



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

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE PERTURBACIONES EXTERNAS SOBRE UN
FRONTHAUL DE FIBRA ÓPTICA WDM ACTIVO Y PASIVO UTILIZADO EN UN
SISTEMA C-RAN 4.5G/5G

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

PRESENTA:
ING. MAURICIO GUARNEROS LOZANO

TUTOR PRINCIPAL
DR. DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA
INSTITUTO DE INGENIERÍA,
UNAM

Ciudad Universitaria, CDMX México. Marzo 2023.



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. Oleksandr Martynyuk
Secretario: Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón
Vocal: Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique
1er Suplente: Dr. Javier Gómez Castellanos
2do Suplente: Dr. Sergiy Khotyaintsev

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO.

TUTOR DE TESIS:

DR. DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA

FIRMA

RESUMEN

El presente trabajo de tesis aborda el análisis de los efectos de perturbaciones externas sobre un fronthaul de fibra óptica DWDM utilizado en un sistema C-RAN 4G/5G en configuración activa y pasiva y empleando multiplexación en longitud de onda (DWDM), y usando un enlace de fibra óptica monomodo dúplex de 21.7 km de longitud. Primero se analizan las características especiales de la fibra óptica monomodo, usando para ello dos equipos de medición de pérdidas ópticas en el fronthaul. Dichos equipos son un medidor de potencia y un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR). Posteriormente se analiza el impacto de las perturbaciones externas en la transmisión de señales digitales a través del fronthaul empleando un analizador BER-Tester. Dicho equipo permite medir la calidad de comunicación digital Ethernet transmitido en el fronthaul óptico a nivel capa 1 a través de mediciones del Bit Error Rate (BER), y en capa 2 a través de mediciones de jitter, latencia, y pérdidas de tramas de las señales ethernet transmitidas, empleando tasas de transmisión de 100Mb/s y 10Gb/s. En general, no hay suficientes antecedentes en literatura que analicen a detalle los efectos de las diferentes pérdidas ópticas causadas por perturbaciones externas en la degradación de las señales ópticas transmitidas en un fronthaul activo y pasivo DWDM, por lo que con la presente investigación se podrá determinar cuál es la configuración de fronthaul óptico más sensible a perturbaciones externas.

Las perturbaciones externas consideradas en la investigación consisten de vibraciones y curvaturas sobre el enlace de fibra óptica. En particular, para este proyecto se utiliza el fronthaul de fibra óptica con tecnología de multiplexado denso por división de longitud de onda (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) de un sistema 4G/5G con radio-acceso centralizado (C-RAN: Centralized Radio Access Network) instalado en CU, y se analizará en forma sistemática cómo las pérdidas causadas por estas perturbaciones externas afectan la comunicación digital a través de este fronthaul.

En particular, el presente trabajo de tesis se basa en parte en la participación que se tuvo en un proyecto del Instituto de Ingeniería en colaboración con la Facultad de Ingeniería y patrocinado por el gobierno de la Ciudad de México titulado: "Desarrollo de infraestructura para la implementación de una red celular 5G utilizando un fronthaul basado en DWDM y fibra óptica", con número de convenio SECTEI/200/2019, obteniendo como resultado una publicación titulada: "Análisis de un fronthaul óptico activo y pasivo con DWDM para arquitecturas C-RAN 4G/5G" en la revista indizada en JCR Optical Engineering. Dicha publicación se anexa al final del escrito y también se puede descargar a través del siguiente link: <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.10.108103>.

La estructura de la tesis se presenta en un documento en cinco capítulos en el siguiente orden. El **capítulo 1** describe los diferentes tipos de redes de fibras ópticas empleadas en el área de Telecomunicaciones y como estas se pueden usar en redes C-RAN 4G/5G. En particular, una tasa de transmisión de 100Mb/s se emplea en redes C-RAN 4G y una tasa de transmisión de 10Gb/s se emplea en redes C-RAN 5G. Por último, se describen los equipos de medición para analizar un fronthaul de fibra óptica en sistemas C-RAN 4G/5G como el instalado en CU.

El **capítulo 2** comprende la caracterización de la arquitectura del fronthaul óptico de fibra óptica sin perturbaciones. Para ello se usan dos equipos en la medición de pérdidas ópticas en el fronthaul. Dichos equipos son un Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR, por sus siglas en inglés) y un medidor de potencia.

En el **capítulo 3** se aplican perturbaciones controladas sobre el fronthaul de fibra óptica por medio de vibraciones a frecuencias desde 0.5Hz a 100Hz, típicamente encontradas en eventos sísmicos y vibración de motores. Además, se aplican curvaturas controladas con diferentes diámetros y diferente número de vueltas sobre la fibra que corresponden a perturbaciones externas que pueden encontrarse típicamente durante la instalación y despliegue de enlaces de fibra óptica.

El **capítulo 4** se aborda el impacto de las perturbaciones externas en la transmisión de señales digitales a través del fronthaul empleando un analizador BER-Tester. Dicho equipo permite medir la calidad de comunicación digital Ethernet transmitido en el fronthaul óptico a nivel capa 1 y capa 2. En particular, en capa 1 se mide el Bit Error Rate (BER), y en capa 2 se mide el jitter, latencia, y pérdidas de tramas de las señales Ethernet transmitidas en el fronthaul con y sin perturbaciones. Dicho análisis se realizará empleando tasas de transmisión de 100Mb/s y 10Gb/s como las empleadas en las redes DWDM C-RAN 4G y 5G. Por último, se realiza un análisis comparativo y discusión de resultados.

Finalmente, **el capítulo 5** se presentan las conclusiones y se describen recomendaciones para la correcta operación de un fronthaul óptico en una red CRAN 4G/5G.

OBJETIVOS

General

- Analizar las pérdidas ópticas que presenta un fronthaul de fibra óptica ante perturbaciones externas como vibraciones y curvaturas, y estudiar los efectos de estas pérdidas en los parámetros de Bit Error Rate (BER), Latencia, Jitter, y Pérdidas de tramas de las señales digitales Ethernet transmitidas a través de dicho fronthaul óptico empleando para ello diferentes tasas de transmisión como 100Mb/s y 10Gb/s. En particular, se utilizará el fronthaul de fibra óptica DWDM de 21.7km de longitud, con configuración activa y pasiva, de un sistema de radio acceso centralizado C-RAN 4G/5G que se encuentra instalado en el laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Particulares

- Estudiar el funcionamiento de un fronthaul óptico DWDM con configuración activa y pasiva.
- Caracterizar las componentes requeridas para montar un fronthaul óptico DWDM. Dicha caracterización incluye la medición de longitudes de onda de emisión de los láseres empleados en cada canal DWDM.
- Verificar la transmisión de canales DWDM a través del fronthaul óptico y analizar las pérdidas que presentan experimentalmente los canales ópticos WDM en un escenario de transmisión donde el fronthaul no presenta perturbaciones externas.
- Ejercer perturbaciones externas controladas sobre el fronthaul óptico, originadas por vibraciones y curvaturas, y analizar las pérdidas que presentan los canales ópticos DWDM ante estas perturbaciones externas ejercidas sobre el fronthaul.
- Analizar el efecto de las pérdidas causadas por las perturbaciones externas en la degradación de los canales DWDM transmitidos en el fronthaul óptico a través del monitoreo de los siguientes parámetros de comunicación digital Ethernet: Bit Error Rate, Jitter, Latencia y Pérdidas de tramas empleando diferentes tasas de transmisión del orden de 100Mb/s y 10Gb/s como las usadas en redes C-RAN 4G y 5G respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Isabel y Oscar que son un ejemplo para mí en la vida y por todo lo que me han dado, amor, valores, consejos y motivación incondicional. Los amo mucho y me han apoyado en todo momento y les agradezco lo que han hecho por mí y este logro es de ustedes.

Al gobierno de la Ciudad de México que a través del patrocinio del proyecto SECTEI/200/2019 se pudo llevar a cabo la realización del trabajo descrito en este escrito, así como también al proyecto PAPIIT IN104720 patrocinado por la DGAPA-UNAM por los equipos de caracterización empleados en esta investigación.

Al CONACYT por otorgar el apoyo económico durante los meses establecidos que compendian el periodo de estudio de este posgrado.

Agradezco a la UNAM, al Posgrado de Ingeniería por brindarme las bases de estudio y posibilidad de acceder a esta oportunidad de crecimiento y desarrollo profesional y al Instituto de Ingeniería de la UNAM por brindar el total apoyo con el uso de las instalaciones para el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	12
1.1	SISTEMAS DE COMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA	14
1.1.1	<i>Tipos fibra óptica</i>	14
1.1.2	<i>Clasificación de redes de fibra óptica</i>	16
1.2	COMPONENTES USADOS EN REDES ÓPTICAS	17
1.2.1	<i>Tecnología WDM</i>	17
1.2.2	<i>Transceptores ópticos</i>	18
1.2.3	<i>Transpondedores ópticos</i>	21
1.2.4	<i>Tipos de conectores empleados y su limpieza</i>	22
1.3	TRANSMISIÓN DE DATOS ETHERNET EN FIBRA ÓPTICA	25
1.4	EQUIPOS DE MEDICIÓN PARA ANALIZAR LA CALIDAD DE TRANSMISIÓN DE DATOS EN CAPA 1 Y CAPA 2	27
1.4.1	<i>Medidor de Potencia Óptica</i>	27
1.4.2	<i>Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR)</i>	28
1.4.3	<i>Analizador de Espectros Óptico (OSA)</i>	30
1.4.4	<i>Analizador de tasa de bits erróneos (BER Tester)</i>	31
1.5	FRONTHAUL DE FIBRA ÓPTICA EN SISTEMAS CRAN 4G/5G	33
1.5.1	<i>Estado del Arte.</i>	33
1.5.2	<i>Arquitectura de la red 4G/5G con C-RAN</i>	34
1.5.3	<i>Fronthaul óptico pasivo y activo</i>	38
2	CARACTERIZACIÓN DEL FRONTHAUL DE FIBRA ÓPTICA	40
2.1	ARQUITECTURA DEL FRONTHAUL ÓPTICO	40
2.1.1	<i>Configuración Activa</i>	47
2.1.2	<i>Configuración Pasiva</i>	51
2.2	PÉRDIDAS ÓPTICAS DEL FRONTHAUL OBTENIDAS CON OTDR Y POWER METER	55
3	PERTURBACIONES CONTROLADAS SOBRE EL FRONTHAUL	61
3.1	DISEÑO PARA APLICAR PERTURBACIONES	61
3.1.1	<i>Vibraciones sobre conectores mecánicos y secciones de fibra con curvaturas</i>	62
3.1.2	<i>Curvaturas sobre la fibra</i>	65
4	IMPACTO DE LAS PERTURBACIONES EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS	69
4.1	MEDICIONES DE LA TASA DE BITS ERRÓNEOS (BER) EN CAPA 1	69
4.2	MEDICIONES DE LATENCIA, JITTER Y PÉRDIDAS DE TRAMAS EN CAPA 2	76
5	CONCLUSIONES	82
6	BIBLIOGRAFÍA	84

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. DIAGRAMA DE UN SISTEMA C-RAN CON FRONTHAUL DE FIBRA ÓPTICA CON PERTURBACIONES EXTERNAS .	12
FIGURA 1.2. EJEMPLO DE SISTEMA GENÉRICO DE COMUNICACIÓN ÓPTICA.	14
FIGURA 1.3. LA ESTRUCTURA DE UNA FIBRA.	15
FIGURA 1.4. TECNOLOGIA WDM CON SUS DOS VARIANTES DWDM Y CWDM.	17
FIGURA 1.5. ESQUEMA DE UN SISTEMA DWDM BIDIRECCIONAL USADO EN UN FRONTHAUL ÓPTICO DE UNA RED C-RAN.	18
FIGURA 1.6. EJEMPLO DE TRANSCPTOR SFP+ UTILIZADO EN REDES ÓPTICAS DE 10Gb/s.	18
FIGURA 1.7. TODOS LOS TIPOS DE SFP+ COLOREADOS DWDM QUE SE UTILIZARON EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL FRONTHAUL.	19
FIGURA 1.8. SFP+ GRISES QUE OPERAN A 1310 NM QUE SE UTILIZARON EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL FRONTHAUL.	20
FIGURA 1.9. VISTA DE UN EQUIPO TRANSPONDEDOR MODELO PL1000TE.	21
FIGURA 1.10. TIPOS DE CONECTORES ÓPTICOS EN USO, ST, SC, FC Y LC.	22
FIGURA 1.11. TIPO DE PULIDO EN UNA FÉRULA CONECTOR.	23
FIGURA 1.12. TIPOS DE ACOPLADORES ÓPTICOS EN USO, ST-ST, LC-LC, FC-FC Y FC-SC.	24
FIGURA 1.13. FORMATO DE ESTRUCTURA DE TRAMA PARA EL ESTÁNDAR ETHERNET.	26
FIGURA 1.14. MEDIDOR DE POTENCIA MARCA EXFO FPM-300.	28
FIGURA 1.15. OTDR SERIE RTU-720 MARCA EXFO.	28
FIGURA 1.16. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LAS REFLEXIONES OCURRIDAS EN UN OTDR.	29
FIGURA 1.17. EJEMPLO DE UNA TRAZA TÍPICA DEL OTDR CON MUCHOS EVENTOS DE REFLEXIÓN.	29
FIGURA 1.18. ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO (OSA) SERIE MS9740A MARCA ANRITSU.	31
FIGURA 1.19. T-BERD/ MTS-5800 MARCA VIAVI.	32
FIGURA 1.20. ARQUITECTURA DE RED 4G TRADICIONAL.	35
FIGURA 1.21. ARQUITECTURA DE C-RAN CON FRONTHAUL DE RED 4G Y 5G.	37
FIGURA 1.22. ARQUITECTURA DEL FRONTHAUL EN CONFIGURACIÓN ACTIVA.	38
FIGURA 1.23. ARQUITECTURA DEL FRONTHAUL EN CONFIGURACIÓN PASIVA.	39
FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE UN SISTEMA C-RAN CON FRONTHAUL DE FIBRA ÓPTICA.	41
FIGURA 2.2. EVOLUCIÓN DE BBU 4G DE NODO ÚNICO A ARQUITECTURA CU/DU SEPARADA EN 5G.	42
FIGURA 2.3. ARQUITECTURA DEL TENDIDO DE FIBRA ÓPTICA PARA ENLAZAR LA FI Y EL IINGEN.	43
FIGURA 2.4. RACKS INSTALADOS Y EMPALMES REALIZADOS EN LA DEL IINGEN PARA EL FRONTHAUL ÓPTICO.	43
FIGURA 2.5. ARQUITECTURA DEL ENLACE DE FIBRA FORMADO POR EL CONJUNTO 1 DE 3.3 KM.	44
FIGURA 2.6. ARQUITECTURA DEL ENLACE DE FIBRA FORMADO POR EL CONJUNTO 2 DE 10 KM.	45
FIGURA 2.7. ARQUITECTURA DEL ENLACE DE FIBRA FORMADO POR EL CONJUNTO 3 DE 8.4 KM.	45
FIGURA 2.8. ARQUITECTURA DEL FRONTHAUL ÓPTICO ACTIVO PARA 21 KM.	46
FIGURA 2.9. ARQUITECTURA DEL FRONTHAUL ÓPTICO PASIVO PARA 21 KM	46
FIGURA 2.10. MEDICIÓN DEL ESPECTRO DE CANALES WDM AL INICIO Y AL FINAL DEL FRONTHAUL ACTIVO CON EL OSA.	47
FIGURA 2.11. ESPECTRO DEL SFP+ DWDM CORRESPONDIENTE AL CANAL 28.	48
FIGURA 2.12. ESPECTRO DEL SFP+ DWDM CORRESPONDIENTE AL CANAL 30.	49
FIGURA 2.13. ESPECTRO DEL SFP+ DWDM CORRESPONDIENTE AL CANAL 32.	50
FIGURA 2.14. ESPECTRO DEL SFP+ DWDM CORRESPONDIENTE AL CANAL 34.	50
FIGURA 2.15. MEDICIÓN DEL ESPECTRO DE CANALES WDM ANTES Y DESPUÉS DEL FRONTHAUL PASIVO CON EL OSA.	52
FIGURA 2.16. ESPECTRO DEL SFP+ DWDM CORRESPONDIENTE AL CANAL CH29.	53
FIGURA 2.17. ESPECTRO DEL SFP+ DWDM CORRESPONDIENTE AL CANAL CH31.	53
FIGURA 2.18. ESPECTRO DEL SFP+ DWDM CORRESPONDIENTE AL CANAL CH33.	54
FIGURA 2.19. ESPECTRO DEL SFP+ DWDM CORRESPONDIENTE AL CANAL CH35.	54
FIGURA 2.20. MEDICIÓN DE PERDIDAS ÓPTICAS CON OTDR EN EL SITIO B SIN CONSIDERAR LAS MUX/DEMUX.	55
FIGURA 2.21. TRAZA OTDR DEL ENLACE DE 21 KM EN SENTIDO UPSTREAM DESDE EL SITIO B.	56
FIGURA 2.22. TRAZA OTDR DEL ENLACE DE 21 KM EN SENTIDO DOWNSTREAM DESDE EL SITIO B	56
FIGURA 2.23. PÉRDIDAS ÓPTICAS DEL ENLACE DE 21KM EN SENTIDO UPSTREAM DESDE EL SITIO B.	57

FIGURA 2.24. PÉRDIDAS ÓPTICAS DEL ENLACE DE 21KM EN SENTIDO DOWNSTREAM DESDE EL SITIO B.	57
FIGURA 2.25. MEDICIÓN DEL ESPECTRO DE CANALES WDM ANTES Y DESPUÉS DEL FRONTHAUL ACTIVO CON EL POWER METER.	59
FIGURA 2.26. MEDICIÓN DEL ESPECTRO DE CANALES WDM ANTES Y DESPUÉS DEL FRONTHAUL PASIVO CON EL POWER METER.	59
FIGURA 3.1. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DE PERTURBACIONES EN FRONTHAUL DE 21KM.	61
FIGURA 3.2. DIAGRAMA DE EJEMPLO PARA APLICAR VIBRACIONES AL FRONTHAUL ÓPTICO DE 21 KM SOBRE UN CONECTOR MECÁNICO.	62
FIGURA 3.3. TRAZA OTDR DEL ENLACE DE 21 KM EN SENTIDO UPSTREAM CON UN CONECTOR SUSCEPTIBLE A PERTURBACIONES.	63
FIGURA 3.4. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA PARA EJERCER VIBRACIONES EN UN CONECTOR MECÁNICO DEL FRONTHAUL.	64
FIGURA 3.5. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA PARA EJERCER VIBRACIONES EN UNA SECCIÓN DE FIBRA CON CURVATURA EN FRONTHAUL.	64
FIGURA 3.6. DIAGRAMA DE EJEMPLO PARA APLICAR CURVATURAS AL FRONTHAUL ÓPTICO DE 21 KM.	65
FIGURA 3.7. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA PARA EJERCER CURVATURAS EN LA RED DE FIBRA ÓPTICA DE 21 KM.	66
FIGURA 3.8. EQUIPO MTS-5800 ENVIANDO SEÑALES DIGITALES Y MONITOREANDO PÉRDIDAS ÓPTICAS A TRAVÉS DEL FRONTHAUL EN EL LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES DEL IINGEN.	66
FIGURA 3.9. GRAFICAS DE LAS PÉRDIDAS POR CURVATURAS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS PARA LOS CANALES WDM 29,31,33 Y 35 USADOS EN EL FRONTHAUL PASIVO.	67
FIGURA 3.10. GRÁFICAS DE LAS PÉRDIDAS POR CURVATURAS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS PARA LOS CANALES WDM 28,30,32 Y 34 USADOS EN EL FRONTHAUL ACTIVO.	67
FIGURA 4.1. MEDICIÓN DEL BER PARA EL CANAL WDM 28 A TRAVÉS DEL FRONTHAUL DE 21KM CON CURVATURAS D3=2.5CM.	71
FIGURA 4.2. MEDICIÓN DE UN BER DE 2.11×10^{-7} PARA EL CANAL WDM 28 A TRAVÉS DEL FRONTHAUL DE 21KM CON CURVATURAS D3=2.5CM.	71
FIGURA 4.3. GRAFICAS DE BERT A 10 GB/S PARA LOS CANALES WDM 29, 31, 33 Y 35 SOBRE UN FRONTHAUL CON CURVATURAS D1=1CM, D2= 2CM, D3= 2.5CM.	72
FIGURA 4.4. GRAFICAS DE BERT A 100 MB/S PARA LOS CANALES WDM 29, 31, 33 Y 35 SOBRE UN FRONTHAUL CON CURVATURAS D1=1CM, D2= 2CM, D3= 2.5CM.	73
FIGURA 4.5. GRAFICAS DE BERT A 10 GB/S PARA LOS CANALES WDM 28, 30, 32 Y 34 SOBRE UN FRONTHAUL CON CURVATURAS D1=1CM, D2= 2CM, D3= 2.5CM.	74
FIGURA 4.6. GRAFICAS DE BERT A 100 MB/S PARA LOS CANALES WDM 28, 30, 32 Y 34 SOBRE UN FRONTHAUL CON CURVATURAS D1=1CM, D2= 2CM, D3= 2.5CM.	75
FIGURA 4.7. MEDICIONES DE PARAMETROS EN CAPA 2 PARA EL CANAL WDM 28 A 10 GB/S EN UN FRONTHAUL ÓPTICO CON CURVATURAS D3= 2.5CM.	76
FIGURA 4.8. PÉRDIDAS DE TRAMAS, LATENCIA Y JITTER PARA EL CANAL WDM 28 A 10 GB/S EN UN FRONTHAUL CON CURVATURAS D3=2.5 CM.	77
FIGURA 4.9. GRAFICAS DE PÉRDIDAS DE TRAMAS ETHERNET A 10 GB/S SOBRE UN FRONTHAUL PASIVO DE 21 KM CON DIFERENTES CURVATURAS D1=1CM, D2= 2CM, D3= 2.5CM.	78
FIGURA 4.10. GRAFICAS DE PÉRDIDAS DE TRAMAS ETHERNET A 10 GB/S SOBRE UN FRONTHAUL ACTIVO DE 21 KM CON DIFERENTES CURVATURAS D1=1CM, D2= 2CM, D3= 2.5CM.	79
FIGURA 4.11. GRAFICAS DE PÉRDIDAS POR CURVATURAS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS PARA LOS CANALES WDM 29, 31, 33 Y 35 USADOS EN EL FRONTHAUL PASIVO D1=1CM, D2= 2CM, D3= 2.5CM.	80
FIGURA 4.12. GRAFICAS DE PÉRDIDAS POR CURVATURAS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS PARA LOS CANALES WDM 28, 30, 32 Y 34 USADOS EN EL FRONTHAUL ACTIVO D1=1CM, D2= 2CM, D3= 2.5CM.	81

ÍNDICE DE CUADROS

TABLA 1.1. CANALES DWDM EMPLEADOS EN EL SISTEMA C-RAN.	19
TABLA 1.2. CARACTERÍSTICAS DE REFLEXIÓN DE LUZ DE DIFERENTES CONECTORES.	24
TABLA 2.1. RESUMEN DE PÉRDIDAS ÓPTICAS PARA EL FRONTHAUL DE 21 KM EN SENTIDO UPSTREAM OBTENIDAS CON EL OSA.	58
TABLA 2.2. RESUMEN DE PÉRDIDAS ÓPTICAS PARA EL FRONTHAUL DE 21 KM EN SENTIDO UPSTREAM OBTENIDAS CON EL POWER METER.	60
TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LA FIBRA ÓPTICA MONOMODO YOFC.	62
TABLA 4.1. RECOMENDACIÓN DE LA ITU-T 0.150 PARA LA LONGITUD DE SECUENCIAS DE BITS PRBS.	70

ACRÓNIMOS

SMF	Single-Mode Fiber
NA	Numerical Aperture
DCF	Dispersion Compensation Fibre
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ITU	International Telecommunication Union
SDM	Space Division Multiplexing
MCF	Multicore Fiber
MFD	Mode Field Diameter
SPM	Self-Phase Modulation
XPM	Cross Phase Modulation
FWM	Four Wave Mixing
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SRS	Stimulated Raman Scattering
CD	Chromatic Dispersion
PMD	Polarization Mode Dispersion
IC-XT	Inter-core Cross-Talk

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

En el 2022 las operadoras de telefonía celular en México están empezando a implementar redes 4G y 5G que emplean infraestructuras de radio acceso centralizado (C-RAN: Centralized Radio Access Network), los cuales utilizan un fronthaul de fibra óptica con longitudes entre 10 km a 20 km para interconectar las radio bases remotas (RRHs: Remote-Radio-Heads) con las unidades de procesamiento en Banda Base (BBUs: Band-Base-Units) los cuales conforman el sistema C-RAN tal como se puede observar en la Figura 1.1 [1-3]. Sin embargo, todavía no hay un estándar definido para la instalación de dicho fronthaul óptico, el cual puede ser activo, pasivo, y/o basado en multiplexación por longitud de onda (DWDM), siendo dicha selección realizada hasta ahora por la empresa que instala el sistema C-RAN como Nokia, Telcel, Huawei, entre otros. [4-6]. En principio esta selección está determinada por los gastos de instalación u operación, y escalamiento a futuro. Asimismo, tampoco hay suficientes antecedentes en literatura que analicen a detalle los efectos de las diferentes pérdidas ópticas causadas por perturbaciones externas como curvaturas, torsiones, y vibraciones en la degradación de las señales ópticas transmitidas en cada una de estas configuraciones de fronthaul óptico en el sistema C-RAN. Con dicho estudio se podría conocer la configuración de fronthaul óptico más sensible a perturbaciones externas.

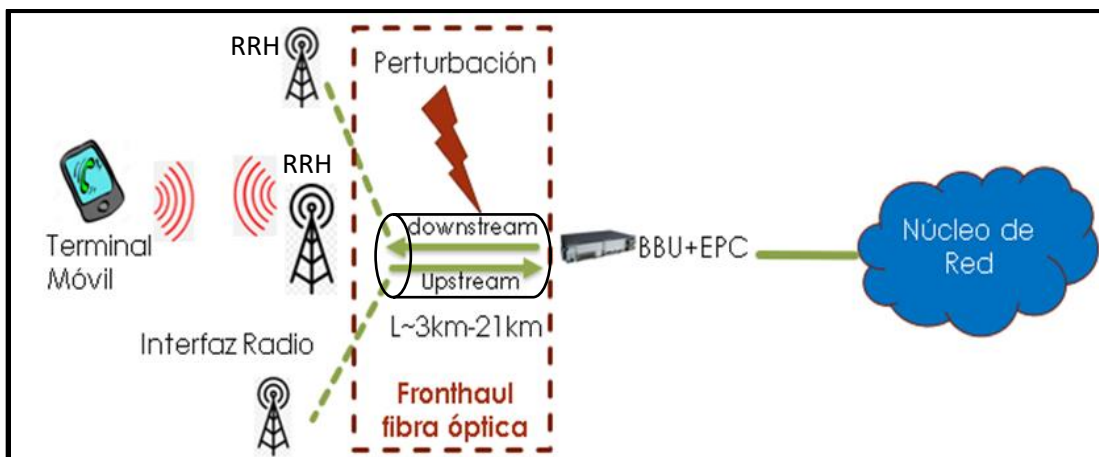


Figura 1.1 Diagrama de un sistema C-RAN con fronthaul de fibra óptica con perturbaciones externas.[6]

Actualmente, los sistemas de comunicación celular 4G y 5G deben coexistir conforme la tecnología 5G vaya evolucionando [7-9]. Se pronostica que para 2025, la tecnología 5G esté acaparando el 45% de todo el tráfico de datos a nivel mundial [9]. La coexistencia de redes 4G y 5G implica que ambas tecnologías deberán usar y compartir una misma infraestructura C-RAN con un fronthaul de fibra óptica tal como el descrito en la Figura 1.1. Esto implica también un cambio en infraestructura muy importante para la tecnología 4G ya que anteriormente las redes 4G funcionaban con una infraestructura de radio acceso RAN sin requerir un enlace de fibra óptica entre las antenas de radio (RRHs) y las unidades de procesamiento de datos (BBUs), es decir, las redes 4G se conformaban

anteriormente por RRH's y BBU's localizados en un mismo sitio. Resulta natural preguntarse ahora si las redes 4G en un sistema C-RAN (también llamadas redes 4.5G) podrían verse afectadas por la inclusión de un fronthaul de fibra óptica con múltiples perturbaciones externas a lo largo de la fibra. También resulta interesante investigar cuál de las tecnologías 4G o 5G resultaría más afectada por dichas perturbaciones externas en el fronthaul de fibra óptica considerando que en tecnologías 4G las velocidades de transmisión de datos digital a través del fronthaul son del orden de 10 a 100Mb/s y en redes 5G las velocidades de transmisión son del orden de 10Gb/s. El responder estos cuestionamientos, también ayudaría a definir donde serían los lugares menos idóneos para instalar un fronthaul de fibra óptica; por ejemplo, cerca de las líneas del tren o metro con una alta densidad de tráfico, o que tan conveniente sería utilizar como fronthaul óptico un enlace de fibra previamente instalado en un edificio con múltiples curvaturas y cerca de motores que generen vibraciones y otras perturbaciones, etc.

Con base en lo anterior, el presente proyecto está basado en el análisis de pérdidas ópticas causadas por perturbaciones externas como curvaturas y vibraciones que se presentan sobre un fronthaul de fibra óptica en configuración activa y pasiva, ambos empleando multiplexación en longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing - WDM) y con una longitud de 21.7 km, el cual es utilizado como fronthaul en una red celular 4G/5G con radio acceso centralizado (C-RAN) que se encuentra instalado en el laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería, así como también se estudia el efecto de estas pérdidas ópticas (causadas por perturbaciones externas) en la degradación de las señales transmitidas a través de dicho fronthaul.

Para analizar la degradación de las señales transmitidas en el fronthaul se debe considerar lo siguiente: En una arquitectura C-RAN, el propósito que cumple el fronthaul es la interconexión de las RRH, que representan propiamente las antenas de enlace en radio frecuencia con otro sitio que centraliza las unidades de procesamiento de banda base BBU's, normalmente ubicados en una oficina central y que se encuentra alejado de las RRH's por varios kilómetros (Fig. 1.1).

El enlace que interconecta ambos elementos se considera un enlace punto a punto; esto se traduce a que el fronthaul debe de ser transparente, transmitiendo las señales digitales entre los RRH y los BBU los cuales pueden estar basados en diferentes protocolos como CPRI (Common Public Radio Interface), OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative), eCPRI (enhanced CPRI), o Ethernet, los cuales utilizan una modulación binaria de tipo OOK (On-Off Keying) que es altamente confiable. En particular, el uso de las diferentes versiones de Ethernet representa una alternativa adecuada para realizar la transmisión en este tipo de enlaces [10-13].

Actualmente hay estándares de medición que permiten medir la degradación que sufre una señal Ethernet transmitida a través de una fibra óptica, tal como la norma Y.1564 sugerida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) [14,15]. Dicha degradación óptica se puede analizar en base a mediciones de parámetros especificados por dicha norma, tales como la latencia, jitter, y pérdidas de tramas de la señal óptica transmitida a través de dicho fronthaul. Estos estudios también se pueden realizar empleando diferentes velocidades de transmisión desde 10 a 100Mb/s (para el caso de 4G) y hasta 10Gb/s (para el caso de 5G) y con ello determinar cuáles tasas de transmisión son más sensibles a perturbaciones externas. Estos estudios permitirán definir y proponer rangos y estándares de valores permitidos de perturbaciones externas sobre un fronthaul de fibra óptica WDM, en configuración activa o pasiva, que permitan un funcionamiento adecuado para su aplicación en sistemas C-RAN en redes 4G y 5G respectivamente.

1.1 SISTEMAS DE COMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA

Los sistemas ópticos de comunicaciones usan la luz como portador de información. Sin embargo, es difícil propagar luz por la atmósfera terrestre para comunicaciones. Para ello se usan las fibras ópticas que utilizan fibra de vidrio o de plástico para contener y transmitir las ondas luminosas y guiarlas en una forma similar a como las ondas electromagnéticas son guiadas en una guía de ondas. En la década de 1960 los cables de fibra disponibles tenían pérdidas muy grandes (más de 1000 dB/km), esto limitaba la transmisión óptica a largas distancias. Sin embargo, para 1970 Keck, Maurer y Krapon de Corning Glass Works en New York desarrollaron una fibra óptica con pérdidas menores a 2dB/Km lo que permitió a los sistemas de comunicaciones de fibra óptica ser utilizados en enlaces mayores a 100km [16, 17].

La Figura 1.2 muestra un diagrama de bloques simplificado de un enlace de comunicaciones con fibra óptica con tres bloques principales que la forman, como el transmisor, el receptor y la guía de fibra óptica.



Figura 1.2. Ejemplo de Sistema genérico de comunicación óptica [17].

1.1.1 Tipos fibra óptica

Hoy en día se fabrican diferentes tipos de fibras y las formas de propagación de luz son las siguientes, monomodo y multimodo. La diferencia es en su rendimiento y capacidad de transmisión de datos, por ejemplo; en una fibra multimodo, la luz puede ser transportada por más de una vía por sucesivos modos de propagación debido a su núcleo de gran tamaño. Se utiliza generalmente en un radio de distancia menor a los 10 km. Por otro lado, en la fibra monomodo se transmite por un solo modo guiado y se utiliza en distancias mayores a los 400 km, su ancho de banda es muy grande, por lo que tiene una capacidad muy alta de transmisión de datos del orden de 400Gb/s, y es inmune a interferencias electromagnéticas. Una ventaja es su aplicación en sistemas de telecomunicaciones de larga distancia.

La fibra óptica de la compañía Corning SMF-28 monomodo se considera la fibra óptica "estándar" para aplicaciones de telefonía, televisión por cable, submarinas y redes privadas en la transmisión de datos, servicios de voz y/o vídeo. Se fabrica según las especificaciones más exigentes de la industria y está optimizada para usarse en la región de los 1310 nm a 1550 nm. En dichas longitudes de onda la capacidad de transmitir información es mayor y también es donde las atenuaciones de la luz causadas por la absorción del vidrio son más bajas [18].

La estructura de la fibra óptica se puede observar en la Figura 1.3 donde se aprecia una capa central denominada núcleo por donde se transmitirá la información, una capa exterior denominada revestimiento, y una capa de protección denominada recubrimiento. En particular, la densidad del material con que es fabricado el núcleo es ligeramente mayor que la densidad del material del revestimiento para poder hacer que los rayos de luz que se transmiten en el núcleo cumplan la

condición de reflexión total interna y pueda propagarse la luz sin salirse del núcleo de la fibra [18]. Las variedades de fibra óptica que se usan en la actualidad utilizan diferentes materiales en su núcleo y revestimiento como el vidrio y el plástico o una combinación de ambas, las variedades son las siguientes:

- 1.- Núcleo de plástico con revestimiento de plástico
- 2.- Núcleo de vidrio con revestimiento de plástico.
- 3.- Núcleo de vidrio con revestimiento de vidrio.

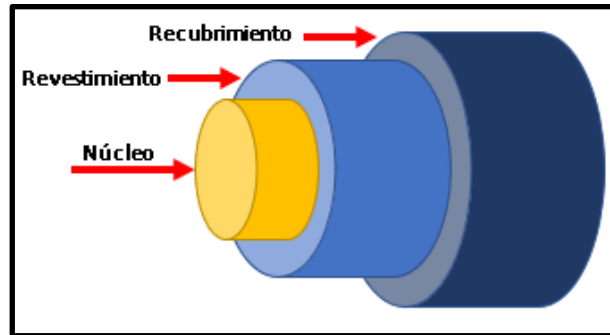


Figura 1.3. La estructura de una fibra [18].

Las ventajas de la fibra óptica con núcleo de plástico es que éstas son fuertes, flexibles, y resistentes a curvaturas, además de que son de bajo costo. La desventaja es que propaga la luz a una velocidad menor que el vidrio y presentan mayores pérdidas de atenuación en su transmisión, y la fibra con núcleo de vidrio son menos flexibles y resistentes a curvaturas, pero poseen menores pérdidas de atenuación, y por eso pueden ser utilizadas en aplicaciones de transmisión a grandes distancias [19].

