



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

“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN *FRONTHAUL* ÓPTICO BASADO EN  
UNA ARQUITECTURA DWDM ACTIVA PARA UNA RED C-RAN CON  
APLICACIONES 4G/5G”

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

PRESENTA:  
ING. DAVID LÓPEZ MATA

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

Ciudad Universitaria, México. Octubre 2022.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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. Rangel Licea Víctor

Secretario: Dr. Martynyuk Oleksandr

1er. Vocal: Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique

2do. Vocal: Dr. Gutiérrez Castrejón Ramón

3er. Vocal: Dr. García Jiménez Luis Francisco

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM

## **TUTOR DE TESIS:**

**DR. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE**

---

FIRMA

## **Agradecimientos**

Se agradece 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 comprenden el periodo de estudio de este posgrado.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por brindar el total apoyo con el uso de las instalaciones, equipo especializado y por las facilidades prestadas en el tiempo de estudio y desarrollo de este proyecto.

Al posgrado de Ingeniería de la UNAM por brindarme las bases de estudio y posibilidad de acceder a esta oportunidad de crecimiento y desarrollo profesional.

A los investigadores principales del grupo de Telecomunicaciones ópticas el Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera y el Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón que su entusiasmo y dirección para este proyecto dieron como resultado no solo un escrito, sino una propuesta innovadora para el estado tecnológico actual en nuestro país.

## Resumen

El presente escrito se basa en la participación que se tuvo en un proyecto del Instituto de Ingeniería en colaboración con 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. En la presente propuesta se analiza la implementación y funcionamiento de un *fronthaul* óptico activo, basado en un enlace de fibra óptica (tipo ITU-T G.652) de hasta 20 km de longitud empleando tecnología de multiplexado denso por división en longitud de onda (DWDM) de cuatro canales operando a 10 Gb/s cada uno. Esta tecnología permite habilitar una red celular 4G/5G en una arquitectura de radio acceso centralizado (C-RAN), constituida en un extremo por radios tipo USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) definidos por software que actúan como antenas o radio bases (RRH) y en el otro extremo por computadoras dedicadas de alto desempeño que conforman las unidades de procesamiento en banda base (BBU). El enlace óptico dedicado que conecta las radio bases RRHs con sus unidades de procesamiento en banda base BBU se conoce en la literatura especializada como *fronthaul* óptico. En particular, se propone y analiza una configuración de *fronthaul* óptico DWDM activo, demostrando su factibilidad técnica basada en el uso de transpondedores optoelectrónicos que realizan una conversión de longitud de onda para cada canal DWDM desde la banda O a la banda C y viceversa, así como también, una regeneración de la señal a transmitirse en cada canal DWDM. Esta configuración de *fronthaul* óptico DWDM activo se ha probado sobre un enlace de fibra óptica de más de 20km, cuya caracterización se realizó mediante el uso de un equipo OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*). Asimismo, se describe y analiza un proceso exhaustivo de caracterización de los componentes que conforman la configuración del *fronthaul* óptico DWDM activo, con especial énfasis en los equipos transpondedores PL1000-TE de PacketLight y en los transceptores de 10Gb/s denominados SFP+ que contienen a los láseres y fotodetectores de cada canal DWDM. Para los láseres de los transceptores SFP+ se caracterizaron su longitud de onda de emisión, ancho de línea, y parámetros ópticos como SMSR (Side Mode Supression Ratio) y OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*), los cuales se obtuvieron con ayuda de un analizador de espectros ópticos (OSA). La investigación se complementa con el análisis de los espectros de transmisión de cada canal DWDM y los cálculos requeridos en términos de potencia de transmisión y medición de la razón señal a ruido óptica de las señales DWDM, para asegurar la inexistencia de efectos no lineales entre los canales DWDM transmitidos. Con este análisis también se logra garantizar una penalización de potencia por dispersión cromática (CD) menor a 1 dB para todos los canales DWDM y asegurar una OSNR a lo largo de todo el sistema por arriba de 40 dB. Estas pruebas de transmisión para cada canal DWDM se realizaron para diferentes distancias del *fronthaul* óptico de 10, 18 y 21 km, permitiendo concluir que el *fronthaul* DWDM activo se ha instalado correctamente y operando de manera óptima para su incorporación en una arquitectura C-RAN.

## **Objetivo General**

El objetivo general de este proyecto de Tesis es el de estudiar e implementar un enlace de fibra óptica basado en tecnología de multiplexación por longitud de onda (WDM) y transpondedores activos, y con ello conformar un *fronthaul* óptico activo que permita interconectar de manera escalable una serie de radio-bases de telefonía celular, que se ubican en un extremo del enlace con las unidades de procesamiento en banda base que se encuentran en el otro extremo del enlace. Este enlace debe cumplir con las características propias de un *fronthaul* de tecnología 5G conforme a una arquitectura Cloud Radio Access Network (C-RAN) de próxima generación. Para garantizar la factibilidad técnica del enlace, se analizarán diversos parámetros de desempeño, con lo cual se verificará el correcto funcionamiento de este tipo de tecnología óptica como *fronthaul* activo en una arquitectura C-RAN para redes 4G/5G.

índice	
Agradecimientos .....	3
Resumen .....	4
Objetivo General .....	5
Glosario .....	8
Capítulo 1 Introducción de redes C-RAN con <i>fronthaul</i> óptico.....	9
1.1 Estado del arte .....	9
1.2 Principales arquitecturas de red 4G/5G .....	11
1.3 Panorama tecnológico de redes 5G.....	14
Capítulo 2 <i>Fronthaul</i> óptico con WDM activo.....	17
2.1 Tecnología WDM .....	17
2.2 <i>Fronthaul</i> óptico (tecnología y arquitecturas) .....	19
2.3 Protocolos de transporte para el <i>Fronthaul</i> óptico .....	22
2.4 Aplicaciones .....	25
2.4.1 Redes ópticas activas y pasivas.....	25
2.4.2 ARoF y DRoF.....	26
2.4.3 Redes WDM, SDM y basadas en MCF.....	26
2.4.4 PoF y FSO .....	27
Capítulo 3 Propuesta de implementación de un <i>fronthaul</i> DWDM activo.....	28
3.1 Propuesta de <i>fronthaul</i> activo con tecnología DWDM .....	28
3.2 Equipo transpondedor requerido .....	30
3.2.1 Transpondedor y su control .....	34
3.2.2 Puertos de red ópticos .....	35
3.2.3 Lectura general del sistema PL-1000TE .....	40
3.3 Identificación de conectores y cables .....	42
3.3.1 Cable ribbon.....	43
3.3.2 Conectores .....	43
3.4 Características de las componentes del <i>Fronthaul</i> Activo .....	44
3.4.1 Capacidades de los transpondedores PL-1000TE .....	44
3.4.2 Características del enlace de fibra óptica instalada .....	47
3.5 Mediciones del enlace de fibra óptica usado en el <i>Fronthaul</i> Activo .....	55
Capítulo 4 Implementación preliminar y caracterización del sistema propuesto .....	63

<b>4.1 Descripción de pruebas a realizar en equipos y componentes por separado</b>	<b>63</b>
<b>4.1.1 Pruebas a los transceptores SFP+</b> .....	63
<b>4.2 Medición de la potencia emitida por los SFP+ conectados al USRP</b> .....	68
<b>4.3 Medición de la potencia emitida por los SFP+ conectados a la PC</b> .....	74
<b>4.4 Medición de la longitud de onda de operación de los SFP+ conectados al USRP</b> .....	78
<b>4.5 Medición de la longitud de onda de operación de los SFP+ conectados a la PC</b>	79
<b>4.6 Medición de parámetros ópticos adicionales: Ancho de línea, SMSR y OSNR de cada canal DWDM</b> .....	79
<b>4.6.1 Ancho de línea</b> .....	80
<b>4.6.2 Razón de Supresión de Modo Lateral (SMSR: <i>Side Mode Suppresion Ratio</i>)</b> .....	85
<b>4.6.3 Razón Señal a Ruido Óptica (OSNR: <i>Optical Signal to Noise Ratio</i>)</b> .....	89
<b>Capítulo 5 Análisis de la factibilidad técnica del sistema propuesto</b> .....	<b>92</b>
<b>5.1 Análisis de presupuesto de potencia y pérdidas de inserción para cada canal DWDM</b> .....	93
<b>5.2 Verificación de inexistencia de efectos no lineales entre canales DWDM</b> ..	98
<b>5.3 Verificación de inexistencia de efectos de dispersión en el <i>fronthaul</i></b> .....	99
<b>5.4 Análisis de validación preliminar del enlace empleando diferentes longitudes del <i>fronthaul</i> óptico</b> .....	100
<b>Capítulo 6 Conclusiones</b> .....	<b>104</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>106</b>
<b>Apéndice 1</b> .....	<b>109</b>
<b>Configuración inicial del PL-1000TE</b> .....	109
<b>Acceso al gestor de administración</b> .....	109
<b>Acceso al CLI</b> .....	110
<b>Procedimiento de acceso al CLI</b> .....	110
<b>Acceso a la aplicación web</b> .....	112
<b>Procedimiento de acceso a la aplicación web</b> .....	113



# Glosario

---

## **B**

banda C	
Longitudes de onda entre 1530 a 1565 nm	7
banda O	
Longitudes de onda entre 1260 a 1360 nm	7
BBU	
Unidades de procesamiento en banda base	
.....	7
BER	
Tasa de bits en error .....	111

---

## **C**

CD	
Dispersión cromática.....	7
CDWM	
Coarse Wavelength Division Multiplexing	
.....	47
CLI	
Command-Line Interface .....	30
CPRI	
Interfaz de Radio Pública Común.....	12
C-RAN	
Red de radio acceso centralizada.....	7

---

## **D**

DHCP	
Dynamic Host Configuration Protocol ...	35
DWDM	
Multiplexado denso por división en	
longitud de onda.....	6

---

## **E**

E2E	
End-to-End.....	9
EPC	
Evolved packet core .....	71

---

## **G**

GUI	
Graphic Unit Interface.....	29

---

## **I**

IINGEN	
Instituto de Ingeniería de la UNAM .....	49
IoT	
Internet de las Cosas.....	8
ITU	
International Telecommunications Union	6

---

## **L**

LAN	
Red de Área Local .....	28

---

## **M**

MNG	
Se refiere al puerto de administración del	
equipo PL-1000TE.....	29
MPO	
Conectores Multi-fibra Pull-Off.....	29
MUX/DEMUX	
Multiplexor/Demultiplexor .....	26

---

## **O**

OBSAI	
Open Base Station Architecture Initiative	
.....	18
OSA	
Analizador de espectro ópticos .....	7
OSC	
Canal Óptico de Supervisión.....	45
OSNR	
Relación señal a ruido .....	7
OTDR	
Reflectómetro óptico en el dominio del	
tiempo .....	7

---

## **R**

RRH	
cabezal de radio remoto .....	7

---

## **S**

SFP	
Small Form Factor Pluggable.....	7
SMSR	
Relación de supresión entre modos laterales	
.....	7
SSH	
Secure socket shell o protocolo de	
seguridad.....	30

---

## **U**

USRP	
Universal Software Radio periférico .....	7

---

## **W**

WDM	
Multiplexación por longitud de onda .....	7

# Capítulo 1 Introducción de redes C-RAN con *fronthaul* óptico

## 1.1 Estado del arte

La red de comunicaciones de quinta generación (5G), fue conceptualizada por primera vez por la NASA en el año de 2008 [1], esta red ha surgido como una clara evolución natural de la red 4G, la cual, actualmente tiene presencia en gran parte del mundo. Esta red 5G responde a la necesidad de proporcionar una mayor tasa de transferencia de datos, de permitir la conexión de una mayor cantidad de dispositivos de manera simultánea, proporcionar una menor latencia, aumentar la cobertura y brindar mayor disponibilidad del servicio. El desarrollo de dicha red permitirá el surgimiento de nuevas aplicaciones, incluso será promotora y parte crucial de la revolución tecnológica que se aproxima con la llegada de los fenómenos del Internet de las Cosas (*IoT, Internet of Things*), la Inteligencia Artificial (*AI, Artificial Intelligence*), las Ciudades Inteligentes (*Smart Cities*) y la Realidad Aumentada (*AR, Augmented Reality*) entre otros [2, 3, 4]. La Tabla 1.1 muestra la evolución de las redes de comunicaciones móviles y sus características más relevantes.

