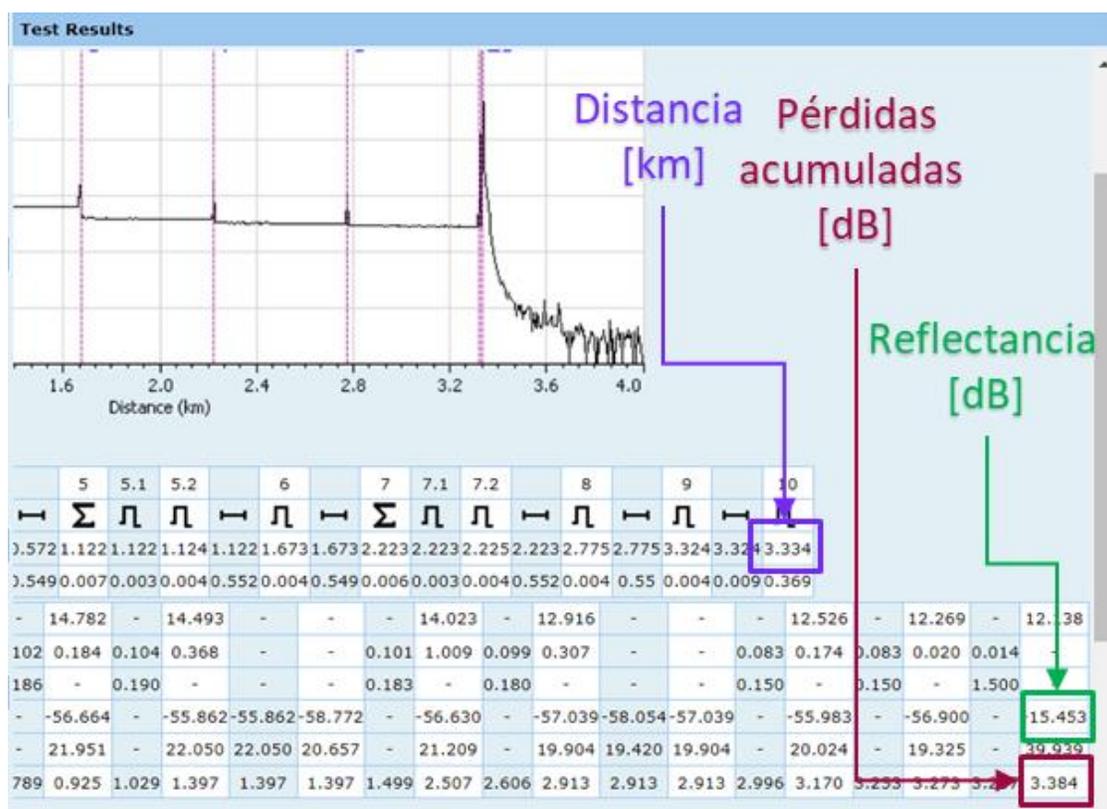


Figura 104 Detalles de la traza del Link 1 en upstream.

Un enlace debe de tener ambos sentidos para proporcionar una comunicación full-dúplex, además de que los valores tanto de distancia final como de pérdidas acumuladas en el enlace se deben de mantener con valores similares para que el enlace se encuentre balanceado y pueda prevenir problemas de sincronización. Para caracterizar por completo al Link 1, se repitió el procedimiento anterior, pero ahora en sentido *downstream*.

La figura 105 muestra la traza de Link 1 en sentido *downstream*, en ella se puede notar que la traza es muy similar a la del Link 1 en sentido *upstream*, lo cual es un buen indicador de que el enlace se encuentre probablemente balanceado, es decir, que comparte tanto la misma distancia como las pérdidas acumuladas.

Para verificar que el enlace se encuentra balanceado, se ha resumido y comparado ambos sentidos del Link 1, los datos se encuentran en la tabla 42. En ella se puede apreciar que la diferencia que hay entre ambos sentidos es nula y que el Link 1 en sentido *downstream* presenta menores pérdidas por 0.203 dB que el sentido *upstream*. La diferencia de las pérdidas acumuladas se debe al uso de conectores mecánicos, ya que, al no tener un acople estable, cada conector puede tener diferentes valores en las pérdidas de inserción.

Tabla 42 Resumen del Link 1.

ID Link 1	Upstream	Downstream	Diferencia
Pérdidas [dB]	3.384	3.181	0.203
Distancia [km]	3.334	3.334	0

Una vez caracterizado el Link 1 se prosiguió con la caracterización del Link 2, el cual teóricamente tiene el triple de distancia que el Link 1, por lo que se estima con una distancia de 9.9 km según los resultados de las trazas anteriores. Para dejar un margen de resultados, la distancia estimada se delimitó a los 11 km. La figura 107 muestra la traza del Link 2 en sentido *upstream*, en ella se pueden apreciar eventos reflexivos al igual que las trazas anteriores; este enlace presenta también eventos atenuantes provocados por los empalmes de fibra óptica por fusión.

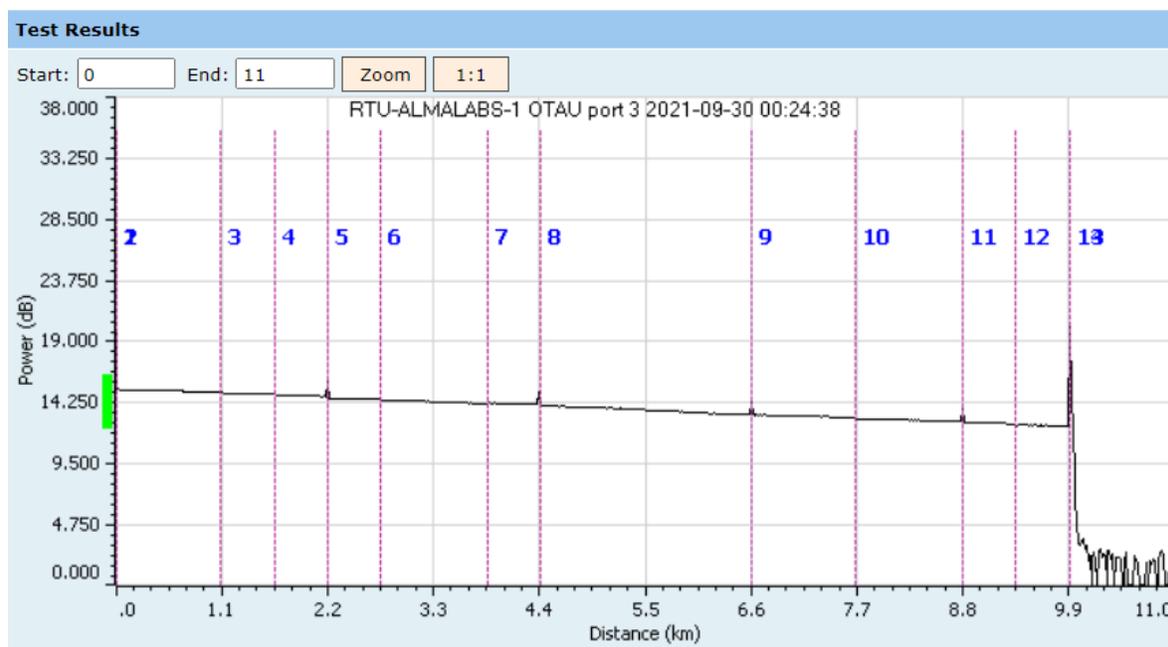


Figura 107 Traza del ID Link 2 en sentido upstream.

Considerando el diseño para la construcción del Link 2, se tiene que, por cada 3 empalmes de fusión existe un conector mecánico, repitiendo este patrón 4 veces hasta obtener un último tramo de fibra óptica empalmado para la salida, con lo anterior, estrictamente se tendrían 17 eventos intermedios, más los 2 de los extremos del enlace. Los empalmes por fusión provocan mucho menos pérdidas que los conectores mecánicos, además de que no causan reflexiones por el acoplamiento del mismo medio con las mínimas pérdidas posibles. Las lecturas de la traza del OTDR mostrada en la figura 107 omite eventos intermedios, concretamente a los eventos atenuantes de los empalmes de

fusión, ya que, al presentar pérdidas mínimas, el OTDR puede confundir esta atenuación como propia de la fibra óptica, lo cual es un indicativo de que el empalme está bien realizado. Sin embargo, los eventos reflectivos siguen manifestándose, lo cual es normal por la naturaleza del acoplamiento mecánico, además de que cada evento aparece en la posición que estaba estimada.

Analizado los eventos detallados arrojados por el OTDR, se puede notar que la distancia máxima corresponde a 9.918 km, las cual corresponde a la estimación de la longitud comparado con el Link 1. El fin del enlace se puede apreciar por la reflectancia de -18.529 dB, que en términos de pérdidas por reflectancia son mayores al estimado de -14 dB correspondiente con sus conectores LC/UPC, también se puede apreciar que las pérdidas acumuladas en el Link 2 en sentido *upstream* son de 2.793 dB. La figura 108 muestra los detalles de la traza del Link 2 en sentido *upstream*.

Event	Number	11	12	
	Type	↵	↔	↵
	Position (km)	8.817	8.817	9.918
	Length (km)	0.034	1.101	0.829
Current	Curve Level (dB)	23.330	-	22.984
	Loss (dB)	0.164	0.181	-
	Attenuation (dB/km)	-	0.164	-
	Reflection (dB)	-54.795	-	-18.529
	Reflective Peak (dB)	27.035	-	44.388
	Cumulative Loss (dB)	2.611	2.792	2.793

Distancia [km]
Reflectancia [dB]
Pérdidas acumuladas [dB]

Figura 108 Detalles de la traza del Link 2 en *upstream*.

Al igual que el Link 1, es necesario verificar que el Link 2 se encuentra balanceado. Se repitió el procedimiento anterior para el Link 2, pero en sentido *downstream*. La figura 109 muestra la traza del OTDR en la lectura del Link 2 en sentido *downstream*, en ella se puede apreciar que existen menos eventos atenuativos por empalmes, por lo que se puede inferir que este sentido tiene mejores empalmes por fusión que su contraparte *upstream*, es decir, la mayoría de los empalmes están bien realizados que el OTDR no reconoce pérdidas de potencia óptica significativa que los pueda catalogar como eventos distintos a las pérdidas de atenuación causadas por el medio. En la traza se siguen manteniendo los eventos reflexivos de los conectores mecánicos y el evento reflexivo final en las mismas posiciones, por lo que se puede apreciar que se mantienen las mismas distancias.

Revisando los últimos valores en el detalle de la traza se puede apreciar que el evento reflexivo que marca el final del enlace se encuentra en el evento 8 con un valor de -16.488 dB, en este evento la distancia máxima del enlace se encuentra a 9.92 km. En la parte de pérdidas acumuladas del evento 8 marca un valor ligeramente más alto que en link 2 en sentido *upstream*, el cual es 2.83 dB. La figura 110 muestra los detalles anteriormente mencionados del Link 2 en sentido *downstream*.

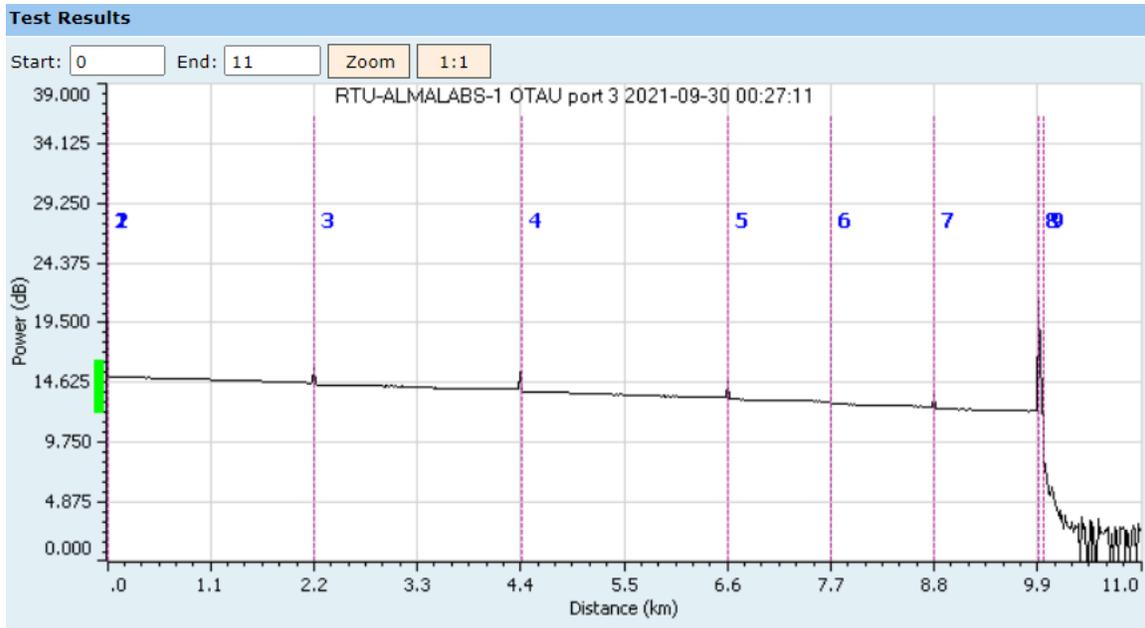


Figura 109 Traza del ID Link 2 en sentido downstream.

Event	Number	15	16
Type			
Position (km)		9.3779.37	79.920
Length (km)		0.0190.54	30.755
Curve Level (dB)		23.263	- 23.105
Loss (dB)		0.074	0.082 -
Attenuation (dB/km)		-	0.152 -
Reflection (dB)		-	- -16.488
Reflective Peak (dB)		23.249	- 45.529
Cumulative Loss (dB)		2.747	2.829 2.830

Figura 110 Detalles de la traza del Link 2 en downstream.

Realizando la comparación en el Link 2 para ambos sentidos se tiene una diferencia de distancias de menos de 10 m de longitud con una diferencia en las pérdidas acumuladas de 0.037 dB. En la tabla 43 se puede notar que la mayor distancia la posee el sentido *downstream*, mientras que las menores pérdidas las tiene el sentido *upstream*. En general es un enlace balanceado, con diferencias que, para redes ópticas de cualquier alcance, ya sea corto, mediano o largo alcance son irrelevantes.

Tabla 43 Resumen del Link 2.

Link 2	Upstream	Downstream	Diferencia
Pérdidas [dB]	2.793	2.83	0.037
Distancia [km]	9.918	9.92	0.002

Teniendo caracterizados los enlaces correspondientes al tendido realizado entre el IINGEN y la FI, únicamente falta por caracterizar el Link 3 correspondiente al carrete añadido ubicado en el IINGEN. Al igual que los enlaces anteriores, se realizaron las mediciones con estimaciones, para el Link 3 se ha estimado que el carrete tiene una longitud de 330 m aproximadamente, por lo que, al tener 24 hilos internos, la distancia equivaldría a unos 8 km aproximadamente. Para tener un margen de error, se le ha delimitado a 9 km como parámetro inicial al OTDR.

La figura 111 muestra la traza OTDR del Link 3 en sentido *upstream*, en ella se puede apreciar que solo tiene 2 eventos reflexivos, los cuales se encuentran en el inicio y en el final. Atendiendo al diseño para la construcción de este enlace, es necesario recordar que el Link 3 carece de conectores intermedios, razón por la cual no aparecen eventos reflexivos intermedios. La construcción del Link 3 se realizó a base de empalmes de fusión, por lo que únicamente aparecen eventos intermedios de atenuación. Idealmente ningún evento por empalme es deseado en las lecturas de las trazas OTDR, sin embargo, experimentalmente los eventos totales que deberían de aparecer al unir 24 tramos de fibra por fusión serían 23, pero en la traza únicamente aparecen 10, por lo que, 13 de estos presentan valores favorables de pérdidas. En la traza del OTDR se puede apreciar que la distancia alcanzada con el carrete añadido es de 8.548 km, lo cual es muy cercano a la estimación.

A través de los detalles de los eventos en la traza del OTDR del Link 3 en sentido *upstream* presentados en la figura 112, se puede notar que el evento reflexivo de -15.021 dB presenta el final del enlace, indicando la distancia final de 8.584 km con pérdidas acumuladas de 3.386 dB.

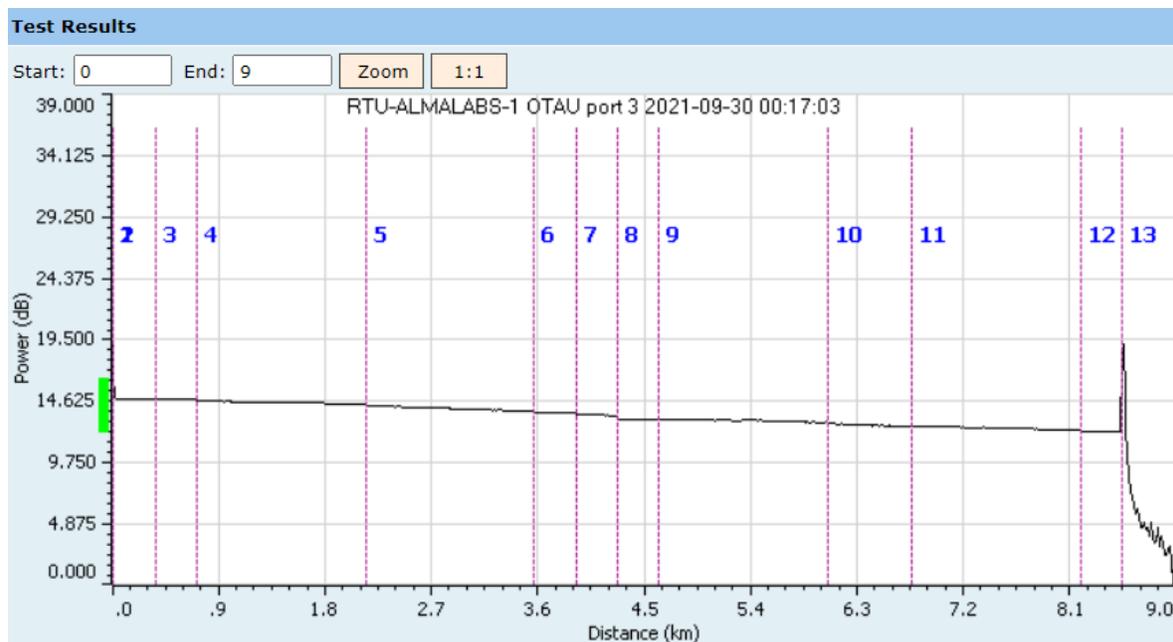


Figura 111 Traza del ID Link 3 en sentido *upstream*.