Es importante mencionar que la atenuación de la luz que se transmite a través de fibras ópticas de vidrio depende de la longitud de onda de la luz. La atenuación en decibeles por kilómetro de fibra se puede calcular usando la Fórmula 1.1 para una distancia de fibra específica, y el resultado puede variar dependiendo de la clase de vidrio que se utiliza en las fibras [20]. En particular para una fibra óptica comercial SMF28 fabricada por la empresa Corning, el valor de la atenuación de su fibra óptica a una longitud de onda de 1550nm es de 0.2 dB/km.

$$\text{Atenuación en decibeles} = 10 \log_{10} \frac{\text{Potencia transmitida}}{\text{Potencia recibida}} \quad (1.1)$$

En general, la fibra óptica es el medio de transmisión preferido para las redes de conexión ópticas en sistemas C-RAN utilizadas en redes inalámbricas existentes 4G y 5G. Además, las redes ópticas presentan inmunidad a la interferencia electromagnética, presentan un diámetro pequeño y poseen un potencial de ancho de banda virtualmente ilimitado, siendo estas algunas de las muchas razones por las que la fibra es una elección adecuada y esto dependerá principalmente de qué protocolos

de tecnología se emplearán. Asimismo, las redes de fibra óptica también pueden utilizarse usando diferentes distancias de enlace, siguiendo la siguiente clasificación. [21].

1.1.2 Clasificación de redes de fibra óptica

Las redes ópticas se dividen tradicionalmente en las siguientes tres categorías generales:

- Las redes (LAN) de área local interconectan a los usuarios en un área localizada, como departamentos, edificios, oficinas, fábricas y campus universitarios.
- Las redes (MAN) de área metropolitana proporcionan la interconexión de usuarios dentro de una ciudad o en el área metropolitana que rodea una ciudad.
- Las redes (WAN) de área amplia cubren una gran área geográfica que va desde conexiones entre ciudades cercanas hasta conexiones de usuarios en todo el país.

Una red LAN puede conectar computadoras y otros recursos en una pequeña distribución geográfica. Por ejemplo, campus universitarios, hospitales, corporativos y fábricas. Por lo general. La distancia máxima de una red LAN está determinada por el modo de comunicación y los enlaces de fibra óptica que pueden extenderse a decenas de kilómetros. La característica más importante de una red LAN es que permite a todos los recursos conectados puedan compartir información entre sí. Es decir, en un corporativo, todas las computadoras, impresoras y servidores pueden estar conectados entre sí. Un protocolo muy popular para esta red es Ethernet, especificado en varios tipos del estándar IEEE 802.3, que en su forma original definía un protocolo de 10 Mbps [22, 23].

Cuando el rango de una red LAN se extiende más allá de varios bloques, múltiples vecindarios o una ciudad entera, se suele conocer como red de área metropolitana o MAN. Generalmente cubren distancias más largas y velocidades de datos más altas en comparación con las redes LAN. Una red MAN tiene un alcance físico de hasta 100 km y pueden transportar velocidades de datos de hasta 40 Gb/s, debido a la exigencia de contar con anchos de banda más grandes y porque los costos se pueden compartir entre un mayor número de usuarios finales, estas permiten usar más tecnologías y dispositivos sofisticados. Los enrutadores y conmutadores mejoran las técnicas del ancho de banda y se encuentran basados en tecnología WDM [24].

Las redes que comunican a los continentes, países o ciudades y se designan como redes de área amplia o WAN, tienen el mayor alcance físico entre las redes y por lo general no son propiedad de una sola entidad. Existen varias entidades que pueden poseer y operar en varios segmentos de la red.

Las redes WAN manejan grandes cantidades de datos a altas velocidades y grandes distancias, ya que la fibra óptica juega un papel dominante en las redes WAN. Además, utilizan técnicas avanzadas de multiplexación, especialmente técnicas WDM porque aumentan el ancho de banda efectivo de la fibra existente. Debido al gran alcance de las redes WAN se conectan muchos otros tipos de redes y tienen que seguir protocolos específicos bien definidos como son ATM y SONET (red óptica síncrona) etc. [24].

1.2 COMPONENTES USADOS EN REDES ÓPTICAS

1.2.1 Tecnología WDM

Una tecnología atractiva para llevar cabo el transporte de información en un enlace de fibra óptica como el fronthaul estudiando en este proyecto es la llamada multiplexación por división de longitud de onda (WDM, wavelength division multiplexing), que consiste en dividir el ancho de banda tan grande que ofrece la fibra óptica en múltiples segmentos espectrales que pueden ser ocupados por diferentes canales de transmisión (Figura 1.4), lo que hace el transporte de datos más eficiente [25]. Estos canales se transmiten generalmente en la banda C (es decir, alrededor de una longitud de onda de la portadora óptica de 1550 nm). Dentro de la tecnología WDM se puede distinguir entre DWDM (Dense WDM) y CWDM (Coarse WDM). En DWDM los canales espectrales están separados 100GHz (0.8 nm) y en CWDM los canales se encuentran separados 2500GHz (20 nm). En particular, la tecnología DWDM es la que se utiliza en el presente proyecto por su mayor eficiencia espectral y mayores oportunidades de incremento de canales compactados espectralmente a transmitirse a través de la fibra óptica.

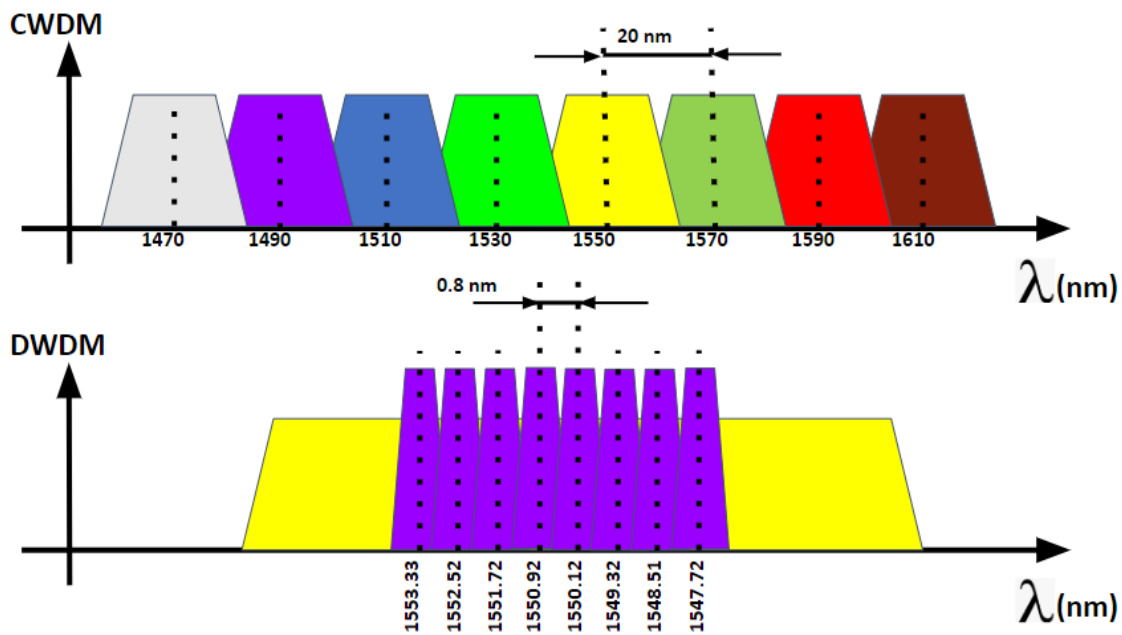


Figura 1.4. Tecnología WDM con sus dos variantes DWDM y CWDM [25].

El principio básico del DWDM es que la información procedente de varias fuentes láser se modula a distintas longitudes de onda [25]. En la Figura 1.5 se puede apreciar un ejemplo de tecnología DWDM bidireccional, ampliamente utilizado en sistemas C-RAN de redes 4G y 5G.

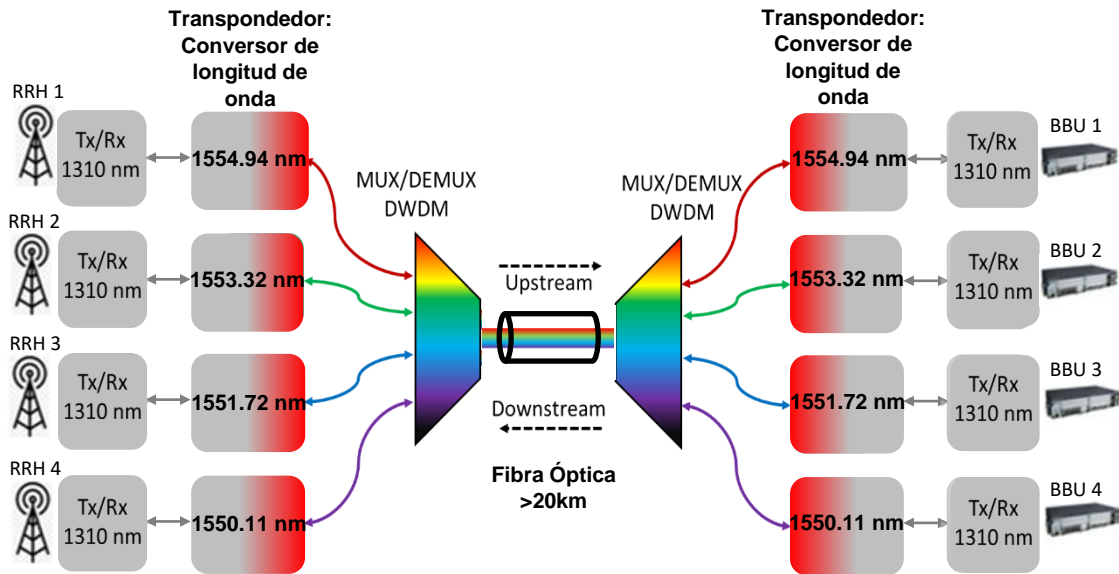


Figura 1.5. Esquema de un sistema DWDM Bidireccional usado en un fronthaul óptico de una red C-RAN [25].

Los elementos que permiten llevar a cabo la multiplexión (combinación) y demultiplexión (separación) de los canales ópticos se conocen como multiplexores y demultiplexores ópticos referidos como componentes MUX (demultiplexor) y DEMUX (Demultiplexor) en la Figura 1.5.

Los multiplexores permiten combinar señales ópticas que poseen diferentes longitudes de onda, permitiendo como consecuencia que todas ellas puedan pasar a través de la misma fibra óptica sin tener interferencia. Los demultiplexores o divisores separan las señales de distintas longitudes de onda, y para ello utilizan filtros que redirigen las señales de distintas frecuencias. Estos siempre los encontramos ubicados al inicio y al final del enlace WDM [25].

1.2.2 Transceptores ópticos

Los transceptores ópticos son componentes que permiten a los dispositivos de red transmitir y recibir luz y son descritos con la nomenclatura SFP+, donde SFP son las siglas en inglés de Small Form-Factor Pluggable y el símbolo + se denomina aquellos transceptores que operan a 10Gb/s. Estos SFP+ tienen 2 puertos, uno para el transmisor láser que generalmente es un diodo láser tipo DFB (Distributed FeedBack), y otro para el receptor óptico que generalmente es un fotodiodo PIN o de Avalancha, los cuales admiten conectores tipo LC (ver Figura 1.6). Cada SFP+ admite un cierto tipo de longitud de onda en transmisión y recepción de la señal láser, lo cual viene indicado en la carcasa del mismo SFP+. En cada uno de los dos puertos del transceptor SFP+ se pueden conectar cables de fibra óptica monomodo con conectores tipo LC tal como se indica en la Figura 1.6 [26].

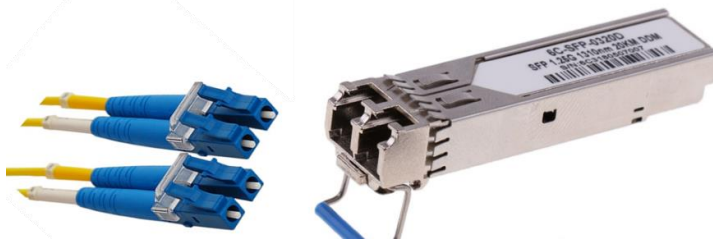


Figura 1.6. Ejemplo de transceptor SFP+ utilizado en redes ópticas de 10Gb/s. [27]

Los SFP+ estarán insertados en cada equipo de la red de fibra óptica, y serán estos los utilizados en el fronthaul óptico estudiado en este proyecto. Los SFP+ son los que les brindan la capacidad a los equipos de red para transmitir y recibir señales en una red óptica. Normalmente los SFP+ se conectan a una tarjeta de red integrada en los equipos RRHs, BBU, y transpondedores descritos en la Figura 1.5. Los SFP+ que utiliza un fronthaul pueden operar a una longitud de onda de 1310 nm también llamados SFP+ “grises” como se les conoce coloquialmente, aunque también se utilizan SFP+ DWDM que operan a longitudes de onda alrededor de 1550nm, que también se les conoce como SFP+ “coloreados”. En particular, en este proyecto de tesis se utilizan SFP+ coloreados que operan en los canales DWDM: 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, y 35, cuyas frecuencias y longitudes de onda vienen descritas en la Tabla 1.1 respectivamente.

Tabla 1.1. Canales DWDM empleados en el sistema C-RAN. [27]

Canal DWDM	Frecuencia [THz]	Lambda [nm]
28	192.800	1554.94
29	192.900	1554.13
30	193.000	1553.32
31	193.100	1552.52
32	193.200	1551.72
33	193.300	1550.91
34	193.400	1550.11
35	193.500	1549.31

Los canales DWDM que se utilizan en enlaces de fibra óptica como el fronthaul a estudiar siguen la recomendación G.694.1 de la ITU-T (ITU-T Rec. G.694.1) correspondiente a la transmisión de canales DWDM en fibras ópticas. La Figura 1.7 muestra los diferentes SFP+ coloreados DWDM que se utilizarán en el fronthaul del sistema C-RAN estudiado en este proyecto. Es muy importante interconectar estos SFP+ coloreados con sumo cuidado en los equipos ópticos, 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.



Figura 1.7. Todos los tipos de SFP+ coloreados DWDM que se utilizaron en la implementación del fronthaul.

En el proyecto también se utilizaron SFP+ que operan a una longitud de onda de 1310nm. A pesar de que todos los SFP+ que operan a 1310 nm usados en el proyecto a priori poseen entre sí casi las mismas características, es fundamental identificarlos y clasificarlos. La Figura 1.8 muestra 16 SFP+ que operan a una longitud de onda de 1310 nm, y que fueron utilizados en el proyecto.



Figura 1.8. SFP+ grises que operan a 1310nm que se utilizaron en la implementación del fronthaul.

Como los SFP+ son los responsables de transmitir y recibir las señales ópticas en el fronthaul, jugarán un papel muy importante. Es de suma relevancia corroborar que trabajen dentro de sus parámetros correspondientes, especialmente los SFP+ DWDM, puesto que estos a diferencia de los grises que son los de 1310 nm, los SFP+DWDM pasarán a través de filtros y distancias mayores a través de la fibra óptica, lo cual puede degradar la transmisión de las señales ópticas.

En particular, los SFP+ DWDM coloreados son los que poseen los transmisores láser y fotodetectores de todos los canales DWDM transmitidos en el fronthaul, por lo que, tanto la potencia de su láser, así como también la frecuencia o longitud de onda de la emisión láser son determinantes, ya que estos son los que recorrerán el enlace que proporciona el fronthaul, y además compartirán el mismo medio con otras señales de diferente longitud de onda, en otras palabras, las señales láser provenientes de todos los SFP+ DWDM serán filtrados para ser insertados en una misma fibra óptica.

Evidentemente, la potencia óptica y la frecuencia de operación son los parámetros principales que caracterizan a los sistemas de comunicaciones ópticos, sin embargo, al tratarse de un sistema DWDM, parámetros de emisión láser de estos SFP+ DWDM coloreados como la razón señal a ruido óptica y el ancho de línea espectral cobran relevancia en el sistema.

El desarrollo de los transceptores SFP+ ha facilitado los estándares de la industria, ya que todos los transceptores deben cumplir con un acuerdo de compatibilidad para la industria, que rige el máximo de dimensiones exteriores del cuerpo del transceptor y el tamaño de un transceptor. También debe

proporcionar una mayor confiabilidad en la transmisión y recepción óptica con temperaturas de operación adecuadas.

Los SFP+ admiten conectores tipo LC y es muy importante identificar correctamente las longitudes de onda (λ) de operación de los SFP+, ya que de lo contrario si estos son ubicados en otro canal que no corresponde, el sistema no recibirá la información adecuada. Sin embargo, se debe prever el rebasar los umbrales superiores de la sensibilidad de la potencia que debe llegarle al receptor y no superar la potencia de saturación del fotodetector [26].

1.2.3 Transpondedores ópticos

Dentro de un enlace de fibra óptica, como el del fronthaul óptico estudiado, se emplean recurrentemente equipos denominados transpondedores, los cuales se encargan de convertir la longitud de onda de 1310nm de las señales ópticas que se transmiten en la red de fibra a longitudes de onda correspondientes a diferentes canales DWDM situados espectralmente alrededor de 1550nm y viceversa, tal como se puede observar en el fronthaul de fibra óptica de la Figura 1.5. En particular, en este proyecto se emplean dos transpondedores modelo "PL-1000TE" de la marca Packet Light. Dicho transpondedor es un equipo de transporte óptico DWDM que admite hasta 8 transpondedores con una combinación flexible de protocolos basados en estándares de la industria instalado en un chasis compacto con bajo consumo de energía. A su vez, es un dispositivo altamente integrable que puede incorporar dos MUX/DEMUX, un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) y un módulo de compensación de dispersión (DCM).

La Figura 1.9, muestra la vista frontal de los equipos PL1000TE instalados en el Laboratorio de Telecomunicaciones.

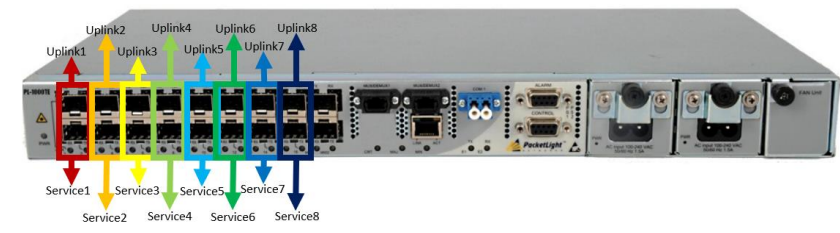


Figura 1.9. Vista de un equipo transpondedor modelo PL1000TE [26].

El equipo Transpondedor acepta transceptores que operan a 1310nm y transceptores que operan a diferentes canales DWDM alrededor de 1550nm. Dicho equipo realiza una conversión de longitud de onda a través de una conversión optoelectrónica, es decir, la señal óptica de 1310nm es convertida a una señal eléctrica cuando esta señal llega a los fotodiodos del transceptor, por lo tanto, la potencia de la señal óptica se convierte en corriente eléctrica. Posteriormente, estas señales eléctricas son usadas para encender el transmisor (diodo láser) del transceptor DWDM coloreado y obtener nuevamente una señal óptica con una longitud de onda diferente y relacionada al canal DWDM con que opera el transceptor coloreado. El proceso anterior describe entonces como un transpondedor convierte una señal de 1310nm a un canal DWDM con una longitud de onda alrededor de 1550nm a través de una conversión Opto-Electro-Óptica. Dicho proceso también se puede realizar a la inversa para convertir una señal DWDM a una señal con longitud de 1310nm respectivamente [26-30].

1.2.4 Tipos de conectores empleados y su limpieza

Un conector de fibra óptica generalmente se monta en el extremo de un cable de fibra y está diseñado para realizar conexiones y desconexiones frecuentes hacia otros conectores o equipos específicos. El requisito básico de un conector de fibra óptica es que debe ser fácil de armar, debe tener un diseño robusto y poseer una baja pérdida. Existen acopladores ópticos que son los medios por los cuales una fibra óptica está conectado a equipos periféricos y a otras fibras. Aunque estos conectores son similares a sus contrapartes eléctricas en función y apariencia externa, en realidad son dispositivos de alta precisión que tiene que centrar la sección transversal de la fibra para que su núcleo de captación de luz quede directamente encima y en línea con la fuente o receptor de luz.

Dado que el tamaño del núcleo de la fibra es del orden de 10 micrómetros, esto tiene que lograrse con tolerancias de unas pocas diez milésimas de pulgada. Sin embargo, la calidad de los conectores depende de varias cosas, como el tipo de fibra, las tolerancias del diámetro de la fibra, la asimetría de la fibra, la concentricidad del núcleo de fibra, las variaciones de apertura numérica y el tipo de revestimiento usado. La pérdida en los mejores conectores está por debajo de 1 dB, pero para conectores económicos, la pérdida puede ser mucho mayor.

Las pérdidas del conector entre dos fibras deben minimizarse si las fibras son idénticas y están perfectamente alineadas, ya que cualquier espacio entre las dos fibras dará lugar a una pequeña pérdida, pero también a reflexiones de los extremos de la fibra. Este reflejo puede dar lugar a problemas, especialmente cuando entran en un diodo láser, y por lo tanto la pérdida debe minimizarse en un conector. Es posible reducir la reflexión utilizando las caras de los extremos del conector pulidas en ángulo, ya que la reflexión de los extremos no se acopla de nuevo en la fibra siempre que se elija el ángulo adecuadamente. En un conector los extremos de la fibra se fijan y cualquier suciedad en la punta del conector genera pérdidas ópticas. Las pérdidas del conector suelen ser de 0.15 a 0.3 dB. A continuación, se muestran a detalle los diferentes conectores mencionados en la Figura 1.10 [31,32].

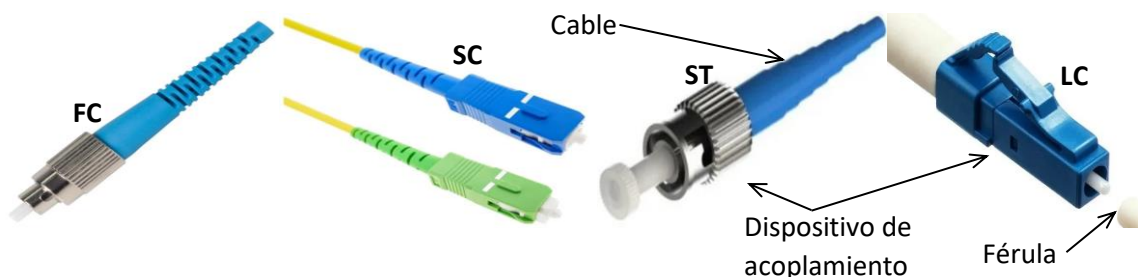


Figura 1.10. Tipos de conectores ópticos en uso, ST, SC, FC y LC [32].

Cada conector consta de tres componentes principales: la férula, el cable y un dispositivo de acoplamiento. La férula es un elemento importante, ya que este dispositivo cilíndrico largo y delgado, generalmente está hecho de metal o cerámica, con un agujero en su centro. Su diámetro es ligeramente mayor que el diámetro del revestimiento, por lo que la fibra se puede colocar dentro de la férula y su función es proteger, sujetar y alinear la fibra de vidrio. El conector está hecho de

metal o plástico y sostiene la férula que lleva la fibra, mientras que la férula permite el contacto físico entre las dos fibras que están conectadas.

La férula se extiende más allá del cuerpo del conector para poder conectarse a otro conector. La cubierta del cable y los elementos de refuerzo suelen estar unidos al cuerpo del conector y actúa como el punto de entrada de la fibra. El dispositivo de acoplamiento ayuda en la alineación de la fibra. Hoy en día hay muchos tipos de conectores estándar ópticos en el mercado, algunos ejemplos son: ST (Straight Tip), SC (Subscriber Connector), FC (Ferrule Conector) y LC (Little Connector, Lucent Connector).

Uno de los más populares es el conector LC debido a su tamaño más pequeño y diseño push-pull. También se utilizan mucho en transceptores ópticos. Fue desarrollado por Lucent Technologies. La familia de conectores LC incluye un diseño simplex o dúplex, y estos pueden usar fibras monomodo y multimodo. En general, para todos los conectores puede haber atributos que hacen que un conector sea más adecuado para una aplicación específica que para otra [33].

El conector conocido como FC se usó ampliamente en redes de fibra óptica hasta hace muy poco tiempo y fue el primer conector óptico con férula de cerámica, desarrollado por Nippon Telephone and Telegraph. Es también uno de los más utilizados en la industria de las telecomunicaciones, para redes LAN y sistemas CATV basadas en fibra óptica. Dispone de un mecanismo de bloqueo de rosca, lo que hace que sea sumamente sencillo de instalar y en cualquier momento puede realizarse la conexión y desconexión. Disponible en configuraciones simples con distintos pulidos UPC (Unpolished conector) y APC (Angled polished conector), lo que brinda compatibilidad con varias fibras monomodo [33].

En general, todos los conectores descritos en la Figura 1.10 pueden tener dos tipos de pulido en su férula: el pulido UPC, y el pulido APC. Los conectores con pulidos UPC, tienen una superficie pulida plana, proporciona una mejor conectividad de núcleo, baja pérdida óptica y se tiene un código de color azul. Los conectores con pulidos APC, codificados en color verde, tienen un corte preciso de 8° en la férula y no exhiben reflejo de Fresnel. Son los más adecuados para aplicaciones de alto ancho de banda debido a su muy baja reflectancia, pero tienen un poco más de pérdidas de inserción en comparación con los conectores con pulido UPC. A continuación, se muestra en la Figura 1.11 una sección transversal del pulido de una férula típica en algunos conectores.

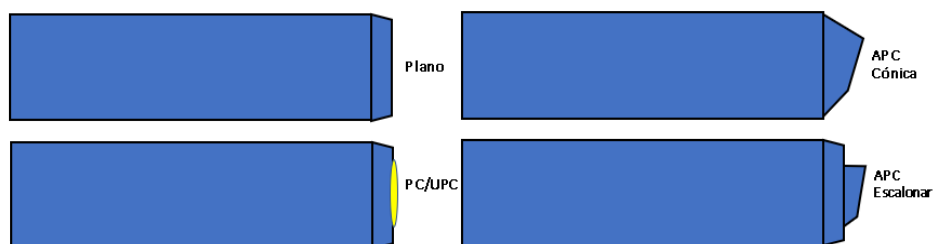


Figura 1.11. Tipo de pulido en una férula conector [33].

La inspección visual es un paso crítico en el proceso de fabricación de un conector, una férula o cualquier otro componente destinado a transferir luz de una fibra a otra. También es muy deseable antes de la conexión realizar una inspección microscópica que consiste en observar el extremo de la férula e interpretar subjetivamente su calidad, limpieza, etc. Este paso es necesario antes de las

pruebas de calificación en el momento de la transmisión óptica de luz a través de fibras ópticas. El uso de conectores ayuda a la interconexión y ofrece flexibilidad al usuario para intercambiar información y pasar de diferentes canales, pruebas, calibraciones, etc. A pesar de estas ventajas, el uso de conectores puede introducir pérdidas ópticas indeseables y reducir los presupuestos de potencia ópticos requeridos para una precisión de mediciones [34].

En general, con la introducción de una férula APC de 8° se puede reducir la reflexión en al menos 65 dB. Para ello, es importante tener en cuenta que el conector APC no puede interconectarse con otros tipos de conectores con pulido UPC. En el caso de conectores monomodo, la retroreflexión debe minimizarse especialmente para proteger los componentes activos sensibles, como las fuentes láser. Hoy en día, algunos fabricantes utilizan los mismos procedimientos para todos sus conectores [34].

La Tabla 1.2 muestra los niveles comparativos de reflexión que se pueden encontrar en función, de acuerdo con el tipo de conector.

Tabla 1.2. Características de reflexión de luz de diferentes conectores [34].

Tipo de conector pulido	Descripción	Reflexión
PC	Contacto Físico	-30dB
SPC	Contacto Superfísico	-45 dB
UPC	Contacto Ultrafísico	-55 dB
APC	Contacto pulido en ángulo	-65 dB

El uso de acopladores ópticos desempeña un papel fundamental para conectar dos cables de fibra separados, permitiendo unir conectores similares o dos conectores diferentes con un mismo tipo de pulido. Estos se identifican mediante una nomenclatura, como son los FC, LC, ST, SC, MTP/MPO, etc. Estos pequeños dispositivos hacen posible que el sistema funcione sin problemas y la mayoría de los conectores utilizan una férula para sujetar la fibra y proporcionar alineación. El tamaño de férula popular es de un diámetro de 2.5 mm, que es estándar. A continuación, en la Figura 1.12 se muestran algunos ejemplos de acopladores mecánicos [34].



Figura 1.12. Tipos de acopladores ópticos en uso, ST-ST, LC-LC, FC-FC y FC-SC [34].

La causa principal de fallas en la red son los conectores ópticos sucios, ya que el 80% de los operadores de red informan tener problemas con los conectores. Por ello, es importante realizar mantenimiento preventivo hacia los conectores.

Se recomienda realizar una limpieza en todos los conectores ópticos, por ello, debe ser limpiado de acuerdo con las herramientas de limpieza adecuadas. Ya que una sola partícula acoplada en el centro de la férula de un conector puede causar un reflejo posterior significativo, pérdida de inserción e incluso daños en el equipo. Existen métodos de limpieza básicos, uno es limpieza en seco y es por medio de un hisopo o cepillo para que se introduzca dentro del adaptador y realizar movimientos giratorios, luego limpiar el interior de la superficie de la manga de alineación. Después de limpiar el adaptador con el conector instalado en un extremo, inspeccionar la superficie del extremo del conector para detectar cualquier tipo de contaminación. Mientras que, para la limpieza en húmedo, es el mismo método de limpieza, sin embargo, el hisopo debe estar humedecido con solución de limpieza para fibra óptica o alcohol isopropílico para eliminar residuos de los conectores ópticos y evitar pérdidas en el sistema óptico.

1.3 TRANSMISIÓN DE DATOS ETHERNET EN FIBRA ÓPTICA

Diversas empresas como DEC, Intel y Xerox diseñaron un estándar Ethernet en 1978 con capacidad para transmitir tramas de datos a tasas de 10 Mb/s, el cual fue llamado estándar DIX. En 1983 se continuó desarrollando el estándar DIX para obtener el estándar IEEE 802.3 Ethernet. Dicho desarrollo permitió que Ethernet pudiera ser aplicado en la transmisión de tramas de datos de enlaces de comunicación a tasas de 10 Mbps, 100 Mbps, 1 Gbps, y 10 Gbps. Más adelante se describe a detalle las tramas de Ethernet usadas para cada velocidad [35]. En particular, para 10 Mb/s por segundo, la nomenclatura del estándar Ethernet es IEEE 802.3, pero casi siempre es referido como Ethernet. Mientras que para 100 Mb/s el estándar es IEEE 802.3u. Sin embargo, para 1000 Mb/s es el estándar IEEE 802.3z. Por último, para 10 Gb/s se usa el estándar IEEE 802.3ae.

Por otro lado, el modelo OSI está basado en una propuesta desarrollada por la ISO (Organización Internacional de Estándares) como un primer paso hacia la estandarización internacional de los protocolos utilizados en varias capas de transmisión de datos. Se llama OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos) porque tiene que ver con la conexión de sistemas abiertos, es decir, sistemas que están abiertos a la comunicación con otros sistemas. Este modelo tiene siete capas y a continuación analizaremos cada capa, indicando su función [35].

1. La capa física define las conexiones físicas, las señales, voltajes y esquemas de codificación para enviar bits a través de un medio de comunicación.
2. La capa de enlace de datos define los estándares para dividir datos en tramas de datos y enviar las tramas de manera secuencial a través de la red libre de errores de transmisión. Si el servicio es confiable, el receptor confirma la recepción correcta de cada trama devolviendo una trama de confirmación de recepción.
3. La capa de red es la responsable de establecer, mantener y terminar la conexión de red entre dos entidades de transporte y de transferir datos a capas superiores del modelo OSI. Las rutas pueden estar basadas en tablas estáticas, codificadas en la red y rara vez cambian.
4. La capa de transporte se encarga de segmentar y ensamblar los datos en un flujo de datos de un punto a otro, siempre y cuando haya una ruta de comunicaciones abierta y reciba solicitudes de la capa de sesión para enviar solicitudes en la capa de red. También asegura

de extremo a extremo entrega de datos, lo que permite que se produzca la comunicación entre varios puntos finales dentro de una red.

5. La capa de sesión es responsable de establecer la comunicación entre los nodos, ya que responde a las solicitudes de servicio de la capa de presentación, así como el envío de solicitudes de servicio a la capa de transporte. También brindan servicios de control de acceso, autenticación, sincronización de datos y otros servicios.
6. La capa de presentación y su tarea es garantizar que los datos que se envían de la capa del emisor puedan ser interpretados y leídos en la capa de aplicación del receptor.
7. La capa de aplicación contiene los sistemas operativos que permiten que los programas de aplicación interactúen con la red. Por ejemplo, un protocolo de aplicación de amplio uso es HTTP (Protocolo de Transferencia de Hipertexto), que es la base de World Wide Web. No solo sirve al proceso de aplicaciones, sino que también envía solicitudes de servicio a la capa de presentación.

La tecnología para 100 Mbps Ethernet funciona para varios kilómetros en un cable de fibra óptica, lo que permite conectar conmutadores Ethernet situados en diferentes edificios. Gigabit Ethernet es una extensión de los estándares a 10 Mbps y 100 Mbps. Ofrece una tasa de datos en bruto de 1,000 Mbps y mantiene una compatibilidad total con la enorme base instalada de equipos Gigabit Ethernet, IEEE 802.3z. A continuación, en la Figura 1.13 se muestra una lista de los elementos básicos de la trama Ethernet que son utilizados para diferentes tasas de transmisión variando solamente la duración en tiempo de los bits y agregando un apartado de extensión en la trama.



Figura 1.13. Formato de estructura de Trama para el estándar Ethernet [35].

- Preámbulo: Costa de 7 bytes de 1 's y 0' s alternados para alertar a una estación receptora de que se está recibiendo una trama. 1 byte consiste de 8 bits. Este es un método utilizado para ayudar a la sincronización entre la capa física de recepción y el flujo de datos entrante.
- Delimitador de cuadro Inicial: Contiene 1 byte de 1 's y 0' s alternando que terminan con dos bits "11" consecutivos para indicar que el siguiente bit pertenece al byte más a la izquierda de la dirección destino.
- Dirección de Destino: 6 bytes que contiene la dirección del nodo que va a recibir la trama. El bit más a la izquierda en este campo indica si la trama está destinada a una dirección de nodo individual (0) o a un grupo Dirección (1). El segundo desde el bit más a la izquierda es un indicador si la dirección es una dirección asignada globalmente (0) o una dirección administrada localmente (1). Los 46 bits restantes de este campo contienen el valor de dirección de la dirección de nodo única, un grupo de nodos de red o todos los nodos en la red.

- Dirección de origen: 6 bytes que contiene la dirección de hardware del nodo transmisor, que es siempre una dirección individual única donde el bit más a la izquierda del campo siempre se establece en 0.
- Tipo/longitud de trama: un campo de 2 bytes que indica el número de bytes contenidos en el campo de datos de la trama o una alternativa de tipo de formato. Si la estructura del Tipo/longitud tiene un valor de 1500 o menos, este valor indica el número de bytes contenidos dentro de la trama de datos. Si el valor del campo es 1536 o mayor, se utiliza para indicar el tipo de trama alternativa que se utiliza para una recepción o trama transmitida.
- Datos: Este campo contiene los datos que están siendo enviados dentro de la trama. Puede ser cualquier número de bytes de información. Se permite un número máximo de 1500 bytes para este campo. Sin embargo, si el número de bytes es inferior a 46, se debe agregar una cantidad de bytes para rellenar el campo y alcanzar su longitud mínima de 46 bytes. El tamaño, según el estándar IEEE 802.3, que no incluye el preámbulo, es de 64 bytes. Las tramas de menos de 64 bytes se descartan como tramas de colisiones, defectuosas o causadas por software.
- Comprobación de redundancia cíclica (CRC): Un campo de 4 bytes que contiene 32 bits de CRC, es calculado e insertado por el nodo de la red de envío y utilizado por el nodo de la red de recepción para validar la trama recibida. Tanto el nodo de envío como el de recepción calculan el valor CRC utilizando los datos contenidos en el destino como son los campos de dirección destino, dirección de origen, longitud/tipo, datos, con el fin de detectar los errores de bit de la trama [35].