Tabla 1.1 Evolución de las redes móviles [2, 3, 4].

	Generación				
	1G	2G	3G	4G	5G*
Década aproximada de despliegue	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
Velocidad teórica de descarga máxima	2 kbps	384 kbps	42 Mbps	300 Mbps	10 Gbps
Latencia en la transmisión de datos	No aplica	629 ms	212 ms	60-98 ms	Menor 1 ms
Ancho de banda	30 kHz	200 kHz	5 MHz	20 MHz	100 MHz
Servicios novedosos	Llamadas de voz (analógica).	Llamadas de voz (digital). Mensajería.	Video streaming. Navegación web de baja velocidad. IPTV.	Video streaming. Navegación web de alta velocidad. HDTV.	Video streaming alta resolución. Control remoto de vehículos y equipo robótico. Realidad virtual aumentada, etc.

Dos de los principales parámetros de desempeño en una red de comunicaciones destaca la tasa de transferencia y la latencia. Principalmente en una red 5G se espera que el usuario final experimente tasas de transferencia del orden de 10 Gbps [1], mientras que para el tiempo de retardo máximo *End-to-End* (E2E), es decir, el tiempo de ida y de vuelta que transcurre cuando se envía un paquete dentro de la red hacia la aplicación del servidor, se espera que su valor máximo sea de 10 ms para la red en general, mientras que para aplicaciones específicas, el retardo máximo E2E no debe de superar 1 ms [5].

La Figura 1.1 muestra la dependencia que presentan los servicios móviles respecto al *throughput* y al tiempo de retardo [6]. El desarrollo de una red 5G permitiría, en principio, no solo mejorar la calidad de los servicios que se prestan a través de la red 4G, sino que incluso nos brindaría la posibilidad de disfrutar de nuevos servicios, entre ellos la conducción autónoma, la realidad virtual y aumentada, el internet táctil y otros servicios más que surgirán o evolucionarán al romperse las limitaciones que imponen las redes móviles actuales.

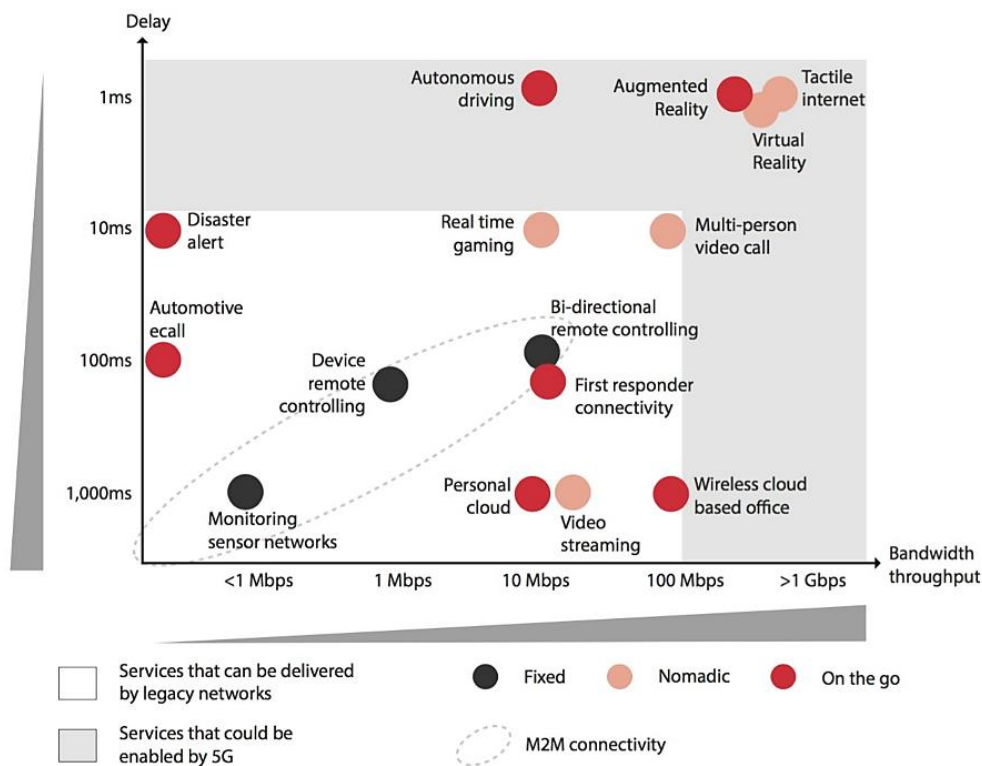


Figura 1.1 Throughput y tiempo de retardo que demandan los servicios móviles [6].

Un sistema de comunicaciones está dividido en tres capas jerárquicas, las cuales son: núcleo, distribución y acceso; dividir la red en estas tres capas trae beneficios de administración y control, además de que el tráfico en una subred de acceso local se mantiene local, mientras que el tráfico dirigido a diferentes redes es trasladado a una capa superior. El sistema de comunicaciones con mayor infraestructura en el mundo es precisamente el de la telefonía, el

cual utiliza radiobases como capa de acceso. La implantación de una red 5G requerirá el despliegue de radiobases distribuidos en *small cells* (células pequeñas) [7], esto permitirá la conexión masiva de dispositivos que se encuentran localizados en una misma zona o área geográfica. Diversos estudios realizados por la industria e instituciones de investigación revelan que el tráfico total de datos móviles será cinco veces mayor para fines de 2024, con un consumo promedio de datos por teléfono inteligente de 21 GB por mes [8], aunado a lo anterior, se prevé la demanda de una mayor tasa de transmisión, gran ancho de banda y alta disponibilidad del servicio.

## 1.2 Principales arquitecturas de red 4G/5G

La arquitectura RAN (Radio Access Network) ya ha sido implementada para las soluciones de tecnología 4G LTE. Esta arquitectura es la más sencilla y cuenta con las antenas que reciben las señales analógicas de los equipos de radio móviles y celulares, luego de un equipo RRH (Remote Radio Head) quien es el encargado del acondicionamiento de las señales RF recibidas por la antena, para luego a través de señales digitales procesarlas en banda base por una unidad de banda base (BBU, Band base unit). Estos componentes a su vez se encuentran acompañados de una planta de energía para su alimentación eléctrica. Todos estos elementos se encuentran en un mismo sitio, el cual brinda una cobertura de acceso bastante amplia a los usuarios de dispositivos móviles; este se conoce como macro-celda. Cada macro-celda proporciona una gran cobertura, para posteriormente conectarse a la red Core mediante el backhaul. El concepto de esta arquitectura predomina en establecer cada macro-celda con todos sus recursos, considerando los BBU's y los RRH's como un solo dispositivo o conectándolos con un simple enlace, que no supera los 100 metros de distancia (Figura 1.2)

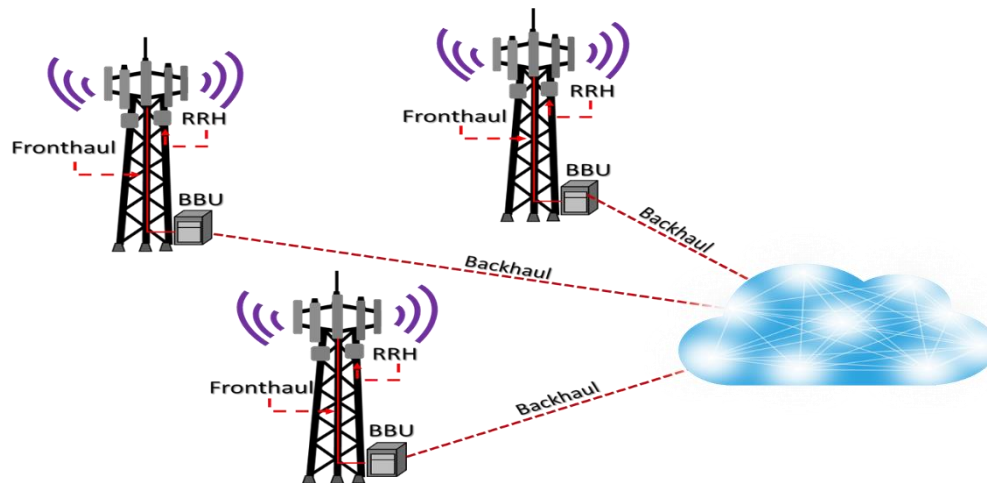


Figura 1.2 Arquitectura de una RAN empleada para una red 4G [9].

La arquitectura RAN empleada en la tecnología 4G presenta algunas deficiencias que la imposibilitan usarla en redes de próxima generación como la 5G, las cuales son [10]:

- La actividad de procesamiento y control de banda base se lleva a cabo en la unidad de banda base local. Esto conduce a un aumento en el número de estaciones base (BS, Base Station) al aumentar el número de usuarios.
- Las estaciones base (BS) tradicionales se asignan para atender a un número específico de usuarios, el consumo de energía es independiente de la carga de tráfico.
- La conexión punto a punto entre la unidad de antena y la unidad de banda base requiere un cable coaxial voluminoso y costoso.

Con el despliegue de las redes 5G se exige la creación de novedosas arquitecturas RAN que interconecten las múltiples antenas y RRHs que se necesitarán en esta nueva tecnología con sus respectivas unidades de procesamiento de datos (BBU) y sus plantas de energía eléctrica. Entre ellas se encuentra la arquitectura C-RAN (Centralized Radio Access Network) descrita en la Figura 1.3, la cual ha atraído nuevos desafíos, como el cálculo y la distribución de los recursos (Antenas, RRH's, y BBUs) para el ahorro de costos y energía. En este nuevo paradigma de arquitectura C-RAN se involucra el nuevo concepto de Fronthaul que corresponde al enlace entre las RRH's y las BBUs. También se han propuesto nuevos avances como el RAN basado en computación en la nube (CC-RAN, cloud computing RAN). El CC-RAN puede ofrecer altos rendimientos de comunicación entre las componentes del RAN y alta eficiencia energética (EE) integrando la computación en la nube en el sistema de comunicación inalámbrico. Los modelos de aplicación de CC-RAN son la red de acceso de radio en la nube (Cloud-RAN), la red de acceso de radio en la nube heterogénea (H-CRAN) y la red de acceso de radio basada en computación en la niebla (F-RAN) [11], sin embargo, solo la C-RAN es la que está más desarrollada, mientras que el CC-RAN, Cloud-RAN, H-CRAN, y F-RAN aún se encuentran en su etapa inicial de investigación.