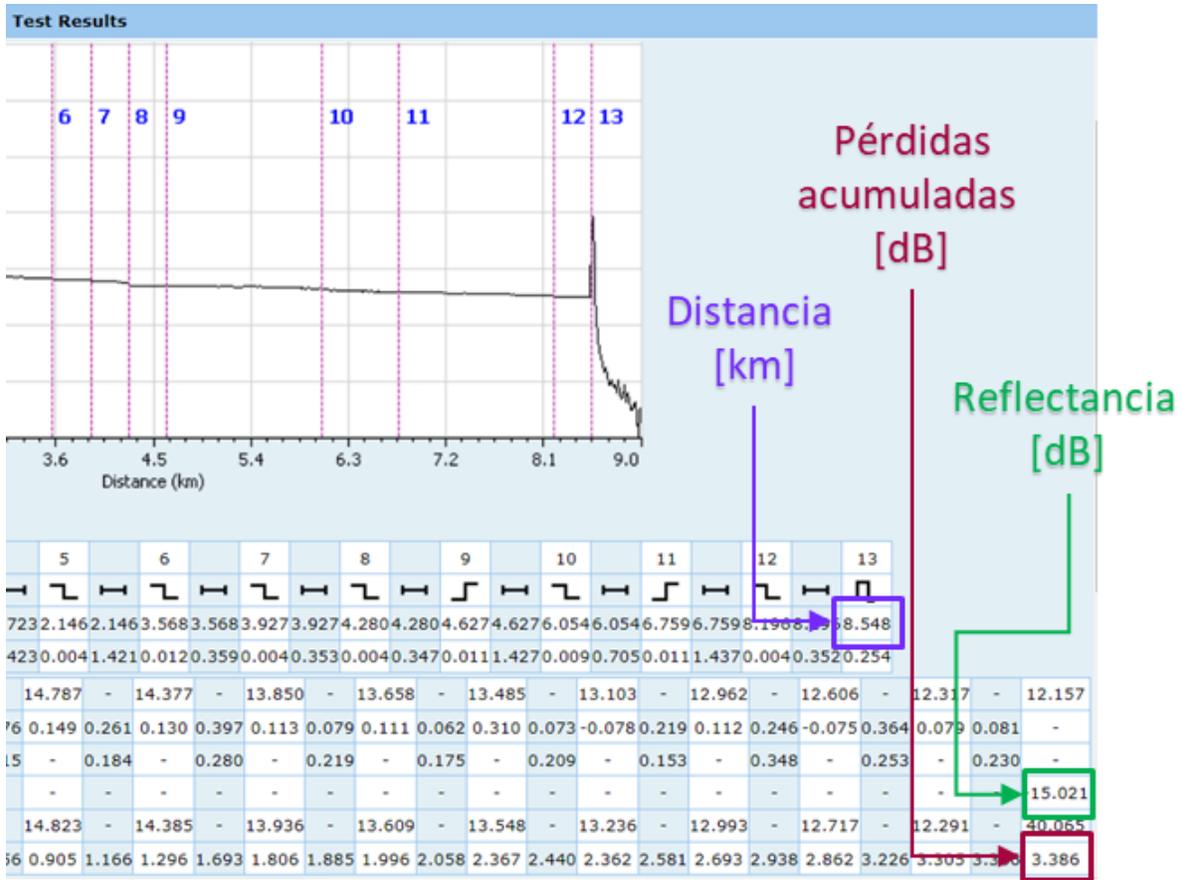


Figura 112 Detalles de la traza del Link 3 en upstream.

Para finalizar la caracterización de todos los enlaces provistos para este trabajo de investigación en todos los sentidos de transmisión, es necesario caracterizar el Link 3 en sentido *downstream*, el cual se comparará con el sentido en *upstream* para descartar problemas de balanceo.

Se repitió el procedimiento anterior para el Link 3 en sentido *downstream*, la figura 113 muestra su traza OTDR, en ella se puede observar que al igual que el sentido *upstream*, la traza carece de eventos reflectivos intermedios. En la traza se pueden apreciar 8 eventos atenuativos, lo cual significa que 15 empalmes de fusión presentan valores propicios de pérdidas de potencia óptica para el trabajo de investigación.

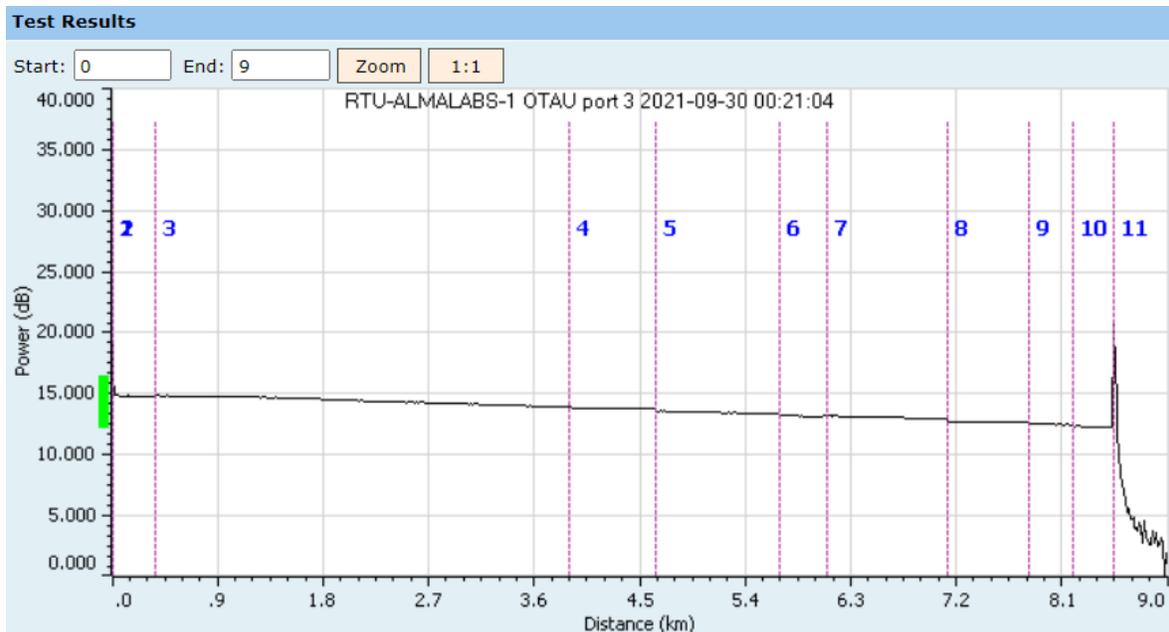


Figura 113 Traza del ID Link 3 en sentido downstream.

Analizando los detalles de la traza OTDR del Link 3 en sentido *downstream*, se puede observar que la reflectancia de -15.275 dB indica el final del enlace, para lo cual la distancia alcanzada es de 8.545 km, mientras que las pérdidas acumuladas son de 3.313 dB. La figura 114 muestra los valores anteriormente descritos.

Realizando una comparación entre ambos sentidos en el Link 3, se puede decir que la mayor distancia la posee el sentido *upstream*, en tanto la menor pérdida de potencia óptica se encuentra en el sentido *downstream*. La tabla 44 muestra el resumen del Link 3, en ella se puede apreciar que tanto los valores de distancia como los valores de potencia óptica se encuentran muy cercanos, por lo que, se puede considerar al Link 3 como un enlace balanceado.

Tabla 44 Resumen del Link 3.

Link 3	Upstream	Downstream	Diferencia
Pérdidas [dB]	3.386	3.313	0.073
Distancia [km]	8.548	8.545	0.003

Los valores de las pérdidas acumuladas varían de enlace a enlace, no únicamente por la distancia, sino también por el tipo de conexión que maneja cada uno, ya que, estos 3 enlaces no se componen de una única fibra óptica, sino que varios hilos de fibra óptica componen a los enlaces. Para el Link 1 se tiene que las conexiones de estos hilos son a través de conectores mecánicos, mientras que las conexiones del Link 3 son únicamente de empalmes por fusión, además de que las conexiones pertenecientes al Link 2 se componen tanto de conectores mecánicos como de empalmes de fusión.

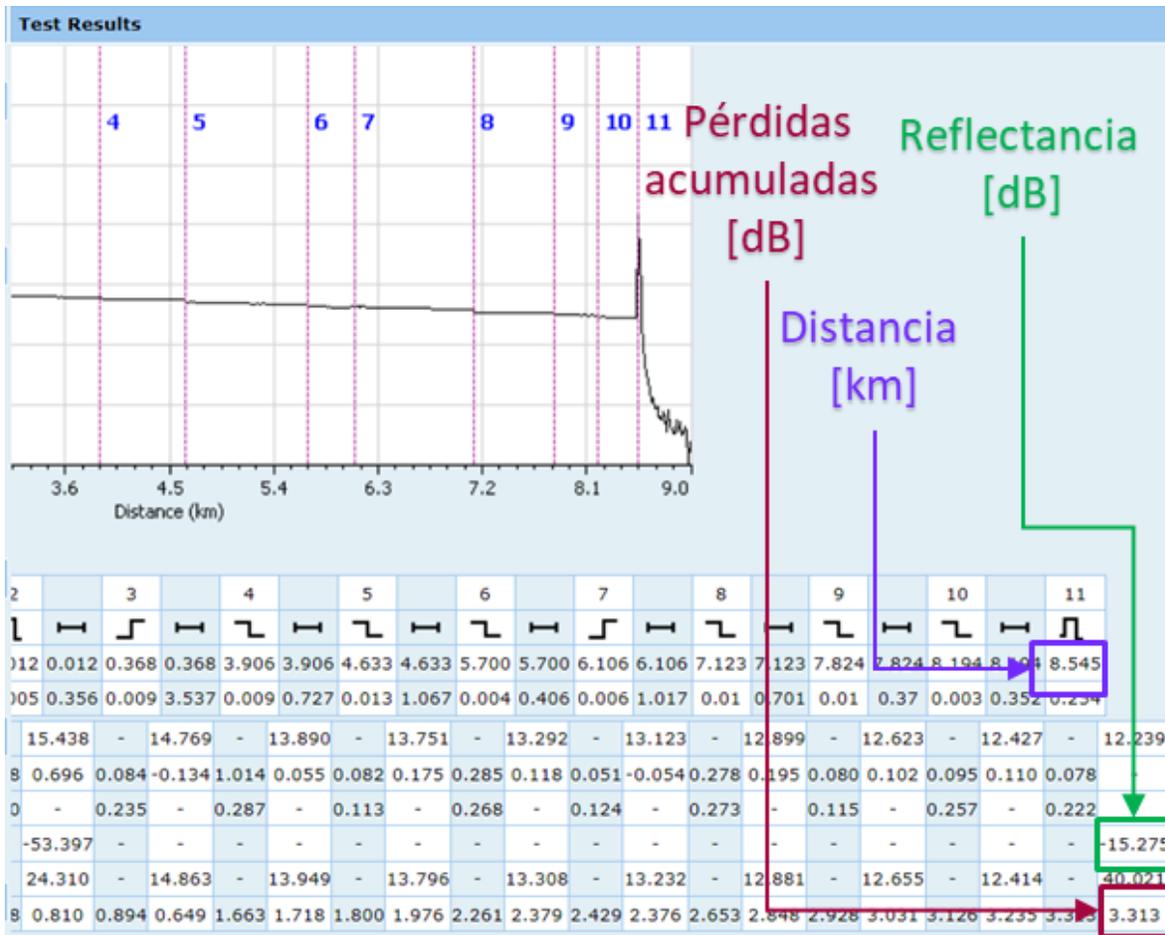


Figura 114 Detalles de la traza del Link 3 en downstream.

Con la información de las trazas OTDR y con el diseño de los enlaces, se puede resumir la información de cada enlace a través de la tabla 45, la cual indica que la distancia del tendido entre el IINGEN y la FI experimentalmente se encuentra alrededor de 555m, mientras que el carrete añadido tiene 350 m de longitud. Considerando los conectores de inicio y final del enlace, se puede notar que el mayor número de conectores lo tiene el Link 1 con un total de 13 conectores mecánicos, pero sin ningún empalme de fusión en el enlace, mientras que el Link 2 es el que tiene el mayor número de hilos todos unidos por empalmes y solamente cuenta con dos conectores mecánicos en sus extremos del enlace.

Tabla 45 Distancia entre extremos de cada enlace y el número de hilos.

ID Link	Distancia entre extremos [m]	No. de hilos	Distancia total aproximada [m]	No. de empalmes	No. de conectores
1	555	6	3330	0	7
2	555	18	9990	13	6
3	350	24	8400	23	2

Atendiendo a los valores del coeficiente de atenuación de la fibra óptica utilizada en esta implementación correspondiente a 0.22 dB/km a longitudes de onda de alrededor de 1550 nm y con las lecturas de las trazas dadas por el OTDR es posible calcular las pérdidas en la fibra óptica y calcular de igual forma las pérdidas por conectores mecánicos y empalmes de fusión.

El cálculo de las pérdidas de potencia óptica en el medio se realiza a través de la multiplicación del factor de atenuación por la distancia, mientras que el cálculo de las pérdidas de potencia óptica por conectores mecánicos y empalmes de fusión se obtiene restando las pérdidas acumuladas con las pérdidas del medio previamente obtenidas. Las tablas 46 y 47 muestran los resultados obtenidos al realizar los cálculos previamente descritos.

Tabla 46 Cálculo de pérdidas en sentido upstream a partir de mediciones experimentales.

Upstream				
ID Link	Distancia medida [km]	Pérdidas acumuladas medidas [dB]	Pérdidas en la fibra óptica [dB]	Pérdidas por conectores y empalmes [dB]
1	3.334	3.384	0.733	2.650
2	9.918	2.793	2.181	1.238
3	8.548	3.386	1.880	1.505

Tabla 47 Cálculo de pérdidas en sentido downstream a partir de mediciones experimentales.

Downstream				
ID Link	Distancia medida [km]	Pérdidas acumuladas medidas [dB]	Pérdidas en la fibra óptica [dB]	Pérdidas por conectores y empalmes [dB]
1	3.334	3.181	0.733	2.447
2	9.920	2.830	2.179	1.064
3	8.545	3.313	1.879	1.433

Con los resultados obtenidos en las tablas 46 y 47, así como con la información del número de conectores y empalmes de la tabla 45, es posible notar que los conectores mecánicos tienen las mayores pérdidas de potencia óptica, que en promedio resulta de unos 0.37 dB por conector, mientras que los empalmes por fusión tienen menores pérdidas de potencia óptica, sin embargo, estos tienen valores más variados, ya que las pérdidas dependen en gran medida de la calidad del empalme. En el Link 2 las pérdidas por empalmes de fusión tienen un promedio de 0.01 dB, mientras que en Link 3, sus valores promedios están alrededor de 0.04 dB; por lo que se puede deducir que en general los empalmes realizados en Link 2 presentan una calidad superior a los del Link 3.

5.2 Presupuesto de potencia

Comúnmente los niveles de potencia óptica en los transmisores y los rangos de la *sensitivity* en el receptor óptico de sistemas de telecomunicaciones se mantienen fijos, por lo que para variar los niveles de potencia en el medio óptico es necesario el uso de amplificadores ópticos o de atenuadores de potencia. El cálculo del presupuesto de potencia es útil para determinar en qué puntos de la red en específico y con qué cantidad se requiere el uso de este tipo de elementos. A diferencia de redes comerciales de telecomunicaciones ópticas, donde se requiere alcanzar una distancia meta y añadir elementos como amplificadores o atenuadores ópticos, este trabajo de investigación utilizará el presupuesto de potencia para delimitar la distancia en la que el *fronthaul* puede operar con los valores provistos, obteniendo así la distancia máxima en la que el *fronthaul* puede operar de manera óptima.

El presupuesto de potencia se calcula de forma secuencial, es decir, de inicio a fin. Esto tiene dos alternativas, según la perspectiva, la primera de ellas es desde el transmisor hacia el receptor, mientras que, la segunda es desde el receptor hacia el transmisor. Ambos cálculos si se hacen apropiadamente compartirán el mismo resultado, esto es cierto para líneas totalmente balanceadas en sentido *upstream* y en sentido *downstream*.

Los elementos más importantes para realizar el presupuesto de potencia son el transmisor y el receptor ópticos, los cuales se encuentran dentro de los SFP+ DWDM. En el apartado del diseño de red se escogieron SFP+ DWDM de 2 distintos proveedores; la diferencia principal de estos es la lambda de operación, ya que su fabricante indica que la distancia final que pueden alcanzar es la misma en ambos, ya que la hoja de especificaciones de *Smart-Optics* y de *Solid-Optics* dicta que están fabricados para alcanzar distancias máximas de 40 km. Este parámetro se ve reflejado en el presupuesto de potencia, ya que, consultando su hoja de especificaciones de cada uno, tienen un valor del presupuesto de potencia igual de 14 dB tanto para *Smart-Optics* como para *Solid-Optics*. La tabla 48 muestra la extracción de los datos necesarios para el cálculo del presupuesto de potencia de los SFP+ DWDM utilizados en este trabajo de investigación.

Tabla 48 Presupuesto de potencia según el fabricante.

Proveedor	Distancia máxima [km]	Power Budget [dB]
<i>Smart-Optics</i>	40	14
<i>Solid-Optics</i>	40	14

Los datos del presupuesto de potencia mostrados en las hojas de especificaciones indican las pérdidas totales acumuladas que los SFP+ DWDM son capaces de tener en el enlace de extremo a extremo para que los transceptores puedan recuperar e interpretar las señales ópticas para su procesamiento en la red. Sin embargo, se puede obtener el valor de presupuesto de potencia experimental considerando los valores de potencia medidos para cada SFP+ DWDM ocupados en este proyecto en su caracterización. El cálculo se realiza restando el valor de la *sensitivity* con la potencia medida. La tabla 49 muestra el presupuesto de potencia calculado a partir de las mediciones experimentales. En ella se puede observar que el presupuesto de potencia obtenido a partir de las mediciones es mayor al de las especificaciones dichas por su fabricante.

Tabla 49 Presupuesto de potencia calculado.

Proveedor	Presupuesto de potencia
Smart-Optics	16.33
Solid-Optics	17.76

Un presupuesto de potencia además de dictar las pérdidas totales y niveles de potencia óptica necesaria también sirve como mapeo de puntos significativos en la red, parecido a las trazas del OTDR. Por lo que se tiene que reportar cada empalme, conector o elemento que contenga la red donde se encuentra específicamente.

Con los valores obtenidos en las mediciones de las trazas OTDR, con los valores de las pérdidas promedio por los conectores mecánicos y con el coeficiente de atenuación en la fibra óptica, se obtuvo el presupuesto de potencia para el canal 31 correspondiente a un SFP+ DWDM de *Solid-Optics* a través del Link 1 en sentido *upstream*. La figura 115 muestra el diagrama para representar el cálculo del presupuesto de potencia. En ella se representa cada tramo de fibra óptica con su respectiva distancia y su pérdida de potencia, cada tramo se encuentra interconectado con un conector mecánico con pérdidas indicadas en el diagrama, al igual que los MUX/DEMUX. Todas las pérdidas del enlace se encuentran con valores indicados en rojo, mientras que los valores de potencia y *sensitivity* se encuentran con morado.

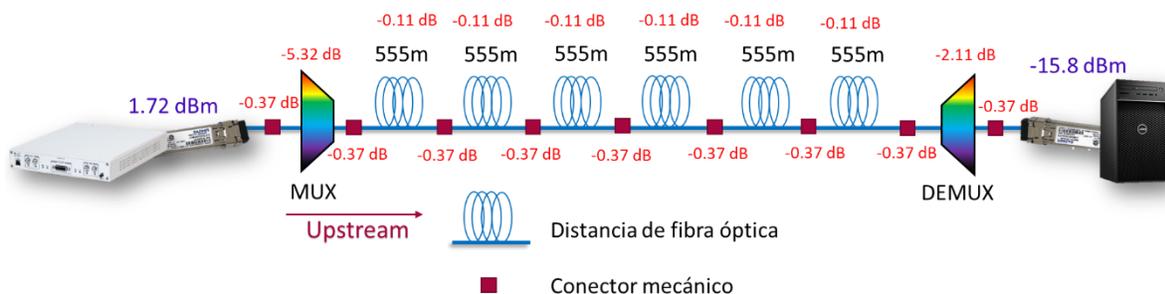


Figura 115 Presupuesto de potencia para Link 1.

La suma de las pérdidas del diagrama de la figura 115 da como resultado: -10.814 dB. A partir del resultado de las pérdidas acumuladas de todos los elementos en el Link 1 para el canal 31, se pueden restar las pérdidas con el valor de potencia en el transmisor, se pueden sumar las pérdidas con la *sensitivity* en el receptor o se puede comparar directo con el valor dado en la hoja de especificaciones. Dependiendo del enfoque que se le dé al presupuesto de potencia, es como se interpretará, ya que, al restar las pérdidas en el transmisor, el presupuesto debe de ser mayor a la *sensitivity* para una comunicación exitosa, mientras que, al sumar las pérdidas en la *sensitivity* del receptor, el presupuesto debe ser menor a la potencia del transmisor, en tanto, en la comparación con los valores de las hojas de especificaciones, las pérdidas acumuladas no deben de sobrepasar el presupuesto de potencia. Las 3 perspectivas anteriores se cumplen con valores absolutos en las pérdidas de potencia óptica.

El presupuesto de potencia anterior se realizó con cálculos a través de valores experimentalmente obtenidos. Con el medidor de potencia óptica también es posible obtener los resultados que el presupuesto de potencia estimaría, pero con el plus de que son los valores reales en el enlace; por

lo que se procederá a realizar las mediciones de potencia óptica con el *fronthaul* variable a 10 km, 18 km y 21 km, para obtener el presupuesto de potencia experimentalmente.