La trama Gigabit Ethernet es similar a la trama Ethernet estándar, es ligeramente diferente en la longitud mínima de la estructura. El tamaño de trama mínimo se amplió de 64 bytes a 520 bytes. Esto es debido a que el incremento de 10 en velocidad requiere modificaciones para la capa MAC.

1.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN PARA ANALIZAR LA CALIDAD DE TRANSMISIÓN DE DATOS EN CAPA 1 Y CAPA 2

1.4.1 Medidor de Potencia Óptica

Existen diversas herramientas para analizar una red de fibra óptica, que permita monitorear o diagnosticar en tiempo real el comportamiento de las redes de telecomunicaciones. Una de las herramientas principales son los medidores de potencia óptica (**Power Meter**) que se utilizan para medir la pérdida de potencia en un enlace de fibra óptica y la pérdida de retorno durante las pruebas de instalación y servicios de campo. Estos medidores están formados por fotodiodos de silicio y germanio que proporcionan un rango de medición espectral de 400 nm a 1800 nm, y un rango dinámico de 90 dB. Existen muchas marcas como EXFO, VIAVI, PROMAX, etc, que desarrollan estos tipos de medidores de potencia en Telecomunicaciones ópticas, donde incluyen funciones básicas como una interfaz de usuario basada en menús, pantallas personalizables, longitudes de onda de calibración seleccionables, almacenamiento a bordo de los resultados de las pruebas (para la lectura

posterior en una PC) y el registro de datos. La Figura 1.14 muestra el Medidor de Potencia utilizado durante las pruebas del presente proyecto [36].



Figura 1.14. Medidor de Potencia marca EXFO FPM-300 [36].

1.4.2 Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR)

La reflectometría óptica en el dominio del tiempo (**OTDR**) por sus siglas en inglés (Optical Time Domain Reflectometer) es una técnica valiosa y ampliamente utilizada para instalaciones de cables de fibra óptica y fue desarrollada a mediados de la década de 1970 por el Dr. Stuart Persenick y el Dr. Michael Binoski. El funcionamiento se basa en la retrodispersión de Rayleigh, en la que una pequeña cantidad de luz se dispersa en todas las direcciones a medida que una señal lumínica viaja a través de la fibra. Dichas dispersiones son causadas por variaciones muy pequeñas de la densidad del vidrio con que es fabricada la fibra. Una gran porción de esta luz que es dispersada en todas direcciones es reflejada en dirección opuesta a la dirección de transmisión de la fibra. Un OTDR hace uso de este fenómeno usando para ello la transmisión de pulsos de luz en una fibra y luego midiendo los reflejos que se producen a lo largo de la fibra. Es decir, funciona como un radar, detectando reflejos de pulsos de luz causados por las dispersiones causadas por la fibra y reflejos de luz causados por conectores y posibles grietas presentes en la fibra. El OTDR es un dispositivo muy versátil, capaz de localizar eventos reflexivos u otras perturbaciones, como curvas, conectores y posiciones de empalme, y sus pérdidas, así como la pérdida distribuida a lo largo de una fibra óptica a una determinada distancia en tiempo real, esto es mediante el acceso a un solo extremo de la fibra [37]. La Figura 1.15 muestra el OTDR utilizado durante las pruebas del presente proyecto.



Figura 1.15. OTDR serie RTU-720 marca EXFO [37].

A continuación, en la Figura 1.16 se muestra un diagrama del funcionamiento del OTDR basado en la transmisión de pulsos de luz y la generación de reflexiones de este pulso producidos por conectores y componentes ópticas situadas a lo largo del enlace de fibra óptica.

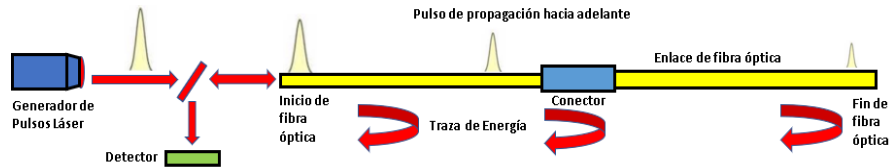


Figura 1.16. Diagrama esquemático de las reflexiones ocurridas en un OTDR [38].

El OTDR se utiliza para localizar roturas, defectos y desalineaciones y cualquier degradación gradual o repentina de un enlace de fibra óptica. El OTDR proporciona una traza con las características específicas del enlace como se menciona a continuación [38].

- Pérdida causada por componentes individuales del sistema, empalmes de fusión y conectores.
- Áreas defectuosas, áreas de alta atenuación como curvas o rupturas.
- Características generales de la fibra.
- Longitud total de la fibra.
- Pérdida total de la fibra.
- Ancho del pulso.

En resumen, la función del OTDR es enviar pulsos de luz a través de una fibra, luego muestreando la luz que se refleja de regreso a la fuente causados por la dispersión de Rayleigh y reflexiones de Fresnel causados por conectores o fracturas de la fibra. La luz muestreada se analiza en el tiempo y se convierte en distancia para medir la longitud y la pérdida en cada posición de la fibra. La Figura 1.17 muestra una traza OTDR típica, donde el eje Y describe la potencia de la señal reflejada, que puede interpretarse como la pérdida en potencia de transmisión, mientras que el eje X representa la distancia. A medida que una señal viaja a través de la fibra, pierde continuamente potencia debido a la atenuación de la fibra óptica [38].

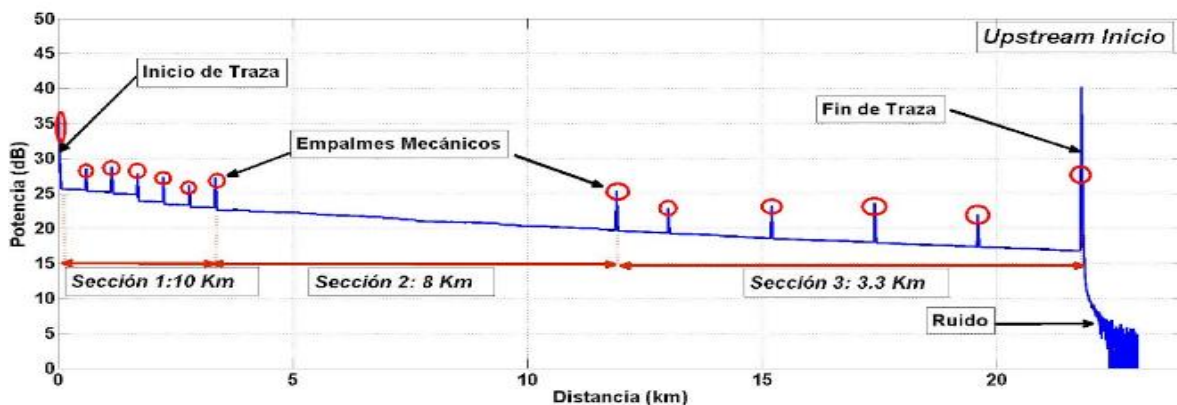


Figura 1.17. Ejemplo de una traza típica del OTDR con muchos eventos de reflexión [38].

1.4.3 Analizador de Espectros Óptico (OSA)

La tecnología ha evolucionado de forma progresiva, que hizo posible analizar la transformada de Fourier en poco tiempo para medir la potencia de diferentes señales (amplitud) y la frecuencia por medio de un analizador de espectro óptico. Estos utilizan una rejilla de difracción para analizar el espectro óptico de la luz en el rango de longitudes de onda, a partir de 600 nm, hasta 1750 nm. Es un instrumento muy utilizado en campo para la medición de dispositivos y sistemas de fibra óptica, además de medir la densidad espectral de una señal de onda de luz a diferentes longitudes de onda. El OSA también tiene funciones para medir la pérdida de elementos pasivos, como divisores ópticos, especialmente cuando se introduce la multiplexación por división de longitud de onda en los sistemas donde existen diferentes canales de datos WDM en una señal óptica y para encontrar el nivel de potencia de la señal óptica en cada canal de longitud de onda [39]. A continuación, se describen a detalle las características principales que se deben considerar para hacer mediciones en un OSA:

- Rango espectral: El rango máximo de longitud de onda que puede cubrir el OSA garantiza al mismo tiempo el rendimiento específico. Generalmente cubren desde 400 nm a 1700 nm. La limitación práctica proviene de la ventana espectral de los filtros ópticos y fotodetectores. Admite fibras monomodo (SM) (8/125 micras) y multimodo (MM) (50/125 micras).
- Precisión: Especifica la precisión con la que el OSA mide la longitud de onda que puede ser generalmente en ± 20 pm. Además, indica qué tan precisa es la separación de longitud de onda medida entre dos canales WDM.
- Resolución: Define qué tan fina se muestrea la señal óptica durante la medición. También mide la densidad espectral óptica, que es la potencia óptica total dentro de un ancho de banda específico, un ancho de banda de mayor resolución significa una caracterización más detallada de la señal óptica. El ancho de banda de resolución óptica oscila entre 0.1 nm y 0.01 nm.
- Sensibilidad: Especifica la potencia óptica de la señal mínima medible antes de alcanzar el piso de ruido de fondo. Por lo tanto, está determinada básicamente por la característica de ruido del fotodiodo de silicio utilizado dentro del OSA. Además, cubre un rango de longitud de onda desde 400 nm hasta 1000 nm. Por otra parte, para la longitud de onda de 1000 nm a 1700 nm, se debe usar un fotodiodo InGaAs y el nivel de ruido es mayor. También puede proporcionar una sensibilidad de detección de -120 dBm en el rango de longitud de onda desde 400 nm hasta 1700 nm.
- Potencia Máxima: La máxima potencia óptica de señal permitida del sistema de detección del OSA antes de que éste sea está saturado. Generalmente puede tolerar la señal niveles de potencia óptica del orden de 20 dBm.
- Rango Dinámico: Para este efecto, depende de la amplitud distinguible y la separación entre dos señales ópticas por un cierto número de nm, ya que el rango dinámico común ronda entre unos 60 dB para un intervalo con una longitud de onda de 0.8 nm y de 52 dB con intervalos de longitud de onda de 0.2 nm.
- Tasa de barrido de Frecuencia: Este punto especifica la velocidad de un barrido sobre la longitud de onda durante la medición, esto depende del intervalo de longitud de onda de medición y del ancho de banda de resolución utilizado. Por otra parte, el número de muestras de medición que toma durante el barrido es igual al lapso de ancho dividido por

el ancho de banda de resolución y la velocidad de barrido también depende de los niveles de potencia de la señal óptica.

- Dependencia de polarización: Especifica las fluctuaciones máximas permitidas de lectura de potencia mientras cambia el estado de polarización de la señal óptica. Generalmente es causada por la transmisión dependiente de la polarización del sistema óptico, como rejillas y filtros ópticos utilizados en el OSA. Estos suelen tener dependencias de polarización menores a 0.1 dB [39].

En la Figura 1.18 se muestra el equipo OSA usado en el presente proyecto.

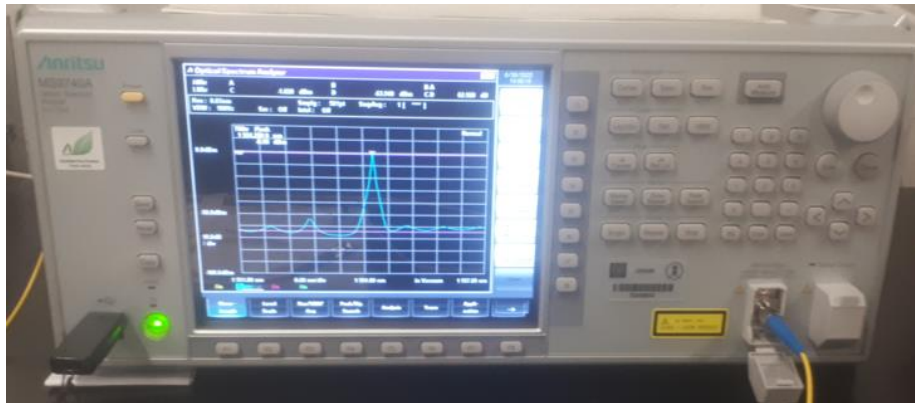


Figura 1.18. Analizador de Espectro Óptico (OSA) serie MS9740A marca ANRITSU [39].

1.4.4 Analizador de tasa de bits erróneos (BER Tester)

Es un dispositivo principal para medir y cuantificar el rendimiento de los enlaces de datos digitales. En el presente estudio se utilizó un BER tester de la empresa Viavi® modelo T-BERD/MTS-5800 que admite una conexión Ethernet de fibra óptica a 10Gb/s. Este equipo portátil puede verificar la calidad de servicio ethernet en la red para el consumidor final, de acuerdo con el nivel de servicio (SLA: (service level agreement)). [40].

En general, el equipo T-BERD puede verificar las redes de transporte de fibra óptica o de cobre con base en Ethernet. Por lo tanto, se utiliza el estándar de la industria para la instalación de redes Ethernet (RFC2544). El análisis que realiza el equipo incluye el índice de información comprometida (CIR), el retardo de tramas (FD: Frame delay) también denominada latencia, pérdida de tramas (FL: frame losses) y pruebas de variables continuas. Además, se comprueba la fluctuación entre paquetes o la variación en el retardo de las tramas (FDV: frame delay variation), es así como, se garantiza el análisis de la red que se encuentra lista para transportar servicios digitales como son IPTV o VoIP.

Dentro de las características principales del equipo es que permite ejecutar diferentes clases de servicios de CIR, FD y FDV, comparado con otros equipos de verificación de enlaces Ethernet. También puede evaluar el tráfico bidireccional, tráfico unidireccional y/o asimétrico. Dentro de las cualidades sobresalientes del equipo es un algoritmo determinista que establece más rápido el máximo rendimiento de una red Ethernet, y verificando que se cumplen con los indicadores principales de desempeño de la red (KPI: key parametrs indicators) [40]. En la Figura 1.19 se muestra el equipo BER Tester usado en el presente proyecto.



Figura 1.19. T-BERD/MTS-5800 marca VIAVI [40].

El estándar Y.1564 es una versión mejorada del estándar RFC2544 y constituye la prueba de activación de servicios estándar más utilizado actualmente en el sector para evaluar redes Ethernet con servicios de voz, datos y vídeo (TriplePlay), y con ello buscar fallas de servicios comerciales de Ethernet. El equipo fue desarrollado para tareas específicas en campo para verificar las métricas SLA y QoS como el rendimiento, retardo, pérdida y fluctuación. Por otra parte, la primera fase es la prueba de configuración de servicio (Ramp Test), mientras que la segunda fase es una prueba de calidad de servicio (Multiservicio). Además, es compatible para verificar el BER de capa 1 (L1) para realizar pruebas de estrés en los enlaces físicos, mientras que latencia, Jitter y la pérdida de tramas se ejecutan en capa 2(L2). [41].

En resumen, de acuerdo con la norma ITU-T Y.1563, los parámetros de transmisión de datos Ethernet que dictaminan la calidad de servicio menciona que cualquier tecnología que administra el tráfico de datos para reducir la pérdida de paquetes (FLR), la latencia (FTD) y el jitter (FDV), en una red. [41].

La latencia es también conocida como (FTD) Frame Transfer Delay y es una medida de tiempo (milisegundo, microsegundo, etc.) de transferencia de tramas completos que se transportan en la red, donde la transferencia de tramas de Ethernet se define para todas las tramas exitosas enviadas a través de una red de operadores de transporte, e informa generalmente en una fracción de segundos. En síntesis, es el tiempo que tarda un paquete en viajar en una red desde el origen hasta el destino, en ida y vuelta para ser lo más cercano a cero (μ s).

El retardo o Jitter también denominado FDV (Frame Delay Variation) se conoce como la variación del retardo de trama o fluctuación del retardo de trama (FTD), ya que es un parámetro de rendimiento en aplicaciones en tiempo real (ms), por ejemplo, en la telefonía IP o distribución de video de banda ancha que exige una variación de retardo baja y predecible para garantizar la reproducción oportuna de la información transferida.

La tasa de pérdida de paquetes es conocida como Frame Loss Ratio (FLR) es la relación entre el porcentaje máximo total de tramas ethernet pérdidas y el total tramas transmitidas en una red. El FLR generalmente se calcula solo usando tramas entregadas con éxito, excluyendo los erróneos u otros tipos de tramas asociadas con los resultados erróneos.

1.5 FRONTHAUL DE FIBRA ÓPTICA EN SISTEMAS CRAN 4G/5G

1.5.1 Estado del Arte.

La evolución de las telecomunicaciones ha permitido al ser humano desarrollar la comunicación a distancia entre personas en distintas partes del mundo, cubriendo una de las necesidades más importantes de la humanidad. La telefonía móvil es un campo de constante cambio tecnológico que ha evolucionado progresivamente los servicios ofreciendo al usuario la calidad de estos, y se distinguen así varias generaciones durante los últimos años. Su desarrollo ha pasado por distintas generaciones, partiendo desde los primeros sistemas denominados analógicos AMPS (1G) en la década de los 80's y que inicialmente operaban en la banda de 450 MHz, hasta 900 MHz. Por consiguiente, la segunda generación (2G) utilizó el sistema GSM y ocupó la banda de frecuencias entre 850 MHz y 915 MHz y fue posible utilizar 1800 y también se mejoró el servicio con GPRS y EDGE.

Posteriormente nace la tercera generación (3G) con sistemas UMTS, donde las bandas de frecuencia utilizadas son 1885-2025 MHz y 2110-22000 MHz, la tecnología empleada fue (WCDMA). Los servicios adicionales que innovaron esta generación fueron las videollamadas, conexión a internet, videojuegos, etc. También se integra HSDPA, donde, la velocidad de transmisión era partir de 14.4 Mb/s de descarga y 2 Mb/s de subida [42].

La cuarta generación (4G-LTE) se conoce también como el estándar 3GPP y está basado en las tecnologías móviles anteriores (GSM/UMTS-EDGE/HSPA). Al mismo tiempo, se encuentra en desarrollo en 4.5 LTE Advanced, ya que presenta diferentes cambios muy importantes en base a su alta velocidad de transmisión, desde 1 Gb/s hasta 300 Mb/s de descarga y 75 Mb/s de subida. Además, la red está basada completamente en IP y, por consiguiente, al hacer llamadas de voz, estas viajan como paquetes de datos. La figura 1.20. muestra la arquitectura de red 4G tradicional y se explica a detalle su estructura.

A continuación, se describe un listado de LTE con sus principales características:

- La velocidad máxima de transmisión que puede alcanzar la estación base al usuario para aplicaciones y servicios avanzados son a partir de 300Mb/s en enlace descendente y 75 Mb/s en enlace ascendente.
- El ancho de banda puede ser escalable, desde (1.25 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz) y MIMO 4x4.
- Servicios móviles de alta calidad y equipos fáciles de usar.
- LTE debe soportar al menos 200 terminales en estado activo cuando opera en 5 MHz.
- La cobertura del sistema solo es admisible una degradación de 5 Km con posibilidad de alcanzar rangos hasta 100 Km.
- El sistema debe ser óptimo para baja velocidad de 0-15Km/h, incluyendo velocidades mayores, por ejemplo, trenes, aviones de hasta 350Km/h la conexión se debe mantener. [42].
- La velocidad y la latencia promedio de la red 4G LTE es apta para el streaming de audio y video [42].

La quinta generación en telefonía (5G) ya opera en CDMX mediante Telcel y AT&T, esto significa poner en operación la red comercial más grande de América Latina, en función del despliegue que ha venido realizando para la provisión de servicios de acceso inalámbrico fijo con tecnología 5G. Los avances deben diseñarse, de acuerdo con los requerimientos de la mayoría de los servicios y aplicaciones que se van a realizar en la red, capaz de satisfacer las necesidades de múltiples dispositivos. Es necesario introducir flexibilidad, programabilidad y virtualización. Sin embargo, todavía no hay un estándar definido para la instalación de dicho fronthaul óptico, el cual puede ser activo, pasivo, y/o basado en multiplexación por longitud de onda (DWDM), siendo dicha selección realizada hasta ahora por la empresa que instala el sistema C-RAN como Nokia, Telcel, Huawei, etc. Tampoco hay suficientes antecedentes en literatura que analicen a detalle los efectos de las diferentes pérdidas ópticas causadas por perturbaciones externas como curvaturas controladas y vibraciones en la degradación de las señales ópticas transmitidas en cada una de estas configuraciones de fronthaul óptico en el sistema C-RAN. Con dicho estudio se podría conocer la configuración de fronthaul óptico más sensible a perturbaciones externas

1.5.2 Arquitectura de la red 4G/5G con C-RAN

La arquitectura de red tradicional de cuarta generación 4G-LTE, se encuentra organizada de forma descentralizada, de tal forma que todo procesamiento de la banda base, incluida la capa física (PHY), la capa de acceso medio (MAC) y las partes del procesamiento de la capa de red se realizan en las estaciones base (BS). Los datos de usuario de la capa de protocolo (IP) se reenvían entre la estación base y el núcleo de red (Core), que requiere una red de transporte, generalmente conocida como la red de retorno (BH) también como Backhaul. [43, 44].

En la Figura 1.20 se muestra una arquitectura de red 4G LTE tradicional con elementos de red que la conforman.

La red 4G-LTE se establece a partir del Release 8 con 300Mb/s en enlace descendente y 75 Mb/s en enlace ascendente y MIMO 4x4. Además, se divide en diferentes partes, la primera parte de acceso (E-UTRAN) conocido como (Evolved Terrestrial Radio Access Network). La segunda parte de Core (EPC, Evolved Packet Core), donde logra interconectar diversas redes de acceso, que en algunas ocasiones pueden ser heterogéneas entre ellas. Así pues, se le llama arquitectura LTE a todo el conjunto de nodos e interfaces que logran la comunicación entre la estación base y la terminal móvil.

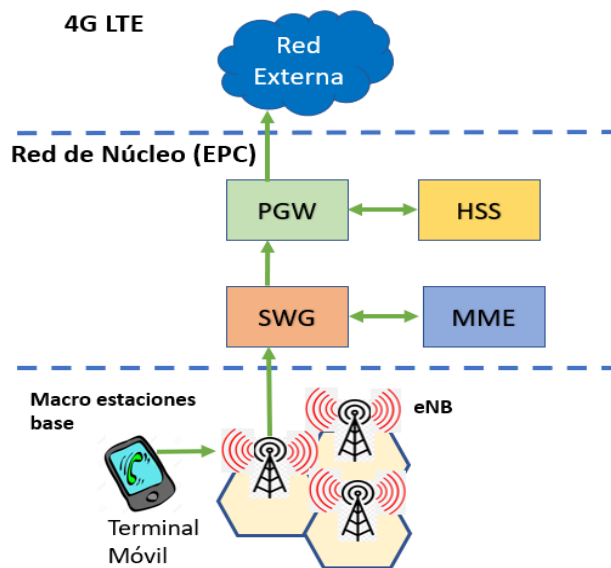


Figura 1.20. Arquitectura de red 4G tradicional [45].

3GPP emplea enlaces OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para minimizar las interferencias e incrementar la eficiencia espectral de alto rendimiento, que permita altas velocidades de transmisión y recepción de los dispositivos móviles, para la comunicación de los usuarios (UE, User Equipment). Por otra parte, la arquitectura de LTE es una evolución de UMTS, ya que es una red únicamente de paquetes (PS, Packets Switch), por lo que se discontinúa la conmutación de circuitos (CS, Circuit Switch), y proporcionará servicios multimedia con servicios de voz sobre IP. Así pues, la red de acceso está formada por un nodo llamado por ENodeB (Enhanced Node B) y este nodo estará conectado con otros nodos similares, así como con el núcleo (Core) de LTE, tanto para la parte de señalización de Entidad de Gestión de la Movilidad (MME), como de datos de usuario o puerta de enlace de servicio (SGW).

Es importante mencionar que dentro de las tareas del eNB se encuentran la gestión de los recursos del radio, el enrutamiento de los datos de usuario hacia el SGW, medición y configuración de informes de medición y transmisión de notificaciones de llamadas entrantes, etc. Por esta razón, la evolución de la red Core o (EPC, Evolved Packet Core), es un pilar fundamental de la banda ancha móvil, ya que, sin él, ni las RAN ni los servicios de Internet móvil alcanzarían todo su potencial. [45].

A continuación, se describen las funciones de cada elemento del EPC para la red 4G-LTE:

- **Mobility Management Entity (MME):** Es un nodo de control clave para la red de acceso LTE y maneja la señalización relacionada con la movilidad.
- **Serving Gateway (SGW):** Actúa como un enrutador de alto nivel, al mismo tiempo reenvía y recibe datos desde las BS y al mismo tiempo que funciona como ancla para de movilidad durante los cambios entre LTE y otras tecnologías 2G o 3G.
- **PDN Gateway (PGW):** Es un nodo a través del cual se conecta el EPC a redes de datos externas.
- **Home Subscriber Server (HSS):** Es una base de datos cuya función contiene toda la información relativa a los usuarios y suscriptores y brinda funcionalidades de apoyo al MME.

- Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): Decide las políticas y asigna cada servicio y/o flujo de usuario.

Las futuras arquitecturas para las redes móviles deben ser capaces de soportar no solo el enorme crecimiento esperado de los dispositivos móviles, pero principalmente el tráfico de datos. Tal es el caso de la arquitectura de red 5G, donde se implementa una gran cantidad de (RRH)/RRU en una gran área geográfica, todos conectados a través de enlaces de fibra óptica en la infraestructura de una red RAN. Además, consiste en separar los RRH y BBU para obtener un desempeño más eficiente en la recepción de una mayor cantidad de datos y su procesamiento. En este caso, la (BBU, unidad de banda base) y el (RRH/RRU, controladores de radio remotos) son instalados en sitios remotos separados a kilómetros de distancia. Esta nueva configuración crea un nuevo segmento de transporte entre los RRH y las BBU, lo que se denomina Fronthaul.

La transmisión se basa en comunicaciones digitales como la interfaz de radio pública común (CPRI) o Ethernet. CPRI es una interfaz digital estándar para enlaces de datos en serie de gran ancho de banda, derivado de la cooperación entre varios proveedores de radio, como son: Ericsson, Huawei, Alcatel-Lucent, NEC, etc. Este sistema que transporta una señal analógica en forma digital; por lo tanto, se puede usar para 2G, 3G o 4G e incluso WiMAX, una red de transmisión óptica (OTN), red óptica pasiva (PON), microondas y sistemas basados en longitud de onda son candidatos potenciales para transporte CPRI [45].

La distancia entre el RRH y la BBU se puede extender hasta 40 km, sin embargo; para distancias menores se pueden utilizar conexiones de microondas, pero si la transmisión es a través de canales inalámbricos, los límites de capacidad y otras restricciones deben ser considerados. Para el enlace descendente (Downstream), las RRU transmiten señales de RF a los UE, mientras que en el enlace ascendente (Upstream), las RRU transportan señales de banda base desde los UE al grupo de BBU para su posterior procesamiento.

El grupo de BBU está compuesto por BBU's que funcionan como estaciones base virtuales para procesar señales de banda base y optimizar la asignación de recursos de red para una RRU o un conjunto de RRU. Los enlaces de fronthaul pueden constituir diferentes tecnologías, ya sean, alámbricas e inalámbricas. La gran ventaja de esta arquitectura es que se puede agregar o actualizar fácilmente cualquier número de BBU en esta nube dependiendo de las necesidades y planificación celular del operador de red [30].

En la Figura 1.21 se describe una arquitectura RAN centralizada (C-RAN) para un sistema 4G/5G.

La función del RRH es transmitir señales de radiofrecuencia a los equipos de usuario (UE) en un enlace Downstream y reenviar las señales de banda base de los UE al conjunto de BBU en el enlace Upstream. Las ventajas del RRH son simples, ya que es de bajo costo y se pueden implementar e instalar fácilmente en un nivel muy alta densidad en escenarios a gran escala.

El BBU está ubicado en un sitio centralizado y funcionan como estaciones base para procesar señales de banda base y optimizar la asignación de recursos de radio. En el grupo de BBU's, el tráfico de datos y la información de control de los servicios móviles se pueden compartir por completo. Como resultado, se puede formar un sistema MIMO virtual desde la perspectiva del grupo BBU, lo que permite multiplexación de más flujos en el mismo canal sin interferencia mutua.

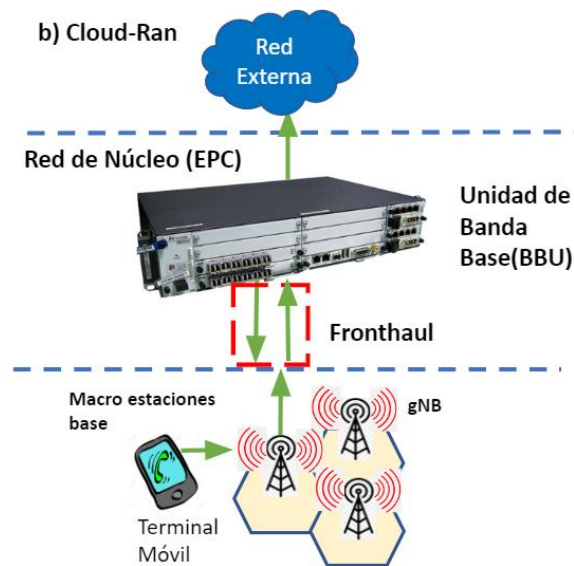


Figura 1.21. Arquitectura de C-RAN con fronthaul de red 4G y 5G [45].

CPRI es una interfaz de radio de protocolo común (common protocol radio interface) que es el modo de transmisión más común entre la BBU y la RRH, ya que transporta señales de banda base de muestra. Por lo tanto, las demandas de capacidad para la transmisión CPRI nativa se basan en varios factores. El ancho de banda del fronthaul es proporcional al ancho de banda disponible del sistema, el número de antenas y la resolución de cuantificación (el número de bits por muestra I o Q es de 8 a 20 bits para LTE y en cualquier caso depende de la carga de la celda y de las tasas de datos del usuario. Por ejemplo, macrositios generalmente tienen de tres a seis sectores que combinan diferentes RAT móviles; es decir, 2G, 3G y 4G en múltiples frecuencias [45].

La arquitectura cloud-RAN o conocida como (C-RAN) propone reducir la funcionalidad de las estaciones base (BS) a llamados cabezales de radio remotos (RRH o RRU), que solo realizan procesamiento analógico y enviar muestras digitales entre el RRH y las unidades centralizadas de banda base (BBU). Una arquitectura tan centralizada ya se utiliza en redes 4G y está activamente siendo considerado para futuras redes móviles ya que ofrece varias ventajas. Primero entre estas ventajas se encuentra la reducción de los gastos operativos y de capital. Al reducir el tamaño, los sitios pueden ser más pequeños y el consumo de energía puede reducirse, particularmente porque no se requiere enfriamiento activo. Como todas las BBU están ubicadas en una misma ubicación centralizada, el mantenimiento también se vuelve mucho más fácil.

La centralización de las BBU hace que las técnicas de procesamiento cooperativo sean mucho más fáciles de implementar, como el multipunto coordinado (CoMP) o la detección turbo multipunto (MPTD). Con lo anterior, las BBUs son mucho más fáciles de implementar ya que todas las señales se reenvían y procesan en una BBU centralizada. Estos beneficios de la arquitectura C-RAN tienen consigo desarrollar una red de transporte altamente confiable entre las RRHs y BBUs, para enviar información digital importante entre estas componentes. Dicha red de transporte se conoce comúnmente como la red fronthaul (FH). Para permitir un procesamiento eficiente de la red, el fronthaul debe ofrecer un gran capacidad y baja latencia y un bajo jitter. De hecho, si no se dimensiona correctamente, el fronthaul podría convertirse en un cuello de botella para el desempeño de futuras redes. Se han investigado varios enfoques para reducir estos requisitos, por

ejemplo, comprimir los datos, reduciendo costos mediante una optimización conjunta de la red RAN y BH/FH, etc. [45].

1.5.3 Fronthaul óptico pasivo y activo

Una opción bastante interesante y viable de una red de transporte de fronthaul es el empleo de enlaces de fibra óptica. Actualmente este tipo de fronthaul óptico es el más utilizado en el despliegue de arquitecturas C-RAN en redes 5G en todo el mundo, debido a que este tipo de transporte óptico ofrece bajas latencias y menores pérdidas en longitudes de enlace de 20 a 40 km. En ese sentido, surgen diferentes opciones de como instalar un fronthaul óptico entre los que destacan las versiones activa y pasiva.

El empleo de transpondedores son un elemento principal que marca la diferencia en la solución de fronthaul activa y este es capaz de realizar conversiones de longitud de onda, lo que garantiza una transmisión más eficiente a lo largo de la fibra óptica. Esto resulta bastante útil, puesto que permite que los equipos de red transmisores y receptores en los extremos del fronthaul óptico (RRH y BBU) operen con una longitud de onda en la banda C donde la atenuación de la fibra óptica es mínima, el cual corresponde a longitudes de onda alrededor de 1510nm. El transpondedor a través de la conversión de longitud de onda es capaz de acondicionar señales que se transmiten inicialmente desde los equipos RRH y BBU a 1310nm y transformarlas a señales ubicadas en la banda C, banda que los sistemas WDM aceptan, las cuales están ubicadas alrededor de los 1550 nm [4-6]. La configuración de una red fronthaul activa se muestra en la Figura 1.22. Una vez que las señales se encuentran dentro de la banda C, el MUX/DEMUX las multiplexa para enviar diferentes señales a través de la misma fibra óptica; este mismo elemento por su principio de funcionamiento puede operar de forma inversa, es decir, de una señal compuesta de varias longitudes de onda en banda C, separa las distintas componentes y las convierte a señales de 1310nm. Las señales individuales transmitidas en la fibra óptica dentro de la banda C representan los canales del sistema WDM [46].

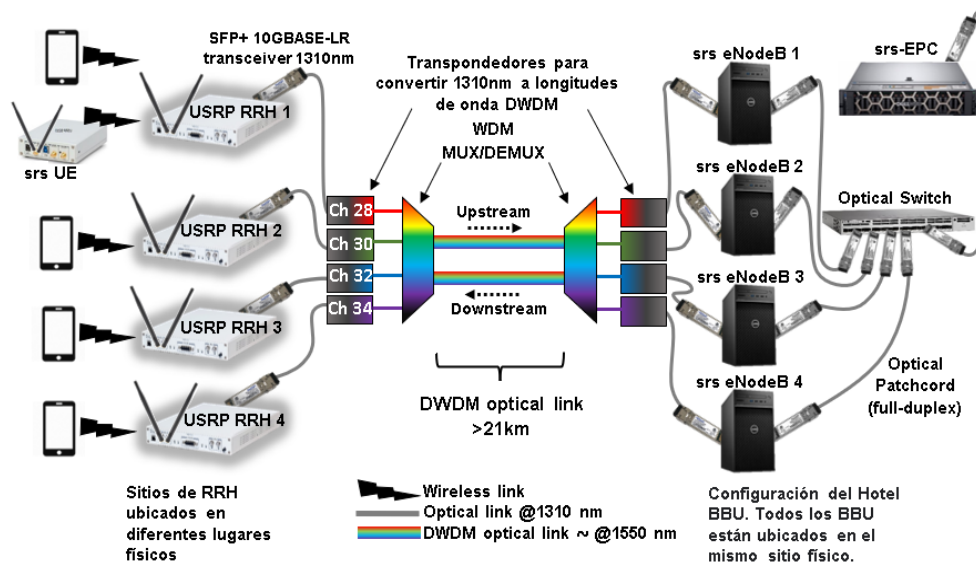


Figura 1.22. Arquitectura del fronthaul en configuración activa.[46]

La configuración pasiva, a diferencia de la solución anterior consiste en que los equipos RRH y BBU transmiten directamente las señales a 1550nm empleando para ello SFP+ coloreados operando directamente en banda C en lugar de SFP+ grises como en la solución activa, los cuales permiten la conectividad directa entre los equipos eNodeB y USRP sin la necesidad de realizar algún cambio en la longitud de onda, en otras palabras, no se requieren equipos activos como los transpondedores. La ventaja que exhibe esta solución pasiva es principalmente económica, ya que suprime el uso de los transpondedores y los correspondientes pares de transeptores, aunque se emite una etapa de regeneración de señales y amplificación que aportan los transpondedores, restringiendo de esta manera el máximo alcance en longitud ofrecido inicialmente por el fronthaul activo. Aquí el enlace se realiza para cada canal WDM, directamente entre los componentes principales de la red celular, sin usar equipo sofisticado de transporte óptico [7-9]. La configuración de fronthaul pasiva se muestra en la Figura 1.23 [46].