Los requerimientos actuales para una red C-RAN 5G son los siguientes:

- 1) Capacidad: Debido a que múltiples RRH's se conectaran a través del *fronthaul* para comunicarse a una estación central donde se encuentra una sola planta de energía y las unidades de procesamiento de datos, se requiere que a través del *fronthaul* se puedan transmitir datos con tasas del orden de 10Gb/s. La comunicación a través del *fronthaul* es digital y se propone inicialmente el protocolo digital de comunicación de Interfaz de Radio Pública Común (CPRI).
- 2) Latencia: en la arquitectura de C-RAN (Centralized RAN), el BBU es desplazado de la estación base (donde se encuentra los RRHs) a un punto centralizado común, se requiere que el tiempo de un extremo del *fronthaul* al otro sea del orden de 1 ms.

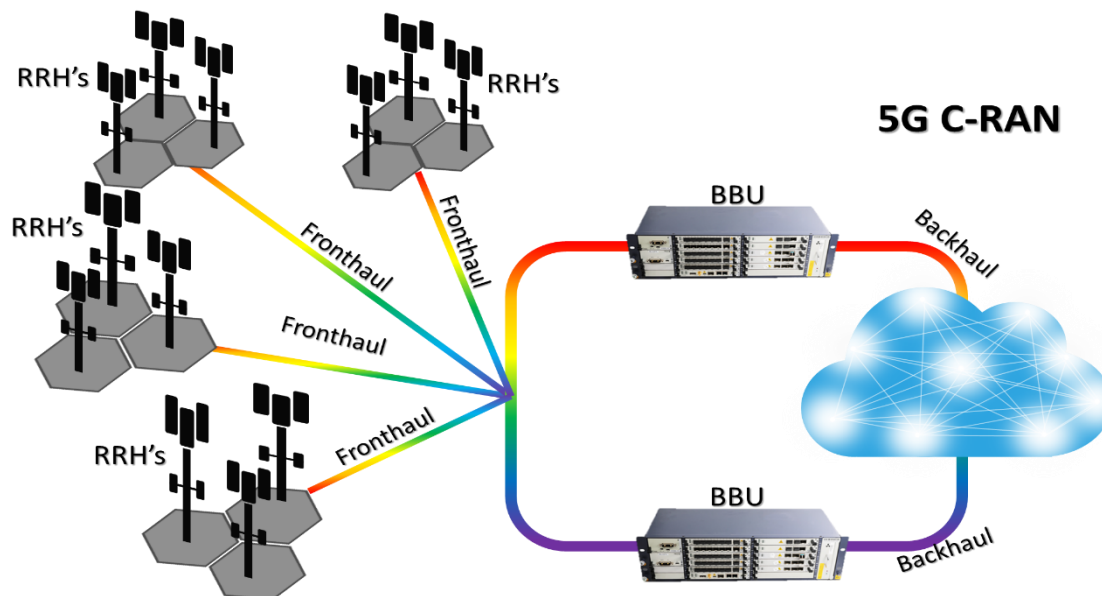


Figura 1.3 Arquitectura de una C-RAN empleada para una red 5G [9].

En la unidad central, donde se encuentran todas las unidades de procesamiento en banda base (BBUs), se cuentan con las siguientes configuraciones de como aglomerar todas las BBUs de la red C-RAN:

- BBU Hotel: Se colocan muchas BBU, pero permanecen separadas y están conectadas individualmente a un RRH dedicado.
- BBU Pool: Se coloca un grupo de BBU, estas cooperan entre sí para servir a un grupo de RRH. La configuración de BBU pool ofrece oportunidades para reducir el exceso de procesamiento del hardware tomando ventaja de los efectos del multiplexaje.
- BBU Cloud: las funciones de procesamiento de un grupo de BBU se implementan en servidores que se pueden configurar de manera flexible, y la carga de procesamiento se puede compartir entre diferentes piscinas ubicadas en diferentes sitios. (Esta solución aún sigue siendo un tema de investigación).

La tendencia en el alojamiento de BBU da lugar a un nuevo segmento de conectividad de transmisión de alta velocidad y baja latencia entre las RRH en el sitio de la célula y las BBU en la Oficina central. El segmento de conectividad resultante es el *fronthaul* [12].

C-RAN ofrece también una forma rentable de minimizar los costos de instalación y operación (CAPEX y OPEX), que es a través del aumento de la densidad de los despliegues de estaciones base controladas a distancia en una oficina central [13]. La densificación de la red inalámbrica se puede lograr reduciendo el tamaño de la celda lo cual involucra un incremento de estaciones base que como se había comentado, se pueden controlar de una mejor manera y con un consumo eficiente de energía a partir de una estación central [14]. La reducción de celdas, así como su masificación, ofrece una mayor cobertura, menor consumo de energía de

transmisión, reutilización de frecuencia entre celdas pequeñas y finalmente resulta en la mejora de la capacidad del sistema. Debido a lo anterior, las redes C-RAN facilitan el despliegue de redes heterogéneas a través de femto-celdas y pico-celdas en lugar de emplear exclusivamente las macro-celdas convencionales de las redes RAN usadas en 4G [15].

### 1.3 Panorama tecnológico de redes 5G

De acuerdo con el *Ericsson Mobility Report 2019* [16], a finales de 2019, el 51% de los suscriptores a la red móvil en Latinoamérica, accedían al servicio través de la tecnología LTE (asociada a 4G), el 26% lo hacía a través de la tecnología WCDMA/HSPA (asociadas a 3G) y el resto accedía haciendo uso de una tecnología más antigua (asociada a 2G). La Figura 1.4 indica porcentualmente el medio a través del cual los suscriptores acceden a la red móvil en América Latina. Se muestran los datos correspondientes al año 2019 y la predicción que se espera para el año 2025. En particular se hace notar que en al año 2019 aún no se tenía en operación de manera comercial ninguna red 5G en Latinoamérica y que para el año 2025 la penetración esperada del servicio se incrementará gradualmente.

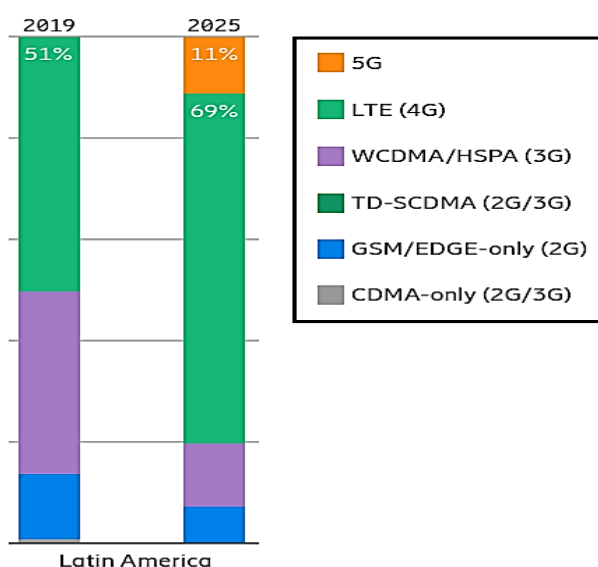


Figura 1.4 Redes de acceso a los servicios móviles [16].

Una de las razones por la cual el crecimiento de la red 5G no es tan acelerado como el que se espera en América del Norte (se proyecta una penetración del 74% para el 2025) se debe a una baja presencia de las redes 4G, las cuales servirán de plataforma para la incorporación de 5G. El estudio realizado contempla la región de Latinoamérica, dentro de esta región México representa una de las naciones líderes, razón por la cual se anticipa que México junto con Argentina, Brasil, Chile y Colombia serán los primeros países de la región en desplegar una red 5G comercial. Un dato interesante que soporta la necesidad de la evolución de la red móvil en la región es el consumo de datos por usuario en un lapso de un mes, en el 2019 se tuvo un promedio de 4.3 GB, mientras que para el 2025 se espera un consumo de 22 GB, lo que representa un crecimiento anual del 32% [16].

La Figura 1.5, extraída del reporte “La economía móvil en América Latina 2019” de la Asociación GSMA (Global System for Mobile Communications Association), indica que en 2018 el 52% de los usuarios en México accedían al servicio móvil a través de la tecnología de red 3G, mientras que solo el 25% lo hacía a través de 4G, para el 2025 se prevé un incremento del uso de 4G hasta alcanzar un 55%, mientras que para 5G se espera un 12% [17].



Figura 1.5 Utilización de las tecnologías de red y penetración de suscriptores [17].

México presenta varias ventajas competitivas dentro de la región, algunas de ellas son su desarrollo económico, tecnológico, avances en infraestructura, regulación y ubicación geográfica, que lo posicionan como la puerta de acceso de las redes 5G en Latinoamérica. México ha empezado a propiciar el desarrollo de las redes 5G en términos de regulación y administración de las telecomunicaciones a partir de la liberación en 2018 de la banda de 600 MHz, así como la subasta de la banda de 2.6 GHz en ese mismo año. Además, los operadores móviles han mostrado un gran interés en continuar invirtiendo en las actualizaciones de las redes 4G LTE Advanced [18].

Un claro ejemplo de lo anteriormente mencionado lo podemos apreciar donde a finales de febrero del presente año la compañía telefónica TELCEL, en conjunto con la infraestructura ya existente por parte de Ericsson lograron realizar el despliegue de la primera red comercial con tecnología 5G Non-Standalone (NSA) en 18 ciudades del territorio nacional, debido a que la tecnología NSA se apoya de la infraestructura ya existente de una red 4G LTE permite de manera más eficiente el fácil crecimiento y desarrollo de una red 5G [19].

En la Figura 1.6 podemos ver las ciudades donde ya hay cobertura de una red 5G por parte de TELCEL y se espera que a finales del año 2022 dicha red logre tener una cobertura de 120 ciudades dentro de la República Mexicana y de esta manera brindar no solo servicios de telefonía móvil, sino que pueda llegar a ser considerado como un habilitador del desarrollo



en aplicaciones de IoT, inteligencia artificial e industria 4.0 además de las aplicaciones de telemedicina, entre otros [20].