Los puntos de medición vistos desde el transmisor son: en el transmisor, después de la multiplexación, al final del recorrido de fibra óptica y después de la demultiplexación o en el receptor. Estos 4 puntos de medición se ilustran en la figura 116, en la cual se indican para ambos sentidos, por lo que para una comunicación full-dúplex se tendrían que medir 8 puntos diferentes. Estas mediciones se realizarán por cada canal, es decir, se tendrá un presupuesto de potencia para los canales 29, 31, 33 y 35 del sistema DWDM y por cada variación de distancia.

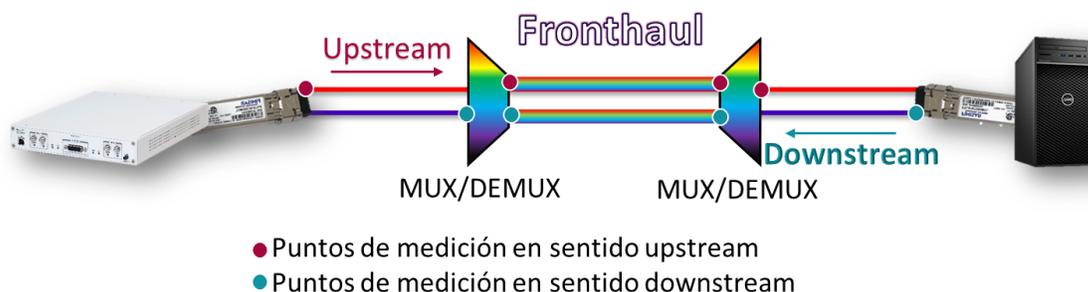


Figura 116 Puntos de medición de potencia óptica en el fronthaul variable.

Atendiendo los puntos de medición indicados en la figura 116, se han tomado las lecturas de todos los canales de la arquitectura con el *fronthaul* a una distancia de 10 km. Los resultados obtenidos se encuentran en las tablas 50 y 51 según el sentido de transmisión. Las tablas indican los valores individuales de cada canal, sin embargo, también poseen dos filas más, la primera es *Total*, en ella se encuentra la potencia total de los canales al ser multiplexados en 0 km y los mismos canales multiplexados después de haber recorrido el enlace. La segunda fila *Promedio* indica la potencia promedio de todos los canales en el transmisor, después de ser demultiplexados y el valor promedio del presupuesto de potencia necesario.

Tabla 50 Potencia de los canales de la arquitectura pasiva en sentido downstream después de 10 km.

Fronthaul: 10 km					
Upstream	Potencia [dBm]				Power Budget [dB]
Canal	USRP	Salida MUX	Después del enlace	Después DEMUX	
CH29	1.22	-3.98	-6.77	-9.89	11.11
CH31	1.62	-3.70	-6.49	-8.60	10.22
CH33	1.33	-3.03	-5.82	-8.61	9.94
CH35	1.96	-2.04	-4.83	-6.01	7.97
Total	-	2.89	0.10	-	-
Promedio	1.53	-	-	-8.28	9.81

En la tabla 50 se puede observar que en promedio la potencia reducida para recorrer una distancia aproximada de 10 km en sentido *upstream* es de 9.813 dB, la columna *USRP* muestra la potencia óptica inicial del transmisor de cada canal, mientras que la columna *Después DEMUX* indica la potencia de cada canal al final de la línea de transmisión. La misma tabla también es útil para contabilizar las pérdidas de inserción producidas por el MUX y el DEMUX para cada canal. En el caso del MUX dichas pérdidas varían entre 4.0 y 5.3 dB, mientras que en el caso del DEMUX varían entre

1.1 y 3.1 dB. Esta caracterización de los filtros es importante porque muestran una disparidad entre canales que es apreciable. La relevancia de este hecho es que el presupuesto de pérdidas varíe severamente entre cada canal, lo cual es indeseable. Las pérdidas para el canal 35 son muy bajas, mientras que para el canal 29 superan los 11.11 dB. Por lo mismo, los requerimientos en términos de sensibilidad para este último canal son más severos, ya que la potencia medida a la salida del DEMUX es más baja. Asimismo, se observa que las pérdidas producidas por el uso del MUX superan a las del DEMUX. La tabla también es útil para calcular las pérdidas producidas por el enlace propiamente (sin contar la inserción de los filtros). El valor medido que considera todos los canales es de $2.89 - 0.1 = 2.88$ dB, lo que equivale a una atenuación promedio de 0.28 dB/km, la cual es bastante aceptable, especialmente considerando las condiciones subóptimas del enlace.

En la tabla 51 se puede observar que la potencia reducida promedio para recorrer una distancia aproximada de 10 km en sentido *upstream* es 9.715 dB. La columna Workstation indica la potencia del transmisor de cada canal. Al igual que en el sentido anterior la columna *Después DEMUX* indica la potencia de cada canal al final de la línea de transmisión. En general, el sentido *downstream* es el que presenta menores pérdidas de potencia óptica al final de la línea de transmisión a través del enlace de 10 km.

Tabla 51 Potencia de los canales de la arquitectura pasiva en sentido *upstream* después de 10 km.

Fronthaul: 10 km					
Downstream	Potencia [dBm]				Power Budget [dB]
Canal	Workstation	Salida MUX	Después del enlace	Después DEMUX	
CH29	1.22	-4.76	-7.59	-9	10.22
CH31	1.62	-3.35	-6.18	-7.59	9.21
CH33	1.33	-3.6	-6.43	-8.15	9.48
CH35	1.96	-3.12	-5.95	-7.99	9.95
Total	-	2.35	-0.47	-	-
Promedio	1.53	-	-	-8.18	9.71

Las tablas 50 y 51 también son útiles para observar el valor de la potencia óptica total después del MUX, es decir, la potencia óptica total que entra en la fibra. En un caso es 2.89 dBm, mientras que en el otro es de 2.35 dBm. La relevancia de esta medición estriba en que la potencia total se encuentre muy por debajo del valor que en principio se requeriría para poder excitar no linealidad en la fibra óptica, tales como modulación cruzada de la fase y mezclado de cuatro ondas. Por tanto, este análisis permite garantizar que efectivamente se está trabajando en el régimen lineal de la fibra y que por ende no se debe contabilizar penalidades de potencia debido a efectos no lineales.

La caracterización del enlace de 18 km en sentido *upstream* se encuentra representado en la traza OTDR de la figura 117. La traza en sus detalles indicada en la figura 118, muestra que el final del enlace lo marca el valor de -17.259 dB en la reflectancia, al final del enlace se describe que alcanza una distancia de 18.465 km con pérdidas acumuladas de potencia óptica de 5.96 dB.

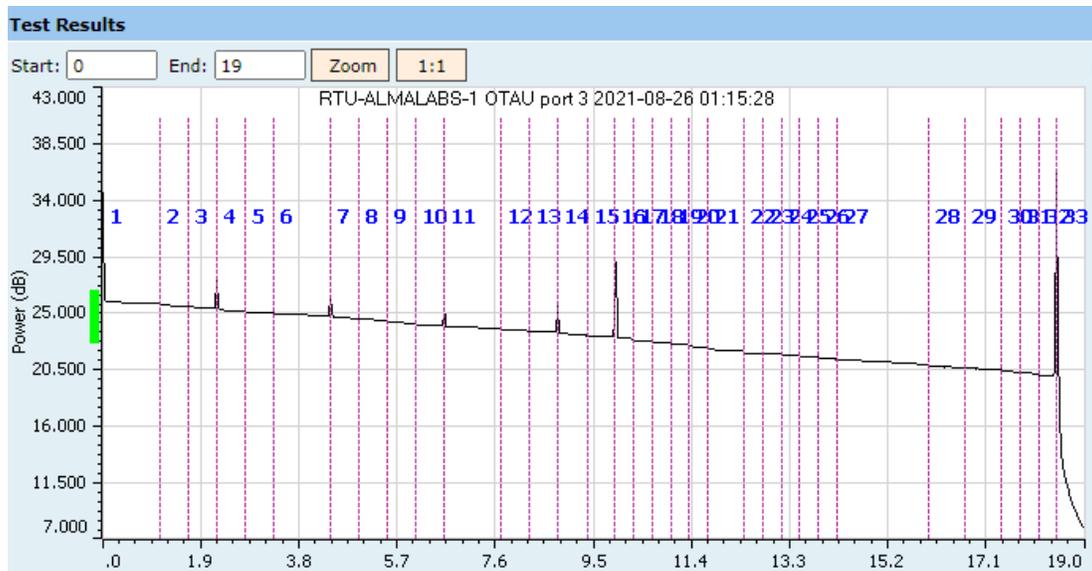


Figura 117 Traza OTDR 18 km en sentido upstream.

Event	Number	32		33	
	Type				
	Position (km)	8.116	18.116	18.465	Distancia [km]
	Length (km)	0.027	0.349	0.407	
Curve	Curve Level (dB)	20.188	-	19.998	
	Loss (dB)	0.128	0.063	-	
	Attenuation (dB/km)	-	0.180	-	
	Reflection (dB)	-	-	17.259	Reflectancia [dB]
	Reflective Peak (dB)	20.175	-	42.036	
	Cumulative Loss (dB)	5.897	5.960	5.960	Pérdidas acumuladas [dB]

Figura 118 Detalle de traza OTDR a 18 km en sentido upstream.

Para obtener la caracterización completa del enlace de 18 km, se repitió el procedimiento anterior, pero ahora en sentido *downstream*. La figura 119 muestra la traza OTDR del enlace de 18 km en sentido *downstream*. La figura 120 muestra el detalles de la traza OTDR, en ella se puede apreciar que la reflectancia a -15.077 dB indica el final del enlace, el cual alcanza una distancia de 18.466 km con pérdidas acumuladas a lo largo del medio de 5.898 dB.

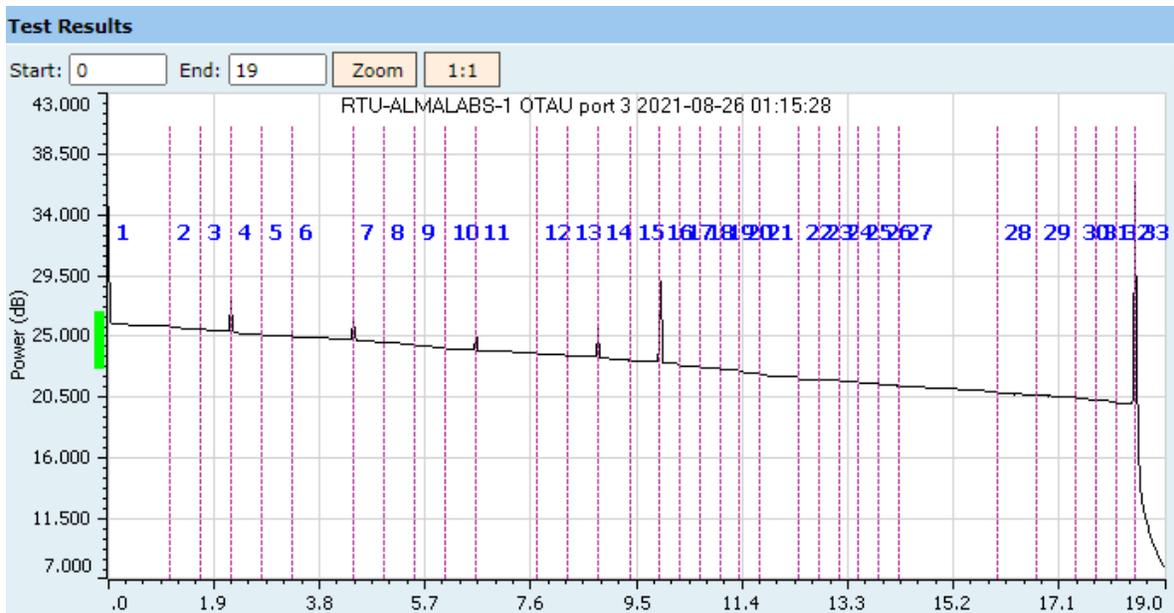


Figura 119 Traza OTDR 18 km en sentido downstream.

Event	Number	26	27	
	Type			
	Position (km)	18.119	18.119	18.466
	Length (km)	0.026	0.347	0.437
Curve	Curve Level (dB)	20.091	-	19.911
	Loss (dB)	0.107	0.074	-
	Attenuation (dB/km)	-	0.212	-
	Reflection (dB)	-	-	15.077
	Reflective Peak (dB)	20.079	-	43.039
		Cumulative Loss (dB)	5.825	5.899

Figura 120 Detalle de traza OTDR a 18 km en sentido downstream.

Considerando el diagrama de la figura 116, se realizaron las mediciones de potencia para el enlace de 18 km tanto en sentido *upstream* como el sentido *downstream*. La tabla 52 contiene todas las mediciones de potencia óptica para el enlace de 18 km en sentido *upstream*, en ella se puede apreciar que en promedio la potencia que reduce este enlace son 12.98 dB, con una variación pronunciada entre canales, nuevamente. Similarmente al caso del enlace de 10 km, estas variaciones son atribuibles a la variación que también exhiben los filtros en términos de pérdidas de inserción. La pérdida que se puede leer de la tabla atribuible exclusivamente a la fibra óptica es en este caso de $2.89 + 3.06 = 5.95$ dB, es decir, una atenuación promedio de 0.33 dB/km. El incremento de este parámetro de la fibra con respecto al caso anterior (10 km) se le atribuye al uso de conectores y empalmes para lograr la distancia deseada.

Tabla 52 Potencia de los canales de la arquitectura pasiva en sentido upstream después de 18 km.

Fronthaul: 18 km					
Upstream	Potencia [dBm]				Power Budget [dB]
Canal	USRP	Salida MUX	Después del enlace	Después DEMUX	
CH29	1.22	-3.98	-9.94	-13.06	14.28
CH31	1.62	-3.70	-9.66	-11.77	13.39
CH33	1.33	-3.03	-8.99	-11.78	13.11
CH35	1.96	-2.04	-8.00	-9.18	11.14
Total	-	2.89	-3.06	-	-
Promedio	1.53	-	-	-11.44	12.98

La tabla 53 contiene las mediciones de la potencia óptica de cada canal en los puntos indicados en la figura 116 a lo largo del enlace de 18 km, en ella se puede apreciar que las mayores pérdidas de potencia ocurren en el canal 29, mientras que las menores pérdidas ocurren en el canal 35, además en promedio ocurren pérdidas de potencia óptica de 12.783 dB, lo cual en general presenta menores pérdidas que el sentido *upstream*. Las pérdidas que exhibe la fibra óptica exclusivamente también son ligeramente menores. En este caso son de 5.89 dB. De gran relevancia son también los valores de potencia que se leen en la columna denominada *después DEMUX*, ya que nos muestran el valor de potencia con que la señal llega al fotodetector (despreciando pérdidas por conexión). Tanto en el caso *upstream* como en el *downstream*, el valor se encuentra por arriba de -13.06 dB. Esto quiere decir que, si los fotodetectores presentan una sensibilidad de -16 dBm para 10 Gb/s, el enlace por canal sería factible en todos los casos, lo que garantiza la correcta operación del diseño analizado en este trabajo.

Tabla 53 Potencia de los canales de la arquitectura pasiva en sentido downstream después de 18 km.

Fronthaul: 18 km					
Downstream	Potencia [dBm]				Power Budget [dB]
Canal	Workstation	Salida MUX	Después del enlace	Después DEMUX	
CH29	1.22	-4.76	-10.65	-12.06	13.28
CH31	1.62	-3.35	-9.24	-10.65	12.27
CH33	1.33	-3.60	-9.49	-11.21	12.54
CH35	1.96	-3.12	-9.01	-11.05	13.01
Total	-	2.35	-3.54	-	-
Promedio	1.53	-	-	-11.25	12.78

Por último, se realizó la caracterización al enlace con más longitud con el que se cuenta en sentido *upstream*. La figura 121 muestra la traza OTDR de este enlace, mientras que la figura 122 muestra el detalle de la lectura de la traza, en ella se puede observar que la reflectancia de -17.877 dB marca el final del enlace, en este evento se alcanza una distancia de 21.769 km con pérdidas acumuladas de 9.118 dB.

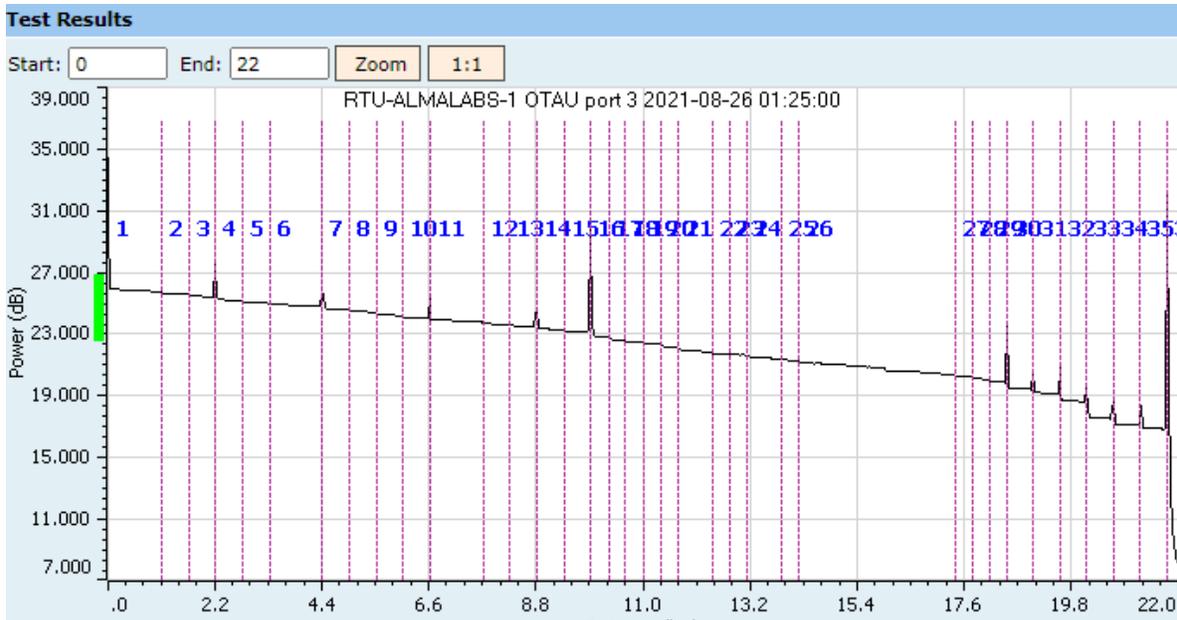


Figura 121 Traza OTDR 21 km en sentido upstream.

Event	Number	35	36		
	Type	┌	└	┌	
	Position (km)	21.220	21.220	21.769	Distancia [km]
Curve	Length (km)	0.041	0.549	0.169	
	Curve Level (dB)	17.110	-	16.834	
	Loss (dB)	0.176	0.100	-	
	Attenuation (dB/km)	-	0.182	-	
	Reflection (dB)	-56.773	-	17.877	Reflectancia [dB]
	Reflective Peak (dB)	20.042	-	38.563	
Event	Cumulative Loss (dB)	9.019	9.119	9.118	Pérdidas acumuladas [dB]

Figura 122 Detalle de traza OTDR a 21 km en sentido upstream.

Se repitió el procedimiento para el sentido *downstream*. La figura 123 muestra la traza OTDR del enlace de 21 km en sentido *downstream*, en tanto, la figura 124 muestra el detalle de la traza OTDR, en ella se puede notar que la reflectancia a -14.4 dB marca el final del enlace, en este evento el enlace alcanza una distancia de 21.772 km con pérdidas acumuladas de 9.122 dB.