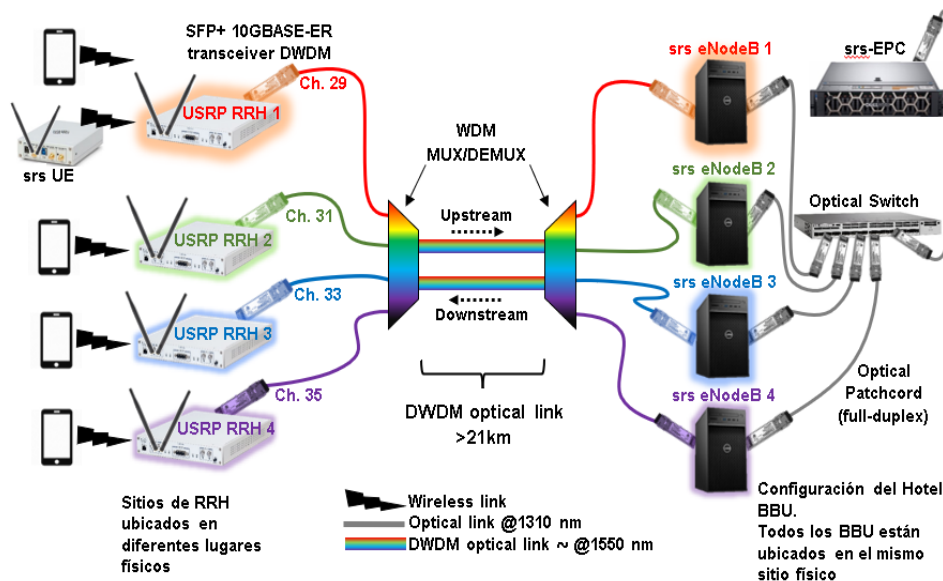


Figura 1.23. Arquitectura del fronthaul en configuración pasiva [46].

El presente escrito se basa en parte en la participación que se tuvo en un proyecto del Instituto de Ingeniería en colaboración con la Facultad de Ingeniería y patrocinado por el gobierno de la Ciudad de México titulado: "Desarrollo de infraestructura para la implementación de una red celular 5G utilizando un fronthaul basado en multiplexación por división de longitud de onda en fibra óptica", con número de convenio SECTEI/200/2019. Como resultado de este proyecto y de la elaboración de esta tesis se ha obtenido una publicación titulada: "Análisis de un fronthaul óptico activo y pasivo con DWDM para arquitecturas C-RAN 4G/5G coexistentes basadas en SDR" en la revista indizada en JCR Optical Engineering con enlace de acceso: <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.10.108103>.

CAPÍTULO 2

2 CARACTERIZACIÓN DEL FRONTHAUL DE FIBRA ÓPTICA

En este capítulo se presenta la caracterización de la arquitectura del fronthaul óptico de fibra óptica sin perturbaciones. Además, se describe como se formó el fronthaul para la realización de este proyecto a partir de la unión de tres diferentes enlaces de fibra óptica con longitudes de 8.4 km, 3.3 km y 10 km, para así tener un total de 21.7 Km de fronthaul óptico. Con el fin de conocer las pérdidas de potencia óptica acumuladas que cada sección de fibra posee a lo largo del fronthaul se realizan mediciones de pérdidas de potencia óptica empleando tres equipos, como lo son un OTDR, un medidor de potencia óptica, y un equipo BER tester. Al final se realizará un comparativo con las mediciones realizadas entre estos equipos, y se obtiene el presupuesto de potencia del fronthaul completo.

2.1 ARQUITECTURA DEL FRONTHAUL ÓPTICO

El rápido avance en la tecnología de comunicaciones móviles e inalámbricas van en aumento del número de usuarios y de sus expectativas de calidad de servicio. Esto a ha llevado a un aumento exponencial en la cantidad de tráfico de la red y los operadores deben proponer nuevas tecnologías que se integrarán en la próxima generación de redes móviles, por ejemplo, el fronthaul óptico, el cual es considerado en este proyecto junto con un enlace de fibra óptica con tecnología DWDM. Dicho enlace óptico, conecta las unidades de banda base (BBU) con sus respectivas unidades de radio remota (RRH) usando diferentes canales DWDM. El ejemplo de la Figura 2.1 muestra un diagrama de red fronthaul con elementos que lo conforman. Sin embargo, La tarea principal de la red es entregar señales altamente sensibles al retardo de 1 ms, por lo que se vuelve más desafiante en implementaciones 5G y se espera que también operen con subtramas más cortas. Esto introduce desafíos de latencia en la red fronthaul [47].

La fibra óptica se ha implementado cada vez más en redes móviles, debido a su gran ancho de banda, fácil mantenimiento y bajo costo. Entonces, los operadores móviles también tienen que reducir el costo de la red, para ser energéticamente eficiente y resistente a los desastres naturales, así como la eficiencia espectral se vuelve importante para enfrentar los desafíos de las futuras tendencias de tráfico.

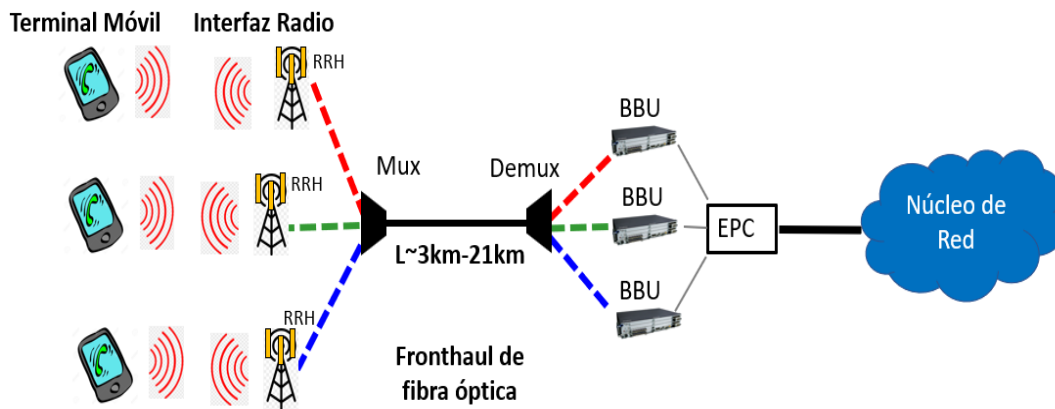


Figura 2.1. Diagrama de un sistema C-RAN con fronthaul de fibra óptica. [47]

Los requisitos claves para una red 5G es que deben de ser capaz de gestionar un alto volumen de tráfico, para una máxima velocidad de datos. Además, tiene que permitir un número masivo de dispositivos que se conectarán simultáneamente a la red para admitir todo el tiempo servicios en la nube. Varias áreas tecnológicas posibles pueden desempeñar un papel en el cumplimiento de estos requisitos, tales como (MIMO, múltiples entradas múltiples salidas) para la cancelación de interferencias y que numerosas antenas sirvan simultáneamente para un número de usuarios en el mismo recurso de tiempo-frecuencia.

En las redes móviles actuales, existen tres tipos de redes de transporte llamadas xHaul, que son (Backhaul, Midhaul y Fronthaul). El Backhaul es un enlace físico entre la red central y las BS en una arquitectura distribuida, aunque la centralización y el Fronthaul juegan un papel importante en las arquitecturas convergentes. Además, Backhaul proporciona un nivel fundamental en la red heterogénea y la convergencia de tecnologías. El Fronthaul es el enlace físico entre la BBU y los RRH/RRU en un RAN centralizada, mientras que, Midhaul es el vínculo entre una BBU y su (RU, Unidad de Radio), proporciona una mayor proximidad como último enlace frente a los usuarios móviles [47].

Sin embargo, para la misma transmisión de información entre Fronthaul, Midhaul y Backhaul, es probable que las velocidades de datos entre Backhaul y Midhaul sean muy similares, pero la tasa de datos en fronthaul, a pesar de la mejora proporcionada por eCPRI, es probable que sea unas diez veces mayor que en Midhaul y Backhaul. En un entorno urbano denso, la capacidad de transporte fronthaul requiere una latencia muy baja de aproximadamente 100 μ s, en comparación con Midhaul es aproximadamente 5 ms y Backhaul es aproximadamente de 10 ms.

El modelo de RAN centralizada (C-RAN) es un concepto arquitectónico donde todas las funciones de banda base se realizan en una CU y el procesamiento de señales centralizado reduce en gran medida la cantidad de equipos de sitio necesarios para cubrir las mismas áreas por unas estaciones base distribuidas. Además, ha ido evolucionando en los últimos años a medida que la tecnología ha madurado. Por ejemplo, la división funcional CU/DU y la interfaz fronthaul de próxima generación se han introducido en C-RAN para cumplir mejor con los requisitos de 5G, por ejemplo, mayor frecuencia, mayor ancho de banda, mayor número de antenas y menor latencia [47].

El modelo de estación base distribuida conduce al C-RAN centralizado y cooperativo a un concepto arquitectónico donde parte de las funciones de banda base se realizan en la (CU, unidad central), y la (DU, unidad distribuida). El procesamiento de señales centralizado reduce en gran medida la

cantidad de equipos necesarios en sitio para cubrir las mismas áreas servidas por una red distribuida de estaciones base. El transmisor de radio cooperativo, combinado con el esquema de antena distribuida proporcionada por RRH proporciona un espectro espectral de más alta eficiencia y coordinación de interferencias [48]. En la Figura 2.2 se observa una arquitectura 5G C-RAN típica, cuya unidad de banda base a menudo comprende un CU y una o más DU.

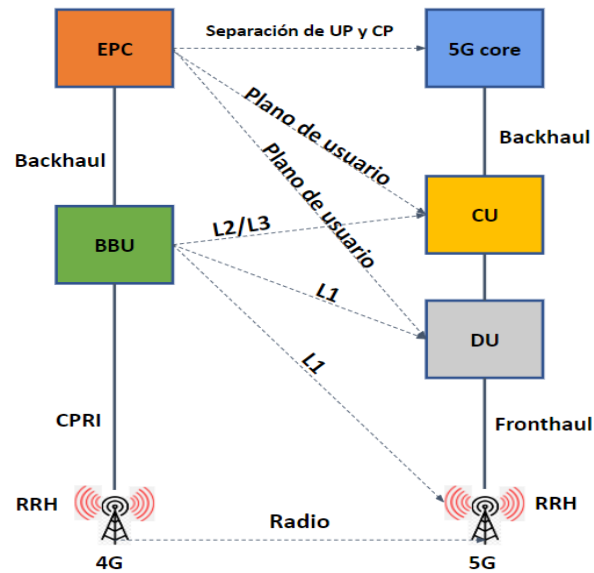


Figura 2.2 Evolución de BBU 4G de nodo único a arquitectura CU/DU separada en 5G [48].

De acuerdo con lo mencionado anteriormente con respecto a las arquitecturas C-RAN, la función principal del fronthaul es la interconexión de un sitio que contiene las RRH con otro sitio que centraliza las BBU, de tal forma que estos dispositivos de la red interconectados se consideren a sí mismos como un enlace punto a punto en su funcionamiento básico.

Para verificar la transmisión de canales WDM a través del enlace óptico, en nuestro proyecto de arquitectura C-RAN se han unido tres diferentes enlaces de fibra, que van desde 8.4 km, 3.3 km y 10 km, para conformar un fronthaul óptico con un total de 21.7 Km de longitud. también se realiza un estudio de las pérdidas de potencia óptica acumuladas que cada uno de estos 3 enlaces posee a lo largo del fronthaul. La Figura 2.3 muestra el trazo de la trayectoria de la fibra óptica utilizada como fronthaul y que fue instalada del Instituto de Ingeniería (IINGEN) hasta la Facultad de Ingeniería (FI). Ambas entidades se encuentran ubicadas dentro de Ciudad Universitaria. El primer y segundo enlace de fibra óptica denominados conjunto 1 y conjunto 2, son dos enlaces que comunican la FI y el IINGEN, mientras que el conjunto tres de fibra óptica empleado es un carrete de fibra óptica ubicado en el laboratorio de Telecomunicaciones del IINGEN.

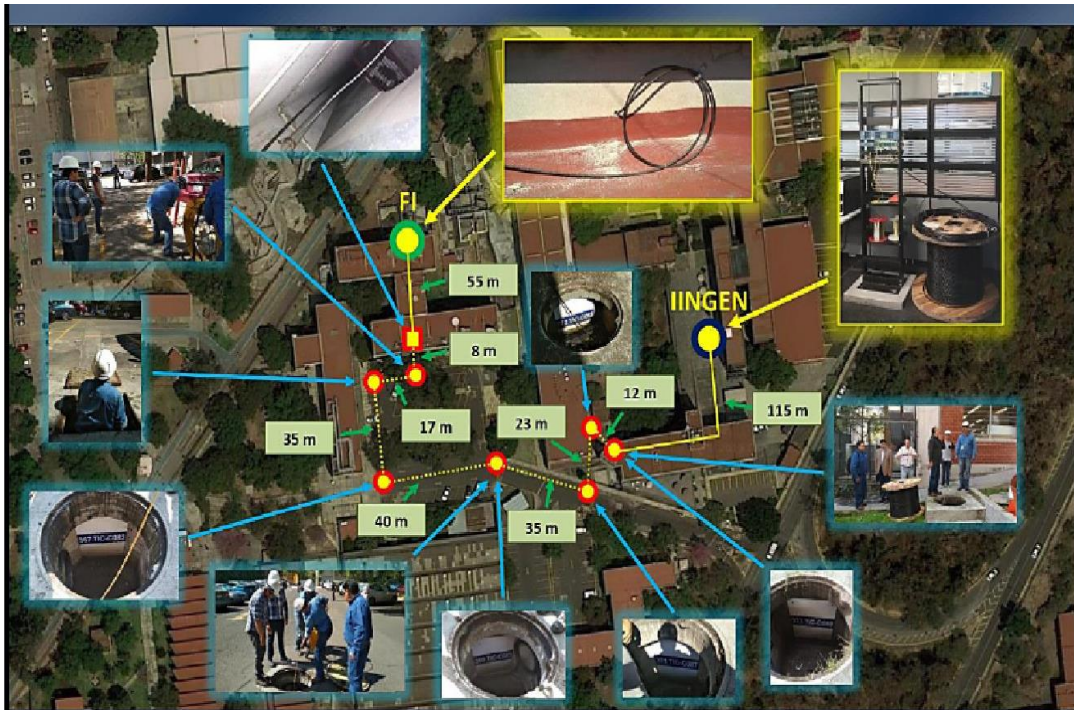


Figura 2.3 Arquitectura del tendido de fibra óptica para enlazar la FI y el IINGEN. [46]

Una vez que se realiza el tendido de la fibra óptica se procede a instalar la infraestructura necesaria para llevar a cabo la caracterización del enlace IINGEN-FI. En el caso del laboratorio de Telecomunicaciones del IINGEN solamente se instala un patch panel, mientras que en el laboratorio de radiofrecuencia de la FI fue necesario instalar un rack junto con su respectivo patch panel. En la Figura 2.4 se pueden apreciar imágenes de los racks utilizados en el laboratorio del IINGEN.

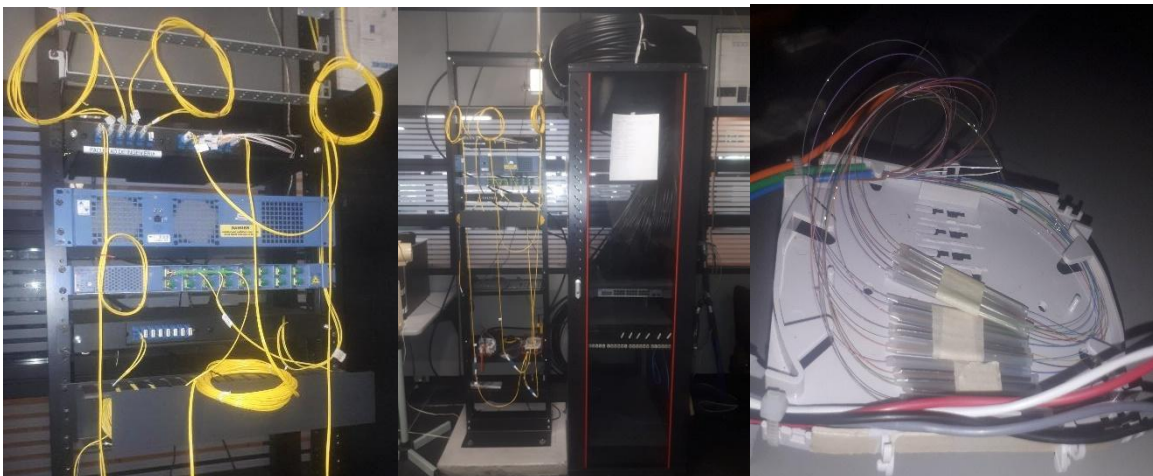


Figura 2.4 Racks instalados y empalmes realizados en la del IINGEN para el Fronthaul Óptico.

El enlace de fibra óptica que une la FI con el IINGEN consiste en un cable grueso de 549 metros que en su interior contienen 4 cables internos de color azul, verde, café, y gris, los cuales tienen en su interior 12 hilos de fibra óptica cada uno. Por lo tanto, tomando en cuenta los 12 hilos de fibra óptica de cada uno de estos 4 cables internos se tiene como resultado un total de 48 hilos de fibra óptica de 549 metros que conectan la FI y el IINGEN. Como se ha mencionado, dentro de cada cable interno hay 12 hilos de fibras ópticas que también poseen diferente color, tal como se observa en la Figura 2.5 que corresponde al caso del cable interno de color azul. Por otro lado, si se organizan estos 12 hilos de fibra óptica en pares para poder establecer una comunicación full-dúplex, entonces se cuentan con 6 pares de hilos de fibra óptica por cada cable interno tal como se indica en la Figura 2.5 para el cable interno de color azul respectivamente.

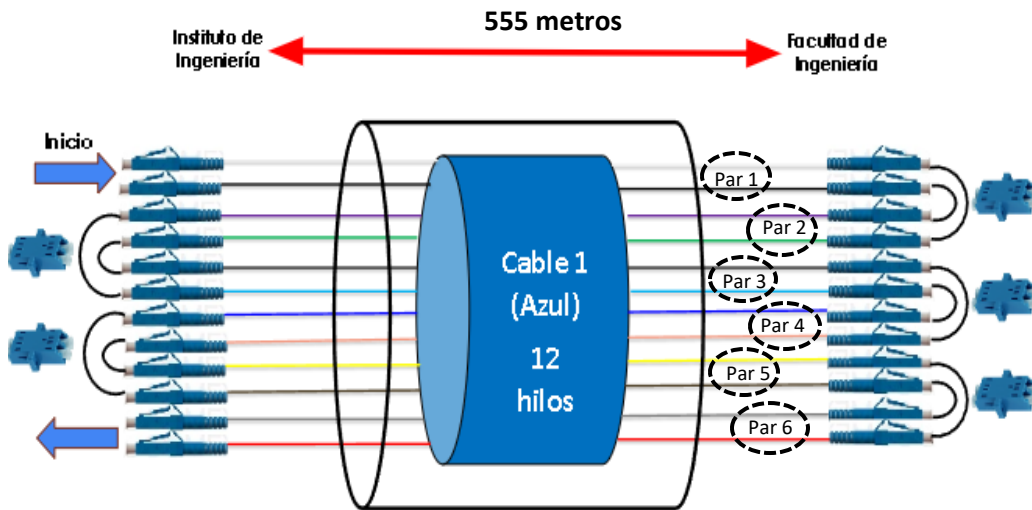


Figura 2.5 Arquitectura del enlace de fibra formado por el conjunto 1 de 3.3 Km.

Si los 6 pares de hilos de fibra óptica se interconectan entre sí utilizando conectores mecánicos tal como se muestra en la Figura 2.5, entonces se puede obtener un enlace full-dúplex entre la FI y el IINGEN de $6 \times 555\text{m} = 3.33\text{km}$, el cual se le designa con el nombre de conjunto 1.

El conjunto dos es un enlace formado por los 36 hilos de fibra óptica que se encuentra en los restantes cables internos de color verde, café, y gris, tal como se puede observar en la Figura 2.6. De la misma manera, si se consideran pares de hilos de fibra óptica, estos 36 hilos se convierten en 18 pares de hilos que conforman un enlace full-dúplex de fibra óptica entre la FI y el IINGEN. Estos 18 pares de hilos al interconectarse por medio de empalmes de fusión y conectores mecánicos como se muestra en la Figura 2.6, entonces se puede contar con un enlace de $18 \times 555\text{ m} = 10\text{ Km}$ de un enlace de fibra full-dúplex entre la FI y el IINGEN respectivamente.

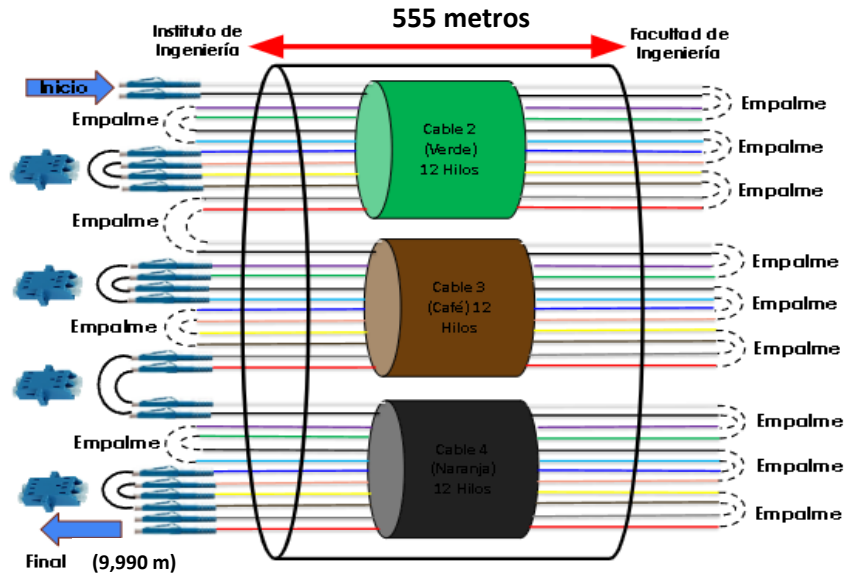


Figura 2.6 Arquitectura del enlace de fibra formado por el conjunto 2 de 10 Km.

Después se decide incrementar aún más la distancia del fronthaul con la finalidad de investigar sus limitaciones y conocer su desempeño cuando el enlace alcanza los 20 km. Para ello, se realiza un enlace adicional partiendo de un carrete de 350 m de longitud que se encontraba disponible en el laboratorio cuya distribución de hilos de fibra óptica se muestra en la Figura 2.7.

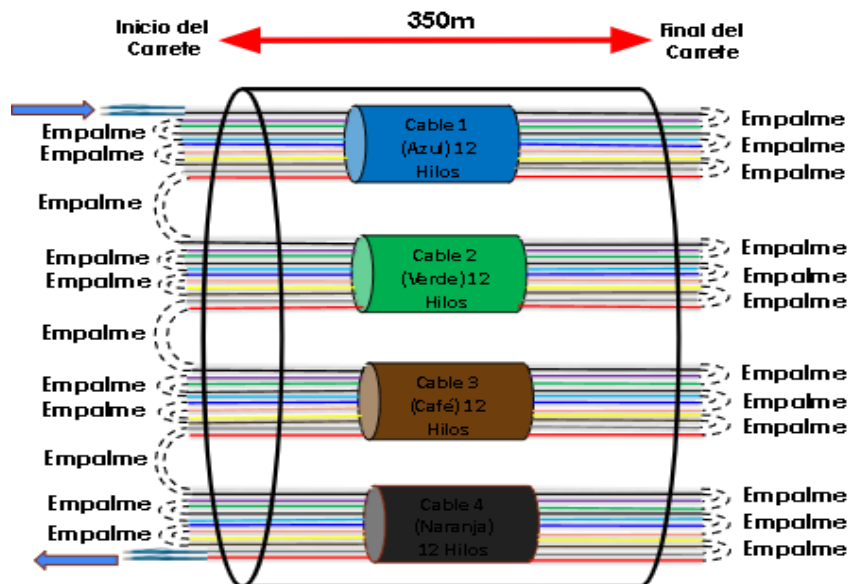


Figura 2.7 Arquitectura del enlace de fibra formado por el conjunto 3 de 8.4 Km.

Este carrete permite obtener hasta 24 pares de hilos de fibra óptica y mediante su interconexión por medio de empalmes de fusión, se puede obtener un enlace full-dúplex de fibra óptica de 24 x 350 m = 8.4 km, el cual se le ha nombrado conjunto 3.

Una vez teniendo definido los 3 enlaces de fibra full-dúplex a utilizar en el fronthaul, se pueden unir estos a través de conectores mecánicos para formar un enlace total de 21 km aproximadamente. En las Figura 2.8 y 2.9 se muestra un diagrama de cómo se realiza esta interconexión del conjunto 1 (3 km), conjunto 2 (10 km), y conjunto 3 (8 km) en el laboratorio del IINGEN en una configuración de fronthaul activa y pasiva respectivamente.

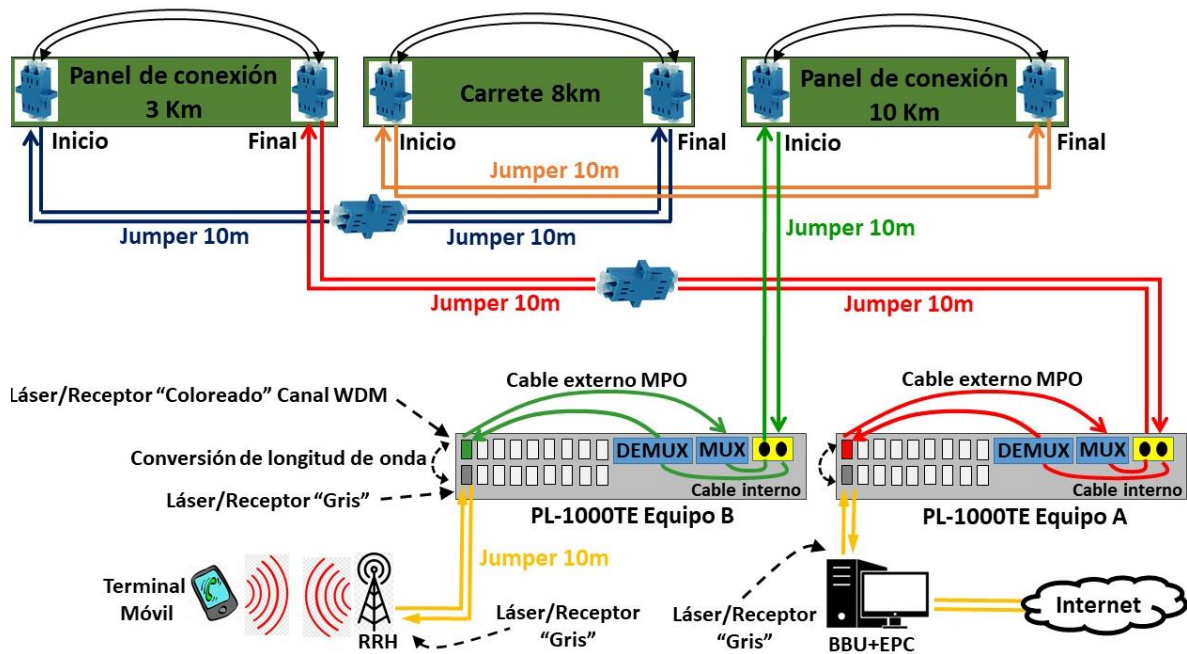


Figura 2.8 Arquitectura del Fronthaul Óptico Activo para 21Km.

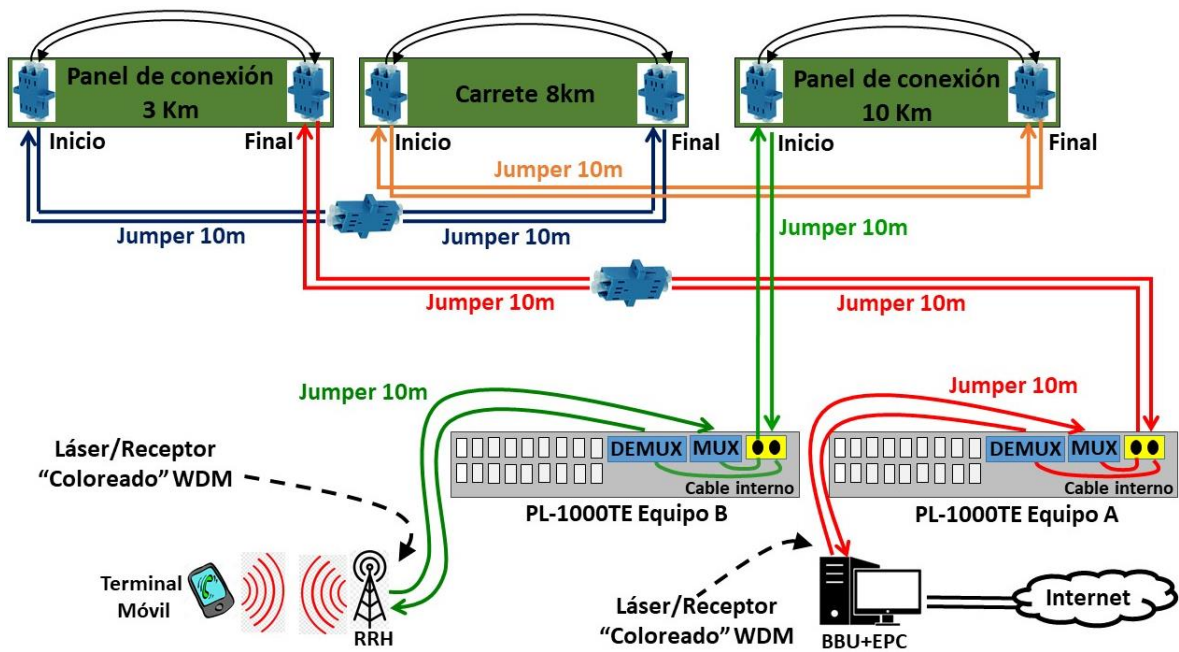


Figura 2.9 Arquitectura del Fronthaul Óptico Pasivo para 21Km.

2.1.1 Configuración Activa

Para el fronthaul óptico en configuración activa se requieren el uso de dos transpondedores colocados al inicio y al final del enlace de fibra de 21km. Ambos transpondedores son nombrados PL-1000TE Equipo A y PL-1000TE Equipo B en la Figura 2.8. Como se ha mencionado anteriormente, estos transpondedores son capaces de realizar conversiones de longitudes de onda. Estos equipos reciben las señales ópticas “grises” emitidas a 1310nm provenientes de los RRHs y BBUs y las convierten a señales ópticas dentro de la banda C alrededor de 1550nm para luego transmitir las a través del fronthaul óptico. Los transmisores láser que emiten a 1550nm se encuentran en los transceptores SFP+ DWDM que son insertados en los equipos transpondedores. En particular, estos transceptores SFP+ WDM son los que se encargan de la transmisión y recepción de canales WDM dentro del esquema de fronthaul activo. Como se muestra en la Figura 2.9 los equipos ópticos PL-1000TE de la marca Packet Light, cuentan con un MUX/DEMUX con la posibilidad de multiplexar hasta 8 canales WDM dentro del fronthaul óptico. Para la configuración activa se utilizan los canales WDM: 28, 30, 32, y 34 respectivamente. Estos canales WDM son provistos por los transceptores SFP+ WDM del fabricante PacketLight.

En la Figura 2.10 el equipo MTS-5800 genera una señal a 1310nm a través del uso de un transceptor SFP+ “gris” insertado en su interior. Esta señal gris emitida a 1310nm se introduce al transpondedor PL1000TE-B, y luego dicho transpondedor convierte dicha señal óptica de 1310nm a un canal WDM con ayuda de un transceptor SFP+ “coloreado” que emite alrededor de 1550nm. Posteriormente, este canal WDM es introducido al MUX que contiene el transpondedor PL1000TE-B para transmitirlo a través del fronthaul de 21km. Al final, luego de recorrer los 21km del fronthaul, el canal WDM es introducido al DEMUX que posee el equipo transpondedor PL-1000TE A para separar esta señal de otros canales WDM que pudieran estar viajando con ella. Luego el canal WDM “coloreado” ubicado alrededor de 1550nm puede ser convertido a una señal gris a 1310nm por el transpondedor PL-1000TE B. El analizador de espectros ópticos (OSA) puede medir el espectro de cada canal WDM al inicio del fronthaul justo antes del MUX del transpondedor PL1000TE-B y al final del fronthaul justo después del DEMUX del transpondedor PL1000TE-A tal como se indica en la Figura 2.10.

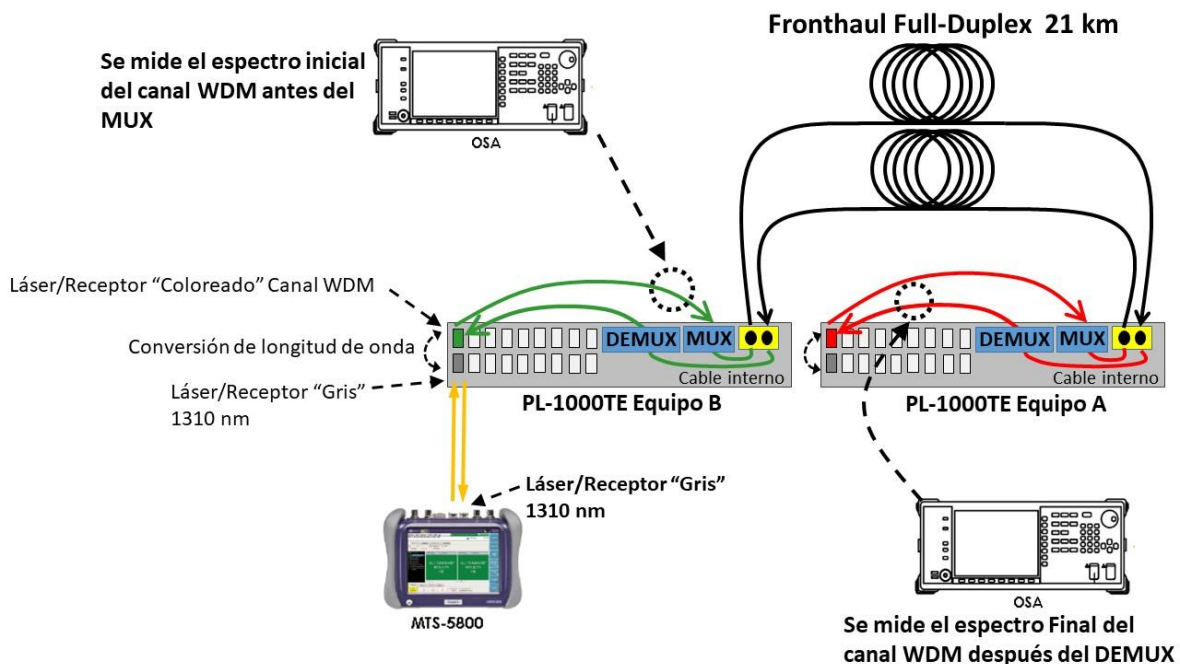


Figura 2.10 Medición del espectro de canales WDM al inicio y al final del fronthaul activo con el OSA.