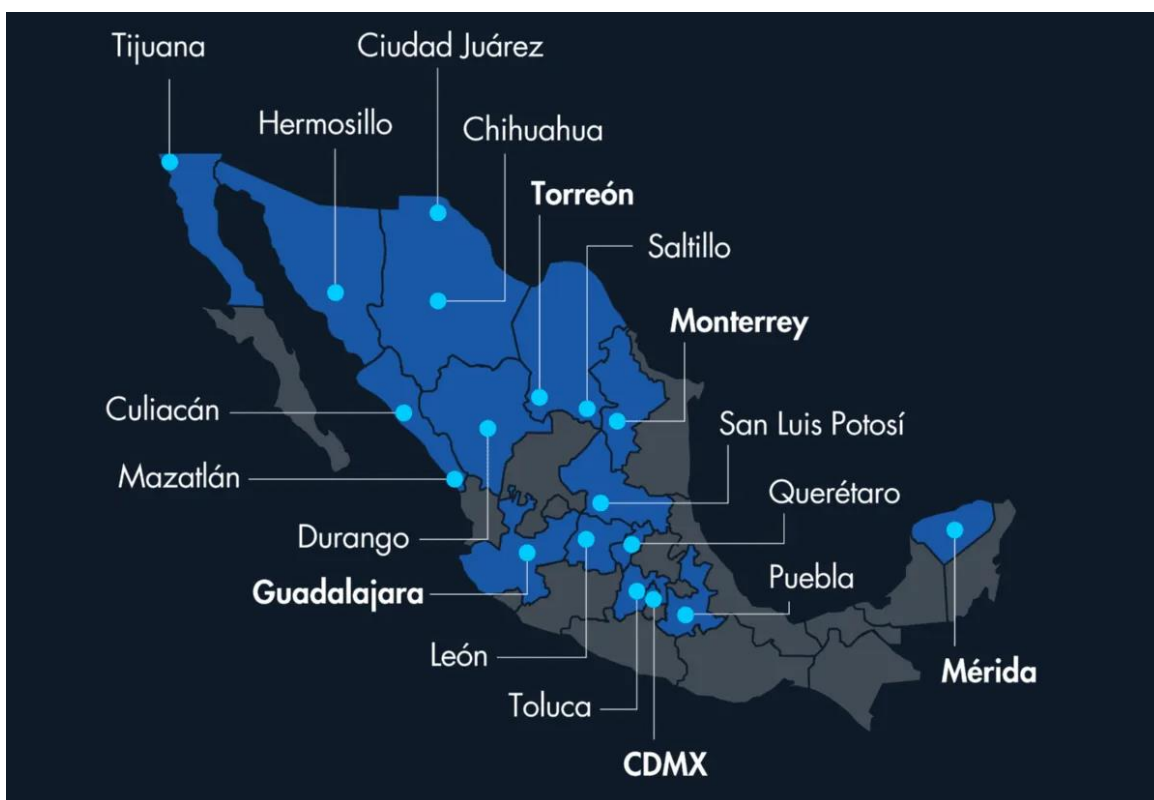


Figura 1.6 Ciudades de la República mexicana donde se ha habilitado una red comercial 5G [20].

El despliegue de las redes 5G en México debe de considerar los siguientes rubros en pro de una adecuada transición: [18].

- Plan de desarrollo para desagregar las redes 2G y 3G, antes de iniciar el despliegue total de la 5G.
- Creación de centros de colaboración e innovación para la industria de telecomunicaciones.
- Desarrollo de políticas públicas flexibles que promuevan la inversión de las empresas de telecomunicaciones y la prestación de servicios de calidad al usuario final.
- Planificar y fomentar la creación de una educación digital en beneficio de todos los actores del sector educativo.

Previsión, planeación oportuna, y atención a los problemas de seguridad, la interconexión y *roaming*.

## Capítulo 2 *Fronthaul* óptico con WDM activo

De acuerdo con las nuevas propuestas de arquitecturas C-RAN para redes 5G se plantea a la fibra óptica como el principal medio de comunicación entre las RRHs y los BBUs debido a que ésta puede soportar una alta capacidad de transmisión de datos con la menor latencia posible. En ese sentido múltiples radio bases se pueden conectar empleando solo un cable de fibra óptica a través del empleo de la tecnología WDM y del uso de equipos activos como transpondedores y amplificadores ópticos.

### 2.1 Tecnología WDM

Una diferencia significativa en la arquitectura C-RAN desde el punto de vista de capa física, es la introducción de un enlace de muy alta capacidad para interconectar las radio-bases y la central de procesamiento, capaz de transmitir las señales de radio, ya sea en su forma analógica nativa o digitalizada, en lugar de los datos ya procesados. El único medio con la capacidad requerida para implementar este enlace es la fibra óptica, ya que es la única tecnología que puede hacer frente a los requerimientos arriba descritos, gracias a su velocidad y capacidad de transmisión, así como su alcance. El enlace que se encarga de conectar las BBU y los RRH se le denomina *fronthaul*. Las longitudes reportadas actualmente de un *fronthaul* óptico van desde los 10 km hasta los 20 km y se está buscando la posibilidad de expandir esta distancia.

Una tecnología atractiva para llevar cabo el transporte de información en un *fronthaul* 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 2.1), lo que hace el transporte de datos más eficiente [21].

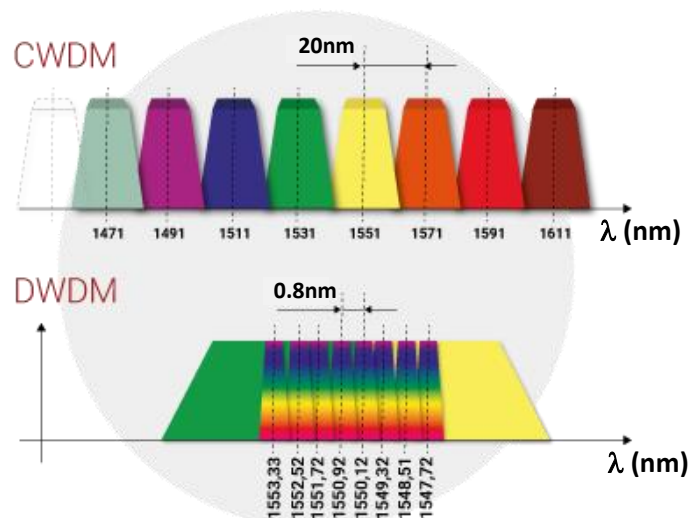


Figura 2.1 Tecnología WDM con sus dos variantes DWDM y CWDM [22].

La Figura 2.2 muestra como ejemplo como se puede instalar la tecnología WDM en un *fronthaul* óptico dentro de una arquitectura C-RAN. El enlace conecta cada uno de los RRH con su correspondiente BBU utilizando un canal WDM particular, para lo cual se utilizan multiplexores y demultiplexores ópticos (MUX/DEMUX) que permiten transmitir varios canales espectralmente espaciados sobre la misma fibra óptica, sin que haya, en el caso más favorable, interferencia entre los mismos. 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.

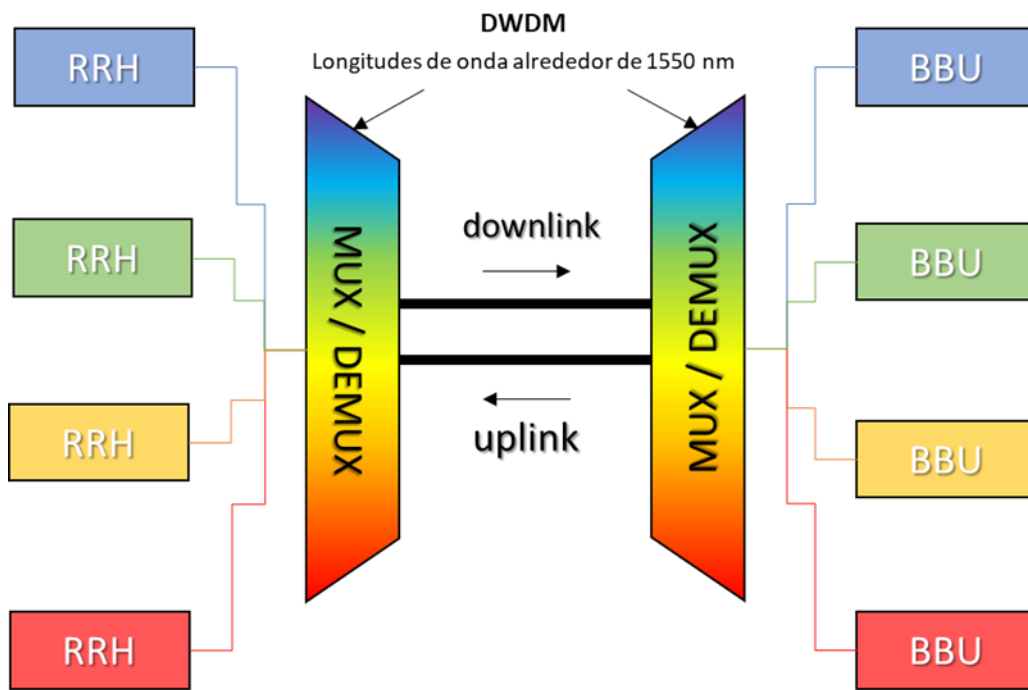


Figura 2.2 Fronthaul óptico con tecnología DWDM.

Con base en lo anteriormente mencionado, resulta natural deducir que el éxito en el desempeño de una red celular construida mediante una arquitectura tipo C-RAN se deberá, en buena medida, a la correcta implementación del correspondiente *fronthaul* y a la capacidad que este muestre de transmitir sin errores una gran cantidad de información a través de la fibra óptica usando tecnología WDM. Además, no solamente permite incrementar de forma masiva la cantidad de datos que se transmiten a lo largo de este segmento, debido a su flexibilidad, sino que permite un escalamiento que se adecua a las necesidades actuales y futuras de la red, sin representar una importante descapitalización (pay as you grow).

## **2.2 Fronthaul óptico (tecnología y arquitecturas)**

Como se mencionó anteriormente, en una arquitectura C-RAN, el propósito que cumple el *fronthaul* es la interconexión de un sitio que contiene las RRH, que representan propiamente los puntos de enlace mediante radio frecuencia con los usuarios de la red (normalmente teléfonos celulares y dispositivos que transmiten/reciben datos) con otro sitio que centraliza las BBU, normalmente denominado oficina central y que se encuentra alejado de las RRH por varios kilómetros. El enlace que interconecta ambos elementos debe de ser transparente, transmitiendo las señales digitales desde los RRH hacia los BBUs y viceversa, siendo estas señales digitales denominadas normalmente como CPRI (Common Public Radio Interface), OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative) o eCPRI (enhanced CPRI), e inclusive Ethernet.

Está claro que la evolución de las redes de acceso de radio necesita ser complementada por el desarrollo de las redes de transporte en el *fronthaul*. Como resultado se han propuesto varias tecnologías orientadas principalmente a las C-RAN. Entre estas tecnologías están las que pueden emplearse como medios de transporte en el *fronthaul*. En general, podemos clasificar a las tecnologías de transporte del *fronthaul* en tecnologías o medios guiados (basados en el uso de fibras ópticas) y en no guiados (basados en el uso de microondas) siendo el medio de fibra óptica el más utilizado en la actualidad por su mayor capacidad y latencia en la comunicación.

Varias arquitecturas de transporte de *fronthaul* óptico han sido propuestas con el fin de desarrollar la tecnología más adecuada que sea capaz de satisfacer las exigencias que demandan las redes 5G. Por tanto, resulta indispensable conocer algunas de las arquitecturas más representativas.

Las siguientes tecnologías de *fronthaul* óptico están siendo analizadas actualmente para ser contempladas dentro de la siguiente generación de redes móviles, en específico, dentro del *fronthaul* de las redes 5G.

- **PLS (*Physical Layer Split*):**

La división de la capa física (PLS) es una de las técnicas más prometedoras; de hecho, ya ha sido considerada por el grupo desarrollador de CPRI y ha sido incorporada dentro de la especificación eCPRI. PLS se basa en la idea de dividir, según convenga, algunas de las funciones de control, administración y procesamiento, de tal forma que una parte se realice dentro de los RRH's y el resto se lleve a cabo en los BBU's, en lugar de desplazar toda la pila de protocolos en banda base desde el RRH hasta el BBU [23].