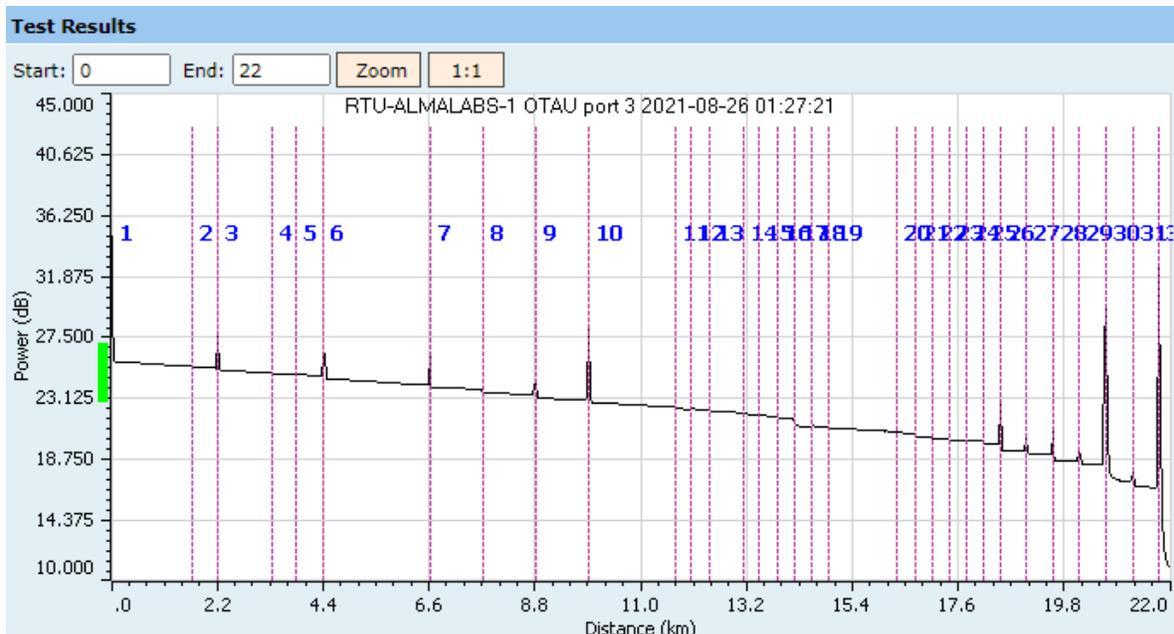


Figura 123 Traza OTDR 21 km en sentido downstream.

Event	Number	31		32	
	Type	┌┐	┌┐	┌┐	
	Position (km)	21.222	21.222	21.772	
Curve	Length (km)	0.04	0.549	0.184	
	Curve Level (dB)	17.090	-	16.688	
	Loss (dB)	0.326	0.120	-	
	Attenuation (dB/km)	-	0.219	-	
	Reflection (dB)	-58.452	-	-14.400	
	Reflective Peak (dB)	19.426	-	40.155	
	Cumulative Loss (dB)	9.046	9.167	9.122	

Figura 124 Detalle de traza OTDR a 21 km en sentido downstream.

Para tener evidencias sobre la transmisión de los canales multiplexados en términos de potencia óptica, se han medido los puntos indicados en la figura 116 para un *fronthaul* de 21 km tanto en sentido *upstream* como en sentido *downstream*. La tabla 54 muestra los datos de las lecturas para un *fronthaul* de 21 km en sentido *upstream*, en ella se puede apreciar que la mayor pérdida de potencia óptica reside en el canal 29, mientras que las menores pérdidas se encuentran en el canal 35. Si nuevamente se analiza la potencia que se pierde debido a la propagación de la señal en la fibra óptica, se concluye que son 9.1 dB. Este valor es sumamente alto para un enlace de 21 km y, por lo tanto, sería relativamente fácil reducirlo si se contara con una instalación de fibra adecuada en la que los añadidos, sobre todo aquellos que se encuentran más allá de los 18 km, se hubieran interconectado de mejor manera. El valor calculado a partir de las mediciones hechas con el *power meter* coincide con lo reportado en la figura 122, el cual muestra la consistencia del análisis. Asimismo, la traza OTDR presente en la figura 121 igualmente muestra que los empalmes realizados

a partir del km 18 tienen deficiencias, con marcadas caídas de potencia. Resultados similares se observan (naturalmente) en la traza de la figura 123.

Tabla 54 Potencia de los canales de la arquitectura pasiva en sentido upstream después de 21 km.

Fronthaul: 21 km					
Upstream	Potencia [dBm]				Power Budget [dB]
Canal	USRP	Salida MUX	Después del enlace	Después DEMUX	
CH29	1.22	-3.98	-13.09	-18.29	19.51
CH31	1.62	-3.70	-12.81	-18.13	19.75
CH33	1.33	-3.03	-12.14	-16.50	17.83
CH35	1.96	-2.04	-11.15	-15.15	17.11
Total	-	2.89	-6.21	-	
Promedio	1.53	-	-	-17.02	18.55

La principal consecuencia de los malos empalmes y, por consiguiente, las altas pérdidas exhibidas por la fibra óptica, es que la potencia que se mide en la columna de la tabla 54 denominada *después DEMUX*, resulta ser muy baja para los canales 29 y 31. Infortunadamente, en este caso el alto valor del presupuesto de pérdidas combinado con el bajo valor de potencia de transmisión da por resultado que la potencia que llega al fotodetector del receptor se encuentre por abajo del valor aceptado de sensibilidad, por lo que para este enlace de 21 km se pueden llegar a presentar errores a tasas cercanas a los 10 Gb/s, ya que no se cumple enteramente con el presupuesto de potencia.

Se repitió el procedimiento para el enlace de 21 km en sentido *downstream*. La tabla 55 muestra las mediciones obtenidas, en ella se puede apreciar que el mayor valor de pérdidas de potencia óptica se encuentra en el canal 29, mientras que las menores pérdidas están en el canal 31. Comparando los sentidos de transmisión del enlace de 21 km, el sentido *downstream* presenta en promedio menores pérdidas al del sentido *upstream*.

Tabla 55 Potencia de los canales de la arquitectura pasiva en sentido downstream después de 21 km.

Fronthaul: 21 km					
Downstream	Potencia [dBm]				Power Budget [dB]
Canal	Workstation	Salida MUX	Después del enlace	Después DEMUX	
CH29	1.22	-4.76	-13.88	-15.29	16.51
CH31	1.62	-3.35	-12.47	-13.88	15.50
CH33	1.33	-3.60	-12.72	-14.44	15.77
CH35	1.96	-3.12	-12.24	-14.28	16.24
Total	-	2.35	-6.76	-	
Promedio	1.53	-	-	-14.47	16.01

Dado que las pérdidas que ofrece la fibra en este enlace full dúplex son similares en ambos sentidos, esta diferencia de más de 2 dB es principalmente atribuible a los filtros ópticos y muy particularmente el DEMUX. Mediante el cálculo de sus pérdidas de inserción se puede ver que ascienden en promedio a 1.7 dB, valor notablemente menor al que se midió en el caso *upstream*, es decir, 4.8 dB. Por la misma razón, la potencia que llega al fotodetector del receptor en el caso *downstream* (promedio de -14.47 dBm) supera en todos los casos el valor de sensibilidad definido

por el fabricante, por lo que se puede asegurar que el enlace cumple con el presupuesto de potencia y, por tal motivo, operará libre de errores. Finalmente cabe mencionar que al observar la potencia total lanzada en la fibra que se presenta en las tablas 54 y 55, se observa que está lejos del valor necesario para empezar a observar la presencia de efectos no lineales, por lo que la presencia de estos se descarta completamente.

Para una utilización completa de la tasa de transmisión de los SFP+ DWDM que se emplean en este trabajo de investigación la cual es de 10 Gb/s de carga útil, es necesario tener una BER de 1×10^{-12} , la cual se cumple con una *sensitivity* de -15.8 dBm según la hoja de especificaciones del fabricante. Con el análisis de los tres enlaces de *fronthaul* anteriores, es posible determinar desde la perspectiva de la potencia que le llega al receptor que canal del sistema cumple o no con los requisitos del BER y por tanto el canal pueda alcanzar la mayor tasa de transmisión. La comparación de la *sensitivity* de -15.8 dBm se hace con la columna *Después DEMUX* de todas las tablas de los tres enlaces analizados, tanto en *upstream* como en *downstream*, cualquier valor en la columna medido que esté por encima de los -15 dBm cumple con el BER impuesto para la tasa de transmisión más alta soportada por los SFP+ DWDM, mientras que una potencia que esté por debajo significaría un BER más alto y por tanto una tasa de transmisión disminuida.

Para los enlaces de 10 km y 18 km, los valores de la potencia en el receptor son aceptables en ambos sentidos, por lo que tendrían una BER mínima y una tasa de transmisión máxima, sin embargo, algunos canales en el enlace de 21 km tienen una potencia menor en el receptor que la *sensitivity* indicada por el fabricante. Concretamente los canales 29, 31 y 33 en sentido *upstream* tienen una potencia en el receptor menor a la *sensitivity*, aunque estos mismos canales en sentido *downstream* cumplen con la potencia mínima indicada por la *sensitivity*. Teóricamente el único canal que es capaz de operar a la mayor tasa de transmisión en los 21 km es el canal 35. Para un análisis más exacto es necesario realizar pruebas de BER en cada canal fuera de los rangos de la *sensitivity* para determinar en que medida esto afecta a la tasa de transmisión de los canales del sistema.

5.3 Presupuesto de dispersión

La dispersión es un factor que al aumentar a través del enlace de fibra óptica puede tener efectos negativos en el receptor del sistema. Esto se debe a que la dispersión ensancha y distorsiona los pulsos que se propagan debido a las diferentes velocidades de grupo que tiene cada longitud de onda en el medio óptico. La dispersión está directamente relacionada con la distancia que la señal se ha transmitido por el medio óptico. Cuando la dispersión acumulada resulta demasiado grande, puede ocasionar interferencias inter-simbólicas (ISI) o problemas para discernir entre valores altos o valores bajos en sistemas de modulación en intensidad y detección directa (IM/DD), como lo es el caso de este sistema.

Para conocer la distancia máxima que un sistema de telecomunicaciones óptico puede alcanzar según el coeficiente de dispersión que posee la fibra óptica utilizada para el enlace, la tasa de transmisión y la longitud de onda utilizada se puede aplicar la siguiente fórmula [130], la cual es utilizada en sistemas con modulación NRZ iguales a este sistema:

$$L_{Dm\acute{a}x} = \frac{\epsilon c \pi}{B^2 \lambda^2 |D(\lambda)|} \quad (12)$$

Donde:

- $L_{Dm\acute{a}x}$ Distancia máxima permitida por la dispersión en el medio [km]
- ϵ 0.491 (2 dB penalty) o 0.306 (1 dB penalty)
- c Velocidad de la luz [m/s]
- B Tasa de transmisión [b/s]
- λ Longitud de onda de la señal [nm]
- $D(\lambda)$ Coeficiente de dispersión de la fibra óptica [ps/nm-km]

Las características del enlace y de la transmisión del sistema DWDM se encuentran en la tabla 56. Suponiendo un análisis para una penalización de dispersión de 1 dB se ha calculado la distancia máxima del enlace que puede alcanzar, la cual es de 70.612 km. También, realizando el cálculo para una penalización de 2 dB el resultado cambia a una distancia máxima de 113.302 km.

Tabla 56 Valores del enlace y la transmisión del sistema.

ITU-T	G.652
λ [nm]	1550
D [ps/nm-km]	17
B [Gb/s]	10

Es notable que tanto 70.612 km o 113.302 km son superiores a los 21 km que posee el enlace de este sistema de transmisión DWDM, por lo que se puede decir que la penalización de dispersión es un problema irrelevante para el sistema a la tasa de 10 Gb/s a su distancia actual.

5.4 Transmisión de canales DWDM

La transmisión de los canales DWDM se hace a través del *fronthaul* una vez que las señales son multiplexadas al pasar a través del MUX. Los MUX/DEMUX utilizados soportan 8 canales con una separación espectral inter-canal de 100 GHz o de aproximadamente 0.8 nm. El MUX/DEMUX abarca los canales del 28 al 35, de los cuales los canales nones están destinados para la arquitectura de este trabajo de investigación, por lo que, para este diseño los canales tienen un espaciamiento espectral inter-canal correspondiente a 200 GHz o aproximadamente 1.6 nm.

Para comprobar la transmisión de las señales a través del *fronthaul* del sistema DWDM se ha optado por transmitir todos los canales y analizar su espectro para verificar que la transmisión de cada canal sea exitosa. La figura 125 muestra el espectro óptico de los canales multiplexados de la arquitectura pasiva al inicio del *fronthaul*, es decir, a 0 km de distancia con respecto al transmisor. En ella se puede apreciar que hay dos marcadores en el plano de la densidad de potencia espectral, los cuales indican el pico de potencia máxima de los canales y el piso de ruido. La diferencia de estas 2 marcas determina el OSNR de la señal a transmitir.

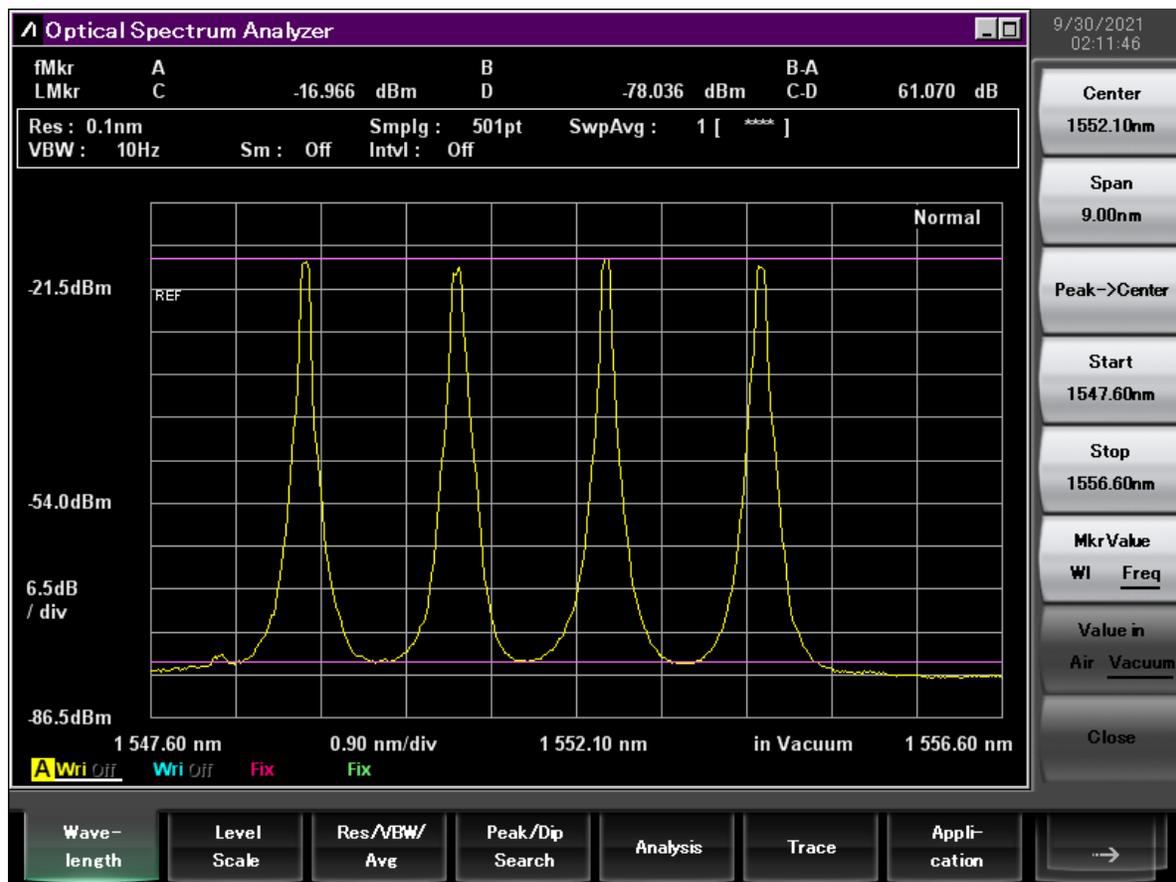


Figura 125 Espectro óptico a 0 km.

Analizando el espectro óptico de la señal multiplexada con el recorrido a través del enlace de 10 km, que se muestra en la figura 126, se puede notar que el OSNR se mantiene con los mismos valores, además de que los canales permanecen centrados en las frecuencias y lambdas correspondientes a los que tenían antes de su transmisión a lo largo de la fibra. La conservación del nivel del OSNR al

final del enlace de los 10 km se debe a que el OSNR es principalmente afectado por el uso de amplificadores ópticos en la línea de transmisión. Los cuales están ausentes en la arquitectura analizada. Por tanto, la transmisión de la señal multiplexada no presenta decrementos de OSNR, lo cual es muy relevante y atractivo. Sin embargo, el mismo espectro nos muestra que los niveles de densidad de potencia espectral se ven afectados.

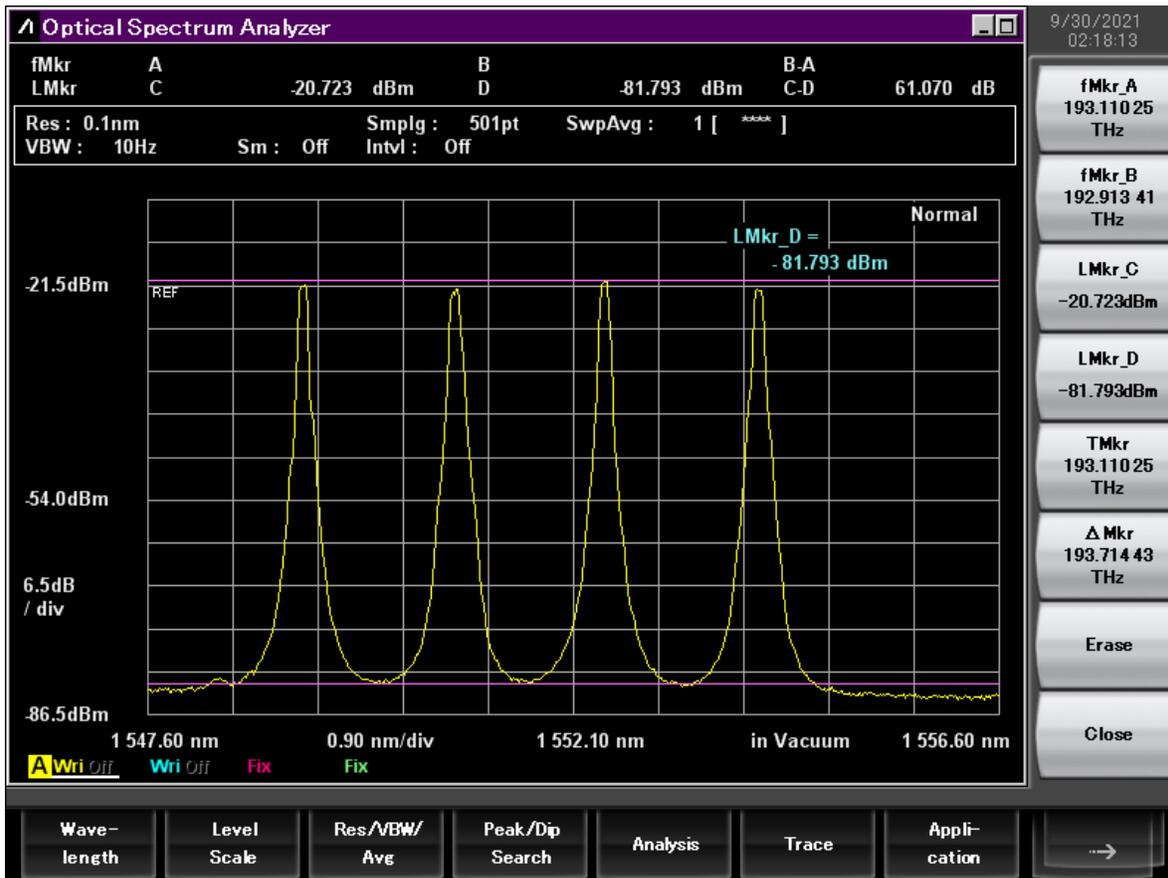


Figura 126 Espectro óptico a 10 km.

Observando los espectros ópticos de la señal multiplexada se puede notar que entre los canales existen diferentes niveles de potencia, por lo que, para comparar los niveles de potencia desde la perspectiva del espectro óptico para las diferentes longitudes del *fronthaul* se ha tomado como referencia el piso de ruido, ya que la atenuación de la fibra óptica genera pérdidas de potencia sin distinciones de señales útiles o señales de ruido. Atendiendo a la figura 125, se puede observar que el nivel de piso de ruido a los 0 km corresponde a -78.036 dB, mientras que, a los 10 km el piso de ruido tiene un valor de -81.793 dB según la figura 126, por lo que al hacer la comparación esto resulta en pérdidas de potencia óptica de 3.757 dB, valor que se estimó en 2.83 dB con las trazas OTDR. Existe una diferencia de 0.927 dB entre la estimación y el valor medido, esta diferencia es ocasionada por la utilización de diferentes herramientas de medición como el analizador de espectros ópticos (OSA) y por el uso adicional de conectores mecánicos.