Para la caracterización completa de todos los SFP+ WDM usados en el fronthaul activo, es necesario medir el espectro de cada SFP+ para corroborar su longitud de onda de emisión y su ancho de línea. Estas mediciones se realizan con el Analizador de Espectros Óptico (OSA). En la Figura 2.10 se muestra la conexión del equipo PL-1000TE a un OSA con el fin de medir el espectro de cada canal WDM transmitido en el fronthaul. En este sentido, se realizó la medición de la frecuencia central del espectro emitido por los SFP+ WDM para los canales 28, 30, 32 y 34, y también para comprobar que éstos operan dentro de los rangos nominales de potencia especificados por el fabricante.

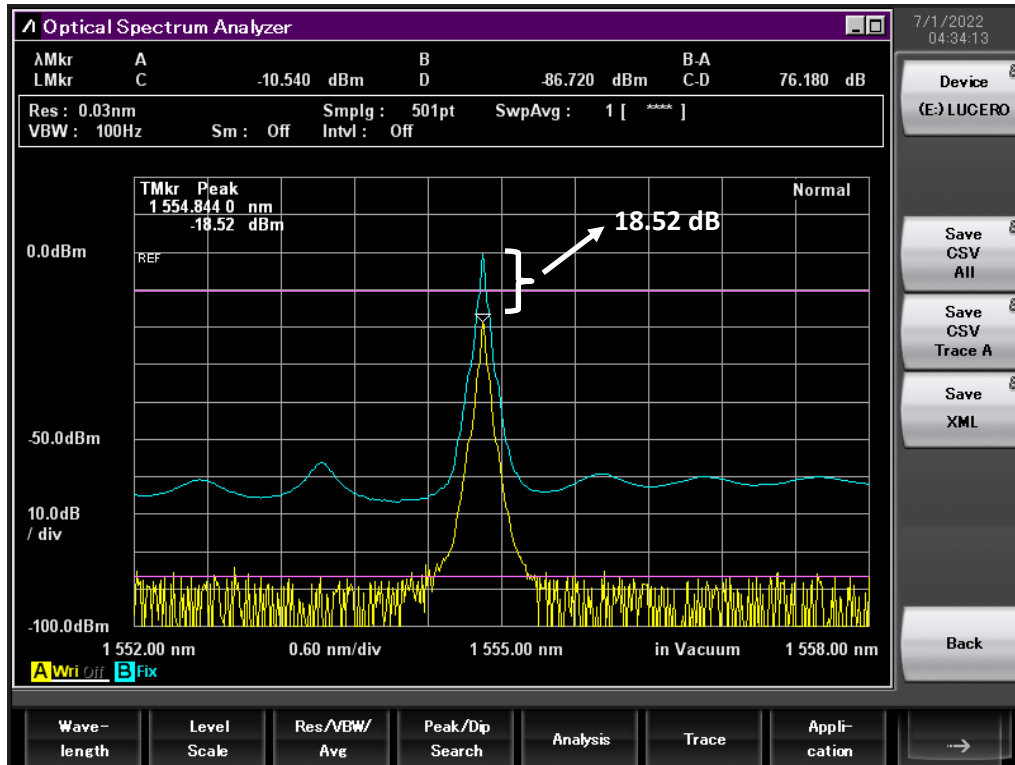


Figura 2.11 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal 28.

La Figura 2.11 se puede apreciar el espectro de una señal WDM emitida con longitud de onda de 1554.84 nm correspondiente al canal WDM 28 y con un ancho de línea de 0.03nm, muy similares a los valores mencionados por el fabricante. También se puede apreciar dos señales de color azul y amarillo superpuestas en la pantalla del OSA, en donde la señal de color azul se refiere al espectro del canal WDM 28 en el inicio del fronthaul justo antes del MUX, mientras que la señal de color amarillo se refiere al espectro de este mismo canal WDM 28 medido al final del fronthaul de 21km justo después del DEMUX. La diferencia en potencia pico entre estas dos señales azul y amarilla tomadas al inicio y al final del fronthaul nos proporciona un valor de 18.52 dB, que corresponde a la pérdida de potencia que tiene el canal WDM 28 cuando se transmite a través de los 21km del fronthaul y cuando pasa por los MUX/DEMUX de los 2 transpondedores usados en el fronthaul.

Cabe mencionar que este sistema WDM está planeado con un espaciamiento de 200 GHz, sin embargo, el espaciamiento diseñado por el fabricante del transpondedor PL-1000TE puede soportar espaciamientos entre canales WDM de 100 GHz. Por otro lado, en una fuente láser WDM, entre más angosto sea el ancho de línea, más eficiente es la fuente de luz, ya que también le permitiría

acercarse espectralmente a otro canal WDM, lo que significaría más canales dentro del mismo espectro y más capacidad en el sistema.

El ancho de línea de una señal óptica es el ancho espectral que ocupa esa señal y es un parámetro importante ya que nos brinda información acerca de la estructura y calidad de láser que se emplea como fuente de luz coherente. Está linealmente relacionado con el retardo que sufren las ondas de luz que se propagan en un medio dispersivo, por lo que su medición es relevante.

Las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14, muestran los espectros medidos por el OSA de los canales 30, 32 y 34 correspondientes a las longitudes de onda de emisión 1553.33nm, 1551.72nm, y 1550.11nm respectivamente. De la misma manera que en el canal 28, los espectros de los demás canales WDM se midieron al inicio y al final del fronthaul óptico de 21km.

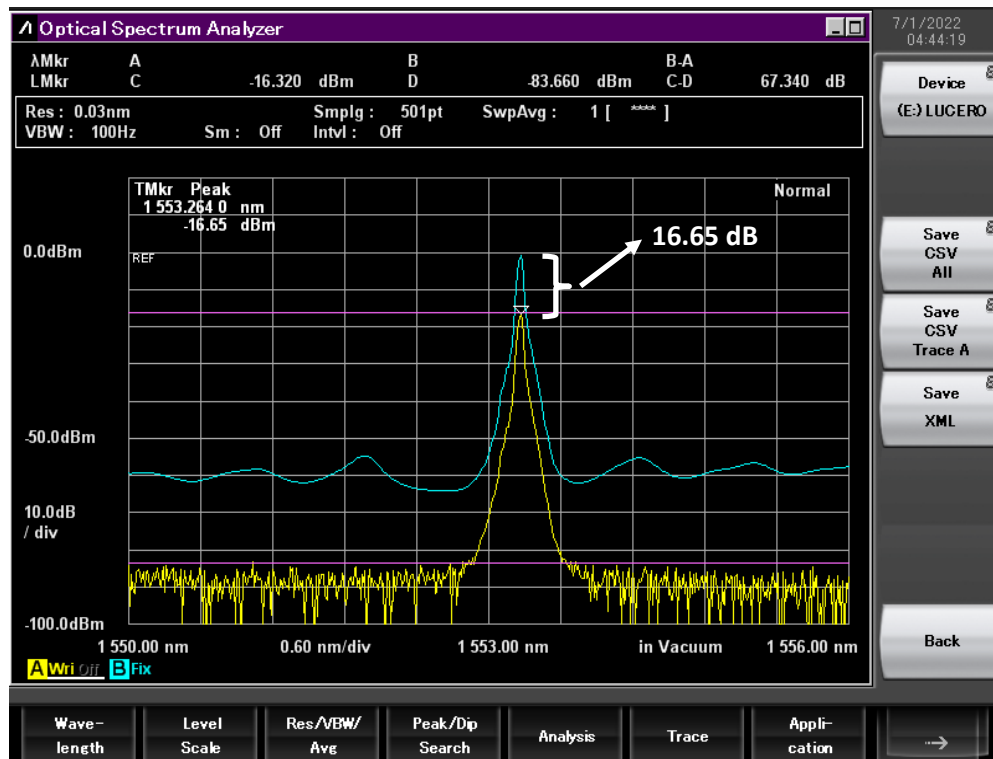


Figura 2.12 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal 30.

De acuerdo con los espectros de los canales 28, 30, 32, y 34, estos poseen un ancho de línea que no supera el valor de 0.1 nm y sus longitudes de onda centrales varían alrededor de 0.03nm con respecto a los valores indicados por el fabricante, por lo que se puede verificar el correcto funcionamiento de los SFP+ WDM empleados en el proyecto. Asimismo, se puede observar que, para los espectros de los canales 30, 32, y 34, la diferencia de potencia pico entre la curva azul y la curva amarilla correspondientes a los espectros tomados al inicio y al final del fronthaul arrojan los siguientes valores: 16.55 dB, 16.77 dB y 16.31 dB para los canales 30, 32, y 34 respectivamente. Estos valores corresponden a la pérdida de potencia que tienen los canales WDM 30, 32, y 34 cuando se transmiten a través de los 21km del fronthaul y cuando pasan por los MUX/DEMUX de los 2 transpondedores usados en el fronthaul.

2.1.2 Configuración Pasiva

Para la configuración pasiva, únicamente se considera el MUX/DEMUX de los equipos PL-1000TE y no se considera la función de conversión de longitud de onda de 1310nm a 1550nm que contienen los equipos transpondedores, tal como se describió anteriormente en la Figura 2.10.

De acuerdo con la Figura 2.15 el equipo MTS-5800 genera una señal “coloreada” alrededor de 1550 nm en lugar de una señal “gris” a 1310 nm. Esto se puede hacer insertando en el equipo MTS-5800 un transceptor “coloreado” SFP+ WDM. Posteriormente, este canal WDM es introducido al MUX que contiene el transpondedor PL-1000TE A para transmitirlo a través del fronthaul de 21km. Al final, luego de recorrer los 21 km del fronthaul, el canal WDM es introducido al DEMUX que posee el equipo transpondedor PL-1000TE B para separar esta señal de otros canales WDM que pudieran estar viajando con ella. Luego el canal WDM “coloreado” puede insertarse a un equipo RRH o BBU sin necesidad de convertirlo a una señal “gris”. De la misma manera, el analizador de espectros ópticos OSA puede medir el espectro de cada canal WDM al inicio del fronthaul justo antes del MUX del transpondedor PL-1000TE A y al final del fronthaul justo después del DEMUX del transpondedor PL-1000TE B respectivamente.

La principal característica de esta solución pasiva son los SFP+ WDM los cuales permiten la conectividad directa entre los equipos BBU y RRH sin la necesidad de realizar alguna conversión en la longitud de onda por parte de los transpondedores. La Tabla 1.1 del capítulo 1 muestra los parámetros de los SFP+ DWDM “coloreados” empleados en esta arquitectura pasiva los cuales corresponden a los canales WDM 29, 31, 33, y 35. Los canales WDM 29 y 33 son provistos por los transceptores SFP+ WDM del fabricante Solid Optics, y los canales 31 y 35 son provistos por los transceptores SFP+ WDM del fabricante Smart Optics respectivamente.

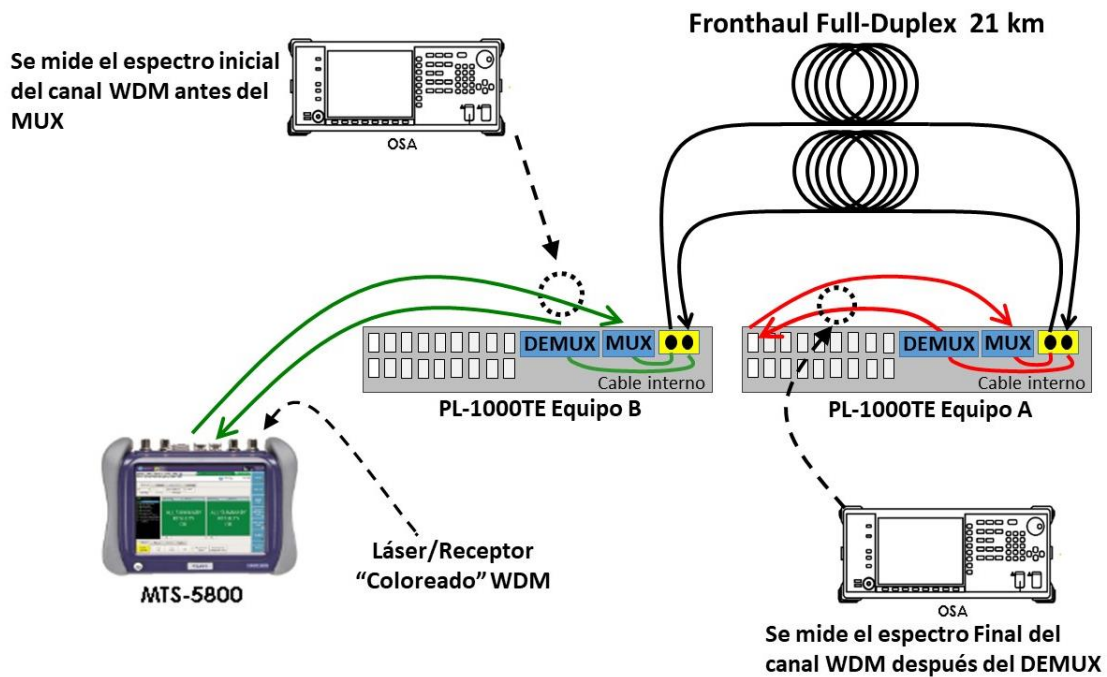


Figura 2.15 Medición del espectro de canales WDM antes y después del fronthaul pasivo con el OSA.

Para la caracterización completa de todos los SFP+ WDM usados en el fronthaul pasivo, también es necesario medir el espectro de cada SFP+ para corroborar su longitud de onda de emisión y su ancho de línea. Estas mediciones se realizan de nuevo con el analizador de espectros óptico. En este sentido, se realizó la medición de la frecuencia central del espectro emitido por los SFP+ WDM para los canales 29, 31, 33 y 35, y también para comprobar que estos operan dentro de los rangos nominales de potencia dados por el fabricante.

Para las mediciones de las longitudes de onda de emisión de cada canal pasivo DWDM, se muestran las Figuras 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19. En base a estas mediciones espectrales obtenidos con el OSA, se tiene los siguientes valores de longitud de onda: 1554.22 nm, 1552.61 nm, 1551.02 nm y 1549.28 nm respectivamente. Las variaciones de estas mediciones de longitud de onda centrales con respecto a las reportadas por el fabricante para los canales WDM 29, 31, 33, y 35 son del orden de 0.05nm. Adicionalmente, las mediciones del ancho de línea para estos 4 canales tuvieron valores menores a 0.1nm, los cuales coinciden con los rangos proporcionados por el fabricante Solid Optics y Smart Optics.

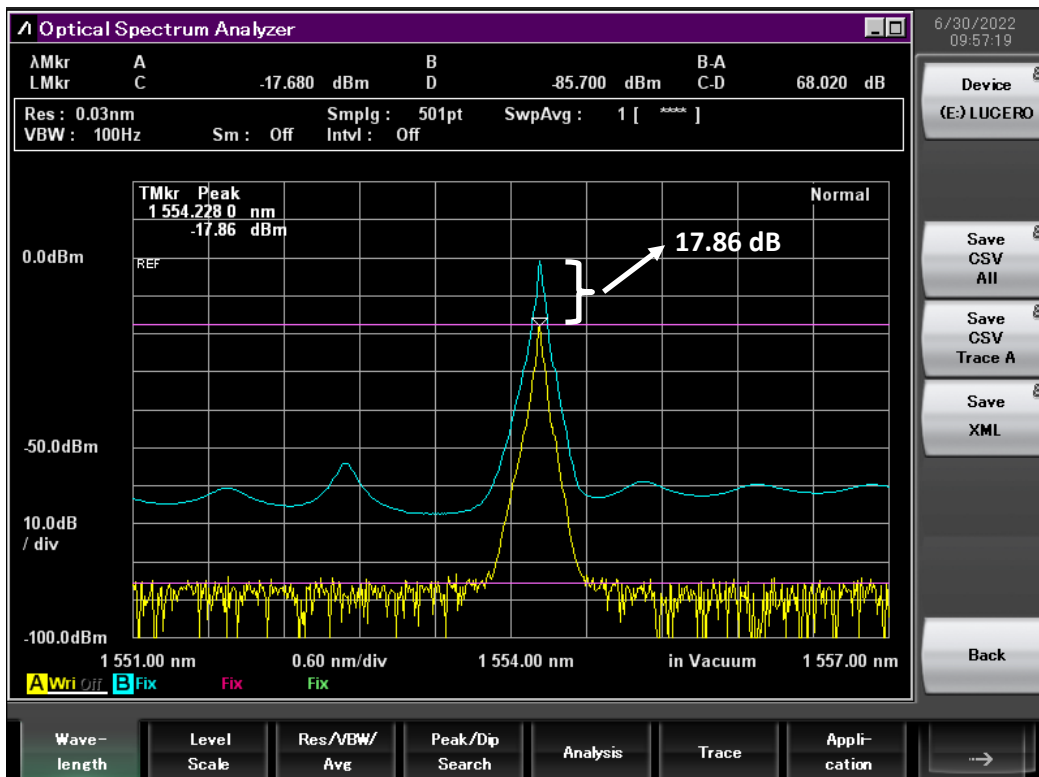


Figura 2.16 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal CH 29.

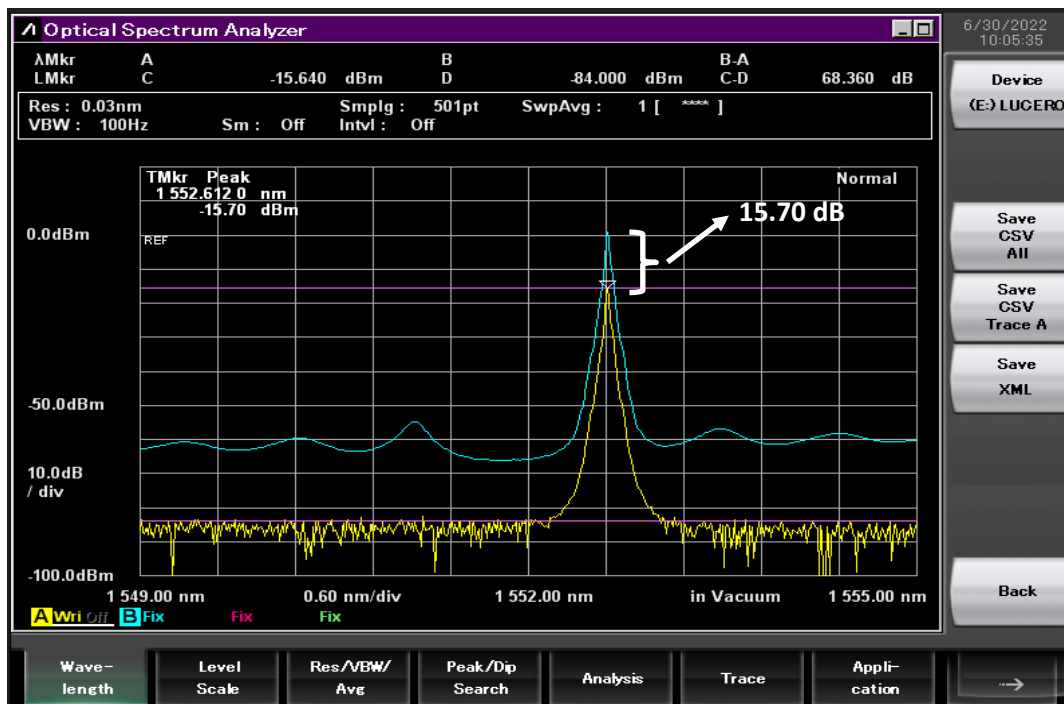


Figura 2.17 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal CH 31.

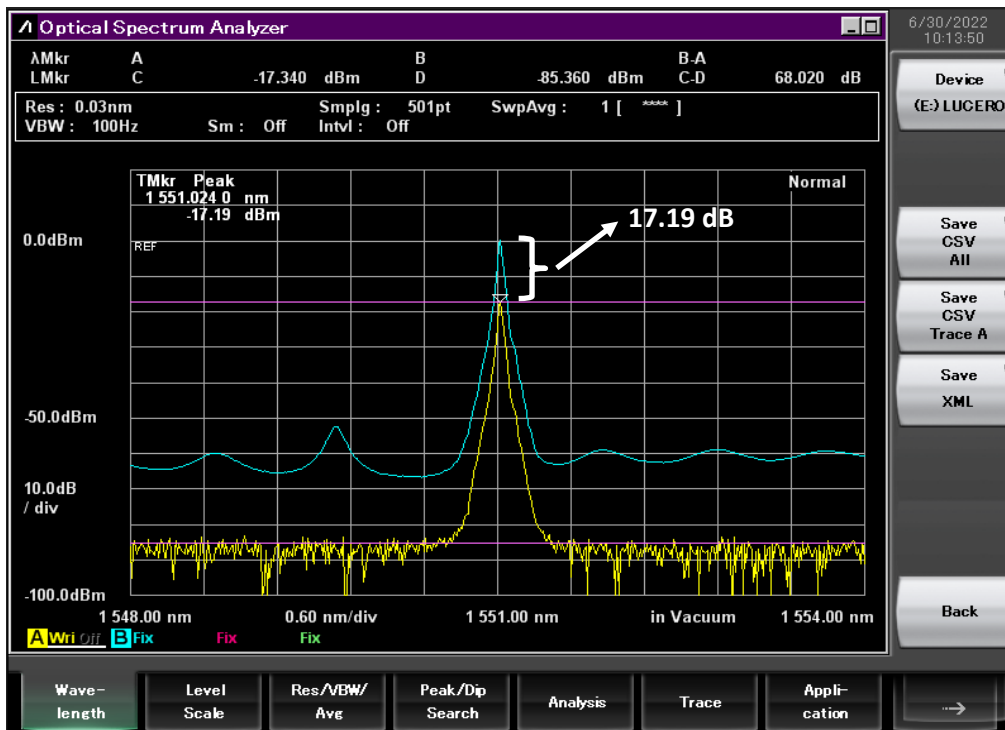


Figura 2.18 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal CH 33.

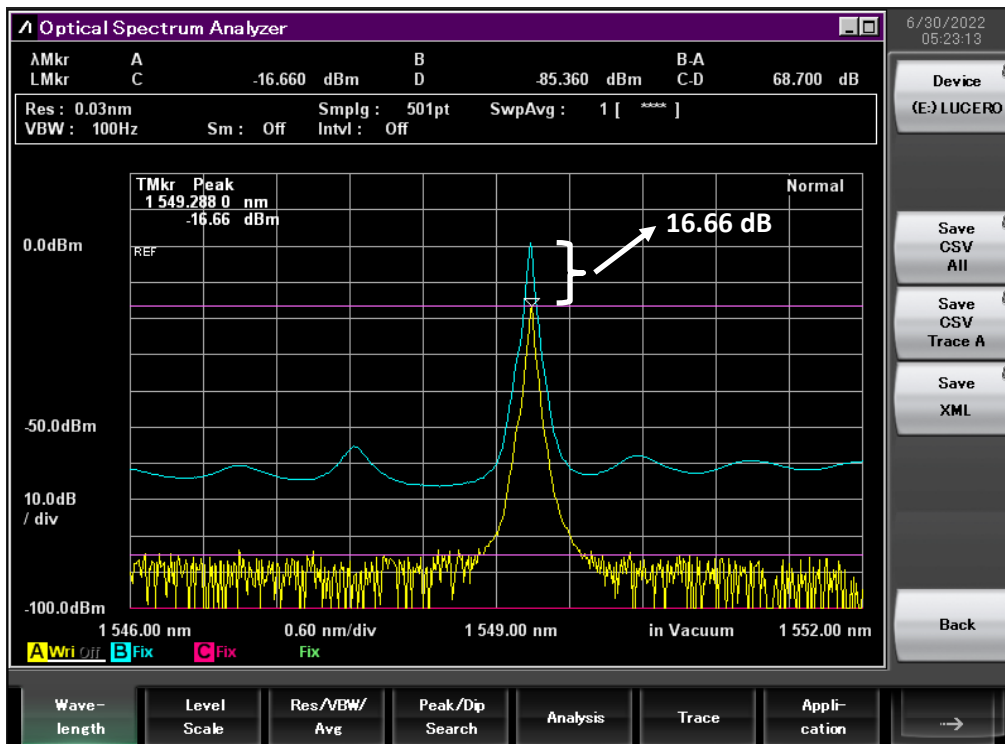


Figura 2.19 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal CH 35.

También en las Figuras 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19 se puede apreciar dos señales en la pantalla de despliegue del OSA, una de color azul y otra de color amarillo, en donde la señal de color azul se refiere al espectro del canal WDM en el inicio del fronthaul justo antes del MUX, mientras que la señal de color amarillo se refiere al espectro de este mismo canal WDM medido al final del fronthaul

de 21km justo después del DEMUX, tal como se indica en la Figura 2.15. La diferencia en potencia pico entre estas dos señales tomadas al inicio y al final del fronthaul para cada canal WDM nos proporciona valores de 17.86 dB, 15.70 dB, 17.19 dB, y 16.66 dB lo que corresponde a la pérdida de potencia que tienen los canales WDM 29, 31, 33, y 35 cuando se transmiten por el fronthaul de 21km y por los MUX/DEMUX usados en el fronthaul.

Es importante mencionar que una de las características más destacadas de los transceptores SFP+ WDM “coloreados” utilizados en la configuración pasiva del fronthaul, es su memoria EEPROM, puesto que da compatibilidad necesaria para establecer comunicación con las tarjetas de red de los equipos terminales como las RRH, BBU, o el equipo MTS-5800.

2.2 PÉRDIDAS ÓPTICAS DEL FRONTHAUL OBTENIDAS CON OTDR Y POWER METER

Se pueden realizar mediciones de pérdidas ópticas de la señal transmitida a lo largo del fronthaul óptico empleando un Analizador de Espectros Ópticos (OSA) tal como se describió en la sección anterior. Estas pérdidas se obtienen realizando la diferencia de potencia pico de los espectros de la señal óptica medidos al inicio y al final del fronthaul de 21 km.

Por otro lado, también se pueden obtener medidas más detalladas de la pérdida de potencia óptica del fronthaul utilizando un Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR: Optical Time Domain Reflectometer). Sin embargo, el OTDR funciona con una longitud de onda de 1550nm que no corresponde a los filtros de las componentes MUX/DEMUX de los 2 transpondedores usados en el fronthaul, por lo que las mediciones de pérdida óptica realizadas con el OTDR solo pueden considerar el enlace de fibra de 21 km y no los MUX/DEMUX de los transpondedores. En la Figura 2.20 se muestra un diagrama de cómo se pueden realizar las mediciones de pérdidas ópticas del fronthaul de 21Km usando el OTDR y sin considerar los MUX/DEMUX de los 2 transpondedores usados en el fronthaul.

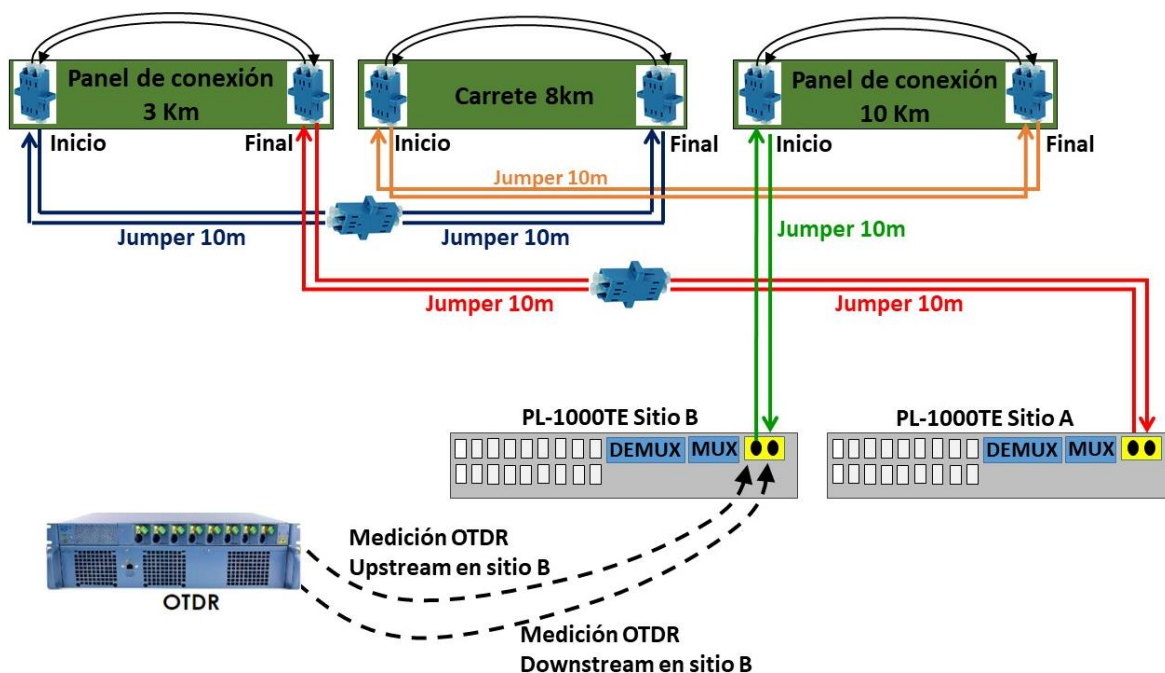


Figura 2.20 Medición de pérdidas ópticas con OTDR en el sitio B sin considerar los MUX/DEMUX.

La función de un OTDR es similar a un radar óptico, ya que es capaz de localizar eventos reflexivos u otras perturbaciones, como curvas, conectores mecánicos y sus pérdidas a lo largo de un enlace de fibra óptica.

En particular, el fronthaul consiste en un enlace conformado por un par de hilos de fibra óptica que puede alcanzar una longitud de 21km, en otras palabras, el fronthaul consiste en un enlace de fibra óptica full-dúplex que permite la transmisión de datos tanto de subida (Upstream) como de bajada (Downstream) en la arquitectura C-RAN 4G/5G. Por lo tanto, se cuenta con dos enlaces de fibra óptica paralelos de 21km y se debe medir con el OTDR las pérdidas presentes en ambas líneas ópticas de transmisión.

Se comienza midiendo estas pérdidas colocando el OTDR al inicio de estos dos enlaces de fibra en el sitio B del fronthaul tal como se indica en la Figura 2.20, obteniéndose en este caso dos trazas OTDR descritas en las Figuras 2.21 y 2.22 respectivamente.

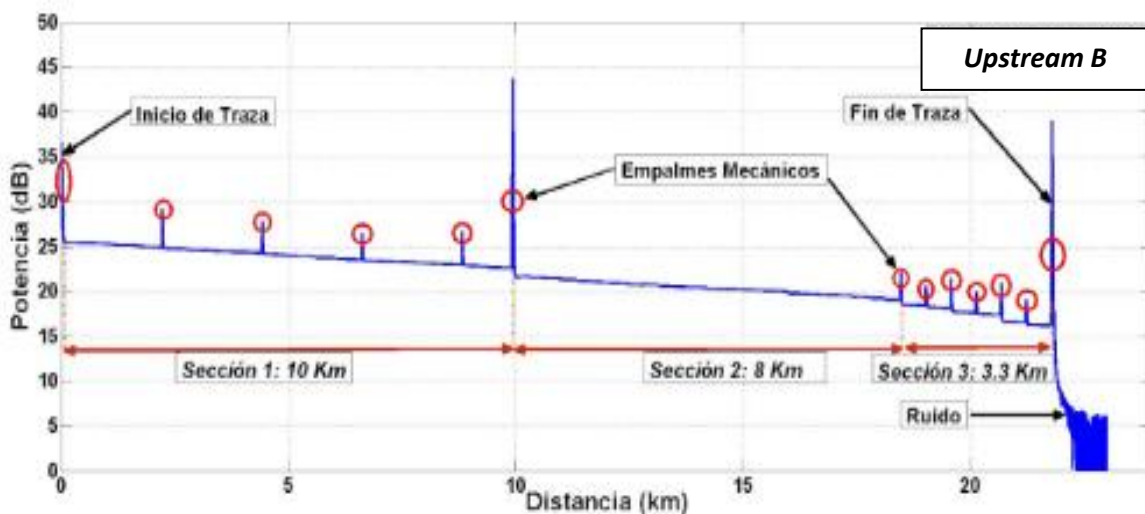


Figura 2.21 Traza OTDR del enlace de 21 km en sentido Upstream desde el sitio B.

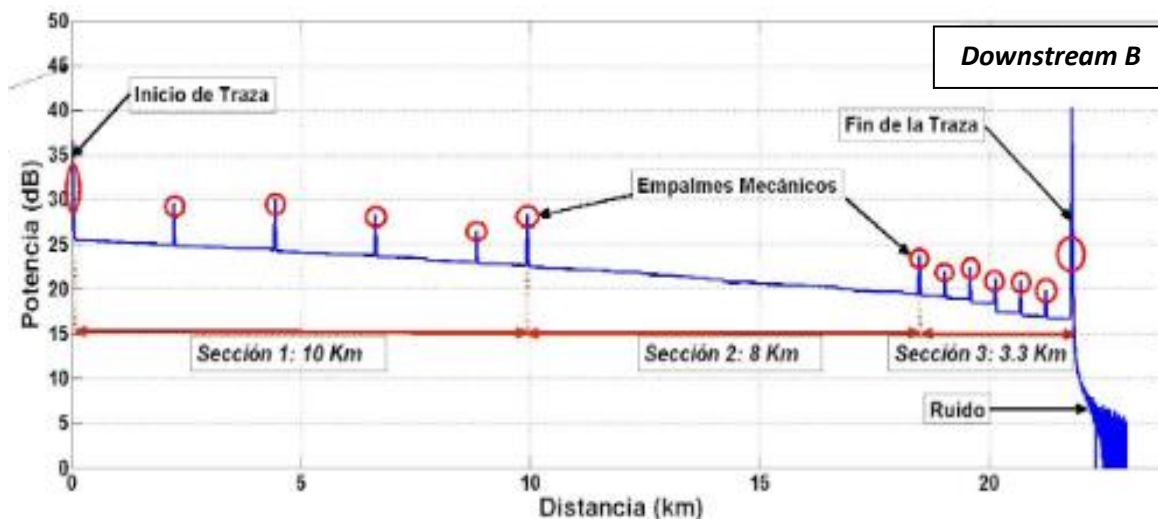


Figura 2.22 Traza OTDR del enlace de 21 km en sentido Downstream desde el sitio B.

En las Figuras 2.21 y 2.22 se puede observar que ambos enlaces paralelos de fibra (upstream y downstream) caracterizados con el OTDR desde el sitio B se pueden identificar los 3 conjuntos de fibra de 10km, 8km, y 3.3 km que fueron utilizados para armar el enlace de 21km. También se observan los empalmes de fusión y mecánicos usados en la unión de los diferentes tramos de fibra óptica.

En las Figuras 2.23 y 2.24 se pueden observar los valores de pérdidas acumuladas obtenidos con el OTDR para la longitud total del fronthaul de 21km en sentido upstream y downstream respectivamente. Para el caso del enlace upstream medido desde el sitio B con el OTDR la Figura 2.24 indica una longitud de 21.769 km y una pérdida acumulada de 9.118 dB, mientras que para el enlace downstream medido desde el sitio B con el OTDR la Figura 2.24 indica una longitud de 21.772 km y una pérdida acumulada de 9.122 dB. Se puede apreciar con estos resultados que la pérdida óptica de ambos enlaces de fibra para upstream y downstream tiene valores muy similares y presentan ligeras diferencias en su longitud (21.769 km y 21.772 km) que pueden ser causados por las diferentes medidas de jumpers de fibra óptica utilizados para realizar las conexiones en el fronthaul.

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

Figura 2.23 Pérdidas ópticas del enlace de 21 km en sentido upstream desde el sitio B.

Event	Number	31		32
	Type	┌	┌	┌
	Position (km)	21.222	21.222	21.772
	Length (km)	0.04	0.549	0.184
Curve	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 2.24 Pérdidas ópticas del enlace de 21 km en sentido downstream desde el sitio B.

Estas mediciones realizadas con el OTDR para el sentido upstream y downstream en el sitio B se repiten si las mediciones son realizadas desde el sitio A, indicando con ello la reproducibilidad y reciprocidad de las pérdidas ópticas presentes en ambos enlaces de fibra óptica que conforman el fronthaul óptico full-dúplex.