- A-RoF (*Analogic-Radio over Fiber*)

*Radio over Fiber* (RoF) es la tecnología que permite el envío de una señal de radiofrecuencia a través de una red de fibra óptica. Cuando se emplea A-RoF, el RRH usualmente se limita a recibir/transmitir la señal RF, amplificarla, filtrarla y realizar la conversión entre los dominios eléctrico y óptico. Mientras que en el otro extremo de la red óptica frontal tenemos al BBU que, además de realizar la conversión óptica-eléctrica y el filtrado de la señal, se encarga de realizar las labores de procesamiento. Una de las diferencias más evidentes entre A-RoF y D-RoF es el punto donde se realiza la conversión DAC / ADC (*Digital to Analog Conversion / Analog to Digital Conversion*), en A-RoF se lleva a cabo dicha conversión en el BBU, mientras que con D-RoF se realiza en el RRH. Dicho de otra manera, con A-RoF la información que se transmite a través de la red frontal es de tipo analógica mientras que con D-RoF es de tipo digital, por lo cual esta última está asociada al empleo de protocolos de transmisión.

La tecnología analógica de radio sobre fibra (A-RoF) se encuentra en continuo desarrollo y plantea grandes posibilidades para seguir realizando investigación además de diversas pruebas del interés de la industria.

En una A-RoF, el ancho de banda requerido para los enlaces de fibra óptica depende del ancho de banda inalámbrico en uso y, por lo tanto, un transceiver a 10 Gbps puede ser empleado para su despliegue. Es por ello que A-RoF puede ser considerada como una solución adecuada para implementarse en el *fronthaul* óptico. Adicionalmente, se puede decir que tiene un bajo consumo de potencia y que es posible emplear las llamadas bandas milimétricas de frecuencias.

- D-RoF (*Digital Radio over Fiber*)

La tecnología digital de radio sobre fibra (D-RoF) representa la solución más común cuando se trata de arquitecturas de *fronthaul*, esta tecnología se encuentra desplegada en la mayor parte de las redes de nueva generación. Ejemplos de D-RoF son los protocolos de señales digitales CPRI, OBSAI, ORI y muchos otros que serán abordados en la siguiente sección. En el 2010 [24] se investigó el desempeño de los enlaces D-RoF y se analizaron los dispositivos láseres y fotodiodos más prometedores, así como también se consideraron las opciones de los enlaces empleando los protocolos CPRI [25] y OBSAI [26]. Como producto de la investigación llevada a cabo en [24], se identificaron los principales factores que afectan el desempeño y diseño de un enlace D-RoF, estos se indican a continuación.

1. Frecuencia Portadora. Es muy probable que la siguiente generación de sistemas inalámbricos empleen frecuencias por debajo de los 6 GHz, a pesar de que en algunos casos se prefieren emplear frecuencias más elevadas debido a una

mayor disponibilidad del espectro de frecuencias. Al trabajar con las ondas milimétricas encontramos un problema serio con la dispersión de la fibra, este fenómeno se presenta incluso en pequeños tramos cuando se emplea algún esquema de modulación convencional de doble banda lateral, por lo que es necesario emplear formatos de transmisión y modulación avanzados.

2. El ancho de banda del canal de radio.
3. Número de canales.
4. OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).
5. Complejidad de modulación.
6. MIMO. Para lograr esto se plantearon 3 consideraciones:
  - a) Realizar múltiples enlaces RoF empleando distintas fibras ópticas haciendo uso de la multiplexación por división espacial (SDM, *Space Division Multiplexing*).
  - b) Realizar varios enlaces RoF empleando la misma fibra óptica mediante WDM (*Wavelength División Multiplexing*).
  - c) Usar el mismo enlace RoF donde cada canal es trasladado en frecuencia a una IF (*Intermediate Frequency*) separada (SCM, *Subcarrier Multiplexing*).

En [27] Se analizó comparativamente el costo de dichas arquitecturas de *fronthaul* mediante el desarrollo de un marco de optimización para planificar una C-RAN 5G. La Figura 2.3 muestra la comparación entre las principales arquitecturas de *fronthaul* donde es evidente que la tecnología PLS y A-RoF no solo satisfacen los requerimientos primarios de 5G, sino que también reducen el costo de despliegue. Cabe señalar que en el caso de D-RoF se utilizó el protocolo CPRI dada su amplia aceptación.

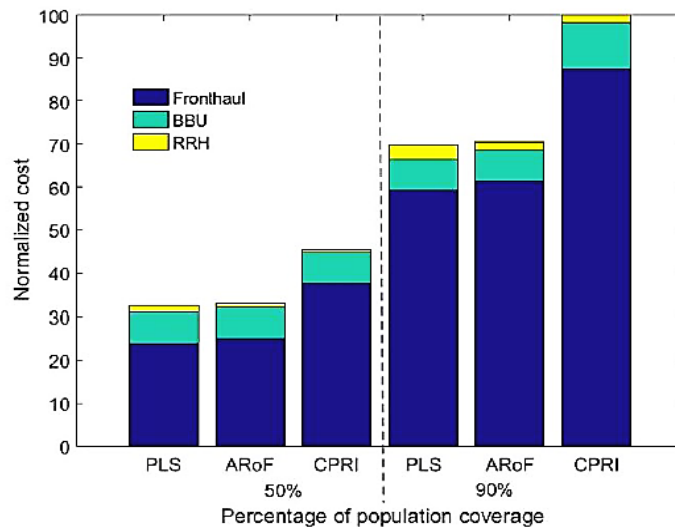


Figura 2.3 Comparación de costos de las principales arquitecturas de *fronthaul* [27].

La Figura 2.4 muestra claramente que el segmento conocido como *fronthaul* representa el elemento que contribuye en mayor medida en el cálculo del costo de implementación tanto en el escenario donde se proyecta un 50% de cobertura como en el de 90%. Esta tendencia se mantiene independientemente de la arquitectura adoptada.

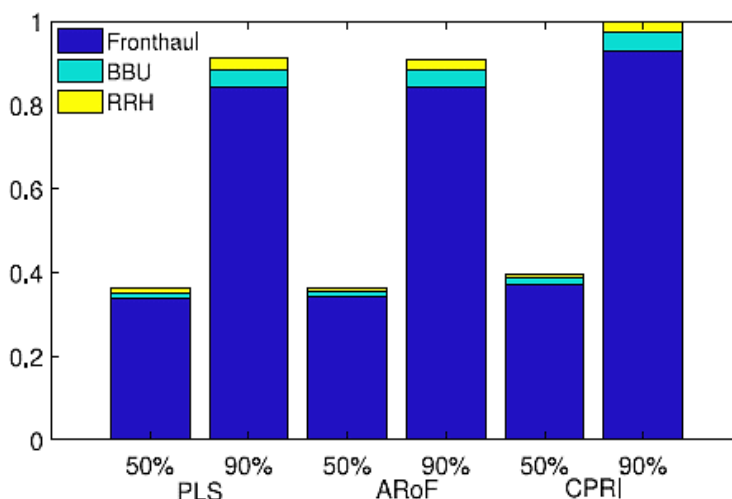


Figura 2.4 Distribución de costos de un fronthaul, RRH y BBU [28].

### 2.3 Protocolos de transporte para el *Fronthaul* óptico

En una arquitectura de red 5G centralizada, el *fronthaul*, es decir, la conexión que existe entre los RRH's y sus respectivos BBU's, recibe el trato propio de una red de transporte. En contraste, el *fronthaul* de una red 4G, es tratado como un simple enlace al ser una conexión de apenas unos cuantos metros de longitud dado que los RRH's y los BBU's se encuentran ubicados prácticamente en el mismo sitio. Las RRH están conectadas a las BBU a través de un protocolo de transmisión frontal digital de alta velocidad que se encarga de transmitir las formas de onda I/Q digitalizadas de las señales inalámbricas.

En las redes 4G, los protocolos de transporte de señales digitales más ampliamente utilizados son: CPRI y OBSAI. La Interfaz de Radio Pública Común (CPRI, Common Public Radio Interface) fue desarrollado por un grupo conformado por Nokia, Huawei Technologies, Ericsson AB y NEC Corporation [29], mientras que el acuerdo de Iniciativa de Arquitectura Abierta de Estación Base (OBSAI, Open Base Station Architecture Initiative) fue desarrollado en conjunto por Nokia, NEC, LG y Samsung [26]. Como puede apreciarse, no se trata de estándares dictados por organizaciones reguladoras, sino de especificaciones propuestas por empresas líderes en el desarrollo de tecnología de telecomunicaciones. Tanto CPRI como OBSAI contienen elementos específicos del proveedor, por lo tanto, no se garantiza la interoperabilidad total [30,31]. Desafortunadamente, el uso de estos protocolos no escala de manera rentable al emplearse dentro de una red 5G debido a que esta exige

anchos de banda del orden de varios cientos de MHz, además de demandar una baja latencia [32, 33]. Otra especificación propuesta es la Interfaz Abierta de Radio (ORI, Open Radio Equipment Interface) desarrollado por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) [33].

La Tabla 2.1 muestra otros protocolos que han sido propuestos para ser empleados en un enlace de *fronthaul* para 4G y 5G.

Tabla 2.1 Protocolos para la interfaz *fronthaul* [31].

Protocolo	Descripción	Operadores compatibles, vendedores y organizaciones
<b>CPRI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Compatible con TDM y DWDM.</li> <li>▪ Confiable, de baja latencia.</li> <li>▪ Contiene elementos específicos del proveedor.</li> <li>▪ Para el transporte de datos I/Q.</li> <li>▪ Introducida en 2003.</li> </ul>	Ericsson AB, Huawei, NEC, Alcatel y Nokia
<b>OBSAI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Basado en el uso de paquetes.</li> <li>▪ Ofrece un sistema modular y provee interoperabilidad al especificar los módulos internos del BS.</li> <li>▪ Contiene elementos específicos del proveedor.</li> <li>▪ Introducida en 2002.</li> </ul>	Hyundai, LGE, Nokia, Samsung y ZTE
<b>ORI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Interoperabilidad multi-proveedores.</li> <li>▪ Buen factor de compresión.</li> <li>▪ Basado en un estándar.</li> <li>▪ Introducida en 2011.</li> </ul>	NGMN y ETSI



<b>eCPRI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Creado para satisfacer las demandas de 5G.</li> <li>▪ Más flexible y escalable que CPRI.</li> <li>▪ Soporta la implementación de nuevas características a través de actualizaciones.</li> <li>▪ Permite el uso de algoritmos de CoMP para garantizar el mejor rendimiento.</li> <li>▪ Reducción del ancho de banda.</li> <li>▪ Red puenteada basada en paquetes (funciona sobre Ethernet y otras tecnologías de transporte).</li> </ul>	Ericsson AB, Huawei, NEC, Alcatel y Nokia
<b>TSN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estandarizada en la recomendación IEEE 802.1 CM.</li> <li>▪ Creada para para las soluciones <i>fronthaul</i> basadas en Ethernet.</li> <li>▪ Creada para mejorar la precisión de la sincronía en redes basadas en el uso de paquetes.</li> <li>▪ Prioriza los flujos de datos en función de la sensibilidad al tiempo.</li> </ul>	IEEE
<b>NGFI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arquitectura 5G para enlaces frontales basados en Ethernet.</li> <li>▪ Compatible con CPRI.</li> <li>▪ Soporta las divisiones funcionales (<i>splits</i>).</li> </ul>	China Mobile, Intel, Broadcom, Nokia, ZTE y IEEE
<b>5G-Xhaul</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Para enlaces <i>backhaul</i> y <i>fronthaul</i> óptico-inalámbricos reconfigurables de forma dinámica.</li> <li>▪ Integra múltiples tecnologías de transporte.</li> <li>▪ Soporta la administración de tráfico en tiempo real.</li> <li>▪ Capaz de predecir la demanda del tráfico.</li> </ul>	Cosmote, Telefónica, ADVA, Blu Wireless, Huawei y HP
<b>5G Crosshaul</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flexible, adaptativa, compartible y eficiente desde el punto de vista económico.</li> <li>▪ Para enlaces <i>backhaul</i> y <i>fronthaul</i>.</li> <li>▪ Unifica el plan de control y del usuario.</li> <li>▪ Optimiza la calidad del servicio.</li> <li>▪ Reenvío de paquetes basado en Ethernet.</li> </ul>	Orange, Telefónica, Atos, Nokia, Ericsson, InterDigital

## 2.4 Aplicaciones

### 2.4.1 Redes ópticas activas y pasivas

Las redes de *fronthaul* óptico tienen como necesidad la reducción de los gastos operativos (OPEX) y la reducción de los gastos de inversión de capital (CAPEX), por lo que la apuesta a la implementación de las redes ópticas tanto activas como pasivas (AON *Active Optical Network*, PON, *Passive Optical Network*), dentro de sus ventajas más notorias de las redes ópticas es la sencilla integración con tecnologías de transporte, como lo es la multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) por lo cual es resulta ser muy llamativa para los proveedores de servicios de internet (ISP, *Internet Service Provider*).