Para comprobar la transmisión de los canales a través del enlace de 18 km, se observó el espectro óptico al final del enlace de fibra óptica con la señal multiplexada. La figura 127 muestra el espectro óptico de la señal multiplexada después haber recorrido la distancia de 18 km. En ella se puede apreciar que el OSNR, las frecuencias y longitudes de onda de la señal transmitida a lo largo del enlace se mantiene similares a las medidas en la salida del MUX. La diferencia son los niveles de densidad de potencia espectral que se reducen por las pérdidas generadas por la atenuación del medio. Por tanto, en este caso también es posible afirmar que la transmisión de los canales WDM a través del *fronthaul* fue exitosa, sin repercusiones graves en términos de degradación de OSNR, distorsiones debido a no linealidades, distorsiones debido al proceso de filtrado en los MUX/DEMUX, etc.

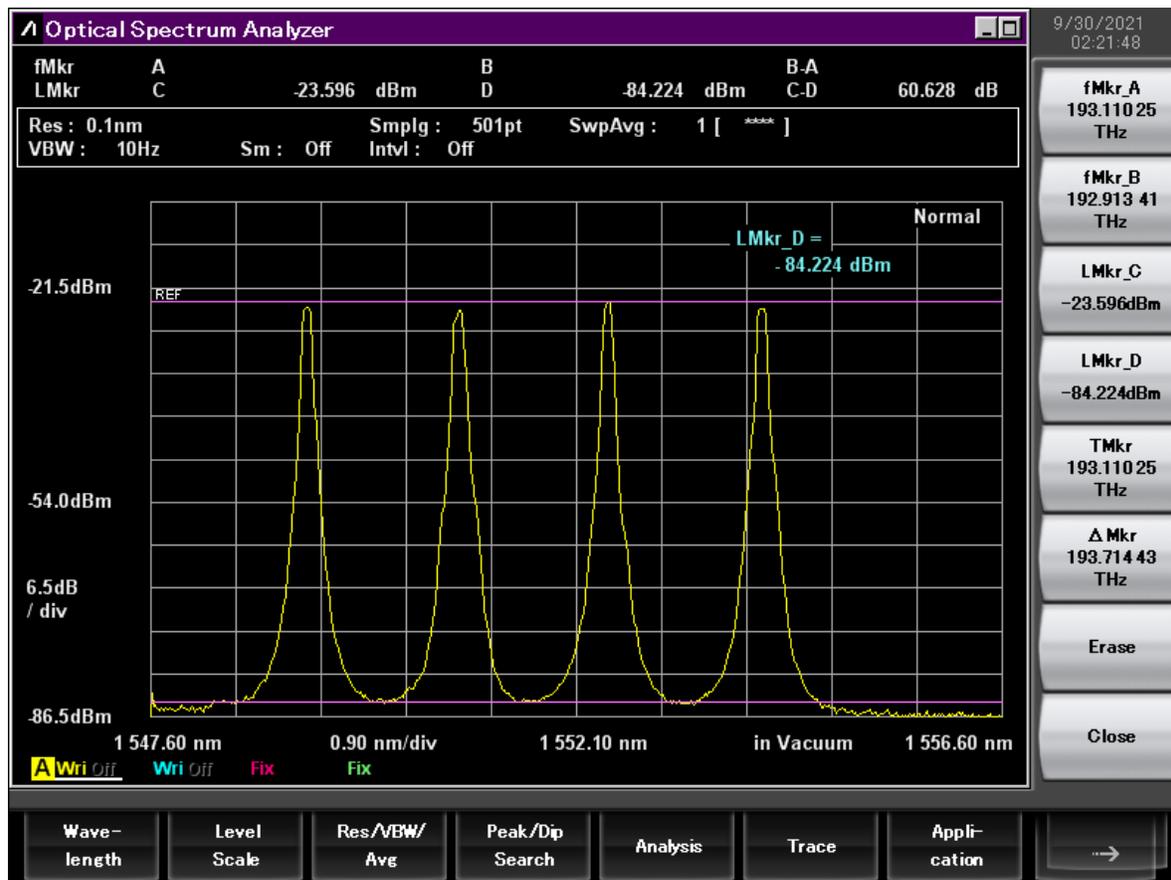


Figura 127 Espectro óptico a 18 km.

Al igual que en el enlace de 10 km, la señal con los canales multiplexados que fue transmitida a través del enlace de 18 km presenta variaciones de potencia en sus picos máximos de cada canal, por lo que, para la comparación de la densidad de potencia espectral en 18 km y 0 km se ha tomado el piso de ruido. El valor de la densidad de potencia espectral a los 18 km en el piso de ruido es de -84.224 dB, por tanto, la pérdida de potencia espectral corresponde a 6.188 dB

La figura 128 muestra el espectro óptico de la señal multiplexada después de ser transmitida a lo largo del enlace de 21 km. Al observar con el analizador de espectros ópticos (OSA), la transmisión de los canales a través del enlace de 21 km, la señal multiplexada mantiene los valores de OSNR, las

frecuencias y longitudes de onda de la señal transmitida a lo largo del enlace, similares a las medidas en la salida del MUX. Por lo anterior se puede nuevamente afirmar que, a pesar de la distancia extendida, la transmisión de los canales WDM se realiza correctamente. Al igual que en los dos enlaces anteriores, las potencias de cada canal de la señal multiplexada varían entre ellos, por lo que se ha tomado nuevamente como referencia de densidad de potencia espectral al piso de ruido, el cual tiene un valor de -87.024 dB. Comparando con el piso de ruido a 0 km se obtiene una diferencia de 8.988 dB, los cuales corresponden a la pérdida de potencia óptica a través del enlace de 21 km.

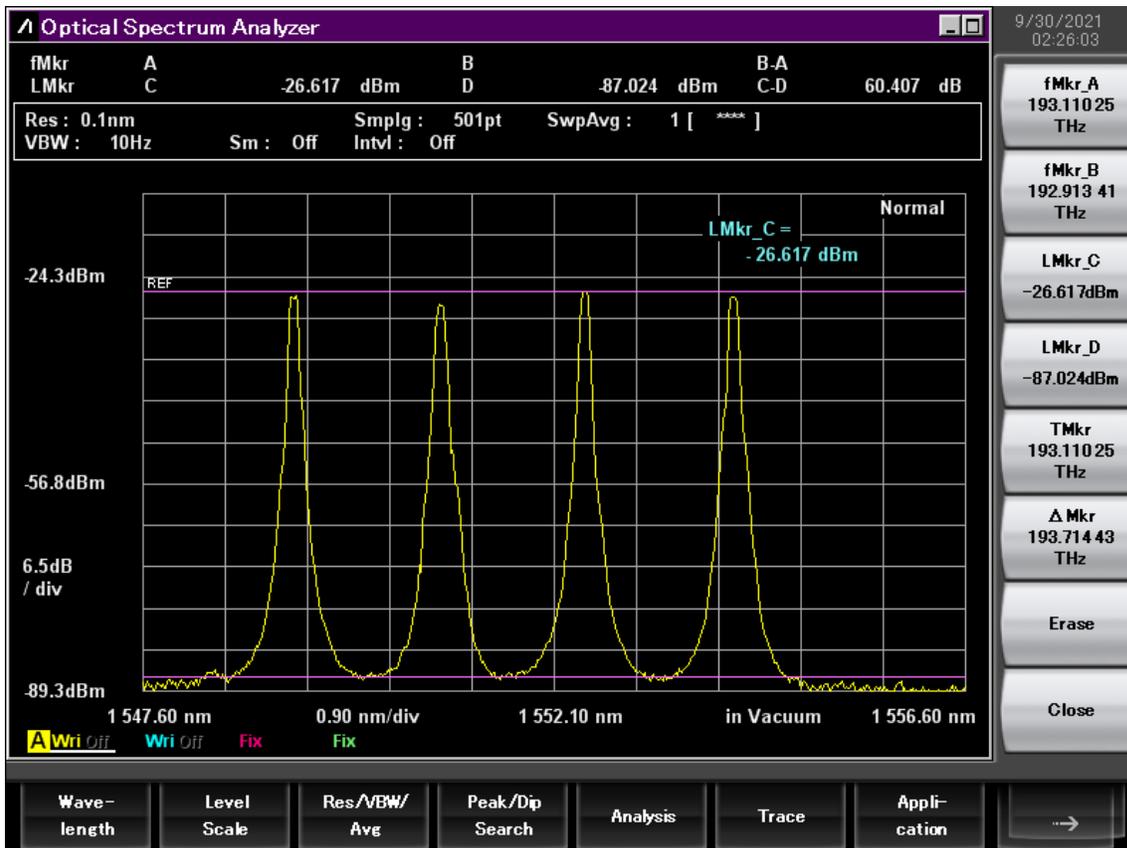


Figura 128 Espectro óptico a 21 km.

El OSNR del sistema siempre se mantiene, ya que en la red no existen elementos que amplifiquen la señal una vez que sale del transmisor de cada canal, sin embargo, el OSNR va cambiando de referencia de potencia de ruido de piso a medida que la señal se va transmitiendo a lo largo de la fibra óptica, ya que la atenuación del medio afecta tanto a la potencia de la señal útil como a la potencia del ruido de piso sin afectar la relación del OSNR.

Capítulo 6. Conclusiones y sumario

En este capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación, se muestran las metas alcanzadas y se ofrecen sugerencias para continuar con un trabajo a futuro.

- Se realizó una investigación sobre las necesidades de las redes móviles 4G/5G para establecer que tecnologías cumplen con los requisitos para los escenarios planteados en este tipo de redes, identificando a la arquitectura C-RAN como base para el diseño de estas redes.
 - Se realizó una investigación en el estado del arte que determina que el *fronthaul* óptico es la opción más rentable para una red de transporte, descartando opciones de cable de cobre o inalámbricas. Debido a las altas tasas de transmisión y a la distancia capaz de alcanzar del medio óptico sobre los otros medios.
 - Se describió el *fronthaul* óptico, el cual presenta dos variantes principales, el activo y el pasivo, para lo cual este trabajo de investigación se focalizó en la solución pasiva por ser más económica y práctica para este fin en particular.
 - Se identificaron las tecnologías principales para la implementación de un *fronthaul* óptico pasivo, las cuales residen en transporte óptico basado en DWDM y en los transceptores ópticos capaces de operar en frecuencias dentro de DWDM desde los equipos de red, evitando convertidores de longitudes de onda y únicamente dejando elementos pasivos en planta externa como lo son los MUX/DEMUX.
- Se diseñó una red óptica pasiva a partir de la arquitecta C-RAN para satisfacer las necesidades de la tecnología 4G/5G.
 - Se eligió la configuración BBU pool de la arquitectura C-RAN para la comunicación entre los BBU y los RRH.
 - Se seleccionó DWDM como tecnología principal de transporte óptico.
 - Se seleccionaron los canales del sistema 29, 31, 33 y 35 con un espaciamiento intercanal de 200 GHz.
 - Se seleccionaron las ubicaciones físicas dentro del IINGEN y de la FI de cada elemento de la red. Eligiendo a la FI para la ubicación de los RRH, los cuales son el acceso del usuario, mientras que los BBU se ubicaron en el IINGEN, el cual es la puerta de enlace hacia el EPC de la red.
 - Se trazó la ruta que sigue el tendido de la fibra óptica que sirve como medio principal del *fronthaul* óptico pasivo que interconecta a las dos instituciones participantes en el proyecto.
- Se seleccionaron los elementos de red de acuerdo con la configuración BBU pool de la arquitectura C-RAN, así como los transceptores ópticos adecuados para cumplir con una arquitectura totalmente pasiva en planta externa.
 - Se seleccionaron radios USRP x310 como elementos RRH de la arquitectura C-RAN.
 - Se seleccionaron equipos de cómputo DELL® 3630 Tower Precision como estaciones de trabajo que realizan la función de BBU en la arquitectura C-RAN.
 - Se seleccionaron tarjetas ópticas de red Ethernet Intel® X520-LR2 compatibles con los elementos de red y con los puertos necesarios para ser utilizadas dentro de la arquitectura C-RAN.
 - Se seleccionaron SFP+ DWDM de dos distintos proveedores (*Solid-Optics* y *Smart-Optics*) a tasas de 10 Gb/s en carga útil, que poseen la cualidad de tener parámetros

ópticos DWDM de acuerdo con los canales seleccionados con el diseño y que lógicamente a través de su EEPROM se presentan con parámetros ópticos compatibles con la primera y segunda ventana óptica, además de tener compatibilidad con las tarjetas ópticas de red que se les instalaron a los elementos de red.

- Se realizó exitosamente el tendido de fibra óptica entre el IINGEN y la FI que proporciona la conectividad necesaria para la comunicación entre los BBU y los RRH.
 - Se realizaron las adaptaciones necesarias al terreno para lograr que la fibra óptica pasara sin afectaciones en ambos sentidos.
 - Se realizaron los empalmes de fusión a los hilos de fibra óptica instalada para obtener un solo enlace y aumentar la distancia para lograr la distancia meta de 10 km.
 - Se añadieron conectores mecánicos en puntos estratégicos a lo largo del enlace para su análisis, así como en los puntos finales del enlace, para permitir su interconexión a los elementos de red y a las herramientas de medición.
 - Se añadió un carrete de 8 km de fibra óptica al enlace instalado para darle más flexibilidad en términos de distancia y realizar pruebas de desempeño que sobrepasa la distancia meta inicial del trabajo de investigación, el cual era de 10 km a 15 km, obteniendo un enlace final de 21 km.
- Se identificaron a los elementos ópticos más relevantes en el *fronthaul* óptico pasivo para tener su caracterización y garantizar una implementación óptima de la red.
 - Se le asignaron identificadores a cada uno de los elementos a caracterizar.
 - Se caracterizaron a todos los SFP+ DWDM utilizados en este trabajo de investigación, los parámetros obtenidos fueron: potencia óptica, longitud de onda, frecuencia, ancho de línea, SMSR y OSNR.
 - Se compararon los parámetros de la caracterización de los SFP+ DWDM con los parámetros obtenidos en las hoja de especificaciones de cada fabricante, los cuales resultaron dentro de los rangos normales de operación, por lo que son adecuados para una implementación óptima en el *fronthaul* óptico pasivo.
 - Se caracterizaron a los MUX/DEMUX utilizados en la red de *fronthaul* óptica pasiva para obtener las pérdidas de inserción, los canales aceptados y su separación inter-canal. Lo que en frecuencia resultó de acuerdo con el diseño, sin embargo, las pérdidas de inserción presentan variaciones entre los canales del sistema, que a la distancia de 21 km que tiene este trabajo de investigación no resulta de gran relevancia, en cambio, para sistemas con distancias más grandes puede resultar perjudicial.
- Se implementó la red con todos los elementos previamente caracterizados, seleccionando tres distancias del *fronthaul* óptico pasivo: 10 km, 18 km y 21 km.
 - Se obtuvieron las trazas OTDR para cada uno de los enlaces para analizar los eventos que presentan los enlaces.
 - Se midió la potencia en puntos importantes de la red para determinar el presupuesto de potencia necesario en cada enlace, lo cual determina su viabilidad en una implementación formal de la red. Resultando en que los enlaces de 10 km y 18 km se encuentran dentro de los parámetros óptimos que garantizan la tasa máxima de transmisión, con lo cual se puede concluir que la meta inicial de este trabajo de investigación se cumple. Sin embargo, para el enlace de 21 km, únicamente el canal 35 se encuentra dentro de los rangos óptimos, a causa de las pérdidas excesivas en el

enlace, debido a la utilización de conectores mecánicos y empalmes de fusión, ya que un enlace dedicado sin uniones intermedias, es decir, un solo hilo de fibra óptica evitaría las pérdidas de potencia óptica, logrando así el presupuesto de potencia.

- Se realizó el presupuesto de dispersión para el sistema DWDM con base en la tasa de transmisión máxima que los SFP+ DWDM utilizados son capaces alcanzar, que es de 10 Gb/s, además de utilizar los parámetros regulados para las normas G.652 que corresponden a la fibra óptica utilizada y de las longitudes de onda respectivas del sistema. Resultando en que la dispersión no afecta hasta sobrepasar los 70 km.
- Se comprobó la transmisión de cada canal DWDM utilizado en el sistema para las tres diferentes longitudes del trabajo de investigación a través del OSA con la señal multiplexada. El cual demostró que la dispersión no es un factor relevante incluso en la distancia más grande de 21 km, pero que la pérdida de potencia óptica es el mayor inconveniente en esta red óptica pasiva, además es visible la conservación del OSNR en todos los puntos medidos de la red, así como la forma espectral de la señal transmitida.

Los resultados obtenidos experimentalmente muestran que es viable implementar una red formal de fibra óptica para ser utilizada como *fronthaul* para una red 4G/5G con tecnología DWDM que sea pasiva en planta externa. Como se muestra en el estado del arte, un *fronthaul* óptico utilizado para este fin se encuentra dentro del rango de los 10 km y 20 km, por lo que, considerando estas distancias, el *fronthaul* óptico pasivo implementado en este trabajo de investigación se encuentra dentro de lo esperado con el estado del arte, además con agregaciones de fibra óptica se logró superar esta distancia llegando a los 21 km.

Gracias al cálculo del presupuesto de potencia con valores obtenidos a través de mediciones experimentales es posible determinar que el enlace de 18 km es apto para lograr una transmisión a la máxima tasa que los SFP+ DWDM empleados en este trabajo de investigación alcanzan, obteniendo una tasa máxima de 40 Gb/s en combinación con los cuatro canales que el sistema posee. En el caso de la distancia más grande analizada en este trabajo que es de 21 km, únicamente el canal 35 es capaz de cumplir con el presupuesto de potencia, debido a que este canal tiene las menores pérdidas a lo largo del enlace de los cuatro canales del sistema, aunque este desbalanceo de potencia óptica en su mayoría es causado por las pérdidas de inserción de los MUX/DEMUX. El incumplimiento en el presupuesto de potencia significa que la potencia recibida en el receptor es menor a la *sensitivity* del receptor, esto tiene consecuencias negativas en el BER, puesto que, tener potencia óptica menor a la requerida ocasiona que la línea de transmisión no pueda discernir de forma óptima entre niveles altos y bajos, generando errores en el sistema, que resulta en disminución en la tasa de transmisión.

Las pérdidas de potencia óptica en esta red residen directamente en el medio óptico y en los MUX/DEMUX, aunque también se presentan en los conectores de los extremos del enlace. Las pérdidas de inserción en los MUX/DEMUX son valores fijos que no se pueden modificar, es decir, la calidad en su construcción determinará el desempeño que tendrán, por lo que para reducir las pérdidas de potencia óptica de esta red es necesario abordarlo desde otra perspectiva. La reducción de pérdidas de potencia óptica es posible plantearla desde la construcción del medio óptico, es decir, desde la planificación de los hilos que se tendrán en un mismo sentido, ya que una fibra dedicada y no hecha de secciones presentará menores pérdidas. Una red de fibra óptica de 21 km con el mismo coeficiente de atenuación que tiene la fibra óptica instalada en este trabajo que es de

0.22 dB/km, si fuera un solo hilo dedicado sin empalmes o conectores intermedios tendría una pérdida de potencia óptica de 4.62 dB, para tener el presupuesto de pérdidas completo a este valor calculado se le tendrían que sumar las pérdidas de inserción de los MUX/DEMUX correspondientes. Comparando las pérdidas acumuladas únicamente en el medio óptico de 9.1 dB de la red implementada con el valor calculado de una línea dedicada, se tiene una diferencia de 4.48 dB, valor suficientemente grande para que la potencia al final de la línea sea mayor que la *sensitivity* del receptor. Sin duda esta es la mejor solución, ya que reduce al mínimo los valores de pérdidas de potencia óptica, sin embargo, existe otra solución que es más práctica, pero que no reduciría al mínimo las pérdidas de potencia; esta solución consiste en sustituir los conectores mecánicos intermedios por empalmes de fusión. Esta sustitución tendría que contar con empalmes de fusión óptimos para garantizar que la potencia óptica transmitida esté dentro del presupuesto de potencia, aunque el inconveniente de esta solución es que se tendría un límite cercano a los 21 km, lo cual para fines de esta red no resulta perjudicial por ser una red planeada para distancias máximas de 20 km.