Para una comunicación full-dúplex fue necesario caracterizar tanto el sentido Upstream como el sentido Downstream, ya que para tener líneas balanceadas es necesario que los valores de pérdidas de ambos sentidos tengan valores similares.

Es importante recordar que estas mediciones de pérdidas ópticas realizadas con el OTDR para el fronthaul solo corresponden para el enlace full-dúplex de fibra óptica de 21km y no consideran las pérdidas ópticas de los MUX/DEMUX de los transpondedores utilizados en el fronthaul.

La Tabla 2.1 muestra un resumen de las pérdidas ópticas reportadas en las Figuras 2.11 a 2.14 obtenidas con el Analizador de Espectros Óptico (OSA) para los canales WDM 28, 30, 32, y 34, así como también las pérdidas ópticas reportadas en las Figuras 2.16 a 2.19 obtenidas también con el OSA para los canales WDM 29, 31, 33, y 35, los cuales fueron obtenidos en sentido upstream y considerando las pérdidas del enlace de 21km más las dos componentes MUX y DEMUX del fronthaul. Esta tabla permite comparar los valores de pérdidas obtenidos con el OSA con los valores de pérdidas obtenidos con el OTDR de 9.118 dB tomando en cuenta solo el enlace de 21 km en sentido upstream y utilizando un láser con longitud de onda de 1550nm.

Tabla 2.1. Resumen de pérdidas ópticas para el fronthaul de 21 km en sentido upstream obtenidas con el OSA.

Canal WDM	Longitud de onda (nm)	Pérdidas (dB) Medición del OSA (21 km + MUX/DEMUX)
Fronthaul Activo		
28	1554.94	18.52
30	1553.32	16.55
32	1551.72	16.77
34	1550.11	16.31
Fronthaul Pasivo		
29	1554.13	17.86
31	1552.52	15.70
33	1550.91	17.19
35	1549.31	16.66

En este sentido, cabe mencionar la importancia de haber realizado las mediciones de pérdidas con el OTDR en forma adicional a las obtenidas con el OSA, debido a que con las mediciones del OTDR podemos observar puntualmente las pérdidas generadas por todos los conectores mecánicos, empalmes de fusión y curvaturas que se presentan a lo largo del enlace de fibra óptica de 21km, y de ahí definir que punto del enlace de fibra es el más delicado y propenso a perturbaciones externas.

Finalmente, para terminar de caracterizar las pérdidas ópticas del fronthaul de 21 Km, se procede a medir con ayuda de un medidor de potencia óptica (Power Meter) las pérdidas de potencia para cada canal WDM a través del fronthaul siguiendo para ello el diagrama de las Figuras 2.25 y 2.26

para los casos de un fronthaul activo o pasivo, y en donde se mide con el Power Meter la potencia del canal WDM al inicio del fronthaul justo antes del MUX del transpondedor PL-1000TE B y la medición de potencia al final del fronthaul justo después del DEMUX del equipo PL-1000TE A para luego hacer la resta de estas potencias y obtener el valor de la pérdida de potencia óptica. De manera similar a mediciones anteriores, éstas se realizan en sentido upstream.

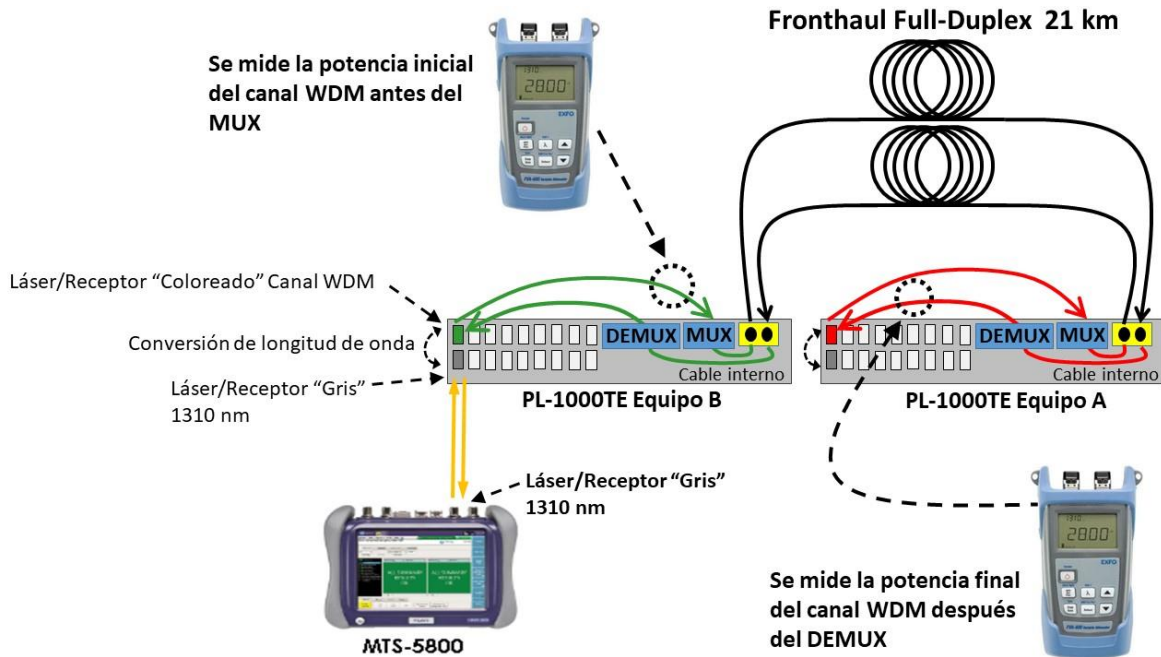


Figura 2.25 Medición del espectro de canales WDM antes y después del fronthaul activo con el Power Meter.

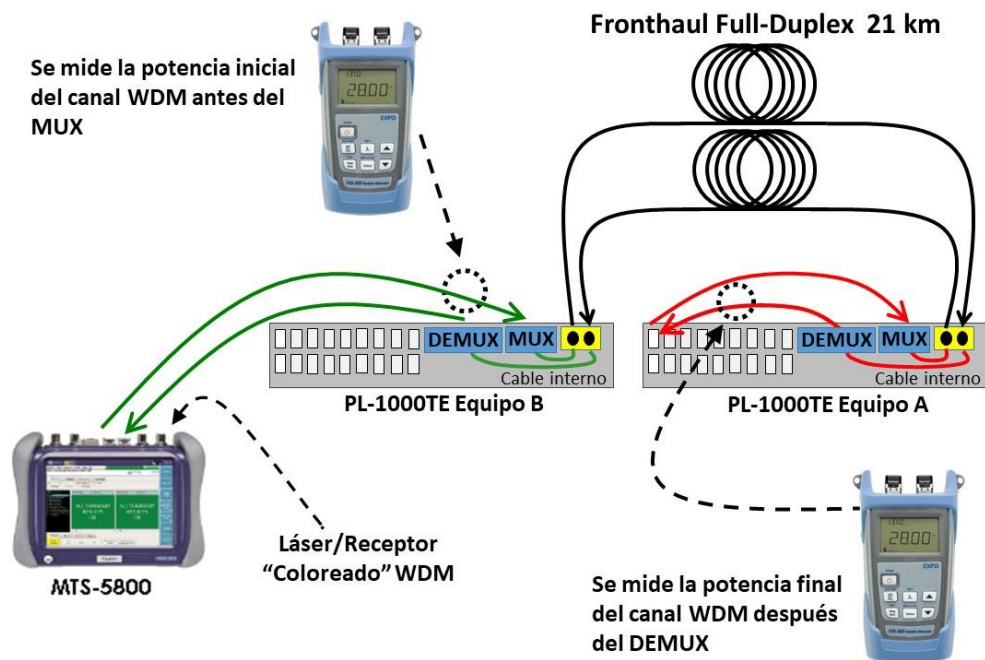


Figura 2.26 Medición del espectro de canales WDM antes y después del fronthaul pasivo con el Power Meter.

El resumen de las mediciones de pérdidas de potencia obtenidas con el Power Meter se puede observar en la Tabla 2.2. Cabe mencionar que en estas mediciones, además de considerar las pérdidas del enlace de fibra de 21 km, también se consideran las pérdidas de las dos componentes MUX y DEMUX del fronthaul.

Tabla 2.2. Resumen de pérdidas ópticas para el fronthaul de 21 km en sentido upstream obtenidas con el Power Meter.

Canal WDM	Longitud de onda (nm)	Potencia inicial TX (dBm)	Potencia final RX (dBm)	Pérdidas (dB) Tx - Rx (21 km + MUX/DEMUX)
Fronthaul Activo				
28	1554.94	1.10	-18.00	19.10
30	1553.32	1.40	-14.60	16.00
32	1551.72	1.10	-15.60	16.70
34	1550.11	2.40	-15.10	17.50
Fronthaul Pasivo				
29	1554.13	0.60	-16.20	16.80
31	1552.52	1.50	-15.00	16.50
33	1550.91	1.30	-15.60	16.90
35	1549.31	1.70	-17.00	18.70

Mediante la comparación de los resultados de pérdidas de potencia óptica mostrados en las tablas 2.1 y 2.2 correspondientes a los equipos de medición OSA y Power Meter, podemos observar valores congruentes para los diferentes canales WDM considerados en el proyecto tanto para el fronthaul activo como pasivo. Las diferencias en las mediciones se atribuyen a que las pérdidas calculadas usando el OSA se obtuvieron considerando solo la potencia pico en la longitud de onda central y no en todo el espectro, situación que si ocurre con las mediciones realizadas con el Power Meter.

CAPÍTULO 3

3 PERTURBACIONES CONTROLADAS SOBRE EL FRONTHAUL

En este capítulo se describe la forma en cómo se ejercen perturbaciones controladas sobre el fronthaul de fibra óptica full-duplex de 21km de longitud. Lo anterior es representando de manera esquemática en la Figura 3.1. En este sentido, se ejercen 2 tipos de perturbaciones, siendo el primero de ellos una serie de vibraciones ejercidas en diferentes puntos del fronthaul con frecuencias de 0.5Hz a 100Hz que corresponden típicamente a las encontradas en vibraciones mecánicas originadas por motores en la industria de la manufactura y también causadas por vibraciones originadas por eventos sísmicos. Un segundo tipo de perturbaciones consiste en ejercer diferentes curvaturas a la fibra óptica en diferentes puntos del fronthaul con circunferencias de curvatura alrededor de 2.5 cm que son los encontrados típicamente en los procesos de instalación de fibras ópticas en interiores de edificios los cuales son causados por sujetadores de plástico (también conocidos como cinchos) los cuales sujetan a la fibra óptica dentro de las canaletas de guiado. Y finalmente, se realiza en forma adicional una mezcla de las dos perturbaciones aplicando curvaturas y vibraciones en forma combinada sobre la fibra en diferentes puntos del fronthaul.

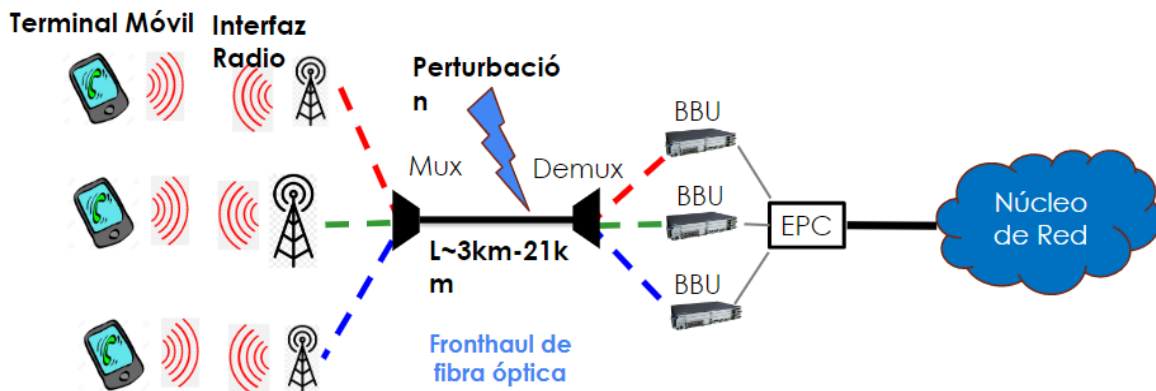


Figura 3.1. Implementación física de perturbaciones en Fronthaul de 21 Km.

3.1 Diseño para aplicar perturbaciones

Antes de iniciar las pruebas de perturbaciones hacia la fibra óptica es muy importante identificar las características técnicas del cable de fibra óptica utilizado, como la marca, número de hilos, atenuación, etc. Por ello, se decide emplear una fibra óptica para el carrete de 48 hilos de la marca YOFC, monomodo con la ITU-T G.652.D, adecuada para realizar transmisiones WDM. En la Tabla 3.1, se indican las características principales del cable de fibra óptica empleado.

Tabla 3.1. Características especiales de la Fibra Óptica monomodo YOFC. [46]

Marca	YOFC (Yangtze Optical Fiber 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
Aplicaciones	Redes metropolitanas y de acceso
Radio de curvatura mínimo (1 vuelta) con pérdidas <0.5dB	1.5 cm

Una vez tomado en cuenta estas características de la fibra óptica, se describen a continuación los esquemas para ejercer perturbaciones al enlace de fibra.

3.1.1 Vibraciones sobre conectores mecánicos y secciones de fibra con curvaturas

Estas vibraciones se ejercen en puntos sensibles del fronthaul óptico activo y pasivo, tales como en conectores mecánicos y en puntos específicos de la fibra que presentan curvaturas, estas vibraciones se aplican a través de una bocina accionada por un generador de funciones. En la Figura 3.2 se observa el diagrama físico para la aplicación de frecuencias de 0.5Hz a 100Hz empleando una bocina conectada a un generador de funciones.

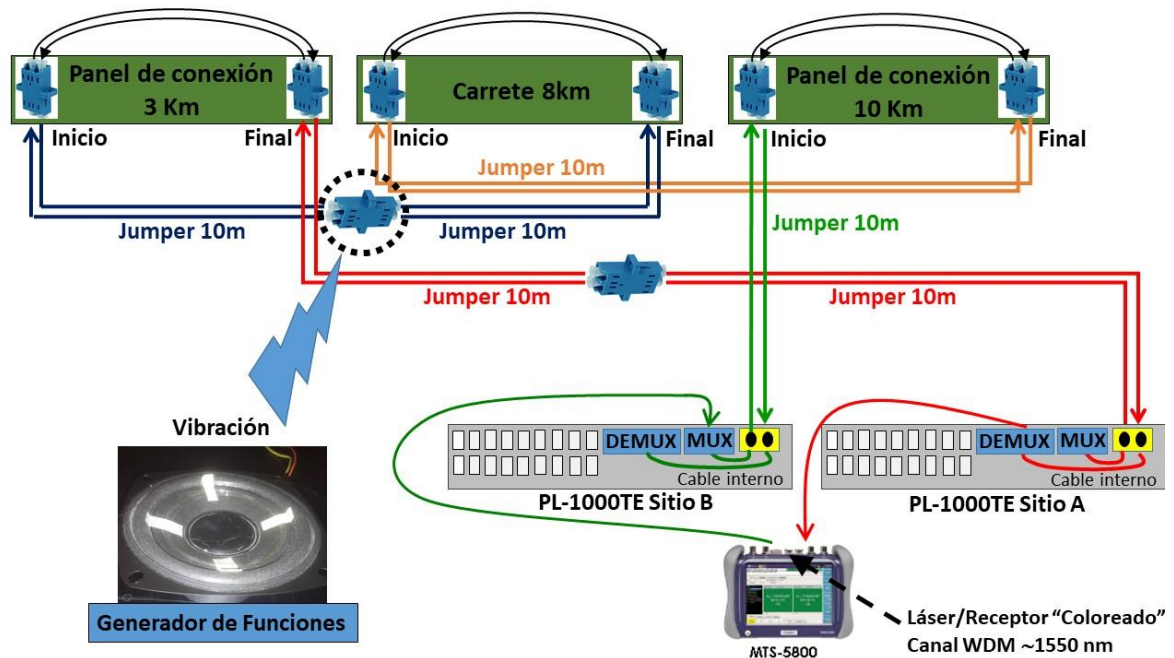


Figura 3.2 Diagrama de ejemplo para aplicar vibraciones al fronthaul óptico de 21 km sobre un conector mecánico.

Se escoge como punto de aplicación de vibraciones los conectores mecánicos debido a que estos son más susceptibles a desalineamientos en un entorno real de comunicación en un fronthaul de fibra óptica. De acuerdo con nuestra experiencia en la implementación de la arquitectura C-RAN, estos conectores mecánicos deben ser cuidadosamente seleccionados ya que un conector mecánico dañado no permite una comunicación adecuada a través del fronthaul y la interconexión entre las RRHs y BBU's no se puede realizar, principalmente en casos donde el fronthaul tiene una longitud de fibra muy larga del orden de 21km.

En la Figura 3.2 también se puede observar que se emplea un equipo MTS-5800 que es un equipo que puede transmitir y recibir señales ópticas digitales a velocidades desde 100Mb/s hasta 10Gb/s a través del fronthaul utilizando para ello un transceptor SFP+ "coloreado" WDM insertado en su interior, de tal forma que las señales digitales son transmitidas usando un canal WDM. El canal WDM usado para transmitir estas señales dependerá del transceptor SFP+ coloreado que este insertado en el equipo MTS-5800. Actualmente se cuentan para este estudio con 8 transceptores coloreados WDM correspondientes a los canales WDM 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, y 35 respectivamente. En este caso, si deseamos transmitir señales digitales a través del fronthaul utilizando el canal WDM 35 solamente debemos insertar el transceptor SFP+ WDM coloreado correspondiente a dicho canal. Posteriormente si se desea transmitir otro canal WDM solo se debe intercambiar el transceptor SFP+ WDM que esta insertado en el equipo MTS-5800 por otro transceptor SFP+ WDM que corresponda al nuevo canal WDM que se desea transmitir.

Prácticamente, el equipo MTS-5800 puede emular la transmisión de señales ópticas digitales que pueden ser generadas por los equipos RRH y BBU's empleados en una arquitectura C-RAN.

El empleo del equipo MTS-5800 nos permitirá medir la calidad de la transmisión de señales ópticas digitales a través del fronthaul cuando este se encuentra sujeto a perturbaciones externas como las vibraciones que se están planteando realizar sobre el fronthaul.

De acuerdo con la Figura 3.3 correspondiente a la traza OTDR del enlace de fibra óptica de 21km en sentido upstream, podemos detectar un conector que presenta una pérdida de potencia considerable identificado como "conector susceptible a perturbación". Dicho conector mecánico es usado para interconectar el conjunto de fibra de 10km con el conjunto de fibra de 8 km respectivamente. En una situación ideal sin perturbaciones, este conector no genera ningún problema a la comunicación, pero en una situación con perturbación, deseamos ver su efecto en la transmisión de datos.

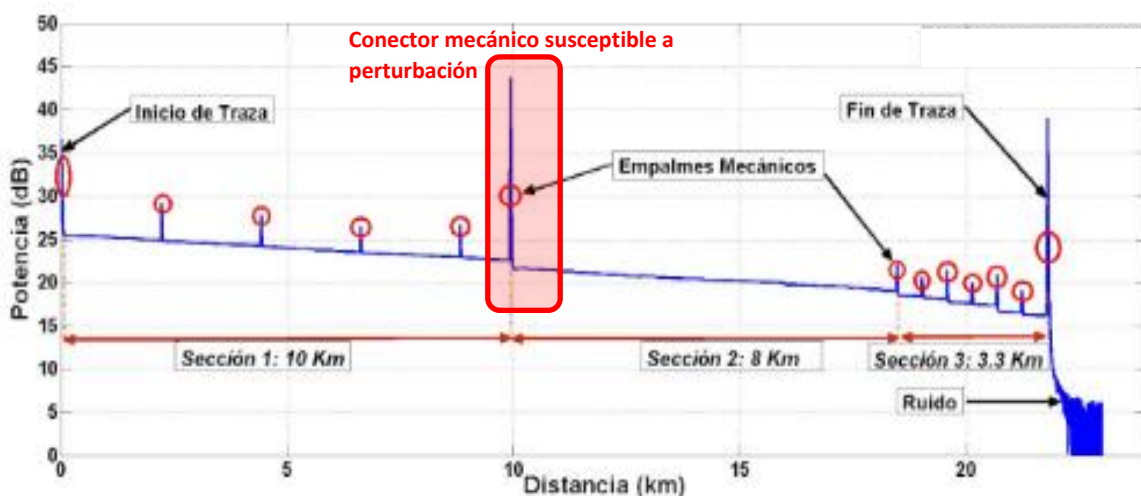


Figura 3.3 Traza OTDR del enlace de 21 km en sentido Upstream con un conector susceptible a perturbaciones.

Las Figuras 3.4 y 3.5, muestran a detalle la implementación de las vibraciones ejercidas sobre una sección de fibra con curvaturas y sobre el conector mecánico del fronthaul indicado en la Figura 3.3. En ambos casos se fueron cambiando las frecuencias desde 0.5 Hz hasta llegar a 100 Hz. En este experimento se aplican curvaturas de 2.5 cm con un número reducido de 4 vueltas sobre la fibra.

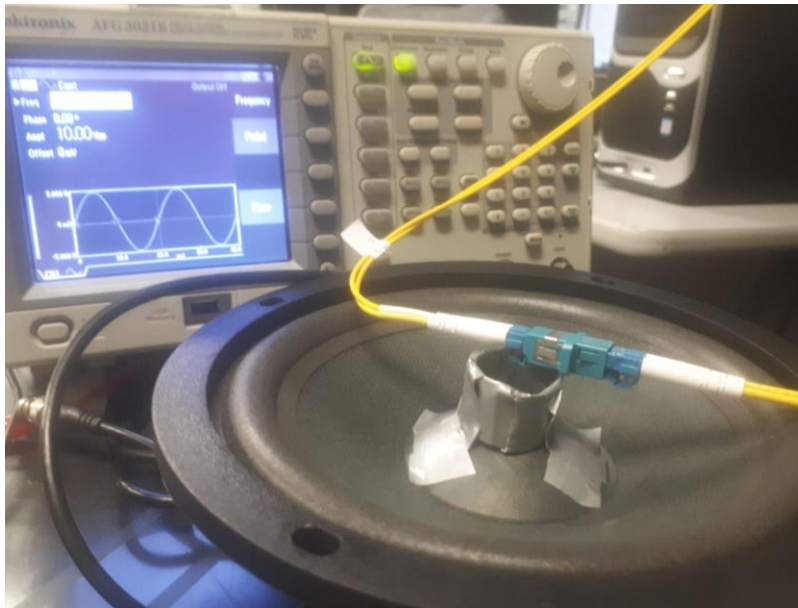


Figura 3.4 Implementación física para ejercer vibraciones en un conector mecánico del fronthaul.

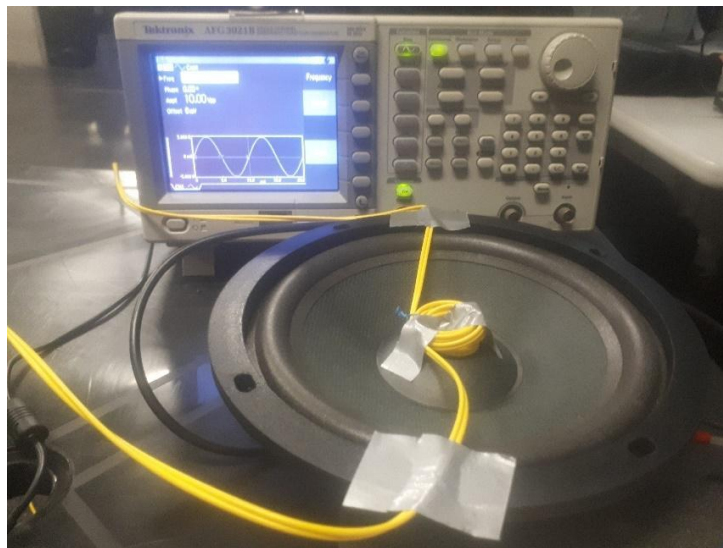


Figura 3.5 Implementación física para ejercer vibraciones en una sección de fibra con curvatura en el fronthaul.

En particular, se puede adelantar que los efectos de las vibraciones en este intervalo de frecuencias fueron mínimos, tanto para el conector mecánico como la sección de fibra con curvaturas, de tal forma que la comunicación digital a través del fronthaul nunca fue deteriorada en forma significativa. Los detalles se darán en el siguiente capítulo. Con lo anterior se puede decir que los

conectores mecánicos empleados en el fronthaul ofrecen una buena sujeción y alineamiento entre los dos extremos de la fibra que está uniendo en forma mecánica a pesar de presentar pérdidas intrínsecas por falta de limpieza o fabricación, y a pesar también de las vibraciones ejercidas sobre este. Por otro lado, el efecto mínimo de las vibraciones ejercidas sobre una sección de fibra con curvatura puede referirse a que no se aplicaron suficientes vueltas a la sección de fibra analizada. En esta situación se procede a realizar un estudio sistemático de perturbaciones por curvaturas sobre diferentes secciones de fibra y empleando diferentes números de vueltas tal como se describe a continuación.

3.1.2 Curvaturas sobre la fibra

Siguiendo la misma configuración que la anterior, se emplean diferentes radios de curvaturas de la fibra óptica alrededor de 2.5 cm, como se observa en la Figura 3.6. Estos valores de radio de curvatura son encontrados típicamente durante la instalación del cableado de fibra en interiores y exteriores. Posteriormente se realizan de nuevo las mediciones de pérdidas ópticas del fronthaul y se hace un comparativo de las mediciones realizadas.

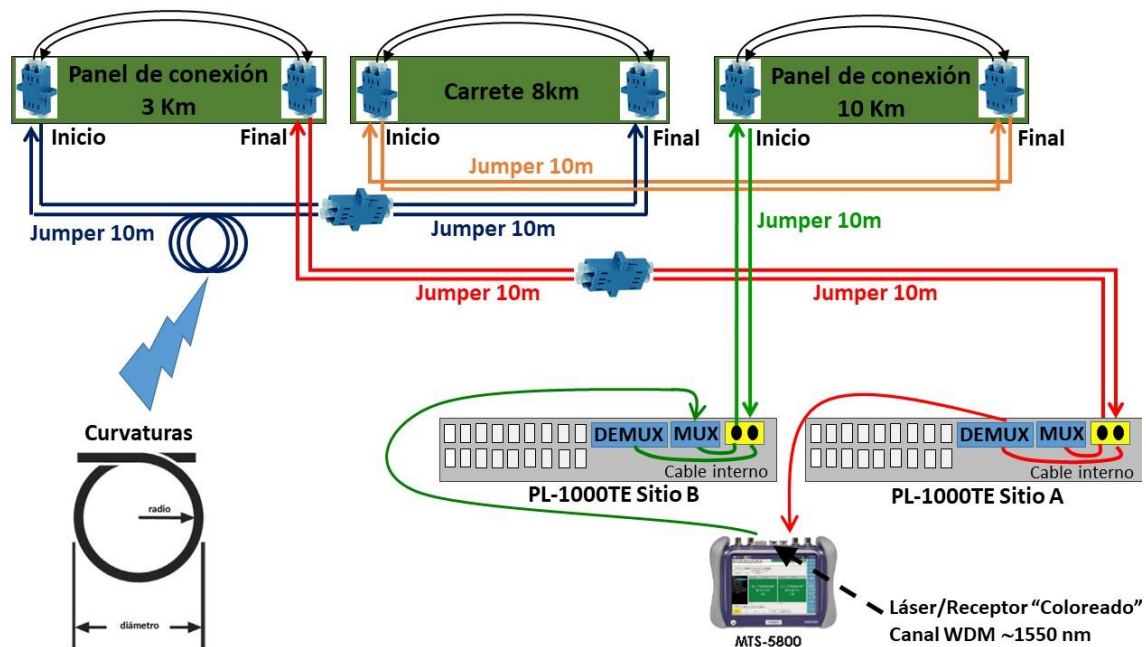


Figura 3.6 Diagrama de ejemplo para aplicar curvaturas al fronthaul óptico de 21 km.

A fin de evaluar el comportamiento de la fibra óptica con diferentes radios de curvaturas. En la Figura 3.7 se observa del lado izquierdo una curvatura con un diámetro de 3.5 cm y del lado derecho esta misma curvatura con una cantidad de 11 vueltas. Es importante mencionar que al aplicar estas 11 vueltas a la fibra óptica en un mismo punto tal como se observa en la imagen de la derecha de la Figura 3.7 es equivalente al caso de realizar estas 11 vueltas por separado en diferentes puntos del enlace de fibra de 21 km, es decir, por ejemplo, 1 vuelta en un punto, 4 vueltas en otro punto, 3 vueltas en otro punto, y 3 vueltas más en otro punto de la fibra, para tener un total de 11 vueltas distribuidas a lo largo de la fibra óptica. Lo anterior se debe a que las pérdidas ópticas causadas por curvaturas son acumulativas a lo largo de la red de fibra de 21km. Este escenario de aplicación de

curvaturas en diferentes puntos del enlace de fibra óptica es un caso común que se presenta durante la instalación de redes ópticas en interiores de edificios los cuales son causados por sujetadores de plástico (también conocidos como cinchos) los cuales sujetan a la fibra óptica dentro de las canaletas de guiado.



Figura 3.7 Implementación física para ejercer curvaturas en la red de fibra óptica de 21 Km.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, se utiliza el equipo MTS-5800 para visualizar las mediciones de pérdidas ópticas durante la prueba para cada canal WDM las cuales son causadas en forma controlada utilizando curvaturas con diferentes radios de curvatura y diferente cantidad de vueltas. Esto se logra gracias a que el equipo MTS-5800 posee un medidor de potencia óptica integrado en su interior que permite medir para cada canal WDM la potencia al inicio y al final del fronthaul pudiendo monitorear con ello la pérdida de potencia de la señal transmitida a través del fronthaul conforme se van aplicando diferentes curvaturas. Dicho equipo se conecta de acuerdo con el diagrama de la Figura 3.6. Por otro lado, en la Figura 3.8 se presenta una imagen de cómo es conectado físicamente el equipo MTS-5800 al fronthaul.

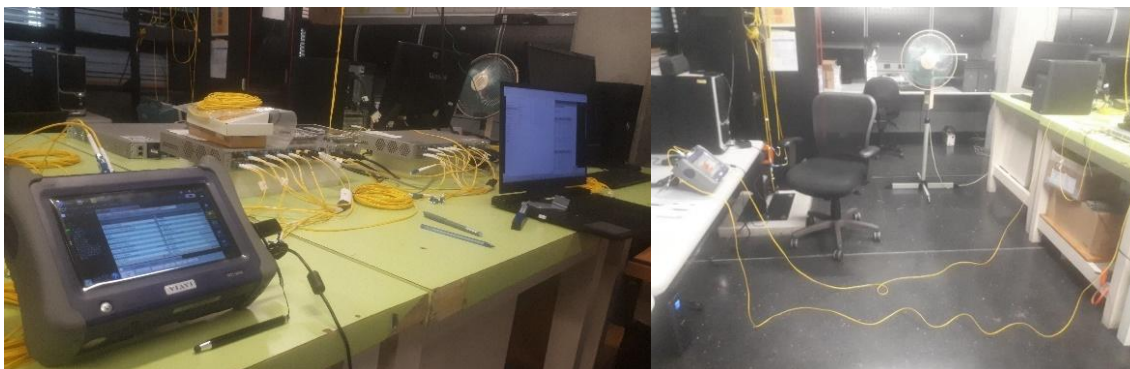


Figura 3.8 Equipo MTS-5800 enviando señales digitales y monitoreando pérdidas ópticas a través del fronthaul en el Laboratorio de Telecomunicaciones del IINGEN.

Los resultados de las pérdidas de potencia óptica para cada curvatura para los canales WDM 29, 31, 33, y 35 usados en el fronthaul pasivo se detallan en la Figura 3.9, mientras que las pérdidas por

curvaturas para los canales WDM 28, 30, 32, y 34 usados en el fronthaul activo se detallan en la Figura 3.10 respectivamente.

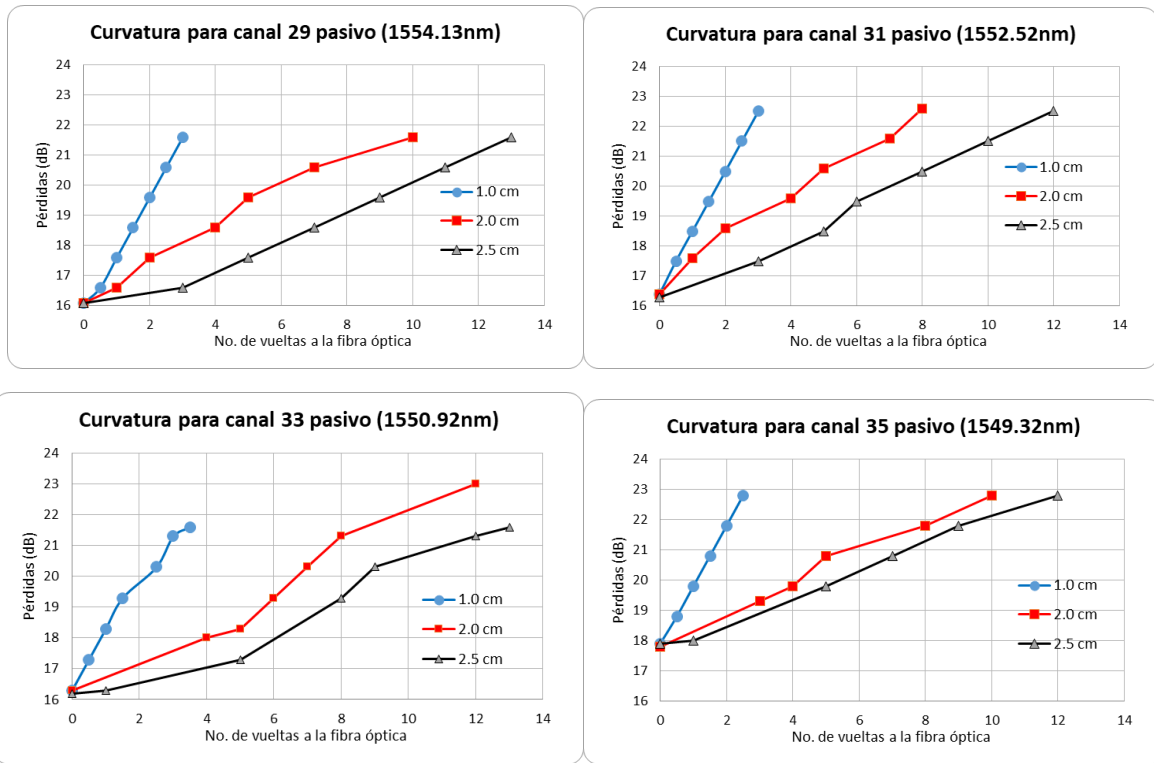


Figura 3.9 Graficas de las pérdidas por curvaturas en función del número de vueltas para los canales WDM 29, 31, 33 y 35 usados en el fronthaul pasivo.