En una red óptica activa el principal factor a destacar son sus equipos de transmisión donde este equipo óptico activo (convertidores optoelectrónicos, convertidores fotoelectrónicos, amplificadores, etc.) funge como principal pilar y soporte para las redes tipo AON. Las redes ópticas activas una vez desplegándose entre una oficina central y el extremo final del usuario logran atender las demandas de calidad de servicio que este requerirá, con la característica es que la señal original que se transmite es que en el camino al usuario final puede llegar a transformarse una o varias veces de una señal eléctrica a una óptica y viceversa, este tipo de redes suele estar basado en SDH la cual permite una transmisión de datos de hasta 70 km.

Las redes ópticas están basadas en el estándar IEEE 802.1 (Ethernet) y proveen un ancho de banda simétrico y velocidad de transmisión superiores a las de 1Gbps en una única fibra óptica empleando dos longitudes de onda una para recepción y otra para transmisión.

Otra característica que poseen las redes ópticas activas es que son muy robustas debido a los equipos activos con los que cuentan, pero incrementando el costo de implementación según tantos equipos activos sean requeridos.

En el caso de las redes ópticas pasivas la principal bondad es el nulo consumo de energía, además de que los equipos de red pasivos son más baratos comparados con elementos de red activos. Las PON tienen la ventaja de reducir considerablemente el CAPEX y el OPEX, pero a costa de limitar en demasía el presupuesto de potencia (*Power Budget*), esto se ve reflejado en la distancia final que puede alcanzar una red PON. Esta es la principal razón por las que las PON sólo se implementan como redes de acceso.

Para efectos prácticos, el *fronthaul* no es una red de largo alcance (*long-reach*), sino que se limita a alrededor de 20 km, distancia que se puede cubrir con la implementación de una red PON.

### 2.4.2 ARoF y DRoF

Una de las líneas de investigación que se está llevando a cabo también muy prominentemente es la tecnología *Analog Radio over Fiber* (ARoF) (Radio Analógico sobre Fibra), en la cual se han investigado y propuesto diversos formatos de modulación avanzada tales como: PAM8, OFDM, F-OFDM, GOFDM, 16-QAM, 64-QAM. Una característica relevante es que generalmente en este tipo de tecnología no se emplea un equipo DSP (*Digital Signal Processing*) a menos que se requiera para generar alguna señal, para este tipo de señales se llegó a operar con frecuencias de 3.5 GHz mientras que en interiores se pueden utilizar frecuencias del orden de los 26 GHz. Una ventaja que podemos tener en esta tecnología es que existen estándares ya bien definidos como lo es el caso de CPRI y OBSAI.

Empleado este tipo de tecnologías se han realizado demostraciones experimentales de una red 4G/5G que emplea DRoF y ARoF sobre un *fronthaul* híbrido fiber-FSO (*Free-Space Optics*) [34].

ARoF proporciona la solución con mayor eficiencia espectral y menor complejidad, además de brindar la mayor eficiencia en potencia. Además, se puede implementar la modulación de intensidad en el enlace de bajada y modulación de fase con detección interferométrica en el enlace de subida en el *fronthaul* para unidades remotas más simples y con energéticamente más eficientes. Sin embargo, este tipo de tecnología es susceptible a las no linealidades y distorsión.

Otra tecnología alternativa de *fronthaul* es *Digital Radio over Fiber* (DRoF) esta tecnología introduce un ADC (convertor Analógico a Digital) en el transmisor para digitalizar las señales y un DAC (convertor Digital a Analógico) en el receptor para reconstruirlas. Este tipo de tecnología puede representar una solución flexible de bajo costo, que extiende la distancia de transmisión y escala la tasa de bit. De hecho, empleando este tipo de tecnologías se ha presentado una red WiFi convergente PtMP (Point to Multi-Point) para 3 casos de uso empleando un enlace de 10 km de fibra y una conectividad de 3 metros empleando una red neuronal y PAM 8 [35].

### 2.4.3 Redes WDM, SDM y basadas en MCF

Dado el intenso tráfico que deberán de soportar las redes 5G, aunado a la adopción de la fibra óptica como principal medio de transmisión en la red frontal, resulta evidente la necesidad de desarrollar e implementar novedosas técnicas que permitan transportar grandes cantidades de datos empleando la infraestructura disponible o reemplazándola por una de mayores prestaciones con capacidad de escalamiento. Por tal motivo en la actualidad se observa una clara tendencia a implementar la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), ya sea en su formato CWDM o DWDM, siendo este último el que brinda una mayor

capacidad, sin embargo, también implica un mayor reto dado el estrecho espaciado intercanal y la presencia de efectos no lineales inducidos por los niveles de potencia óptica relativamente altos cuando se transmiten varios canales de forma simultánea. Por tal motivo, aún se realizan investigaciones orientadas a determinar los parámetros óptimos propios de una red basada en WDM, entre ellos el número de canales, el espaciado, la potencia óptica y la equalización de canales WDM.

En el afán de seguir incrementando la capacidad de la red frontal se han propuesto redes basadas en la multiplexación por división espacial (SDM) [36], si bien algunas de las propuestas han empleado fibras de pocos modos (FMF) o multimodo (MMF), en general se prefiere emplear las fibras multinúcleo (MCF) [37]. Dichas fibras no solamente nos permiten establecer una mayor cantidad de canales, sino que también nos brindan la posibilidad de segmentar una red atendiendo el tipo de tecnología de acceso a la red (RAT), por ejemplo, en [38] se utiliza un MCF de 4 núcleos y sobre cada uno de ellos se emplea una RAT distinta. Una de las investigaciones más ambiciosas es la presentada en [39], en ella se incluye una propuesta que combina a WDM y SDM sobre una fibra MCF. Si bien en la actualidad resulta complicado pensar en una red 5G comercial que implemente SDM y utilice fibras MCF, resulta de gran importancia para el desarrollo de las redes del futuro y representa investigación de punta en el contexto global, muestra de ello son los proyectos patrocinados por la Unión Europea y la 5G-PPP (5G *Public-Private Partnership*) a través del programa Horizon 2020, entre ellos están los proyectos BlueSpace y 5G-PHOS.

#### **2.4.4 PoF y FSO**

Algunas de las tecnologías implementadas en otros sistemas de comunicaciones han sido estudiadas y extrapoladas a las redes 5G con *fronthaul* óptico, ya sea por fines demostrativos o para investigar la factibilidad de implementación y su desempeño. Un ejemplo de ello es la tecnología de PoF (*Power over Fiber*) [40], inspirada en la tecnología de PoE (*Power over Ethernet*), la cual ya se implementa de manera comercial. La idea es básicamente la misma, proporcionar una señal de potencia que permita alimentar un dispositivo remoto, en este caso se propone realizarlo a través de la transmisión de una señal óptica de alta potencia y realizando una conversión óptica-eléctrica en el receptor remoto.

Por otro lado, se ha propuesto emplear la tecnología de FSO (*Free Space Optics*) [41][42], para complementar la red de fibra óptica que constituye el *fronthaul*, ciertamente resulta una opción poco ortodoxa, sin embargo, podría encontrar cavidad en escenarios donde se privilegie la economía y rapidez del despliegue, sobre la capacidad y disponibilidad de la red 5G.

## Capítulo 3 Propuesta de implementación de un *fronthaul* DWDM activo

En este capítulo se describe y explica de manera detallada la propuesta de implementación del *fronthaul* óptico activo con tecnología DWDM, así como también el equipo óptico que se empleó. También se describe el funcionamiento y se explica la importancia de los transpondedores optoelectrónicos conformados por los equipos PL-1000TE y usados en la propuesta de *fronthaul* óptico activo, así como una caracterización de los componentes y elementos que permiten el funcionamiento de un *fronthaul* con una configuración óptica activa. Se explica la importancia de un transpondedor óptico-eléctrico-óptico dentro de los equipos con tecnología WDM para hacer una conversión de longitud de onda de 1310nm a alrededor de 1550nm y viceversa, y cómo es que con ayuda de este dispositivo óptico se puede lograr una mejor integración entre equipos que operan en diferentes bandas o canales de comunicaciones.

### 3.1 Propuesta de *fronthaul* activo con tecnología DWDM

La Figura 3.1 muestra el diagrama general del *fronthaul*, incluyendo las funciones que realiza el transpondedor conformado por el equipo PL-1000TE. Se puede observar que la red necesita un par de PL-1000TE, los cuales contienen un MUX/DEMUX y un conversor de longitud de onda por canal (es decir, un transpondedor optoelectrónico) que hace una transducción óptica-eléctrica óptica (OEO). También se muestra que la longitud mínima de la fibra óptica que se emplea para desplegar un *fronthaul* es de 10 kilómetros, si bien no se ha impuesto una distancia máxima en el diseño de la red, esta se evaluará para obtener una distancia máxima con valores de desempeño aceptables de capacidad de transmisión y latencia para que cumpla con los requisitos de una C-RAN 5G y pueda funcionar correctamente. Aunque, es de importancia recordar que la distancia máxima promedio según el estado del arte del *fronthaul* óptico es de 20 km, aproximadamente. El diagrama que se muestra en la figura solamente considera cuatro de los ocho canales DWDM que el equipo transpondedor PL-1000TE soporta. La arquitectura de *fronthaul* propuesto solo contempla 4 canales DWDM pudiendo expandirse a futuro hasta 8 canales DWDM.

Es importante mencionar que la transmisión de datos a través del *fronthaul* óptico activo mostrado en la Figura 3.1 ocurre en ambos sentidos (*downstream* y *upstream*), debido a que en una red celular 5G, hay señales de subida y bajada.