De acuerdo con la potencia medida en cada uno de los SFP+ DWDM y con la potencia de la señal multiplexada al inicio del enlace se puede concluir que la influencia de los efectos no lineales es despreciable en todos los casos y no representa una preocupación de diseño. De igual forma, con el cálculo del presupuesto de dispersión realizado se puede garantizar que para las condiciones que presenta la fibra la dispersión acumulada a los 21 km del enlace más largo en este trabajo de investigación no representa inconvenientes en el desempeño del sistema.

Al inicio de este proyecto se tenía contemplado implementar un *fronthaul* óptico DWDM activo, pues comúnmente en los sistemas de telecomunicaciones comerciales en tecnologías de transporte óptico, el uso de transpondedores está presente en la mayoría de estas redes. Sin embargo, considerando los beneficios que tienen las redes PON en la disminución del gasto tanto en CAPEX como en OPEX, se consideró la alternativa para implementar un *fronthaul* óptico pasivo. La diferencia entre PON y un *fronthaul* DWDM es que las redes PON están diseñadas para redes de acceso, además de tener lambdas fuera del espectro correspondiente a los canales DWDM. Así que la selección de los transceptores ópticos fue una tarea crucial para la implementación de la red.

El éxito de esta implementación reside en los SFP+ DWDM utilizados, ya que al estar centrados en las frecuencias de los canales que los MUX/DEMUX admiten, el sistema puede omitir el uso de convertidores de longitudes de onda como transpondedores optoelectrónicos que comúnmente se utilizan en redes comerciales. En general, los elementos de red y sus tarjetas de red se rigen por protocolos, los cuales indican la compatibilidad de los transceptores que se insertan a estos. Es usual que los elementos de red como lo son las computadoras, los radios, switches o routers únicamente admitan transceptores ópticos dentro de las dos primeras ventanas ópticas, es decir, que sus protocolos sólo admiten SFP+ que operan en 850 nm o 1310 nm. Para lo cual, los SFP+ necesarios en este trabajo de investigación necesitan cumplir con características lógicas correspondientes a estas ventanas ópticas.

Se demostró la viabilidad de desplegar una red de *fronthaul* óptico utilizando DWDM como principal tecnología de transporte desde una perspectiva pasiva, ya que la solución pasiva presenta reducciones en CAPEX y OPEX comparado con la arquitectura activa. También se determinó que el principal factor que afecta a esta red es la pérdida de potencia óptica, lo que resulta habitual en

cualquier red pasiva. La comprobación de la transmisión de los canales DWDM a su tasa máxima a los 18 km resulta determinante para una convergencia óptima con la red inalámbrica, para poder crear la red *fiber-wireless* utilizada en redes 4G/5G.

Como ya se mencionó previamente, la pérdida de potencia óptica es el factor que más perjudica al sistema, por lo que es de vital importancia mantener a la red en excelentes condiciones para tener un desempeño óptimo, es decir, realizar empalmes de calidad, así como evitar el uso de conectores mecánicos. Uno de los principales inconvenientes que reducía considerablemente la potencia óptica en la caracterización y que limitaba la distancia que podía alcanzar el enlace era la suciedad en los conectores, por lo que es recomendable limpiar los conectores ópticos cada vez que se intercambien o se conecten en cualquier equipo con el material adecuado, ya que esto garantiza la reducción de pérdidas de potencia innecesarias, que fácilmente pueden alcanzar los 2 dB.

Finalmente, de los cuatro objetivos planteados al inicio de este trabajo de investigación, se puede concluir que satisfactoriamente los cuatro se cumplieron en su totalidad, puesto que se implementó la infraestructura de un *fronthaul* óptico siguiendo la arquitectura C-RAN. Debido a que, la red cuenta con extremos de RRH y BBU, además de un *core* que administra los recursos de los BBU. Asimismo, se implementó la tecnología DWDM con elementos pasivos en su totalidad en planta externa, logrando una transmisión exitosa dentro del rango impuesto en el estado del arte investigado en la realización de este trabajo. Igualmente, con los resultados obtenidos en el capítulo 5 *Resultados y análisis*, se demostró la transmisión de las señales de los canales provenientes de los BBU y RRH que a su vez se encuentran interconectados con la contraparte inalámbrica de la red.

Trabajo a futuro

Este trabajo de investigación abre la puerta al análisis de sistemas más sofisticados que puedan utilizar a la arquitectura C-RAN como base para el diseño de cualquier red basada en fibra óptica o que requieran de un sistema capaz de multiplexar señales para utilizar una red de transporte DWDM, ya que el equipo óptico completo se encuentra caracterizado, el cual se concluye que trabaja en óptimas condiciones, además de que este proyecto realizó la interconexión de los laboratorios de telecomunicaciones de la FI y del IINGEN mediante el tendido de fibra óptica, por lo que facilita trabajos en colaboración entre estas dos instituciones, asimismo se construyó el enlace de manera en que se pueda variar la longitud, ya sea acortar de los 21 km o incluso agregar más fibra óptica.

La flexibilidad de esta red no solo se encuentra en la longitud variable, sino que también en los equipos de red, ya que las plataformas utilizadas en las redes 4G/5G utilizan SDR o SDN, lo que se traduce en que saltos de tecnologías ya sea de 4G a 5G o incluso versiones anteriores o con diferencias sea posible únicamente cambiando el SW de los radios USRP y las estaciones de trabajo. Proporcionando escenarios fácilmente adaptables para investigaciones de temas o tecnologías específicas.

Como continuación directa a este trabajo de investigación se puede realizar la caracterización del *fronthaul* con un medidor de BER (BERT, *BER Tester*) como prueba última en la capa física óptica, ya que esto determinaría el impacto exacto que tiene el incumplimiento del presupuesto de potencia en el enlace de 21 km.

Procedente a este trabajo, es necesario realizar pruebas de desempeño de la red en escenarios característicos de las redes 4G/5G, donde la red se estrese para establecer que tan confiable es la red en términos de tráfico o para determinar el número máximo de dispositivos que el sistema puede admitir con una calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) aceptable. De esta forma especificar las aplicaciones reales que esta red sería capaz de llevar a cabo y determinar si es una red viable para ser la precursora de aplicaciones novedosas.

Apéndice

Técnicas/tecnologías sobresalientes en 5G

Las aplicaciones que se logran a través de 5G son muy llamativas para todos, ya que estos servicios no son sólo de telecomunicaciones, más bien la red 5G es el medio que mejora y desenvuelve servicios ajenos a las comunicaciones. Como se mencionó eMBB, mMTC y URLLC son los principales escenarios de uso, por lo que 5G tiene que utilizar nuevas técnicas para obtener estos nuevos servicios y satisfacer sus requisitos.

mmWave

La visión hacia 5G se formalizó con el lanzamiento y la aceptación del *Release 15*, el cual introdujo la interfaz aérea: NR, que admite el acceso del equipo del usuario (UE, *User Equipment*) hacia la red de 5G. En NR se definen características clave de rendimiento que distinguen esta interfaz de su predecesora 4G LTE. Una cualidad destacable de NR es la mayor flexibilidad de frecuencias y espectro utilizable, es decir, la utilización de ondas milimétricas (*mmWave*), ya que provee grandes anchos de bandas, que serán al menos de 100 MHz, lo cual es 5 veces más que el máximo en 4G y que podrán ser superiores a 1 GHz. El nombre de ondas de radio milimétricas proviene de su longitud de onda, que varía entre 1 mm y 10 mm [131].

La longitud de onda (λ) se obtiene a partir de la ecuación 13, donde la velocidad de propagación de la onda es igual al producto de su longitud por su frecuencia (ν). En el caso de las radiaciones electromagnéticas que se propagan en el vacío, la velocidad de propagación es igual a la velocidad de la luz $\sim 300,000$ km/s (c).

$$c = \lambda \nu \quad (13)$$

La introducción de mmWave trae muchos beneficios, principalmente la solución de conexiones masivas de dispositivos a altas velocidades, sin embargo, tiene muchos desafíos intrínsecos a las ondas de altas frecuencias como lo es la limitada cobertura derivada de la pérdida de potencia en la ruta (*path loss*), lo que conlleva a un funcionamiento óptimo sólo en línea de vista (LOS, *line of sight*), incluso el bloqueo de mano en algunas circunstancias con un escenario de clima lluvioso puede limitar gravemente la propagación de la señal [132]. Actualmente, las ondas de radio de alrededor de siete milímetros (~ 42 GHz) se utilizan en las comunicaciones por satélite, así como en los sistemas de radar [133], por lo que el uso de estas bandas de frecuencias para el acceso a de los usuarios a las radio-bases es completamente nuevo.

NR define dos rangos mmWave, el rango de frecuencias (FR, *Frequency Range*) 1 cubre desde los 410 MHz a los 7.125 GHz, a este primer rango se le conoce como la banda sub-6 GHz, ya que el rango en su mayoría está por debajo de los 6 GHz. El FR2 cubre desde los 24.25 GHz a los 52.6 GHz. Estos rangos de frecuencias significan 25 veces más que el espectro utilizado en 4G. En la tabla 57 se muestran los FR con sus posibles anchos de banda por canal; el ancho de banda máximo del canal definido para FR1 es de 100 MHz, debido a la escasez de espectro continuo en este FR, mientras que en FR2 el mínimo es de 50 MHz y el máximo es de 400 MHz con la posibilidad de agregación de canales.

Tabla 57 Espectro mmWave definido en NR.

Denominación	Rango de frecuencias	Ancho de banda soportado para un canal [MHz]
FR1	410 MHz – 7125 MHz	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100
FR2	24250 MHz – 52600 MHz	50, 100, 200, 400

Las bandas definidas por NR se identifican con la letra **n** como prefijo, el rango FR1 tiene frecuencias superpuestas con las frecuencias utilizadas en 4G LTE y con otras aplicaciones sin licencia, mientras que FR2 en su mayoría está libre. Es por esto, que en FR1 no se tiene espectro continuo y es más difícil la asignación de anchos de banda más grandes comparado con FR2. Las características de las diferentes bandas de frecuencia dentro de este amplio espectro se utilizarán para definir sus aplicaciones óptimas, tales como video en ultra alta definición (UHD, *ultra high-definition*), salud electrónica (e- health, *electronic health*), comunicación a vehículos (V2X, *Vehicle-to-everything*), realidad aumentada, realidad virtual, etc. Las asignaciones de bandas se muestran en las tablas 58 y 59 [28], donde la tabla 58 está descrita para FR2, mientras que la tabla 59 contiene la asignación del uso de banda para FR1.

Tabla 58 Distribución del FR2.

Banda	F [GHz]	Nombre	Uplink / Downlink [GHz]	Ancho de banda [MHz]	Duplexación
n257	28	LMDS	26.50 – 29.50	50, 100, 200, 400	TDD
n258	26	K-band	24.25 – 27.50	50, 100, 200, 400	TDD
n259	41	V-band	39.50 – 43.50	50, 100, 200, 400	TDD
n260	39	Ka-band	37.00 – 40.00	50, 100, 200, 400	TDD
n261	28	Ka-band	27.50 – 28.35	50, 100, 200, 400	TDD

Tabla 59 Distribución del uso de bandas en el rango sub-6 GHz.

Banda	Modo dúplex	F [MHz]	Nombre	Uplink [MHz]	Downlink [MHz]	Espaciamiento [MHz]	Ancho de banda [5 MHz]
n1	FDD	2100	IMT	1920 – 1980	2110 – 2170	190	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50
n2	FDD	1900	PCS	1850 – 1910	1930 – 1990	80	5, 10, 15, 20
n3	FDD	1800	DCS	1710 – 1785	1805 – 1880	95	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40
n5	FDD	850	CLR	824 – 849	869 – 894	45	5, 10, 15, 20
n7	FDD	2600	IMT-E	2500 – 2570	2620 – 2690	120	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50
n8	FDD	900	Extended GSM	880 – 915	925 – 960	45	5, 10, 15, 20
n12	FDD	700	Lower SMH	699 – 716	729 – 746	30	5, 10, 15
n14	FDD	700	Upper SMH	788 – 798	758 – 768	-30	5, 10
n18	FDD	850	Lower 800 (Japan)	815 – 830	860 – 875	45	5, 10, 15
n20	FDD	800	Digital Dividend (EU)	832 – 862	791 – 821	-41	5, 10, 15, 20
n25	FDD	1900	Extended PCS	1850 – 1915	1930 – 1995	80	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40

n26	FDD	850	Extended CLR	814 – 849	859 – 894	45	5, 10, 15, 20
n28	FDD	700	APT	703 – 748	758 – 803	55	5, 10, 15, 20, 30
n29	SDL	700	Lower SMH	N/A	717 – 728	N/A	5, 10
n30	FDD	2300	WCS	2305 – 2315	2350 – 2360	45	5, 10
n34	TDD	2100	IMT	2010 – 2025		N/A	5, 10, 15
n38	TDD	2600	IMT-E	2570 – 2620		N/A	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40
n39	TDD	1900	DCS–IMT Gap	1880 – 1920		N/A	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40
n40	TDD	2300	S-Band	2300 – 2400		N/A	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80
n41	TDD	2500	BRS	2496 – 2690		N/A	10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100
n46	TDD	5200	U-NII-1–4	5150 – 5925		N/A	10, 20, 40, 60, 80
n47	TDD	5900	U-NII-4	5855 – 5925		N/A	10, 20, 30, 40
n48	TDD	3500	CBRS (US)	3550 – 3700		N/A	5, 10, 15, 20, 40, 50, 60, 80, 90, 100
n50	TDD	1500	L-Band (EU)	1432 – 1517		N/A	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80
n51	TDD	1500	L-Band Extension (EU)	1427 – 1432		N/A	5
n53	TDD	2500	S band	2483.5 – 2495		N/A	5, 10
n65	FDD	2100	Extended IMT	1920 – 2010	2110 – 2200	190	5, 10, 15, 20, 50
n66	FDD	¹⁷⁰⁰ 2100	Extended AWS	1710 – 1780	2110 – 2200[6]	400	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40
n70	FDD	2000	AWS-4	1695 – 1710	1995 – 2020	300	5, 10, 15, 20, 25
n71	FDD	600	Digital Dividend (US)	663 – 698	617 – 652	–46	5, 10, 15, 20
n74	FDD	1500	Lower L-Band (US)	1427 – 1470	1475 – 1518	48	5, 10, 15, 20
n75	SDL	1500	L-Band (EU)	N/A	1432 – 1517	N/A	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50
n76	SDL	1500	Extended L-Band (EU)	N/A	1427 – 1432	N/A	5
n77	TDD	3700	C-Band	3300 – 4200		N/A	10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
n78	TDD	3500	C-Band	3300 – 3800		N/A	10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
n79	TDD	4700	C-Band	4400 – 5000		N/A	40, 50, 60, 80, 100
n80	SUL	1800	DCS	1710 – 1785	N/A	N/A	5, 10, 15, 20, 25, 30
n81	SUL	900	Extended GSM	880 – 915	N/A	N/A	5, 10, 15, 20
n82	SUL	800	Digital Dividend (EU)	832 – 862	N/A	N/A	5, 10, 15, 20
n83	SUL	700	APT	703 – 748	N/A	N/A	5, 10, 15, 20
n84	SUL	2100	IMT	1920 – 1980	N/A	N/A	5, 10, 15, 20

n86	SUL	1700	Extended AWS	1710 – 1780	N/A	N/A	5, 10, 15, 20, 40
n89	SUL	850	CLR	824 – 849	N/A	N/A	5, 10, 15, 20
n90	TDD	2500	BRS	2496 – 2690		N/A	10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100
n91	FDD	800	DD (EU)	832 – 862	1427 – 1432	570 – 595[7]	5, 10
		1500	L-Band (EU)				
n92	FDD	800	DD (EU)	832 – 862	1432 – 1517	600 – 660[7]	5, 10, 15, 20
		1500	L-Band (EU)				
n93	FDD	900	Extended GSM	880 – 915	1427 – 1432	527 – 547[7]	5, 10
		1500	L-Band (EU)				
n94	FDD	900	Extended GSM	880 – 915	1432 – 1517	532 – 632[7]	5, 10, 15, 20
		1500	L-Band (EU)				
n95	SUL	2100	IMT	2010 – 2025	N/A	N/A	5, 10, 15
n96	TDD	6000	U-NII-5-9	5925 – 7125		N/A	20, 40, 60, 80

La forma en que opera FR1 en el acceso de la red es bien conocido, debido a que son frecuencias que ya se utilizaban con anterioridad en 4G LTE, sin embargo, el funcionamiento en FR2 trae mucho desconcierto por pérdidas y potencias nuevas en este tipo de sistemas; por lo que NR definió valores de potencia en el UE y en el gNB. En el UE definió como mínima potencia isotrópica radiada equivalente (EIRP, *Effective Isotropic Radiated Power*) unos 22.4 dBm, mientras que una máxima EIRP de 43 dBm. Para que estos valores puedan ser captados y procesados por el gNB, NR definió que este debe de tener una referencia de sensibilidad (REFSENS, *Reference sensitivity level*) entre -83.1 dBm a -76.4 dBm; esto para anchos de banda de 400 MHz [28].

Beamforming

El gran ancho de banda y las grandes pérdidas de potencia en mmWave se deben a las altas frecuencias que utiliza el espectro, ya que la pérdida de propagación en el espacio libre es proporcional al cuadrado de la frecuencia portadora [134], por lo que se necesitan de métodos que hagan posible la utilización de mmWave. Algo que acompaña a mmWave para que sea totalmente funcional es la alta directividad del lóbulo principal de una señal transmitida a través de una antena; esto se logra a través de la formación de haces (*beamforming*), que consiste en controlar la fase y la potencia de la señal transmitida por medio de una matriz de antenas que se alimentan de la misma señal. En la figura 129 [135] se ejemplifica cómo la directividad de un arreglo de antenas va creciendo a medida que aumentamos el número de elementos en la matriz de la antena.

Las antenas dentro de la matriz son alimentadas con la misma señal, pero de manera individual para controlar la fase y la amplitud de cada antena. Al tener la misma señal en cada antena, es posible crear interferencias constructivas y destructivas, debido a que todas las antenas en la matriz tienen la misma frecuencia; con estas interferencias se logra formar un patrón de radiación nuevo y compuesto

Beamforming es posible porque cada antena alimenta con la misma señal de transmisión, pero por separado, ya que así se logra controlar la fase y la amplitud de cada elemento que forma la matriz de antenas. Al ser la misma señal en la matriz, cada antena maneja la misma frecuencia, por lo que en la salida se tienen interferencias constructivas y destructivas; de esta forma el frente de onda sigue un patrón de radiación nuevo y compuesto, logrando una alta ganancia en una dirección [136].

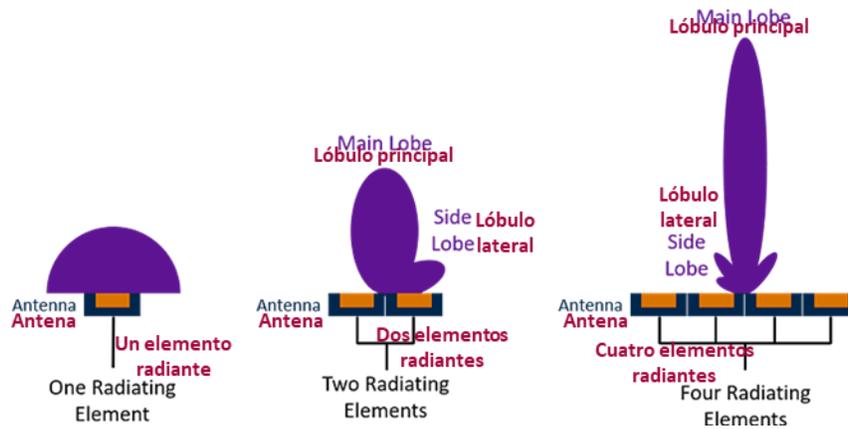


Figura 129 Control del lóbulo principal a través de un arreglo de antenas [135].