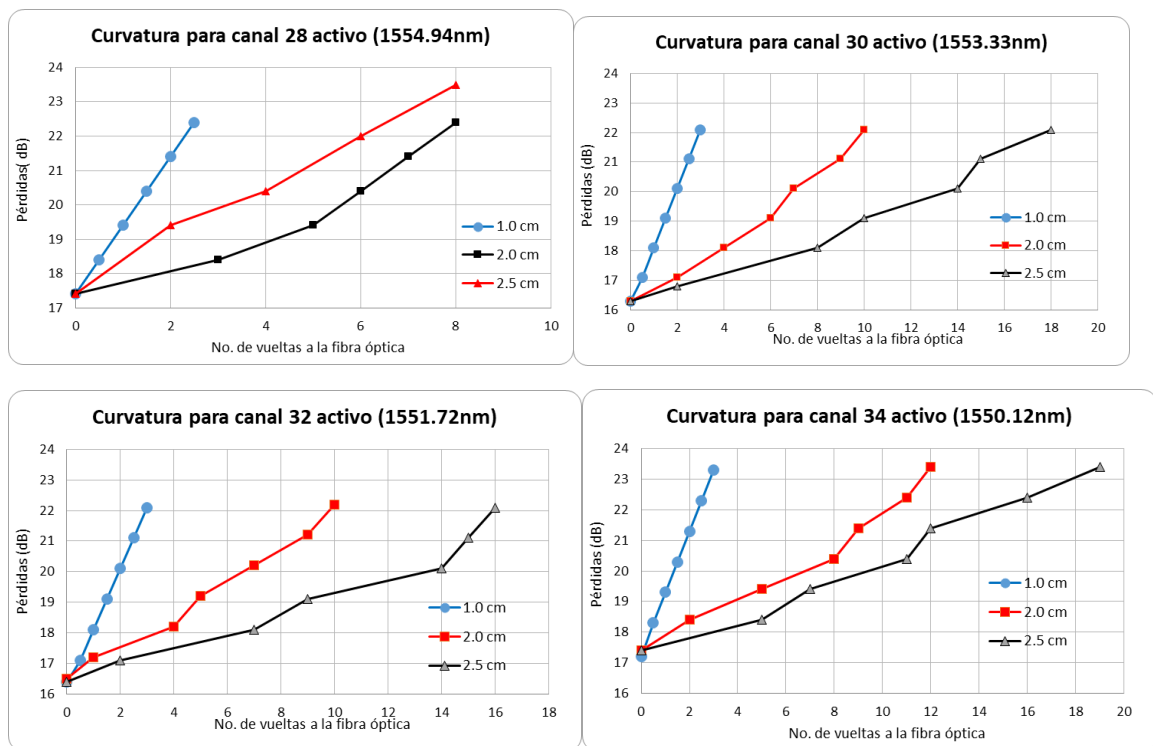


Figura 3.10 Graficas de las pérdidas por curvaturas en función del número de vueltas para los canales WDM 28, 30, 32, y 34 usados en el fronthaul activo.

En particular, en este experimento se aplicaron curvaturas que van desde 1cm, 2cm y 2.5cm, para evaluar las pérdidas de la fibra óptica con diferentes circunferencias y garantizar altas tasas de transmisión de calidad, con la mínima tasa de transmisión desde 100 Mb/s hasta 10 Gb/s. Esto, conforme a los estándares establecidos para los evaluadores de desempeño transmitido en el fronthaul óptico a nivel capa 1 que mide el Bit Error Rate (BER). Además, se pudo graficar valores comerciales para los parámetros de los principales elementos ópticos empleados. De acuerdo con las figuras 3.9 y 3.10 en función del número de vueltas para los canales WDM sobre el fronthaul activo y pasivo se observa que conforme al número de vueltas aumenta, también aumenta la cantidad de pérdida óptica del enlace. Es decir, existe una relación lineal con las pérdidas expresadas en dB entre el número de vueltas aplicadas y las pérdidas, en donde la pendiente se incrementa conforme se utilizan vueltas de menor diámetro.

El efecto de estas pérdidas para cada canal WDM causadas por dichas curvaturas son descritas en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4

4 IMPACTO DE LAS PERTURBACIONES EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS

El presente capítulo se muestra unas gráficas específicas del impacto de las pérdidas por curvaturas en función del número de vuelta sobre el fronthaul en la transmisión digital de datos. Para ello se utiliza un equipo que permite enviar tráfico de señales Ethernet en fibra óptica llamado MTS-5800 de la marca VIAVI® a diferentes velocidades de transmisión, desde 10Mb/s hasta 10Gb/s, utilizando los transceptores ópticos SFP+ conocidos como coloreados WDM correspondientes a los canales 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, y 35, insertados en su interior, de tal forma que las señales digitales son transmitidas. Dicho equipo también contiene un módulo para analizar la tasa de bits erróneos (BER: Bit Error Rate) de los bits transmitidos en capa 1, también otro módulo que permite medir la latencia, jitter, y pérdidas de tramas de las señales Ethernet transmitidas en capa 2. Con dicho equipo se analiza los valores de estos parámetros en los casos cuando se transmiten señales digitales a través del fronthaul con y sin perturbaciones. Con ello, estudiar el impacto de estas perturbaciones en la degradación de las señales Ethernet transmitidas. Para estas mediciones se utiliza la misma configuración de conexión del equipo MTS-5800 descrito en el capítulo anterior en la Figura 3.6.

4.1 MEDICIONES DE LA TASA DE BITS ERRÓNEOS (BER) EN CAPA 1

Cuando se transmiten señales digitales de unos y ceros, lo que importa es si la información avanza del transmisor al receptor sin errores, para mantener la integridad de la señal, es decir un error sería un uno recibido como un cero, o un cero recibido como uno. El receptor debe ser capaz de distinguir entre ceros y unos, sin embargo, no existen sistemas de transmisión lineales perfectos y libres de errores. Por lo tanto, se puede garantizar una cierta tasa máxima de error de bit (BER). Este BER es el número de bits que se reciben incorrectamente al número total de bits transmitidos. Además, existen probadores de tasa de error de bit conocidos como equipos BERT (BER Tester).

La función de un BERT consiste en una fuente digital de datos y un receptor rápido, es decir, lo que hace es crear un flujo de datos que es enviado al sistema bajo prueba, para luego recibir este flujo de datos transmitido, y así comparar los datos originales al inicio y al final del enlace contando de esta manera el número de bits que llegan erróneos al receptor. El flujo de datos es una secuencia de bits pseudoaleatorios (PRBS: Pseudo Random Bits Sequence). Con esta secuencia pseudo aleatoria se recrea un peor escenario de transmisión para obtener errores de bits en lugar de enviar una secuencia de puros unos de bits en el enlace de fibra óptica [49]. En otras palabras, en los sistemas prácticos, la causa principal de los bits erróneos es el ruido. Para hacer una prueba de estrés de tales sistemas, es necesario generar un flujo de bits pseudoaleatorio y luego analizar la salida para determinar la tasa de error de bit de los datos transmitidos [50].

En general, cualquier secuencia PRBS-k tendrá una longitud de palabra con "k" bits y una longitud de secuencia de 2^k-1 bits. Esta combinación de bits aleatorios hace esta secuencia ideal para probar interfaces. Como el analizador BERT conoce qué bits PRBS se generan, es relativamente

sencillo realizar una comparación al inicio y al final del enlace y contar un error de bit a través de esta comparación.

Las secuencias PRBS pueden variar en longitud de secuencia desde 127 bits (PRBS7) a 2.147.483.647 bits (PRBS31). Sin embargo, el ITU-T 0.150 hace las siguientes recomendaciones para estas secuencias de mediciones y rendimiento en equipos de transmisión digital, de acuerdo con la Tabla 4.1.

Generalmente se recomienda usar patrones cortos de PRBS en pruebas que usen velocidades bajas de bit y patrones largos de PRBS en pruebas que utilicen altas tasas de bits. En particular, el PRBS-31 es uno de los patrones de prueba recomendados para tareas de medición específicas a 10 Gigabit Ethernet.

Tabla 4.1 Recomendación de la ITU-T 0.150 para la longitud de secuencias de bits PRBS [50].

Sequence	Length of Sequence	Length of Sequence (bits)	Use of Sequence	Comments
PRBS9	$2^9 - 1$	511	Error measurements on data circuits at bit rates up to 14,400 bit/s	PRBS-9 is one of the recommended test patterns for SFP+
PRBS15	$2^{15} - 1$	32,767	Error and jitter measurements at bit rates of 1544, 2048, 6312, 8448, 32,064 and 44,736 kbit/s	PRBS15 is often used for jitter measurement
PRBS23	$2^{23} - 1$	8,388,607	Error and jitter measurements at bit rates of 34,368 and 139,264 kbit/s	PRBS23 is one of the recommended test patterns for SDH/SONET PRBS23 is also commonly used by SDI chip manufacturers to test interface performance
PRBS31	$2^{31} - 1$	2,147,483,647	Specific measurement tasks	PRBS31 is one of the recommended test patterns for 10 Gigabit Ethernet

La Figura 4.1 muestra un ejemplo de medición del BERT del equipo MTS-5800, utilizando en este caso un transceptor WDM coloreado correspondiente al canal WDM 28, así como también aplicando sobre la fibra óptica una curvatura con un diámetro de 2.5 cm y un número de vueltas igual a 8 y con una potencia óptica de recepción de -21 dBm a lo largo del enlace de fibra con curvaturas. En este caso se emplea un tráfico de datos de 10Gb/s con una secuencia de bits PRBS31, midiendo en este caso particular durante un periodo de prueba de 60 segundos una cantidad de 130,586 bits erróneos.

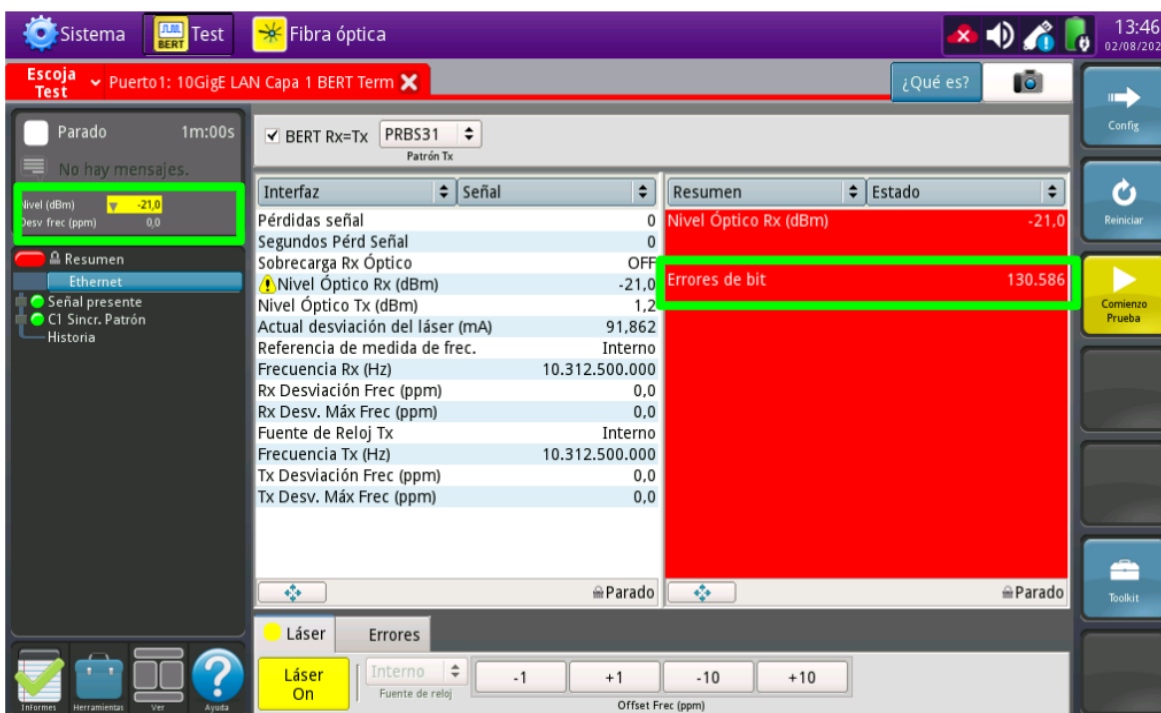


Figura 4.1 Medición del BER para el canal WDM 28 a través del fronthaul de 21 Km con curvaturas D3=2.5cm.

La Figura 4.2 muestra otra pantalla de visualización del equipo donde se puede apreciar una tasa de errores de bit de 2.11×10^{-7} para las condiciones del fronthaul con perturbaciones mencionado anteriormente como ejemplo. Para el caso de una transmisión de 10Gb/s la señal se considera aceptable cuando tiene un BER de 1×10^{-12} , por lo que, en este caso, nuestra señal con un BER de 2.11×10^{-7} posee valores de rendimiento no aceptables.

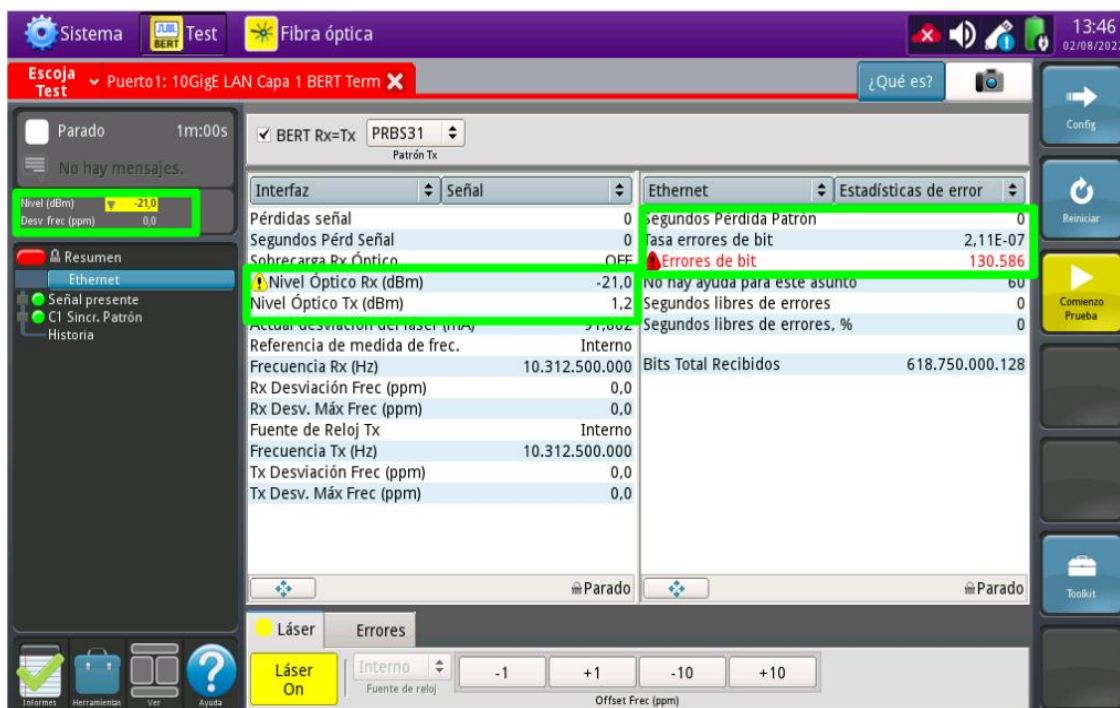


Figura 4.2 Medición de un BER de 2.11×10^{-7} para el canal WDM 28 a través del fronthaul de 21 Km con curvaturas D3=2.5 cm.

La Figura 4.3 muestra los diferentes resultados obtenidos del BER para 10 Gb/s para los canales WDM 29, 31, 33, y 35 usados en la configuración de fronthaul pasivo. Para una mejor visualización de las mediciones se comparan las mediciones del BER obtenidos con el canal 29 con respecto al BER medido con los otros canales. Además, las mediciones del BER se grafican con respecto al número de vueltas ejercidas sobre la fibra óptica con curvaturas de $D1=1\text{cm}$ (curvas de color azul), $D2=2\text{cm}$ (curvas de color rojo), y $D3=2.5\text{cm}$ (curvas de color negro) respectivamente. También se adiciona a las gráficas una recta horizontal de color verde que define una tasa de BER de 1×10^{-12} , la cual si se supera entonces se considera que la transmisión de 10Gb/s no es adecuada para el fronthaul por degradaciones causadas por curvaturas.

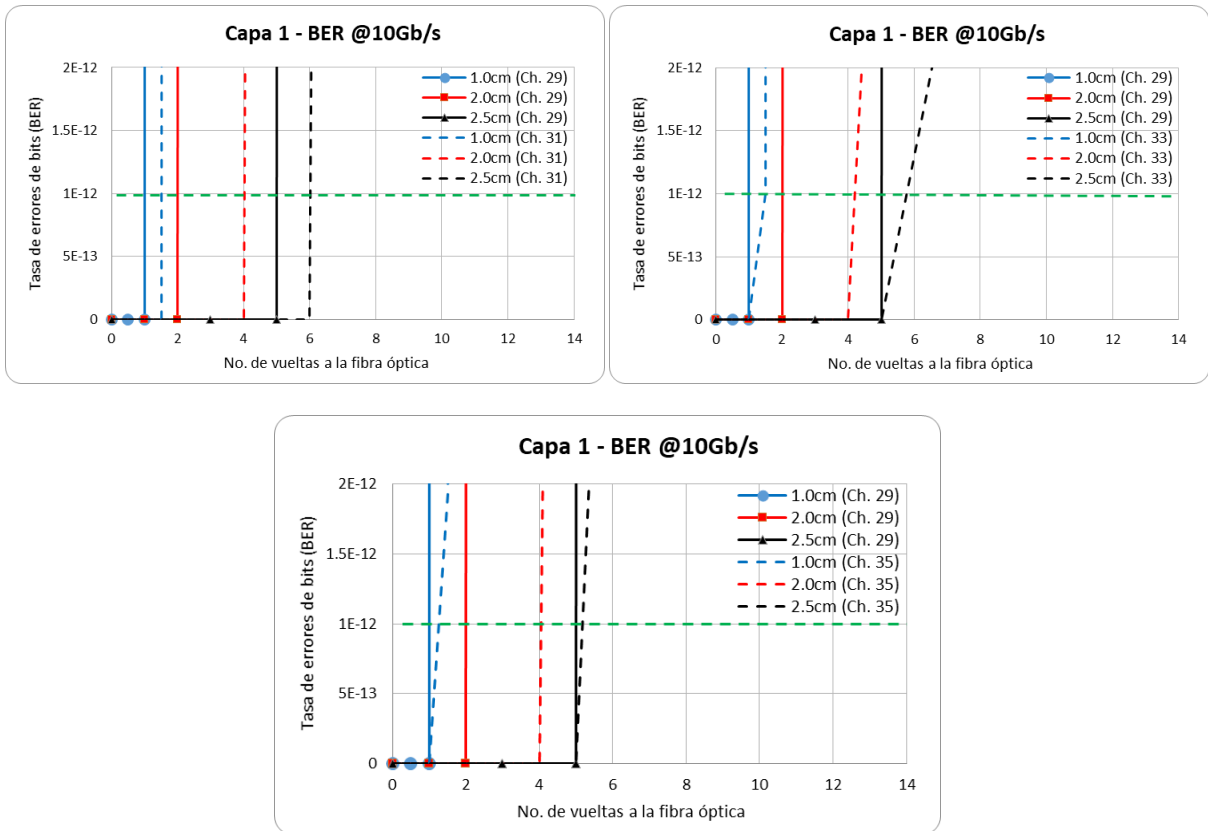


Figura 4.3 Graficas de BERT a 10 Gb/s para los canales WDM 29, 31, 33 y 35 sobre un fronthaul con curvaturas $D1=1\text{ cm}$, $D2= 2\text{cm}$ y $D3= 2.5\text{ cm}$.

En las mediciones de BER de la Figura 4.3 se observa que para los canales WDM 31, 33, y 35 hay una mayor tolerancia a las curvaturas con respecto al canal 29, en otras palabras, los canales WDM más altos pueden aguantar más número de vueltas antes de que su valor de BER supere el umbral de 1×10^{-12} . Esto es atribuido a que los canales 35(1549.31nm), 33(1550.91nm), y 31(1552.52nm) tienen una longitud de onda menor al canal 29(1554.13nm), así como también puede deberse a las variaciones en la potencia de transmisión y recepción de los transceptores coloreados WDM de cada canal WDM respectivamente. Asimismo, se observa que conforme el radio de curvatura es menor, se requieren un menor número de vueltas para que el BER se incremente por arriba del umbral.

Cabe recordar que este experimento se realizó a una tasa de transmisión de 10Gb/s para tomar en cuenta las velocidades típicas de transmisión que se requieren en un fronthaul de fibra óptica de una arquitectura C-RAN en una red 5G. Por otro lado, en las redes 4G con fronthaul óptico (también nombradas 4.5G) la velocidad de transmisión puede ser del orden de 100Mb/s, por lo que, para analizar este escenario, se repite el experimento midiendo el BER de las señales transmitidas sobre el fronthaul con curvaturas, pero ahora con una menor tasa de transmisión de 100Mb/s, y cuyos resultados se muestran en la Figura 4.4. En este nuevo escenario con menor velocidad el umbral típico de BER es ahora de 1×10^{-9} el cual también es indicado con una línea horizontal de color verde en las gráficas de la Figura 4.4.

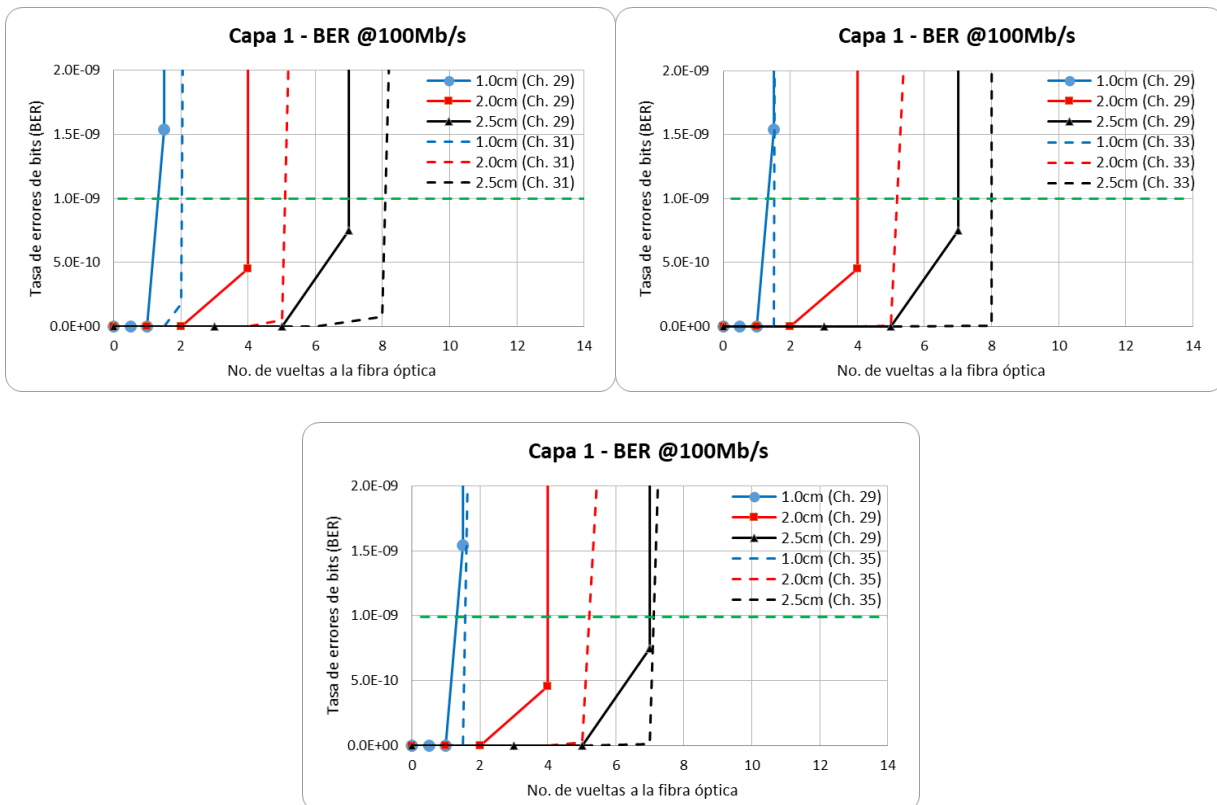


Figura 4.4 Graficas de BERT a 100 Mb/s para los canales WDM 29, 31, 33 y 35 sobre un fronthaul con curvaturas $D1=1$ cm, $D2=2$ cm y $D3=2.5$ cm.

En las gráficas de la Figura 4.4 se vuelven a obtener la misma tendencia con respecto a las gráficas de la Figura 4.3, en donde para los canales 31, 33, y 35 (que tienen una menor longitud de onda con respecto al canal 29) pueden soportar más número de vueltas sobre la fibra óptica para cada una de los radios de curvatura considerados de 1cm, 2cm, y 2.5cm respectivamente. Por otro lado, se puede observar que la principal diferencia es que, al transmitir a una menor velocidad, la tasa umbral de BER se reduce ahora a un valor de 1×10^{-9} y esto permite que, en este nuevo escenario, la transmisión de señales a través del fronthaul soporte también un mayor número de vueltas a la fibra con curvaturas. Por ejemplo, en las gráficas de la Figura 4.3 a 10Gb/s se alcanzan un máximo de número de vueltas de 6, mientras que para las gráficas de la Figura 4.4 se llegan a alcanzar un máximo de número de vueltas de 8 para el caso de un radio de curvatura de 2.5cm. Lo anterior

indica que en un fronthaul de fibra óptica en una red 5G es más propenso a degradaciones por curvaturas que un fronthaul usado en una red 4.5G.

Ahora se analizan las mediciones de BER para los canales WDM 28, 30, 32 y 34 con longitudes de onda 1554.94nm, 1553.32nm, 1551.72nm, y 1550.11nm cuando éstos se transmiten a través del fronthaul perturbado con curvaturas aplicadas en un punto del enlace de 1cm, 2cm, y 2.5cm de radio. En la Figura 4.5 se muestran las mediciones de BER realizadas en un escenario de transmisión de 10Gb/s. De la misma forma, para visualizar de una mejor manera las mediciones del BER para estos canales WDM, se comparan los valores del BER del canal 28 con respecto a los valores del BER de los canales 30, 32, y 34 respectivamente, así como también se muestra un umbral de BER 1×10^{-12} indicado con un aline horizontal verde, el cual, si se supera, la transmisión a 10Gb/s es degradada.

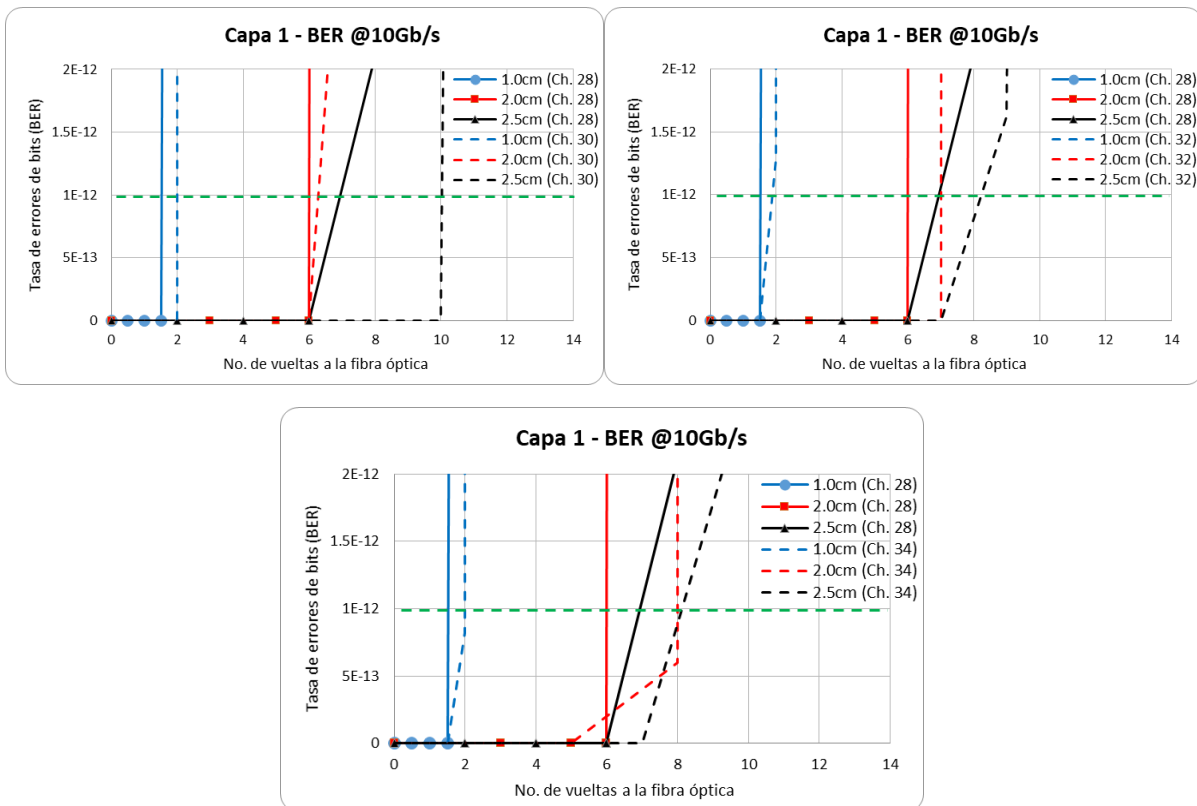


Figura 4.5 Graficas de BERT a 10 Gb/s para los canales WDM 28, 30, 32 y 34 sobre un fronthaul con curvaturas $D1=1\text{ cm}$, $D2=2\text{ cm}$ y $D3=2.5\text{ cm}$.

Las mediciones de BER para los canales 28, 30, 32, y 34 muestran la misma tendencia, en donde los canales más grandes 30, 32, y 34 que poseen una longitud de onda menor soportan un mayor número de vueltas para no superar el umbral de BER de 1×10^{-12} con respecto al canal 28 que posee una longitud de onda mayor. Hay que tomar en cuenta que estos canales WDM se utilizan en una configuración activa y los transceptores WDM coloreados usados para los canales WDM 28, 32, 34, y 36 provienen de otro fabricante comparado con los transceptores WDM coloreados de los canales 29, 31, 33, y 35 respectivamente.

Ahora se repite el experimento de medición de BER para los canales WDM 28, 30, 32, y 34 usando una menor tasa de transmisión de 100Mb/s, velocidad típica usada en un fronthaul de una red 4.5G y en donde el umbral de BER es considerado ahora de 1×10^{-9} . Estos resultados son mostrados en la Figura 4.6.

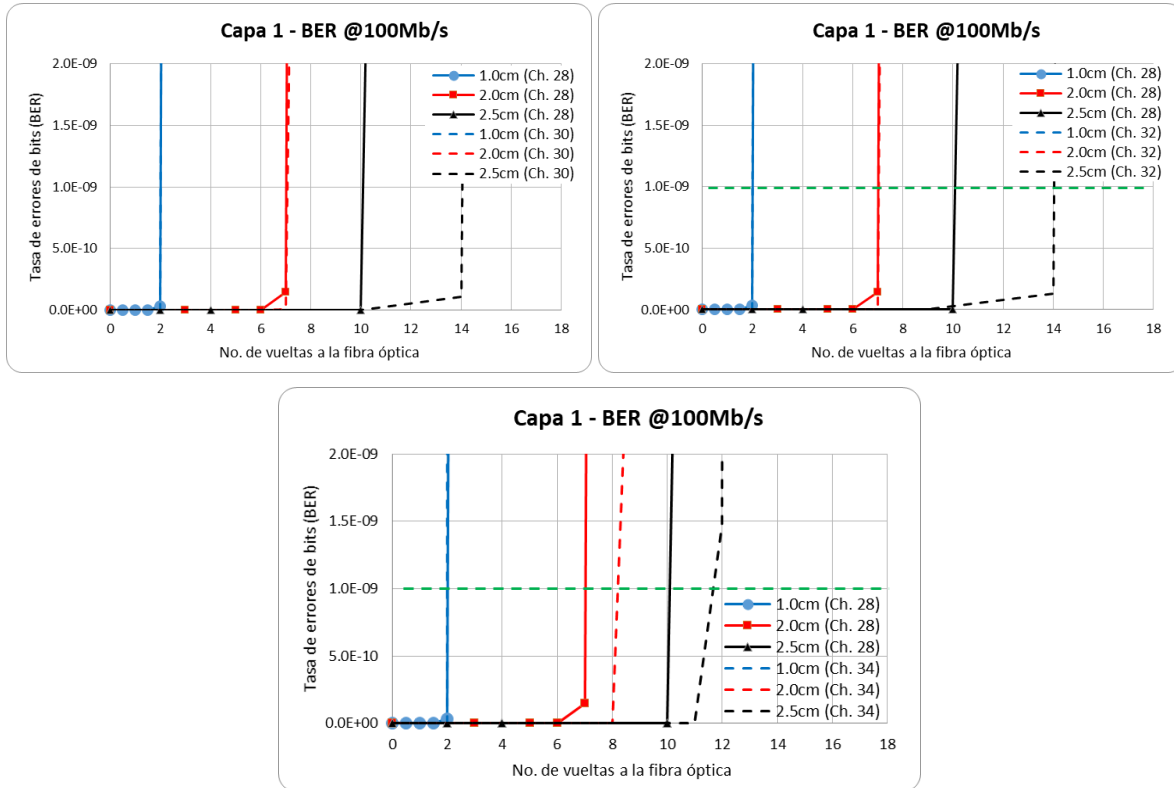


Figura 4.6 Graficas de BERT a 100 Mb/s para los canales WDM 28, 30, 32 y 34 sobre un fronthaul con curvaturas $D1=1$ cm, $D2=2$ cm y $D3=2.5$ cm.

En las mediciones de las figuras 4.5 y 4.6 se puede observar las gráficas de la tasa de errores de bits (BER) que constituyen una forma de medir la integridad de las señales de los canales WDM transmitidos a 100Mb/s y 10Gb/s, que pueden soportar un mayor número de vueltas de la fibra a diferentes curvaturas antes de alcanzar este umbral. La caída del BER que se muestra es debido al aumento de las pérdidas de la fibra por las vueltas, debido a la reducción de potencias recibida. Un resultado de 10^{-9} se considera generalmente una tasa de errores de bits aceptable en el ámbito de las telecomunicaciones, mientras que un valor de 10^{-13} es una BER mínima apropiada para la transmisión de datos. Con base en estos resultados de mediciones de BER en capa 1, se puede concluir que la transmisión a tasas de 10Gb/s son más propensas a perturbaciones por curvaturas para todos los canales WDM considerados en el proyecto, situación que debe considerarse en arquitecturas C-RAN de redes 5G.

4.2 MEDICIONES DE LATENCIA, JITTER Y PÉRDIDAS DE TRAMAS EN CAPA 2

Las Figuras 4.7, y 4.8 muestran un ejemplo de medición de los parámetros de Latencia, Jitter, y Pérdidas de Tramas en capa 2 de las señales Ethernet transmitidas a través del fronthaul óptico de 21km con curvaturas a una tasa de 10 Gb/s. Para este ejemplo se realizan curvaturas en un punto del fronthaul con radios de 2.5cm y una cantidad de vueltas de 8. En este escenario de ejemplo, la potencia óptica recibida en el receptor después de transmitirse la señal a través del fronthaul de 21km con curvaturas es de -21dBm. En la Figura 4.7 se puede apreciar que dentro de la trama Ethernet transmitida, en la sección de la trama correspondiente a datos se emplea nuevamente una secuencia de bits pseudoaleatoria PRBS 31, asimismo, durante 60 segundos de prueba, se pudieron transmitir 140,971,797 tramas Ethernet y solo se pudieron recibir 140,968,542 tramas, dando un total de tramas pérdidas de 87,163, tal como se puede apreciar en la Figura 4.8 respectivamente.