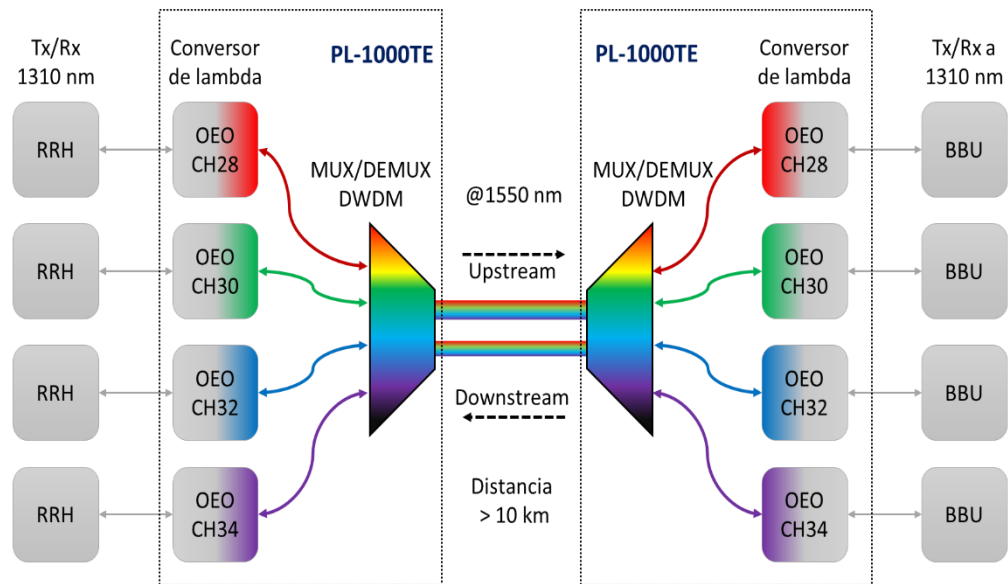


Figura 3.1 Diagrama de bloques considerando el transpondedor PL-1000TE.

Se había comentado que el equipo transpondedor PL-1000-TE puede soportar hasta 8 canales DWDM. Dichos canales satisfacen la norma DWDM ITU Grid y son los siguientes canales: 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35. Es importante asignar estos canales a los conectores del equipo PL-1000TE para posteriormente identificarlos e interconectarlos apropiadamente a la red. La Tabla 3.1 muestra el número de conector asignado a cada canal DWDM que admite el transpondedor con su respectiva longitud de onda.

Tabla 3.1 Canales DWDM admisibles en el transpondedor PL-1000TE.

Conector	CH	Frecuencia [THz]	Lambda [nm]
1	28	192.800	1554.94
2	29	192.900	1554.13
3	30	193.000	1553.32
4	31	193.100	1552.52
5	32	193.200	1551.72
6	33	193.300	1550.91
7	34	193.400	1550.11
8	35	193.500	1549.31
MNG	No WDM	198.538	1510.00

Dentro del diseño de esta red, se ocuparán los canales pares para la configuración activa, es decir, los canales: 28, 30, 32 y 34. En este punto es conveniente recordar, que, según la recomendación de la ITU, la separación espectral entre los canales pares es de 200 GHz. Al canal de gestión denominado MNG, el fabricante del equipo le ha asignado la frecuencia de 198.538 THz. Esta información está presente en la Tabla 3.1, junto con los valores correspondientes de longitud de onda.

### **3.2 Equipo transpondedor requerido**

En una configuración activa, como se muestra en la Figura 3.2, el transpondedor conformado por el equipo PL-1000TE es el elemento principal. Estos transpondedores se ubican al inicio y al final del enlace de fibra óptica operando con canales DWDM. Los transpondedores son capaces de realizar conversiones de longitud de onda. Esto resulta bastante útil, puesto que permite que los equipos de red transmisores y receptores en los extremos del *fronthaul* óptico que están conectados a los RRH y BBU operen primeramente con una longitud de onda en la banda O que corresponde a una longitud de onda centrada alrededor de los 1310 nm. Entonces el transpondedor a través de la conversión de longitud de onda es capaz de adaptar estas señales y transformarlas a señales ubicadas dentro de la banda C alrededor de los 1550 nm, banda en que los canales DWDM se sitúan y que pueden transmitirse con una menor atenuación a través del enlace de fibra.

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 a través de los receptores (fotodiodos), es decir, la potencia de la señal óptica se convierte en corriente eléctrica. Posteriormente, estas señales eléctricas son usadas para modular el láser del transceptor DWDM y obtener nuevamente una señal óptica con una longitud de onda diferente y relacionada al canal DWDM con que opera el transceptor. 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.

Otro elemento que se debe considerar es el MUX/DEMUX, el cual una vez que las señales se encuentran dentro de la banda C, este las multiplexa para enviar diferentes señales ópticas como una misma señal a través de la fibra óptica; este mismo dispositivo por su principio de funcionamiento puede operar de forma inversa, es decir, de una señal compuesta de varias longitudes de onda, separa las distintas componentes en señales de una sola longitud de onda. Estas señales individuales representan los canales del sistema DWDM.

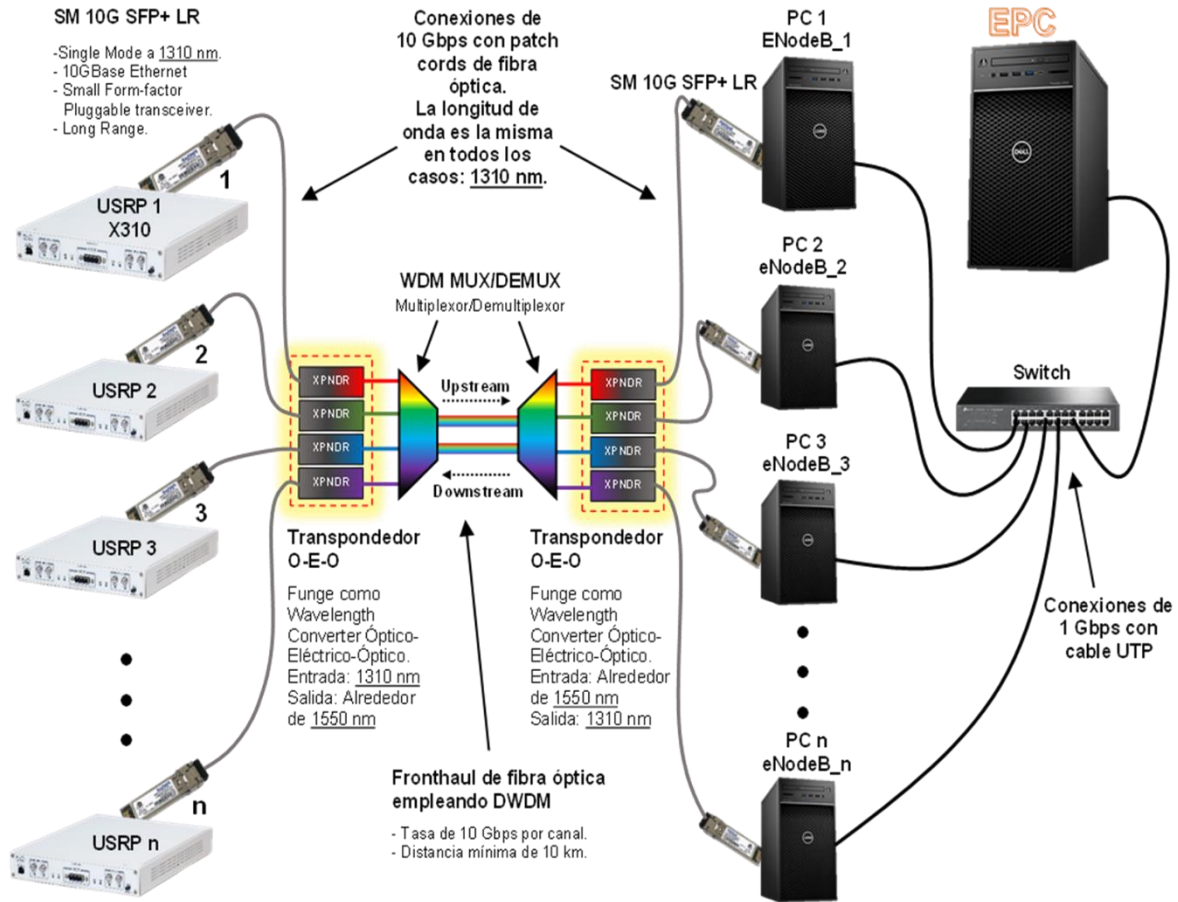


Figura 3.2 Configuración del fronthaul en configuración activa con DWDM.

Una característica fundamental de esta configuración activa es que permite la regeneración de las señales en el transpondedor, lo que garantiza una transmisión más eficiente a lo largo de la fibra óptica de transporte, es decir, la que une los multiplexores con los demultiplexores en cada extremo del enlace. Los transpondedores aceptan transceptores ópticos (o SFP, Small Form-Factor Pluggable) que contienen los transmisores láser y receptores ópticos. Estos SFP se colocan en los equipos transpondedores. Estos determinan el tipo de modulación y velocidad del canal, entre otras características. La Tabla 2.2 muestra las especificaciones que indica el fabricante para un transceptor óptico SFP+ DWDM que se incorpora en la arquitectura activa y se encuentran funcionando como transmisor, mientras que la Tabla 3.3 muestra las especificaciones del SFP+ DWDM trabajando como un receptor. Cabe mencionar que los transceptores ópticos SFP que permitir transmitir y detectar señales a 10Gb/s se les identifica como SFP+.



Tabla 2.2 Especificaciones en transmisor de los SFP+ DWDM "PL"

Parameter	Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Input/Output Data rate			9.95	10.3125	11.1	Gb/s
Average Launch Power	Power coupled into a 9/125 $\mu\text{m}$	$P_{o, \text{AVG}}$	-1.0		+3.0	dBm
Optical Extinction Ratio		ER	8.2			dBm
Side-Mode Suppression Ratio		SMSR	30		-30	dBm
Transmitter and Dispersion Penalty	@800 ps/nm @10.3Gb/s	TDP			3	dBm
Relative Intensity Noise		RIN			-128	dB/Hz
Average Launch Power of OFF Transmitter					-30	dBm

Tabla 3.3 Especificaciones en receptor de los SFP+ DWDM "PL"

Parameter	Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Sensitivity	Measured with Average power; BER < $10^{-12}$ and PRBS $2^{31}-1$				-16	dBm
overload		$P_{\text{MAX}}$	-1	-	-	dBm
Optical Center Wavelength		$\lambda_c$	1260		1620	nm
Optical Return Loss		ORL			-27	dB
LOS De-Assert	Transmission: low to high	$\text{LOS}_D$	-	-	-16	dBm
LOS Assert	Transmission: high to low	$\text{LOS}_A$	-28	-	-	dBm

La pieza clave de la implementación del *fronthaul* óptico se concentra en el transpondedor "PL-1000TE" de la marca PacketLight. El PL-1000TE es un dispositivo óptico capaz de albergar varios elementos modulares. El PL-1000TE puede incluir: multiplexores ópticos, transpondedores optoelectrónicos, amplificadores ópticos, switches ópticos y elementos de protección de este, como ventiladores y fuentes de energía de respaldo. Para el diseño de la red, no es necesario incorporar el módulo de amplificación de potencia óptica, por lo que el PL-1000TE contendrá los módulos: MUX/DEMUX y el transpondedor optoelectrónico que acondicionará las señales para los canales DWDM.

El PL-1000TE tiene 7 tipos de puertos para el flujo de datos y 2 tipos de puertos para la alimentación eléctrica, la Figura 3.3 muestra las conexiones físicas.