Beam-steering

El direccionamiento de haz (*beam-steering*) es darle directividad a un haz afectando la fase de antenas individuales dentro de un arreglo de antenas. Beam steering es dinámico, es decir, puede cambiar la ganancia de un haz sin cambiar los elementos físicos de la antena ni el arreglo o cualquier otro HW.

Beam-steering reduce pérdidas de propagación del espectro mmWave, debido a que la potencia radiada no se desperdicia en el espacio donde no hay UE activos, sino que toda la potencia es dirigida a una dirección en específico; logrando una conexión punto a punto. Se puede decir que se logra un efecto de cableado, puesto que el patrón de radiación ya no será omnidireccional o incluso de 120°, sino que la recepción sólo se logrará en un punto en específico.

Beam-sweeping

Las técnicas anteriores son una solución directa para el problema de la pérdida de propagación, sin embargo, con la aplicación de estas soluciones surge un nuevo desafío, que es la comunicación inicial con los UE, ya que, al radiar sólo en una dirección, las radio-bases no podrán descubrir los UE que quieren tener acceso a la red.

El barrido de haz (*beam-sweeping*) es una técnica que permite a las radio-bases hacer una exploración de la red, para descubrir UE y brindar el acceso a la red. Beam-sweeping consiste en enviar ráfagas bien definidas, las cuales contienen información única de cada ráfaga, así el UE capta las ráfagas y determina la mejor calidad asociada. Posteriormente el UE envía la información de su canal al gNodeB y se establece la conexión como una conexión cableada. Beam-sweeping también sirve para determinar la información sobre la cobertura superpuesta, esto ayuda a los traspasos (*handover*) entre gNodeB.

La figura 130 [36] muestra el proceso de *beamforming*, *beam-steering* y *beam-sweeping* que hacen posible la transmisión en frecuencias mmWave. El gNB empieza con un barrido, con señales de sincronización, para encontrar UE que se conecten a la red, en este primer paso se comparte la información básica del gNB. Una vez que un barrido le llega al UE, este UE contesta con la información para establecer un canal de conexión. Cuando se ha establecido la comunicación se hace el *beam-steering* para brindar la mayor potencia en la transmisión.

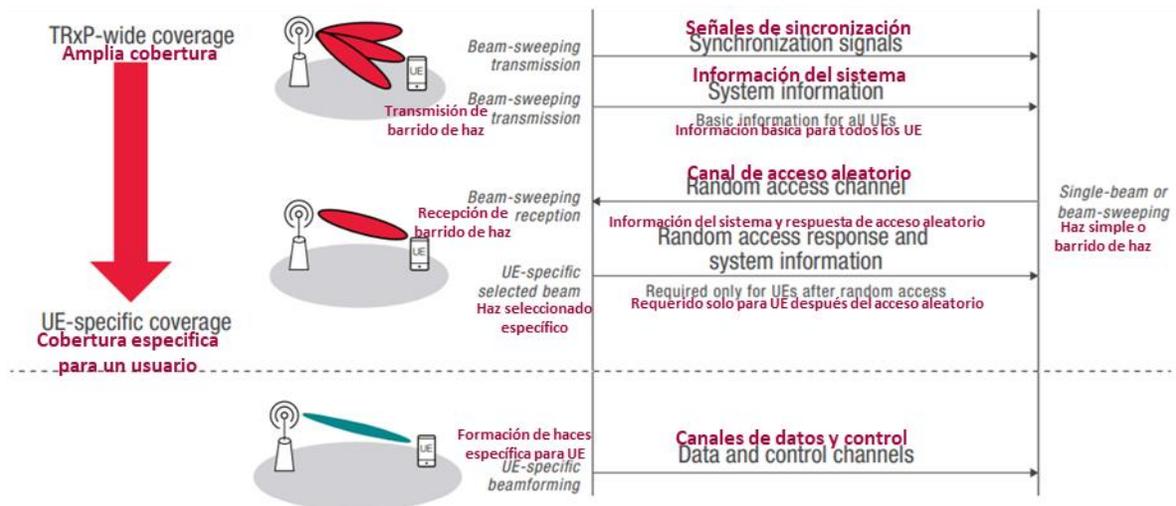


Figura 130 Técnicas que posibilitan el uso de mmWave [36].

MIMO masivo

MIMO se crea a partir de la multi-trayectoria, la cual tradicionalmente causaba interferencias en los puntos de recepción. La multi-trayectoria se refiere a los diferentes caminos que puede tomar una señal con base en el entorno de propagación, es decir, los rebotes que puede sufrir una señal con los obstáculos que se encuentra en su camino. MIMO se apoya del concepto de la diversidad espacial, el cual consiste en ubicar antenas separadas en distintas posiciones para tomar ventaja de los diversos caminos de la señal que existen en un entorno típico; en resumen, MIMO convierte a la multi-trayectoria de algo perjudicial a algo beneficioso.

MIMO tiene dos configuraciones principales, las cuales pueden brindar robustez en el enlace o incremento en la capacidad de transmisión. La robustez en el enlace se logra mandando la misma información en dos o más antenas, recibiendo la misma información en dos o más antenas o también mandando y recibiendo la misma información en dos o más antenas. El incremento de la tasa de transmisión sigue el mismo principio que la robustez del enlace, la diferencia radica en que ya no se manda la misma información, sino que se mandan diferentes señales de información; consiguiendo que en un mismo sistema se tengan transmisiones en paralelo.

Normalmente en MIMO la máxima configuración es de 8x8, lo que significa que se tienen 8 antenas en transmisión y 8 antenas en recepción. En MIMO MxN la M significa el número de antenas en transmisión y N es el número de antenas en la recepción. MIMO masivo sigue el mismo principio de funcionamiento que MIMO tradicional; la diferencia sustancial es en el incremento del número de antenas, que puede llegar a un arreglo de 100x100 o incluso más [137].

En la figura 131 [138] se puede apreciar el incremento de la capacidad de un sistema utilizando MIMO masivo. El incremento de la capacidad del sistema se utiliza para soportar más usuarios al sistema. Esta implementación es una solución directa para el caso de uso de mMTC.

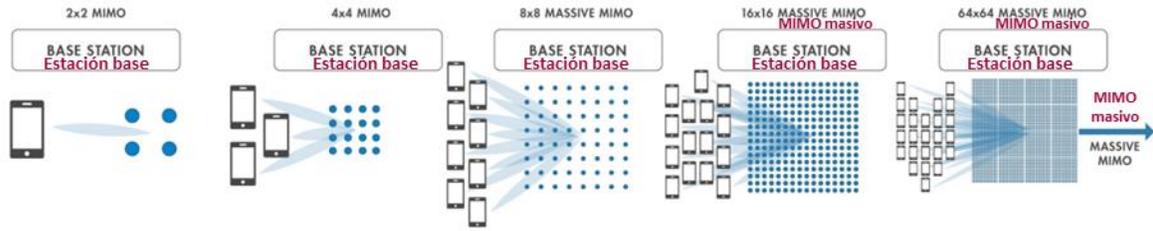


Figura 131 Incremento en la capacidad del sistema mediante la utilización de MIMO masivo [138].

Referencias

- [1] M. Abu-Matar y R. Mizouni, «Variability Modeling for Smart City Reference Architectures,» *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pp. 1-8, Sep. 2018.
- [2] S. Jayaprakasam, X. Ma, J. W. Choi y S. Kim, «Robust Beam-Tracking for mmWave Mobile Communications,» *IEEE Communications Letters*, vol. 21, nº 12, pp. 2654-2657, December 2017.
- [3] P. Perry, A. Peters, S. McClean, P. Morrow, B. Scotney y L. Barry, «All-Optical Network Capacity for 5G Cellular Fronthaul,» *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-4, July 2019.
- [4] G. Chang, L. Cheng, M. Xu y D. Guidotti, «Integrated fiber-wireless access architecture for mobile backhaul and fronthaul in 5G wireless data networks,» *2014 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP)*, pp. 49-50, November 2014.
- [5] T. R. Raddo, S. Rommel, B. Cimoli y I. T. Monroy, «The Optical Fiber and mmWave Wireless Convergence for 5G Fronthaul Networks,» *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, pp. 607-612, Sep. 2019.
- [6] S. N. R. S. L. K. T. I. SHERI DETOMASI, «Fact Or Fiction: What's Real In 5G New Radio,» *EE WORLD ONLINE NETWORK*, 10 May 2018. [En línea]. Available: <https://www.eeworldonline.com/fact-or-fiction-whats-real-in-5g-new-radio/>. [Último acceso: 28 Oct. 2020].
- [7] A. Tartaglia, R. Magri y A. Deho, «Optical Solutions for 5G: Technologies and Network Architectures,» *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-7, July 2019.
- [8] J. Terada, T. Shimada y A. Otaka, «Optical access network technologies for future radio access networks,» *2017 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM)*, pp. 37-38, July 2017.
- [9] A. Prata, A. S. R. Oliveira y N. B. Carvalho, «All-digital flexible uplink remote radio head for C-RAN,» *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pp. 1-4, 2016.
- [10] Calnex Solutions plc, «Getting Into the Hotel Business,» Calnex Solutions plc, 02 May 2018. [En línea]. Available: <https://www.calnexsol.com/en/article-display/114-archived-blog/875-getting-into-the-hotel-business>. [Último acceso: 28 Oct. 2020].
- [11] B. Mahapatra, A. K. Turuk, S. K. Patra y R. Kumar, «Optimal Placement of Centralized BBU (C-BBU) for Fronthaul and Backhaul Optimization in Cloud-RAN Network,» *2017 International Conference on Information Technology (ICIT)*, pp. 107-112, December 2017.

- [12] S. Sarmiento, J. A. Altabas, S. Spadaro y J. A. Lazaro, «Experimental Assessment of 10 Gbps 5G Multicarrier Waveforms for High-Layer Split U-DWDM-PON-Based Fronthaul,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, nº 10, pp. 2344-2351, May 2019.
- [13] R. M. Borges, L. A. Melo Pereira, H. Rodrigues Dias Filgueiras, A. Carvalho Ferreira, M. Seda Borsato Cunha, E. Raimundo Neto, D. H. Spadoti, L. Leonel Mendes y A. Cerqueira S., «DSP-Based Flexible-Waveform and Multi-Application 5G Fiber-Wireless System,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, nº 3, pp. 642-653, February 2020.
- [14] Zhongwei Tan, Chuanchuan Yang, Jingjing Song, Yu Liu y Ziyu Wang, «Energy consumption analysis of C-RAN architecture based on 10G EPON front-haul with daily user behaviour,» *2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, pp. 1-3, 2015.
- [15] I. V. Lucena Cid, «EL DERECHO DE ACCESO A INTERNET,» *Revista Internacional de Pensamiento Político*, vol. 9, pp. 383-398, 2014.
- [16] Cisco, «Cisco Annual Internet Report (2018-2023),» *White paper Cisco public*, 2020.
- [17] O. Rodríguez Gámez., R. H. Perdomo, . L. Torno Hidalgo, . L. García Escalona y . R. Rodríguez Romero, «Telefonía móvil celular: origen, evolución, perspectivas,» *Ciencias Holguín*, vol. XI, pp. 1-8, 2005 .
- [18] F. D'almeida y D. Margot, «La Evolución de las Telecomunicaciones Móviles en América Latina y el Caribe,» *BID Invest*, nº 4, Abril 2018.
- [19] C. Robledo Ramos, «Introducción a la telefonía celular,» *Telefonía celular y protección de sus enlaces de comunicaciones*, pp. 22-35, 2007.
- [20] F. Rodríguez Sánchez, F. Sáez Vacas y J. M. García Hervás, «El teléfono móvil, producto estelar de la red universal digital,» *Cátedra Orange*, pp. 32-36, 2010.
- [21] Xakata móvil, «Del 1G al 5G: así funcionan las redes móviles y todo lo que cambia tras cada salto de generación,» 21 Apr. 2020. [En línea]. Available: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/1g-al-5g-asi-funcionan-redes-moviles-todo-que-cambia-cada-salto-generacion>. [Último acceso: 26 Sep. 2020].
- [22] ETSI, «Digital cellular communication system (Phase 2+) Radio transmission and reception,» *ETSI TS 145.005*, vol. 10.0.0, Apr. 2011.
- [23] J. Madrazo Lorite, «Análisis y estudio de soluciones,» *Universitat Oberta de Catalunya*, pp. 10-12, 2018.
- [24] ITU, «Focus Group on IMT-2020,» ITU, 2020. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/es/ITU-T/focusgroups/imt-2020/Pages/default.aspx>. [Último acceso: 2020 10 28].

- [25] International Telecommunication Union , «Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s),» Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services, 2017.
- [26] P. Bertolini, «UIT-R aprobó 5G del 3GPP como estándar IMT-2020,» DPL news, 16 Jul. 2020. [En línea]. Available: <https://digitalpolicylaw.com/uit-r-aprobo-5g-del-3gpp-como-estandar-imt-2020/>. [Último acceso: 2020 Oct. 28].
- [27] 3GPP, «3GPP Calendar,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/release-17>. [Último acceso: 27 10 2020].
- [28] 3rd Generation Partnership Project, «3GPP TR 38.815 V1.0.0 (2018-06) Technical Report,» Valbonne - FRANCE, 2018.
- [29] J. Agrawal, P. Mor, J. M. Keller, R. Patel y P. Dubey, «Introduction to the basic LTE handover procedures,» *2015 International Conference on Communication Networks (ICCN)*, pp. 197-201, November 2015.
- [30] NGMN Alliance, «Service-Based Architecture in 5G,» *The engine of broadband wireless innovation*, nº V1.0, p. 4, 19-January-2018.
- [31] S. Tony y A. Xiang, «Network Slicing and 3GPP Service and Systems Aspects (SA) Standard,» *IEEE Softwarization*, December 2017.
- [32] S. Balasubramaniam, «End to End Network Slicing in 5G,» *3GPP Standards Perspective*, 2016.
- [33] P. Ashwood-Smith, «Why end-to-end network slicing will be important for 5G,» ITU News, 4 Jul 2017. [En línea]. Available: <https://news.itu.int/why-end-to-end-network-slicing-will-be-important-for-5g/>. [Último acceso: 15 Jun 2020].
- [34] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone y G. Durisi, «5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View,» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55765-55779, 2018.
- [35] Nokia, «Use cases to expand your business,» *Unleash the value of 5G*, 2020.
- [36] Keysight Technologies, «Engineering the 5G World,» *Design and Test Insights*, January 29, 2020.
- [37] GIGA-BYTE Technology Co, «A Smart City Solution with 5G mMTC Technology,» *To build a massive 5G IoT network to enable the smart cities of the future, network operators can combine mMTC (Massive Machine-Type Communications) technology together with a MEC (Multi-access Edge Computing) based on GIGABYTE's H242 Series servers*, 2020.
- [38] N. Y. I. o. T. College of Engineering and Computing Sciences, «What 5G means for smart cities,» *Smart Cities World*, Oct 2019.

- [39] G. C. Ferrante, J. Ostman, G. Durisi y K. Kittichokechai, «Pilot-assisted short-packet transmission over multiantenna fading channels: A 5G case study,» *2018 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 1-6, March 2018.
- [40] B. P. Sahoo, C.-C. Chou, C.-W. Weng y H.-Y. Wei, «Enabling Millimeter-Wave 5G Networks for Massive IoT Applications: A Closer Look at the Issues Impacting Millimeter-Waves in Consumer Devices Under the 5G Framework,» *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 8, nº 1, pp. 49-54, January 2019.
- [41] . H. Niu, H. Yin y G. Wu, «REMOTE RADIO UNIT (RRU) AND BASE BAND UNIT (BBU)». United States Patente US 9,112,758 B2, 18 Aug. 2015.
- [42] Y. Bo, CTTL-System y CAICT, «Equipment in the LTE Network,» *Academy of Information and Communications Technology*, p. 15, 2016.
- [43] F. Talebi, «An Introduction to I/Q Signals,» SkyRadar, 06 May 2020. [En línea]. Available: <https://www.skyradar.com/blog/an-introduction-to-i/q-signals>. [Último acceso: 10 Nov 2020].
- [44] UIT-R, «Identificación técnica de las señales digitales,» *Recomendación UIT-R SM.1600-2*, 2015.
- [45] ZTE CORPORATION, *ZXSDR R8978 TDD 8 Path Remote Radio Unit User Manual*, P.R.China, 2017.
- [46] G. . A. ESPINOZA JIMÉNEZ, «PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA RADIOBASE PARA LA TECNOLOGÍA DE LTE,» UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, Ciudad Universitaria, Cd. Mx, 2016.
- [47] D. B. Rawat y S. R. Reddy, «Software Defined Networking Architecture, Security and Energy Efficiency: A Survey,» *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, nº 1, pp. 325-346, Firstquarter 2017.
- [48] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker y J. Turner, «OpenFlow: Enabling innovation in campus networks,» *Computer Communication Review*, vol. 38, pp. 69-74, April 1, 2008.
- [49] W. Stallings, «Software-Defined Networks and OpenFlow,» *The Internet Protocol Journal*, vol. 16, nº 1, March 2013.
- [50] K. Dhamecha y B. Trivedi, «SDN Issues – A Survey,» *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. 73, nº 18, pp. 30-35, July 2013.
- [51] T. Pfeiffer, «Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures [Invited],» *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, nº 11, pp. B38-B45, November 2015.

- [52] S. Shin y H. J. Son, «Why WDM is essential in C-RAN fronthaul networks? - Ultra high CPRI link capacity,» NETMANIASTECH-BLOG, 12 March 2014. [En línea]. Available: <https://www.netmanias.com/en/post/blog/6237/c-ran-fronthaul-cpri-lte/why-wdm-is-essential-in-c-ran-fronthaul-networks-ultra-high-cpri-link-capacity>. [Último acceso: 25 Nov. 2020].
- [53] L. Li, M. Bi, H. Xin, Y. Zhang, Y. Fu, X. Miao, A. M. Mikaeil y W. Hu, «Enabling Flexible Link Capacity for eCPRI-Based Fronthaul With Load-Adaptive Quantization Resolution,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 102174-102185, 2019.
- [54] Z. Chen, F. Sohrabi y W. Yu, «Multi-Cell Sparse Activity Detection for Massive Random Access: Massive MIMO Versus Cooperative MIMO,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, nº 8, pp. 4060-4074, August 2019.
- [55] D. Brenner, «FCC vote will pave the path for 5G advancements to mobilize mmWave [UPDATED],» Qualcomm, 12 Jul. 2016. [En línea]. Available: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2016/07/12/upcoming-fcc-vote-will-pave-path-5g-advancements-mobilize-mmwave>. [Último acceso: 29 Oct. 2020].
- [56] H. Ji, C. Sun y W. Shieh, «Spectral Efficiency Comparison Between Analog and Digital RoF for Mobile Fronthaul Transmission Link,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, nº 20, pp. 5617-5623, October 2020.
- [57] NGOF, «5G-Oriented OTN Technology - White Paper,» *Next-Generation Optical transport network Forum*, 2018.03.
- [58] J. Wang, Z. Jia, L. A. Campos y C. Knittle, «Delta-Sigma Modulation for Next Generation Fronthaul Interface,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, nº 12, pp. 2838-2850, June 2019.
- [59] D. T. Kiet, T. M. Hieu, N. Q. Hung, N. V. Cuong, V. T. Van y P. N. Cuong, «Research and Implementation of eCPRI Processing Module for Fronthaul Network on FPGA in 5G – NR gNodeB Base Station,» *2020 4th International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications Computing (SigTelCom)*, pp. 1-5, August 2020.
- [60] S. T. Le, T. Drenski, A. Hills, M. King, K. Kim, Y. Matsui y T. Sizer, «400Gb/s Real-Time Transmission Supporting CPRI and eCPRI Traffic for Hybrid LTE-5G Networks,» *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pp. 1-3, March 2020.
- [61] J. Kim, M. Sung, S. Cho, Y. Won, B. Lim, S. Pyun, J. K. Lee y J. H. Lee, «OTA Enabled 147.4 Gb/s eCPRI-Equivalent-Rate Radio-Over-Fiber Link Cooperating with mmWave-Based Korea Telecom 5G Mobile Network for Distributed Antenna System,» *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pp. 1-3, March 2019.