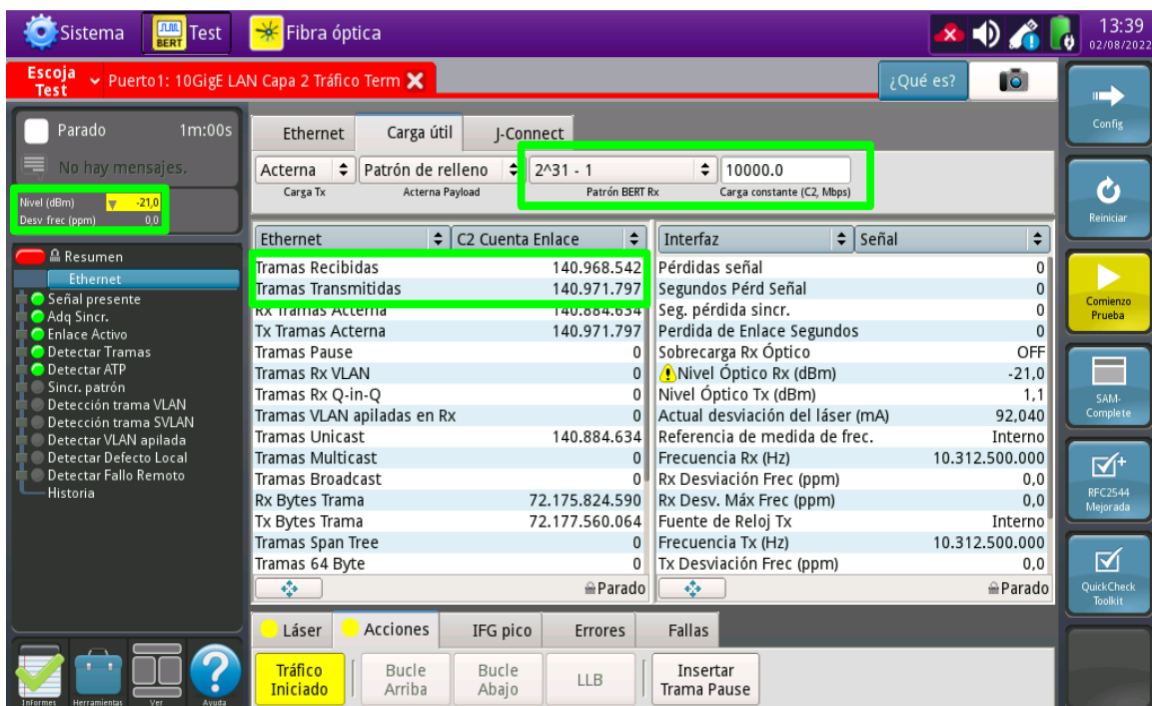


Figura 4.7 Mediciones de parámetros en capa 2 para el canal WDM 28 a 10 Gb/s en un fronthaul óptico con curvaturas $D3=2.5$ cm.

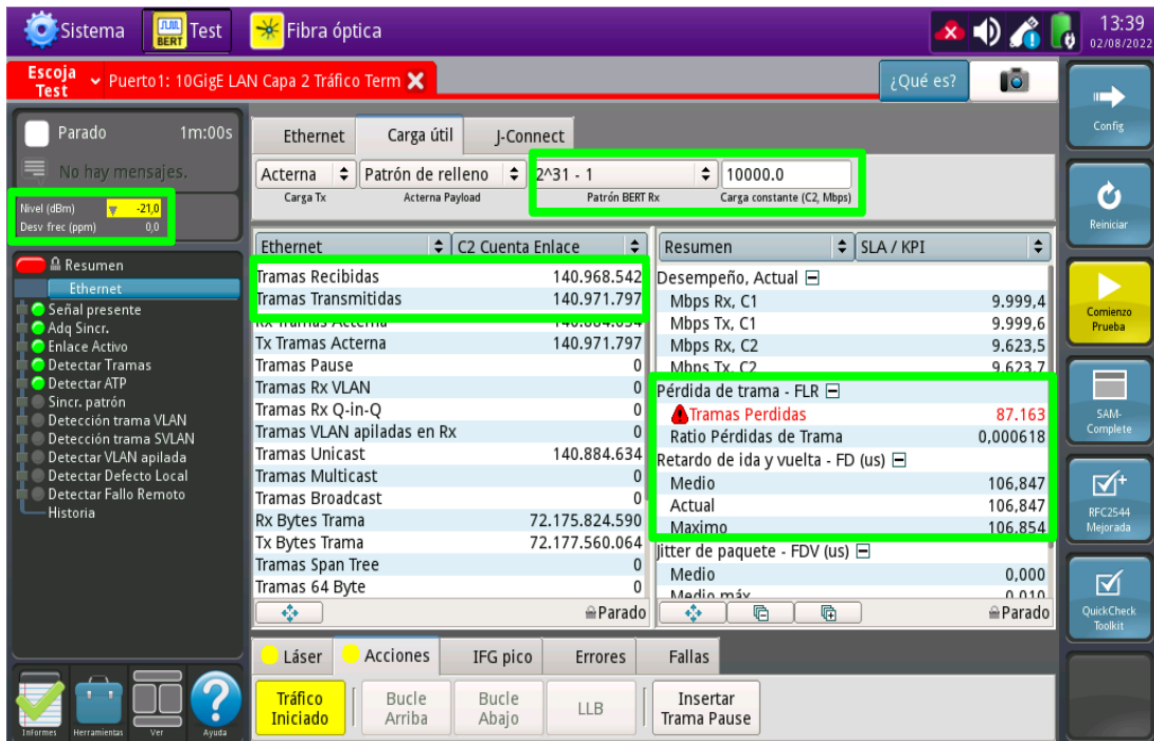


Figura 4.8 Pérdidas de tramas, Latencia y Jitter para el canal WDM 28 a 10 Gb/s en un fronthaul con curvaturas $D3=2.5$ cm.

En la Figura 4.8 se pueden apreciar las mediciones de Latencia y Jitter de las tramas Ethernet transmitidas a 10Gb/s a través del fronthaul de 21km con curvaturas. En este sentido, se considera la Latencia como el tiempo que tarda una trama completa de Ethernet en salir del transmisor y llegar al receptor después de transmitirse por el fronthaul respectivamente, mientras que el Jitter se refiere a las variaciones en tiempo que presenta la medición de Latencia para diferentes tramas Ethernet. Para el ejemplo de la Figura 4.8 se tiene que la Latencia mide $106.847 \mu\text{s}$ y el Jitter $0.010 \mu\text{s}$. Es importante adelantar que estas mediciones de Latencia y Jitter no cambian para diferentes valores de curvaturas y número de vueltas aplicadas a la fibra óptica, lo cual confirma el hecho de que estas medidas de tiempo no son afectadas por las pérdidas causadas por estas perturbaciones externas. Sin embargo, el parámetro de Pérdidas de tramas si depende de las curvaturas por lo que se realiza un estudio de cómo estas medidas se modifican con las curvaturas aplicadas en un punto del fronthaul.

En la Figura 4.9 se muestra gráficas de mediciones de la tasa de pérdidas de tramas, que son definidas como el número de tramas pérdidas entre el número de tramas transmitidas a través del fronthaul. Estas mediciones se realizaron usando los canales WDM 29, 31, 33, y 35 usados en la configuración de fronthaul pasivo, así como también se consideran curvaturas aplicadas en un punto de la fibra y con un cierto número de vueltas y con diferentes curvaturas con radios de 1cm (curvas de color azul), 2cm (curvas de color rojo) y 2.5cm (curvas de color negro) respectivamente.

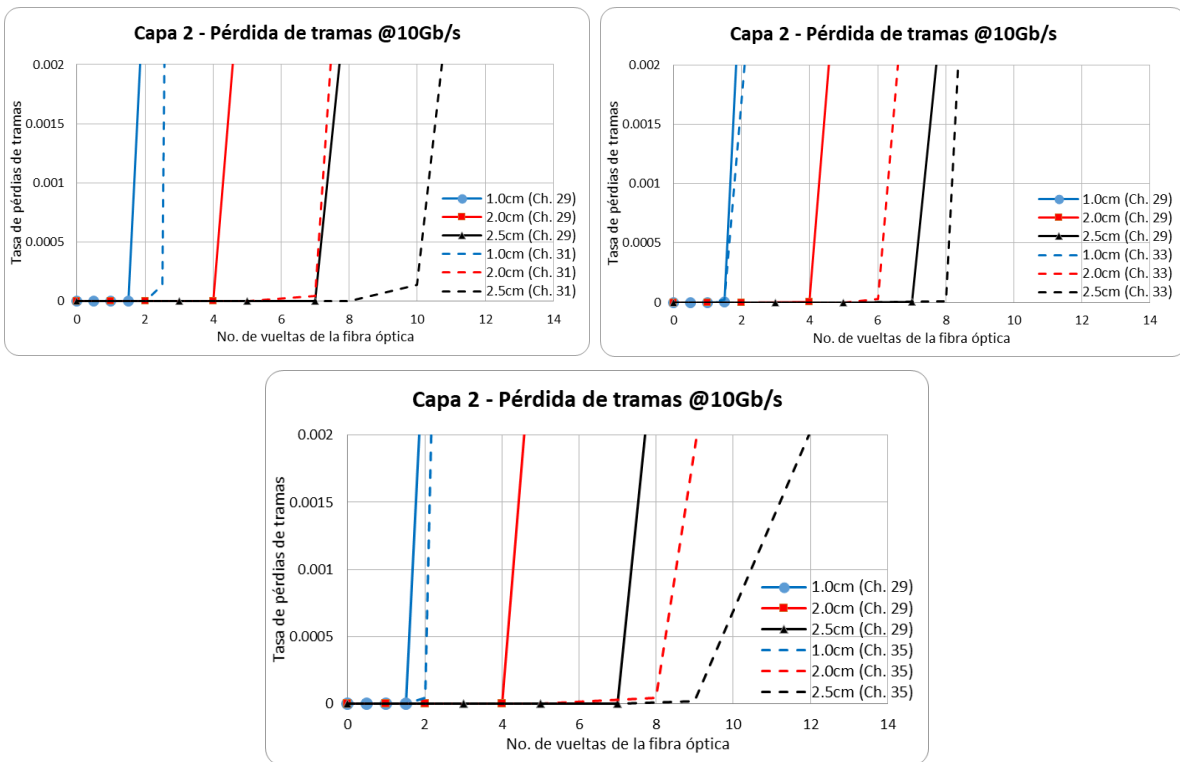


Figura 4.9 Gráficas de Pérdidas de tramas Ethernet a 10 Gb/s sobre un fronthaul Pasivo de 21km con diferentes curvaturas D1=1 cm, D2= 2cm y D3= 2.5 cm.

De la Figura 4.9 podemos observar que no hemos colocado un umbral para decidir si un valor de tasa de pérdidas de tramas es adecuado para una transmisión de 10Gb/s en el fronthaul. En algunas pruebas de activación de servicios Ethernet para voz, datos, y videos a nivel comercial consideran que debe haber una tasa de al menos 0.001 de pérdidas de tramas para poder soportar el servicio, mientras que en otras pruebas de activación de servicios Ethernet consideran un umbral de cero para la tasa de pérdidas de tramas en casos cuando se busca una seguridad en la transmisión de datos interbancarios. En este sentido nosotros consideramos un umbral de cero para la tasa de pérdidas de tramas. Con base en lo anterior podemos observar de las gráficas de la Figura 4.9, que los canales 31, 33, y 35 que poseen una menor longitud de onda pueden soportar un mayor número de vueltas en la curvatura aplicada a la fibra para conservar una tasa de cero pérdidas de tramas en comparación al canal WDM 29 que posee una longitud de onda mayor.

Este mismo experimento a 10Gb/s se repite para los canales WDM 28, 30, 32, y 34 utilizados en el fronthaul activo. Los resultados de las mediciones de tasa de pérdidas de tramas para estos canales WDM se pueden observar en la Figura 4.10

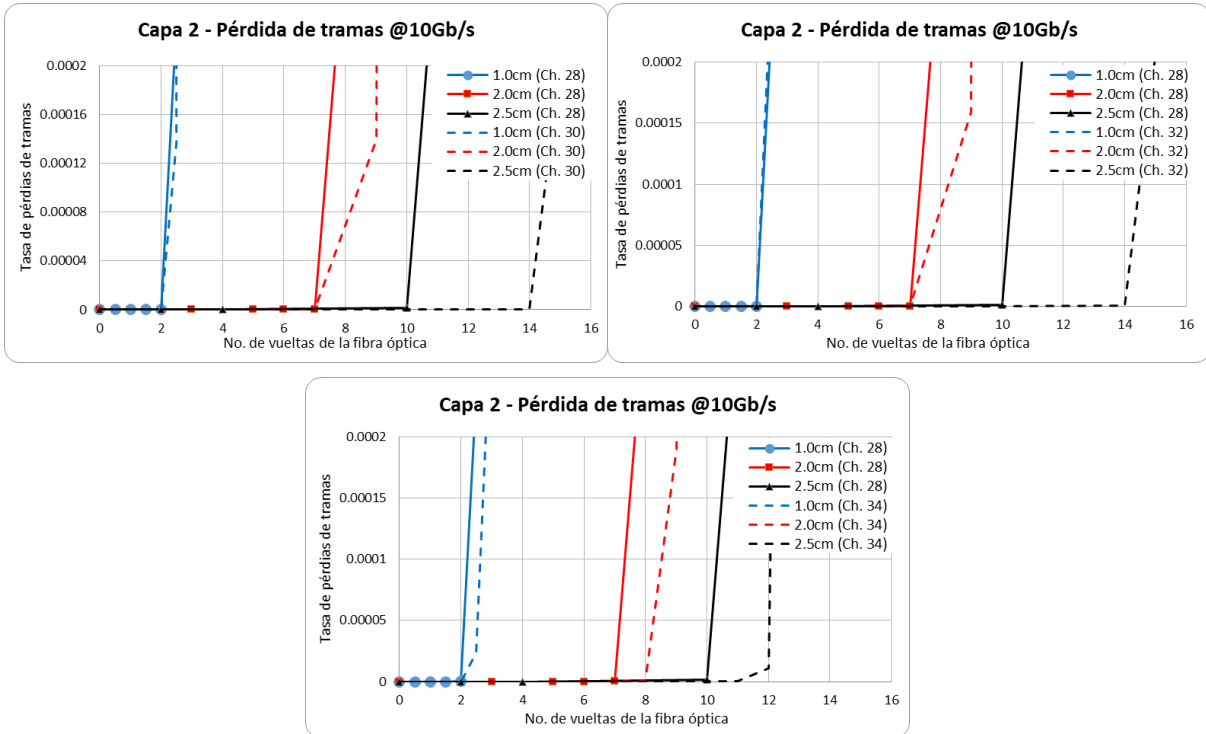


Figura 4.10 Gráficas de Pérdidas de tramas Ethernet a 10 Gb/s sobre un fronthaul Activo de 21km con diferentes curvaturas D1=1 cm, D2= 2cm y D3= 2.5 cm.

De la misma manera, en la Figura 4.10 se puede observar que los canales 30, 32, y 34 que poseen una menor longitud de onda pueden soportar un mayor número de vueltas en la curvatura aplicada a la fibra para conservar una tasa de cero pérdidas de tramas en comparación al canal WDM 28 que posee una longitud de onda mayor. Una comparativa de valores de tasa de pérdidas de tramas entre los canales WDM usados en la configuración pasiva (29, 31, 33, y 35) y activa (28, 30, 32, y 34) podría verse comparando las gráficas de las Figuras 4.9 y 4.10, aunque se debe resaltar que el proveedor de los transceptores WDM coloreados de los canales 28, 30, 32, y 34 es diferente al de los transceptores WDM coloreados de los canales 29, 31, 33, y 35 respectivamente.

Si repetimos este mismo experimento de medición de pérdidas de tramas empleando una tasa de transmisión de 100Mb/s correspondiente a velocidades típicas empleadas en un fronthaul de una red 4.5G los resultados son similares a los reportados en las Figuras 4.9 y 4.10 correspondiente a una velocidad de 10Gb/s que son usadas en redes 5G. Lo anterior se atribuye a lo siguiente, en las mediciones para 100Mb/s es normal que haya menos pérdidas de bits en comparación a las mediciones de 10Gb/s, y esta diferencia en pérdidas de bits no se transfiere directamente al escenario de medición de pérdida de tramas obtenida a 100Mb/s y a 10Gb/s respectivamente. Lo anterior puede deberse a que, si consideramos una trama con ciertos bits perdidos en su sección de datos, dicha trama aún se puede recuperar a través de una corrección, por lo que es normal que una trama medida a 10Gb/s con mayor pérdida de bits en su interior pueda corregirse y contarse como una trama no perdida, haciendo que el número de tramas transmitidas sin perderse a 10Gb/s puedan igualarse a las tramas transmitidas sin perderse a 100Mb/s.

Esta observación es muy importante, ya que podemos deducir que la medición de tasa de pérdida de tramas Ethernet a diferentes velocidades (100Mb/s y 10Gb/s) no podrá ser efectiva para saber si la transmisión de datos es mejor o peor cuando transmitimos 100Mb/s (en redes 4.5G) o 10Gb/s (en redes 5G) a través de un fronthaul con perturbaciones, por lo tanto, es mejor basarse en las mediciones de la tasa de bit erróneos (BER) estudiada en la sección anterior.

Finalmente se desea volver a analizar las pérdidas causadas por las curvaturas y que se muestran en las Figuras 4.11 y 4.12 para todos los canales WDM estudiados en el proyecto.

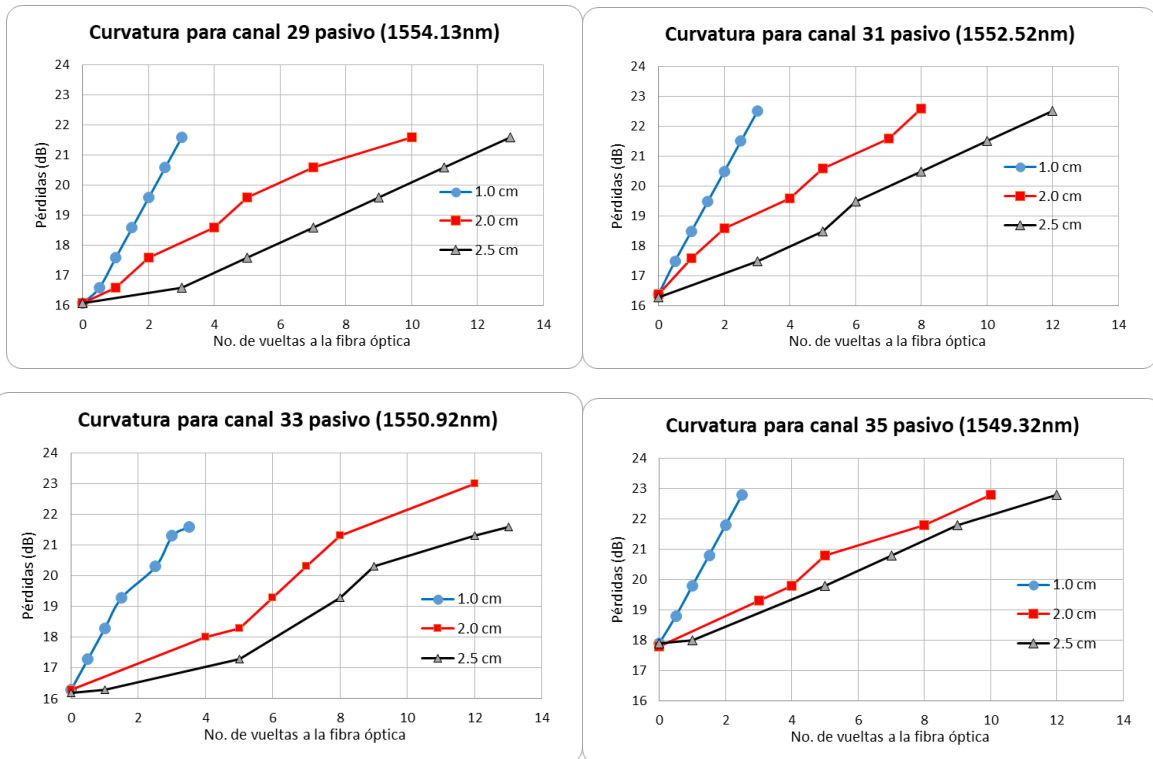


Figura 4.11 Graficas de pérdidas por curvaturas en función del número de vueltas para los canales WDM 29, 31, 33 y 35 usados en el fronthaul pasivo D1=1 cm, D2= 2cm y D3= 2.5 cm.

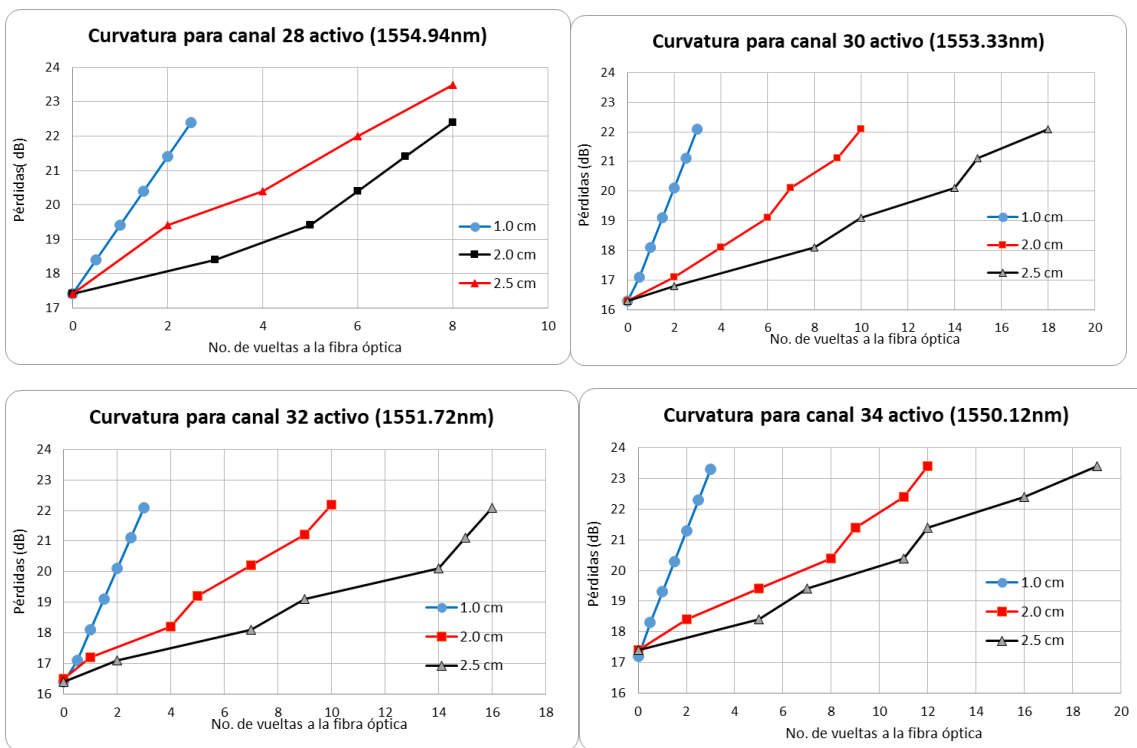


Figura 4.12 Graficas de pérdidas por curvaturas en función del número de vueltas para los canales WDM 28, 30, 32, y 34 usados en el fronthaul activo D1=1 cm, D2= 2cm y D3= 2.5 cm.

Estos valores de pérdidas son muy importantes, debido a que prácticamente desde un número de vueltas igual a 2, las pérdidas para cualquier curvatura siempre tienen un valor mayor a 17dB.

Por otro lado, si consideramos que la potencia inicial de todos los transceptores WDM coloreados utilizados en el presente proyecto tienen una potencia promedio inicial de 1 dBm y aparte tienen una sensibilidad promedio de -16dBm, es decir, no pueden medir valores de potencia menores a -16dBm (para garantizar una transmisión a 10Gb/s con un BER de 1×10^{-12}), entonces todos los transceptores WDM coloreados usados solo pueden permitir en teoría una pérdida total de $1\text{dB} + 16\text{dB} = 17\text{dB}$ para garantizar una transmisión de 10Gb/s con el mínimo de degradación.

Sin embargo, en nuestras mediciones de BER en el fronthaul de 21km y con curvaturas aplicadas se pueden observar valores de BER menores al umbral de 1×10^{-12} aun teniendo más de 2 vueltas y ya habiendo superado el valor de 17dB de pérdida teórico que requieren los transceptores WDM coloreados para garantizar una transmisión de 10Gb/s. Lo anterior lo atribuimos a que los transceptores ópticos todavía tienen una tolerancia en la potencia mínima que pueden recibir para garantizar una transmisión a 10Gb/s a través de un fronthaul y que no necesariamente esa potencia mínima es fija a -16dBm. Dichas tolerancias no vienen descritas en las características de fábrica de los transceptores WDM coloreados utilizados y que en con las mediciones realizadas en nuestra investigación éstas fueron evidenciadas.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES

Los datos obtenidos en este proyecto de investigación realizado en el laboratorio del instituto de ingeniería de la UNAM, se presenta un antecedente importante en el área de investigación en la correcta operación de un fronthaul óptico en una red CRAN 4G/5G. Para las conclusiones se incluye un resumen de lo realizado durante el proyecto de investigación, que incluye propuestas, contribuciones realizadas a la generación de conocimiento científico para un trabajo a futuro.

Finalmente se cumple el objetivo de la tesis, cuyo trabajo fue enfocado en el análisis de los efectos de perturbaciones externas sobre el fronthaul de fibra óptica DWDM utilizado en un sistema C-RAN 4G/5G. Sin embargo, los proveedores de servicios en México continúan con la búsqueda de ofrecer servicios de la red 5G que requieren diferentes niveles de calidad, están obligados a evolucionar desde un enfoque basado en una arquitectura fronthaul. Esto implica una arquitectura que pueda satisfacer las necesidades y ofrecer una mayor flexibilidad, pero también requiere un enfoque de prueba diferente. Validando la latencia, jitter y pérdida de paquetes de la red a escala requieren soluciones de prueba que sean eficientes, simples y que requieran altas tasas de transmisión y baja latencia, transmitidas en dicho fronthaul desde 100 Mb/s hasta 10 Gb/s.

Se verificó la integridad del cable de fibra óptica, así como se efectuó su caracterización con las especificaciones señaladas en la norma ITU-T G.652.D. Además, es importante mantener 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.

Inicialmente, se obtuvieron resultados interesantes, en los empalmes, ya que no presentan factores que pudieran causar atenuación en la señal del fronthaul óptico tanto el sentido Upstream y Downstream del fronthaul activo y pasivo full-dúplex. Además, se analizaron los 21 Km de fibra óptica mediante el equipo óptico OTDR y el OSA donde se generaron las trazas a detalle. También se observan los conectores mecánicos utilizados en la unión entre las fibras ópticas adicionales y se utilizó un medidor de potencia (Power Meter) para validar pérdidas de potencia de la señal óptica adquiridas al inicio y al final de la red de fibra.

Por otro lado, se utilizó equipo óptico (Mux/Demux) Packetlight tanto al inicio como al final de la red de fibra que permite unir y separar los canales WDM transmitidos. Estos equipos añaden pérdidas de inserción que no pueden ser medidos con un OTDR, pero si con un medidor de potencia.

Posteriormente, se obtuvieron parámetros de medición importantes mediante el equipo VIAVI tanto para capa 2 y capa 1, de las pruebas del BERT, latencia, jitter, pérdidas de tramas. Además, el primer paso fue aplicar vibraciones mecánicas con frecuencias desde 0.5Hz hasta 100 Hz, tanto la configuración activa, como la pasiva. Estas vibraciones se ejercieron en puntos sensibles del fronthaul óptico, tales como en conectores mecánicos y en puntos específicos de la fibra, a través de una bocina accionada por un generador de funciones. Sin embargo, se utilizaron transceptores ópticos SFP+ con diferentes proveedores y diferentes longitudes de onda y no presentaron problemas y/o pérdidas de potencia durante las vibraciones. El segundo paso fue emplear tres

diferentes radios de curvaturas de la fibra óptica, con valores que son encontrados típicamente durante una instalación del cableado de fibra en interiores y exteriores.

Con base en las recomendaciones del ITU-T 0.150, estas mediciones de rendimiento en equipos de transmisión digital, las gráficas que se obtuvieron del BER para velocidades entre 100 Mb/s y 10 Gb/s del capítulo 4, se puede concluir que la transmisión a tasas de 10Gb/s son más propensas a perturbaciones por curvaturas para todos los canales WDM considerados en el proyecto, situación que debe considerarse en arquitecturas C-RAN de redes 5G.

Por último, se publicó en calidad de co-autor el manuscrito titulado "Análisis de un fronthaul óptico activo y pasivo con DWDM para arquitecturas C-RAN 4G/5G coexistentes basadas en SDR" en la revista de Optical Engineering en Estados Unidos con el número OE:20220517GR, elaborado en conjunto entre el Instituto de ingeniería y la Facultad de ingeniería, y en donde se muestran parte de los resultados obtenidos en este trabajo de Tesis de Maestría.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] IFT. (2022). El pleno del IFT aprueba modificar 18 títulos de concesión de Telcel para ofrecer 5G. IFT, 1-7.
- [2] Kazi Mohammed Saidul Huq, J. R. (2017). Backhauling Fronthauling for Future Wireless Systems, 1st Edition. UK: John Wiley & Sons.
- [3] Imran, M. A. (2017). Access-fronthaul and backhaul networks for 5G & beyond. UK: IET.
- [4] White paper, (2019). Nokia Optical Anyhaul as an enabler of C-RAN: Accelerating the delivery of 5G networks. Nokia, 1-5.
- [5] White paper, (2019). Nokia Optical Anyhaul as an enabler of C-RAN: Accelerating the delivery of 5G networks. Nokia, 1-5.
- [6] Forum, Huawei, (20 de Febrero de 2020). <https://forum.huawei.com/enterprise/en/5g-fronthaul-solution/thread/624437-875>. Recuperado el 06 de Agosto de 2022.
- [7] L. Wan, Z. G. (2019). Enabling efficient 5G NR and 4G LTE coexistence. IEEE Wireless Communications 26(1), 6-8.
- [8] A. O. Mufutau, F. P.-R. (2020). Demonstration of a hybrid optical fiber–wireless 5G fronthaul coexisting with end-to-end 4G networks. J. Opt. Commun. Netw. 12(3), 72-78.
- [9] Cisco, (2020) “Cisco Annual Internet Report (2018–2023),” http://grs.cisco.com/grsx/cust/grsCustomerSurvey.html?SurveyCode=4153&ad_id=US-BN-SEC-M-CISCOSECURITYRPT-ENT&KeyCode=000112137. Recuperado el 13 de Agosto de 2022.
- [10] J. G. Andrews, S. B. (2014). What Will 5g Be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.32,1065-1082. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6824752>.
- [11] E. Dahlman, S. P. (2013). 4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband. USA: Academic press.
- [12] Rhee, S. (2016). Catalyzing the Internet of Things and smart cities: Global City Teams Challenge. International Workshop on Science of Smart City Operations and Platforms Engineering (SCOPE) in partnership with Global City Teams Challenge (GCTC) (SCOPE - GCTC), 1-10.
- [13] Effenberger, X. L. (2016). Emerging optical access network technologies for 5G wireless. in IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 8, 70-79.
- [14] Sirotkin, S. (2021). 5G Radio Access Network Architecture, The Dark Side of 5G Book. En J. W. Sons, 5G Radio Access Network Architecture, The Dark Side of 5G Book (págs. 200-213). USA: John Wiley & Sons.
- [15] VIAVI SOLUTIONS, (01 de Febrero de 2020). <https://www.viavisolutions.com/es-mx/productos/pruebas-de-la-tasa-de-errores-de-bits-bert>. Recuperado el 15 de Septiembre de 2022.
- [16] Agrawal, G. P. (2002). Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition. USA: John Wiley & Sons.
- [17] Azadeh, M. (2009). Fiber Optics Engineering - Optical Networks. USA: Springer.
- [18] Corning Optical Communications, Datasheet, Communications, C. O. (21 de Marzo de 2022). <https://ecatalog.corning.com/optical-communications/CALA/en/generate-product-specsheet?code=024EV4-14100D53>. Recuperado el 21 de Agosto de 2022.
- [19] James, F. K. W. (2010). Redes de computadoras: Un enfoque descendente, 5ta Edición. España, Prentice Hall, Pearson Education.
- [20] Castrejón, D. R. (2019). Proyectos de desarrollo e innovación tecnológica enfocados a las tecnologías de la información y la comunicación. UNAM, 5-20.

- [21] Antony, A. G. (2003). DWDM Network Designs and Engineering Solutions, 1st Edition. USA: Cisco Press.
- [22] Dodd, A. Z. (2012). The essential guide to telecommunications, 4th Edition. USA: Prentice Hall.
- [23] R.B, J. E. (2009). Networking Self-Teaching Guide, OSI, TCP/IP, LANs, MANs, WANs, Implementation, Management and Maintenance. USA: John Wiley & Sons.
- [24] Tanenbaum, A. S. (2003). Redes de Computadores, 4th Edición. México: Prentice Hall, Pearson Education.
- [25] Achyut K. Dutta & Niloy K. Dutta, M. F. (2004). WDM Technologies Optical Networks. USA, Academic Press.
- [26] Packet Light Networks, (2013). PL-1000TE 1.0 INSTALLATION AND CONFIGURATION MANUAL. PL-1000TE 1.0 INSTALLATION AND CONFIGURATION MANUAL, 20-30.
- [27] Intel. (2012). Intel Ethernet Converged Network Adapter X520, product brief. Intel Ethernet Converged Network Adapter X520, product brief, 1-2.
- [28] Finisar. (2020). Datasheet, FTLX1472M3BCL. Datasheet, FTLX1472M3BCL, 1-2.
- [29] Smart Optics, (2020). Datasheet, SFP+ 10G MR DWDM 100GHz 40km D9470. SFP+ 10G MR DWDM 100GHz 40km D9470, 1.
- [30] EXFO.com.(09 de Abril de 2020). <https://www.exfo.com/en/solutions/communication-service-providers/wireline/dwdm>. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020.
- [31] Ghatak, K. & Thyagarajan. (2007). Fiber Optic Essentials IEEE press,1st Edition. USA: John Wiley & Sons.
- [32] Decusatis, C. (2002). Fiber Optic Data Communication Technological Trends and Advances,1st Edition. USA: Academic Press.
- [33] George J & Sudhakar C.(2020). Distributed Fiber Optic Sensing and Dynamic Rating of Power Cables, 1st Edition. USA: John Wiley & Sons; IEEE.
- [34] Thorlabs. (18 de Abril de 2022).https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6975. Recuperado el 30 de Abril de 2022.
- [35] Wetteroth, D. (2003). OSI Reference Model for Telecommunications, 1st Edition. USA: McGraw-Hill.
- [36] EXFO. (2008). EXFO-fpm-300-datasheet. EXFO Expertise Reaching out, 2-4.
- [37] EXFO. (2013). User Guide RTU-720. EXFO Expertise Reaching out, 2-4.
- [38] H, D. E. (2021). Regeneración de Señales-Notas de Clase, Capítulo 4, Reflectometría. UNAM, 10-15.
- [39] Anritsu Corporation,(2019). MS9740A Optical Spectrum Analyzer Operation Manual. Anritsu DataSheet, 20-50.
- [40] Anritsu Corporation,(2019). S9740A Optical Spectrum Analyzer Operation Manual. Anritsu DataSheet, 30-40.
- [41] Krzanowski, R. (2013). Metro Ethernet Services for LTE Backhaul, Mobile Communications Series, 1st Edition. USA: Artech House.
- [42] Moya, J. M. (2012). Comunicaciones Móviles y Sistemas GSM, UMTS y LTE, 1ra Edición. México:Alfa-Omega.
- [43] Kazi Mohammed Saidul Huq, J. R. (2017). Backhauling Fronthauling for Future Wireless Systems. USA: John Wiley & Sons.
- [44] Zhang, M. V. (2017). Cloud Mobile Networks From RAN to EPC, Wireless Networks, 1st Edition.USA: Springer International Publishing.
- [45] Hao Jiang, Q. C. (2019). Mobile Data Mining and Applications, 1st Edition. USA: Springer International Publishing.
- [46] Castrejón, R. G. (2019). Analysis of an active and passive optical fronthaul with DWDM for

- coexisting 4G/5G C-RAN architectures based on SDR Paper Number: OE 20220517GR.Optical Engineering, 33-45.
- [47] VIAVI SOLUTIONS, (06 de Enero de 2019). VIAVI SOLUTIONS. Recuperado el 05 de Julio de 2022, de VIAVI SOLUTIONS: <https://www.viavisolutions.com/fronthaul>.
- [48] Ahmadi, S. (2019). 5G NR Architecture, Technology, Implementation and Operation of 3GPP New Radio Standards. UK: Academic Press publications Elsevier.
- [49] Wolfgang M.(2006). Digital Timing Measurements From Scopes and Probes to Timing and Jitter, 1st Edition.(págs. 65). USA: Springer. International Publishing.
- [50] Ernesto A. (2010). Redes CISCO CCNP a Fondo Guía de estudio. 1ra Edición. México :Alfaomega Grupo Editor.