- [62] X. Liang, Y. Dai, F. Yin, X. Liang, J. Li y K. Xu, «Digital suppression of both cross and inter-modulation distortion in multi-carrier RF photonic link with down-conversion,» *Optics Express*, vol. 22, nº 23, pp. 28247-28255, 2014/11/17.
- [63] G. Giannoulis, N. Moraitis, N. Argyris, S. Dris, C. Lessi, S. Perdikouris, L. Kostikidou, D. Apostolopoulos, C. Spatharakis, I. Papafili, G. Agapiou, A. D. Panagopoulos y H. Avramopoulos, «Field-trial demonstration of an extended-reach GPON-supporting 60-GHz indoor wireless access,» *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications X*, vol. 10103, p. 101030M, 2017/02/24.
- [64] G. Giannoulis, N. Argyris, N. Iliadis, G. Pouloupoulos, K. Kanta, D. Apostolopoulos y H. Avramopoulos, «Analog Radio-over-Fiber Solutions for 5G Communications in the Beyond-CPRI Era,» *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-5, July 2018.
- [65] G. Serafino, F. Scotti, D. Onori, F. Falconi, F. Amato, P. Ghelfi y A. Bogoni, «Photonics for mmW signal generation,» *2018 19th International Radar Symposium (IRS)*, pp. 1-8, June 2018.
- [66] X. Li, J. Yu y G.-K. Chang, «Photonics-Aided Millimeter-Wave Technologies for Extreme Mobile Broadband Communications in 5G,» *Conference Name: Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, nº 2, pp. 366-378, January 2020.
- [67] M. S. B. Cunha, E. S. Lima, N. Andriolli, D. H. Spadoti, G. Contestabile y A. Cerqueira, «5G NR RoF System Based on a Monolithically Integrated Multi-Wavelength Transmitter,» *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 27, nº 2, pp. 1-8, March 2021.
- [68] J. M. Galve, I. Gasulla, S. Sales y J. Capmany, «Reconfigurable Radio Access Networks Using Multicore Fibers,» *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 52, nº 1, pp. 1-7, January 2016.
- [69] M. Sung, S.-H. Cho, J. Kim, J. K. Lee, J. H. Lee y H. S. Chung, «Demonstration of IFoF-Based Mobile Fronthaul in 5G Prototype With 28-GHz Millimeter wave,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, nº 2, pp. 601-609, January 2018.
- [70] J. Bohata, M. Komanec, J. Spáčil, Z. Ghassemlooy, S. Zvánovec y R. Slavík, «24–26 GHz radio-over-fiber and free-space optics for fifth-generation systems,» *Optics Letters*, vol. 43, nº 5, pp. 1035-1038, 2018/03/01.
- [71] I. Mesogiti, E. Theodoropoulou, K. Filis, G. Lyberopoulos, A. Ropodi, K. Tsagkaris, P. Demestichas, N. Pleros, G. Kalfas y C. Vagionas, «Fiber-Wireless Fronthaul/Backhaul Network Architectures for 5G,» *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pp. 1-5, Sep. 2018.
- [72] N. Argyris, G. Giannoulis, K. Kanta, N. Iliadis, C. Vagionas, S. Papaioannou, G. Kalfas, D. Apostolopoulos, C. Caillaud, H. Debrégeas, N. Pleros y H. Avramopoulos, «A 5G mmWave

Fiber-Wireless IFoF Analog Mobile Fronthaul Link With up to 24-Gb/s Multiband Wireless Capacity,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, nº 12, June 2019.

- [73] B. G. Kim, S. H. Bae, M. S. Kim y Y. C. Chung, «Reflection-Tolerant RoF-Based Mobile Fronthaul Network for 5G Wireless Systems,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, nº 24, December 2019.
- [74] E. Moutaly, P. Assimakopoulos, S. Noor, S. Faci, A.-L. Billabert, N. J. Gomes, M. L. Diakit , C. Browning y C. Algani, «Phase Modulated Radio-Over-Fiber for Efficient 5G Fronthaul Uplink,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, nº 23, pp. 5821-5832, December 2019.
- [75] S. Rommel, D. Perez-Galacho, J. M. Fabrega, R. Muñoz, S. Sales y I. Tafur Monroy, «High-Capacity 5G Fronthaul Networks Based on Optical Space Division Multiplexing,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 65, nº 2, pp. 434-443, June 2019.
- [76] C. Vázquez, J. D. López-Cardona, D. S. Montero, I. Pérez, P. C. Lallana y F. M. A. Al-Zubaidi, «Power over Fiber in Radio over Fiber Systems in 5G Scenarios,» *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-4, July 2019.
- [77] M. Morant y R. Llorente, «Performance analysis of multiple radio-access provision in a multicore-fibre optical fronthaul,» *Optics Communications*, vol. 436, pp. 161-167, April 1, 2019.
- [78] M. Sung, J. Kim, E.-S. Kim, S.-H. Cho, Y.-J. Won, B.-C. Lim, S.-Y. Pyun, H. Lee, J. K. Lee y J. H. Lee, «RoF-Based Radio Access Network for 5G Mobile Communication Systems in 28 GHz Millimeter-Wave,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, nº 2, pp. 409-420, January 2020.
- [79] Y. Li, Y.-W. Chen, W. Zhou, X. Tang, J. Shi, L. Zhao, J. Yu y G.-K. Chang, «D-Band mm-Wave SSB Vector Signal Generation Based on Cascaded Intensity Modulators,» *Conference Name: IEEE Photonics Journal*, vol. 12, nº 2, pp. 1-11, April 2020.
- [80] S. Yao, Y.-W. Chen, S.-J. Su, Y. Alfadhli, S. Shen, R. Zhang, Q. Zhou y G.-K. Chang, «Non-Orthogonal Uplink Services Through Co-Transport of D-RoF/A-RoF in Mobile Fronthaul,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, nº 14, pp. 3637-3643, July 2020.
- [81] W. Zhou, L. Zhao, J. Zhang, K. Wang, J. Yu, Y.-W. Chen, S. Shen, R.-K. Shiu y G.-K. Chang, «135-GHz D-Band 60-Gbps PAM-8 Wireless Transmission Employing a Joint DNN Equalizer With BP and CMMA,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, nº 14, pp. 3592-3601, July 2020.
- [82] L. A. M. Pereira, C. H. S. Lopes, R. M. Borges, E. S. Lima, A. C. Ferreira, M. Abreu, L. L. Mendes y A. Cerqueira S., «Implementation of a multiband 5G NR fiber-wireless system using analog radio over fiber technology,» *Optics Communications*, vol. 474, p. 126112, November 1, 2020.

- [83] A. O. Mufutau, F. P. Guiomar, M. A. Fernandes, A. Lorences-Riesgo, A. Oliveira y P. P. Monteiro, «Demonstration of a hybrid optical fiber–wireless 5G fronthaul coexisting with end-to-end 4G networks,» *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, nº 3, pp. 72-78, March 2020.
- [84] A. Checko, H. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. Berger y L. Dittmann, «Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview,» *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 17, pp. 405-426, January 1, 2015.
- [85] V. Ha, L. Le y D. Đào, «Coordinated Multipoint (CoMP) Transmission Design for Cloud-RANs with Limited Fronthaul Capacity Constraints,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, January 1, 2015.
- [86] CPRI, «Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification,» *CPRI Specification V7.0 (2015-10-09)*, Oct. 2015.
- [87] OBSAI, «Reference Point 1 Specification,» *OBSAI*, 2006.
- [88] ETSI, «Open Radio equipment Interface (ORI); ORI Interface Specification,» *ETSI GS ORI 002-2 V4.1.1 (2014-10)*, Oct. 2014.
- [89] A. de la Oliva, J. A. Hernandez, D. Larrabeiti y A. Azcorra, «An overview of the CPRI specification and its application to C-RAN-based LTE scenarios,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, nº 2, pp. 152-159, February 2016.
- [90] J.-S. Tassé, «Overcoming Network Failures in C-RAN for 5G-Readiness,» EXFO, 31 Mar. 2017. [En línea]. Available: <https://www.exfo.com/fr/ressources/blog/overcoming-network-failures-in-c-ran-for-5g-readiness/>. [Último acceso: 19 Oct. 2020].
- [91] S. Shin y J. S. Harrison, «CPRI (1): Emergence of C-RAN/Fronthaul and CPRI overview,» *Netmanias*, 04 March 2014. [En línea]. Available: <https://www.netmanias.com/en/post/blog/6220/c-ran-fronthaul-cpri-lte-lte-a/cpri-1-emergence-of-c-ran-fronthaul-and-cpri-overview>. [Último acceso: 25 Nov. 2020].
- [92] JDS Uniphase Corporation, «Radio Frequency Analysis at Fiber-Based Cell Sites,» *White Paper*, Dec. 2014.
- [93] L. Valcarenghi, K. Kondepu y P. Castoldi, «Time- Versus Size-Based CPRI in Ethernet Encapsulation for Next Generation Reconfigurable Fronthaul,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, nº 9, pp. D64-D73, 2017/09/01.
- [94] E. A. Khalaf Alvarez, «Acceso radio en LTE,» de *Recepción de señal LTE mediante técnicas de radio*, CANTABRIA, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, Oct. 2016, pp. 9-18.
- [95] TEXAS INSTRUMENT, «CPRI Protocol,» 25 Aug. 2009. [En línea]. Available: https://processors.wiki.ti.com/index.php/CPRI_Protocol. [Último acceso: 2020 Nov. 25].

- [96] Universidad Politécnica de Madrid, «Conceptos Fundamentales de Comunicaciones Ópticas,» *Departamento de Tecnología Fotónica y Bioingeniería*, 2006.
- [97] INCOM, «Historia de las Comunicaciones Ópticas,» INCOM Blog, 2020. [En línea]. Available: <https://blog.incom.mx/entrada/Historia-de-las-Comunicaciones-%C3%93pticas-/23>. [Último acceso: 16 Dic. 2020].
- [98] J. R. Sendra Sendra, «Características de transmisión de fibras ópticas,» de *Apuntes de Comunicaciones Ópticas I*, Especialidad Sistemas Electrónicos, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, Oct. 1999, pp. 25-42.
- [99] R. Montañana, «Curso de Redes. 2.4.5 Cables de fibra óptica. Atenuación, ventanas y bandas,» Aula Click, 18 Jun 2018. [En línea]. Available: https://www.aulaclip.es/redes/secuencias/p02_04_05_atenuacion_yt.htm. [Último acceso: 20 Dic. 2020].
- [100] FS Community, «CWDM - Cost-Effective Alternative to Expand Network Capacity,» 18 Jun. 2014. [En línea]. Available: <https://community.fs.com/blog/cwdm-cost-effective-alternative-to-expand-network-capacity.html>. [Último acceso: 18 Dic. 2020].
- [101] ITU-T, «Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,» *ITU-T Recommendation G.694.1*, Feb. 2012.
- [102] Y. Li, F. Zhang y Casellas Ramón, «Flexible Grid Label Format in Wavelength Switched Optical Network,» 2014.
- [103] Foss AS Fiberoptisk Systemsalg, «Splitter, 1:2, 10/90, 9/125/900, LC/PC,» [En línea]. Available: <https://www.fossfiberoptics.com/splitter-1-2-10-90-9-125-900-lc-pc>. [Último acceso: 26 01 2021].
- [104] Teleweaver Technologies, «What is the Common Optical Attenuator Types,» 18 Apr 2018. [En línea]. Available: <http://fibrefiber.com/tutorial/optical-attenuator-types/>. [Último acceso: 26 01 2021].
- [105] Thorlabs, Inc., «Isolator Tutorial,» [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/tutorials.cfm?tabID=1B9018F1-1C6F-47AD-A194-F30639F7A6C5>. [Último acceso: 26 01 2021].
- [106] C. J. Firby, P. Chang, A. S. Helmy y A. Y. Elezzabi, «Versatile broadband polarization-independent optical circulators for nanophotonic integrated circuits,» *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 35, nº 7, pp. 1504-1513, 2018/07/01.
- [107] R. Mehra, H. Shahani y A. Khan, «Mach Zehnder Interferometer and its Applications,» *International Journal of Computer Applications*, pp. 31-36, 2014.

- [108] Edmund optics worldwide, «Optical Filters,» [En línea]. Available: <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/optics/optical-filters/>. [Último acceso: 18 Dic. 2020].
- [109] hitech, «NORIA – the Fiber Bragg Grating manufacturing solution,» [En línea]. Available: <https://hittech.com/en/portfolio-posts/noria-the-fiber-bragg-grating-manufacturing-solution/>. [Último acceso: 19 Dic. 2020].
- [110] Z. Shi y R. W. Boyd, «Fundamental limits to slow-light arrayed-waveguide-grating spectrometers,» *Optics Express*, vol. 21, nº 6, p. 7793, 2013-03-25.
- [111] GET Engineering, «Rugged Wavelength Division Multiplexer (WDM),» GET Engineering Corp., [En línea]. Available: <https://gethio.com/product-wdm>. [Último acceso: 21 Dic. 2020].
- [112] PacketLight Networks, «ROADM Network,» [En línea]. Available: <https://www.packetlight.com/applications/roadm>. [Último acceso: 21 Dic. 2020].
- [113] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, «Recommendation ITU-T G.652,» *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS*, Nov. 2016.
- [114] Fiber Cabling Solution, «EDFA Selection Guide,» 19 Jun. 2015. [En línea]. Available: <http://www.fiber-optic-cable-sale.com/edfa-selection-guide.html>. [Último acceso: 14 Enero 2021].
- [115] H. Fevrier, «Xtera demonstrates 40 Terabit using Raman amplification,» *Gazettabyte*, 5 Feb. 2014. [En línea]. Available: <http://www.gazettabyte.com/home/2014/2/5/xtera-demonstrates-40-terabit-using-raman-amplification.html>. [Último acceso: 14 Enero 2021].
- [116] M. Kong, K. Wang, J. Ding, J. Zhang, W. Li, J. Shi, F. Wang, L. Zhao, C. Liu, Y. Wang, W. Zhou y J. Yu, «640-Gbps/Carrier WDM Transmission over 6,400 km Based on PS-16QAM at 106 Gbaud Employing Advanced DSP,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, nº 1, pp. 55-63, January 2021.
- [117] A. Zhao, N. Jiang, S. Liu, Y. Zhang y K. Qiu, «Physical Layer Encryption for WDM Optical Communication Systems Using Private Chaotic Phase Scrambling,» *Journal of Lightwave Technology*, pp. 1-1, 2021.
- [118] T.-H. Yen y Y.-J. Hung, «Fabrication-Tolerant CWDM (de)Multiplexer Based on Cascaded Mach-Zehnder Interferometers on Silicon-on-Insulator,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, nº 1, pp. 146-153, January 2021.
- [119] V. Corso, E. M. Bastida, M. L. Rocha, E. Mobilon, L. Pezzolo, M. F. F. Oliveira, C. L. Monteiro, M. R. Horiuchi y A. Coral, «Optoelectronic transponder hybrid circuit for 10 Gb/s applications: design, implementation and experimental characterization,» *Proceedings of*

the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2003. (Cat. No.03TH8678), vol. 3, pp. 7-P11, Sep. 2003.

- [120] «Chapter 18 - Emerging Technology for Fiber Optic Data Communication,» de *Handbook of Fiber Optic Data Communication (Fourth Edition)*, Oxford, Academic Press, January 1, 2013, pp. 447-467.
- [121] INPHENIX, «The Enhanced Functionalities of Semiconductor Optical Amplifier and their role in Advanced Optical Networking,» 250 N. Mines Road, Livermore, CA 94551, USA, InPhenix, Inc., June, 2010.
- [122] Moris, «OEO Media Converter in WDM System,» FS Community, 4 May 2015. [En línea]. Available: <https://community.fs.com/blog/the-introduction-of-transponder-based-dwdm-system.html>. [Último acceso: 6 Mar 2021].
- [123] National Instruments, «X300/X310,» Ettus Research, 14 Apr 2021. [En línea]. Available: <https://kb.ettus.com/X300/X310>. [Último acceso: 22 Jul 2021].
- [124] SundayGeek, «Introducción a srsLTE,» programador clic, 30 Aug 2018. [En línea]. Available: <https://programmerclick.com/article/6397382073/>. [Último acceso: 24 Jul 2021].
- [125] B. NOSRATIEH, «Characterize lasers for DWDM transmission,» ElectronicsDesignNetwork, 1 Jan 2001. [En línea]. Available: <https://www.edn.com/characterize-lasers-for-dwdm-transmission/>. [Último acceso: 25 Sep 2021].
- [126] B. Moeyersoon, G. Morthier y M. Zhao, «Degradation of the mode suppression in single-mode laser diodes due to integrated optical amplifiers,» *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 40, nº 3, pp. 241-244, March 2004.
- [127] mathscinotes, «Converting Spectral Width to Sigma,» Magic Number Analysis, 12 Oct 2010. [En línea]. Available: <https://www.mathscinotes.com/2010/10/magic-number-analysis-converting-side-mode-suppression-ratio-to-sigma/>. [Último acceso: 25 Sep 2021].
- [128] «What is OSNR-Optical Signal to Noise Ratio,» RF Wireless World, 2012. [En línea]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/What-is-OSNR.html>. [Último acceso: 27 Sep 2021].
- [129] J.-S. Tassé, «What should the OSNR values be in DWDM networks?,» EXFO, 06 Dec 2012. [En línea]. Available: <https://www.exfo.com/en/resources/blog/osnr-values-dwdm-networks/>. [Último acceso: 03 Nov 2021].
- [130] G. Nava-Heredia, S. M. Castro-Resines, A. Fernández-Alcántara y R. Gutiérrez-Castrejón, «Design and feasibility analysis of the physical layer for the academic WDM ring of Mexico City,» *2009 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, pp. 1-6, 2009-01.

- [131] V. Vukelić, «POKRETNE MREŽE PETE GENERACIJE – PREGLED,» *Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera*, 2016.
- [132] Z. Qingling y J. Li, «Rain Attenuation in Millimeter Wave Ranges,» *2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation EM Theory*, pp. 1-4, October 2006.
- [133] R. Gavrić, D. Ilišević, N. B. Čurguz y đ. Budimir, «Comparison of basic characteristics of 4G/LTE and 5G NR technology,» *2019 27th Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 1-4, November 2019.
- [134] S. Singh, R. Mudumbai y U. Madhow, «Interference Analysis for Highly Directional 60-GHz Mesh Networks: The Case for Rethinking Medium Access Control,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19, n° 5, pp. 1513-1527, October 2011.
- [135] Metaswitch Networks, «What is 5G beamforming, beam steering and beam switching with massive MIMO,» Metaswitch Networks, 2020. [En línea]. Available: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-beamforming-beam-steering-and-beam-switching-with-massive-mimo>. [Último acceso: 28 Oct. 2020].
- [136] A. Morsali, S. Norouzi y B. Champagne, «Single RF Chain Hybrid Analog/Digital Beamforming for Mmwave Massive-mimo,» *2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, pp. 1-5, November 2019.
- [137] G. L. Agredo-Méndez, P. E. Jojoa-Gómez y V. Almenar-Terré, «Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica,» *Ingeniería y Tecnología Unilibre Cali*, vol. 2, n° 2, 2015.
- [138] MathWorks, «What Is Massive MIMO?,» The MathWorks, Inc., 2020. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/discovery/massive-mimo.html>. [Último acceso: 1 Nov. 2020].
- [139] B. J. R. Sahu, S. Dash, N. Saxena y A. Roy, «Energy-Efficient BBU Allocation for Green C-RAN,» *IEEE Communications Letters*, vol. 21, n° 7, pp. 1637-1640, July 2017.
- [140] W. Commons, «Optical Cross Connect,» 17 Oct 2020. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optical_Cross_Connect,_OXC.png. [Último acceso: 21 Dic. 2020].
- [141] F. V. España, «LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles,» España, 2010.
- [142] «Introducción a srsLTE,» [En línea]. Available: <https://programmerclick.com/article/6397382073/>. [Último acceso: 07 2021].
- [143] Vitex, LLC., «OSNR in Fiber Optic Communications,» [En línea]. Available: <https://vitextech.com/osnr-meaning/>. [Último acceso: 27 Sep 2021].