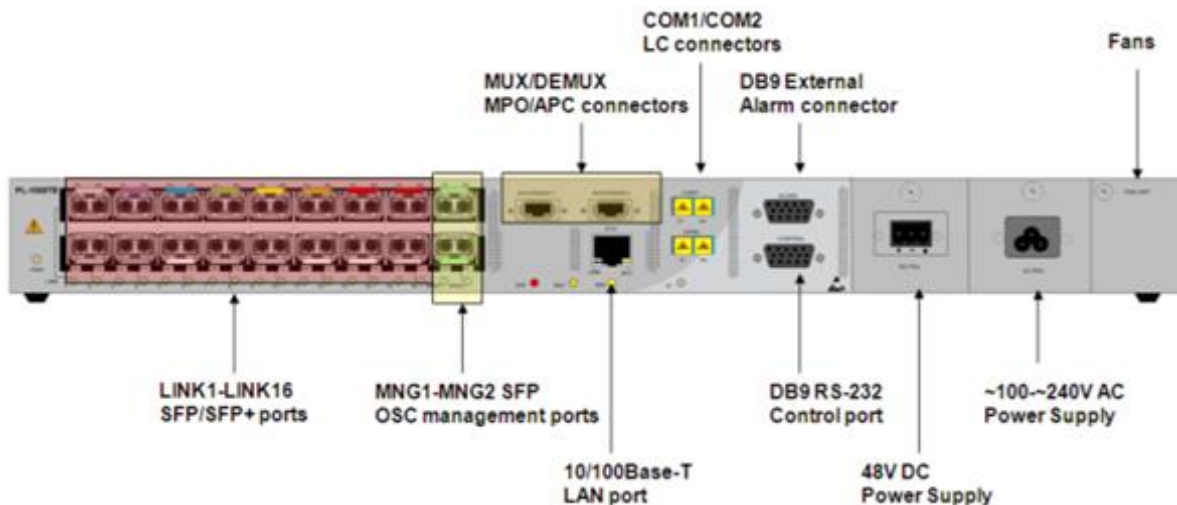


Figura 3.3 Diagrama de puertos en el PL-1000TE.

Los puertos de datos no ópticos son:

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

Los puertos de datos ópticos son:

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

- **COM:**  
Es el puerto de interconexión entre los PL-1000TE. Es el puerto de transporte multiplexado. Su conector es LC/UPC dúplex fijo.

Los puertos de alimentación son:

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

Advertencias eléctricas en el PL-1000TE

- Desconectar el cable de alimentación antes de retirar una unidad de fuente de alimentación enchufable.
- La alimentación del equipo PL-1000TE debe de estar adecuadamente aterrizado para evitar daños en el mismo.

Antes de operar el PL-1000TE en una red y hacer que transmita tráfico, es necesario realizar algunas configuraciones preliminares para establecer los parámetros y acondicionar al equipo PL-1000TE con el diseño de la red, lo cual permite una convergencia entre las necesidades de la red y el funcionamiento del equipo óptico. En el *Apéndice 1* se indican los pasos que se tuvieron que seguir para realizar la configuración inicial del equipo y acceder a su sistema de control a través de una aplicación WEB.

### **3.2.1 Transpondedor y su control**

El entorno que ofrece la aplicación basada en web del PL-1000TE permite realizar un control completo de éste, pues brinda la información de los valores ópticos de forma ordenada. Desde esta aplicación web es posible controlar los puertos que posee el PL-1000TE, además de monitorear su rendimiento e identificar cualquier anomalía que se pueda presentar durante el funcionamiento de la red.

El primer paso para manipular de forma precisa y segura al PL-1000TE es reconocer cada puerto físico con la representación dentro de la aplicación web. Para una comprensión de la aplicación más fácil, el mismo gestor muestra de manera gráfica los puertos del PL-1000TE como si se estuvieran observando desde la parte de atrás del PL-1000TE. La Figura 3.4 muestra los puertos de servicio del PL-1000TE enumerándolos del 1 al 16, además de dos puertos adicionales MNG, que corresponden al monitoreo de la red. También es posible observar el estado del MUX/DEMUX desde el botón MUX y el estado del enlace multiplexado desde la opción COM, con su respectivo enlace de respaldo.

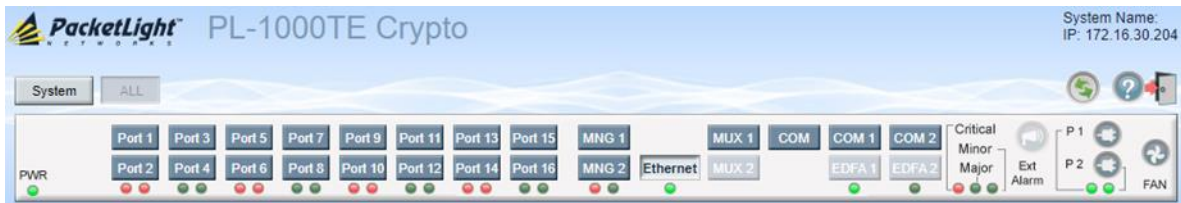


Figura 3.4 Representación de puertos dentro de la aplicación web en el PL-1000TE.

La Figura 3.5 muestra las configuraciones que a los administradores de red les es posible realizar al puerto ethernet, en la imagen se aprecia que se le puede configurar si el puerto tendrá auto negociación de velocidad en el puerto o no, además de poner una velocidad predeterminada y el tipo de comunicación, ya sea full-dúplex o half-dúplex.

En este mismo apartado también se puede apreciar el tipo de puerto que en este caso es 10/100BaseT, además brinda información sobre si el puerto se encuentra activo o no, así mismo si el puerto se encuentra funcionando. Por último, la aplicación web también muestra la dirección MAC del puerto LAN del PL-1000TE.

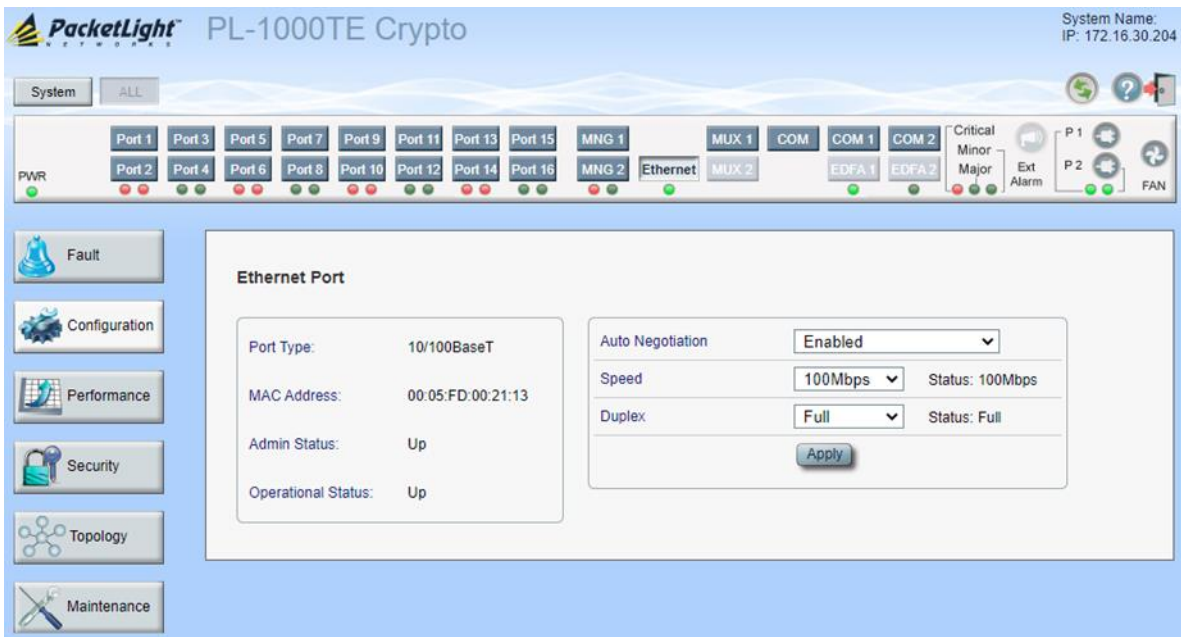


Figura 3.5 Configuración del puerto ethernet.

### 3.2.2 Puertos de red ópticos

Para las pruebas preliminares de desempeño óptico de la red, las lecturas de los puertos de red ópticos serán los más relevantes, puesto que ellos son los que activan a los SFP+ brindándoles energía para que les sea posible transmitir las señales y se puedan medir sus

parámetros. Estos puertos corresponden tanto a los puertos DWDM *Uplink* como a los puertos grises Service.

Para los puertos de red existen dos pestañas principales de configuración y lectura de parámetros dentro de la aplicación web, la primera de ellas es para una configuración inicial del puerto. Esta corresponde al apartado Port N, donde N indica el número de puerto. En esta pestaña se indica el tipo de puerto, el puerto con el cual se encuentra enlazado para la conversión de longitud de onda, la velocidad bruta a la que el SFP+ conectado al puerto es capaz de alcanzar, la información sobre si el puerto se encuentra encendido u apagado, la información sobre si el puerto se encuentra funcionando o no y el número de conector que le corresponde. En este apartado también se selecciona con qué tipo de servicio o protocolo funcionará el enlace, además del tipo de comunicación, es decir, si el puerto del PL-1000TE funcionará como transmisor, receptor o en ambos sentidos. También cuenta con una protección inicial que se compone de habilitar o deshabilitar pérdidas de propagación para que el enlace sea capaz de propagar luz, además de que es posible asignarle un alias para que el administrador de red reconozca fácilmente el puerto avistado.

En la Figura 3.6 se pueden apreciar las lecturas del primer puerto físico del PL-1000TE que corresponden al puerto *Uplink* 1. Las lecturas indican que es un puerto que se le ha aplicado la conversión de longitud de onda correspondiente al puerto 2, con una velocidad de línea de 10.3125 Gbps. Este puerto se encuentra apagado por lo que no está funcionando. La selección de protocolo corresponde a 10GbE-LAN con una comunicación full-dúplex, además de que se encuentra sin la protección inicial de pérdidas de propagación, es decir, la configuración está lista para que el SFP+ funcione una vez que se active el puerto.



Figura 3.6 Configuración inicial del puerto.

A través de la pestaña Port 1 se puede encender el puerto, sólo basta elegir la opción *Admin Up* presentada con un botón verde y se puede apagar el puerto con la opción *Admin Down* representada con el botón rojo. El PL-1000TE cuenta con una opción de encriptación la cual se activa al comprar la licencia. Esta opción se activa desde la opción de *Service Type*. Sin embargo, para diseños de esta red, esta opción es irrelevante y por lo tanto cada uno de los servicios se configurarán como enlaces sin encriptación.

La segunda ventana que brinda información relevante sobre los SFP+ conectados a los puertos del PL-1000TE es la pestaña SFP/+. Esta ventana indica el nombre del vendedor del SFP+, la longitud de onda a la que opera dicho SFP+, el tipo de WDM, el número de serie, el número de lote, el espaciado espectral inter-canal y el tipo de conector que utiliza el SFP+.

La Figura 3.7 muestra las lecturas arrojadas en la aplicación web del SFP+ DWDM del canal 28 del sitio A, estas lecturas se tomaron desde el puerto físico 1. En ella se muestra que el SFP+ es vendido por PLN, que opera a una longitud de onda de 1554.94 nm correspondiente a 192.8 THz que es el canal 28 de DWDM, tal como lo indica en la clase WDM. También indica el mismo número de serie grabado en la carcasa del SFP+ que es PK2L040007. De la misma forma se muestra el espaciado espectral entre cada canal que puede soportar el sistema, el cual es de 100 GHz. Por último, se muestra que utiliza el conector identificado

previamente, el cual es LC/UPC, por lo que podemos decir que este SFP+ cumple con todas las características físicas previstas.

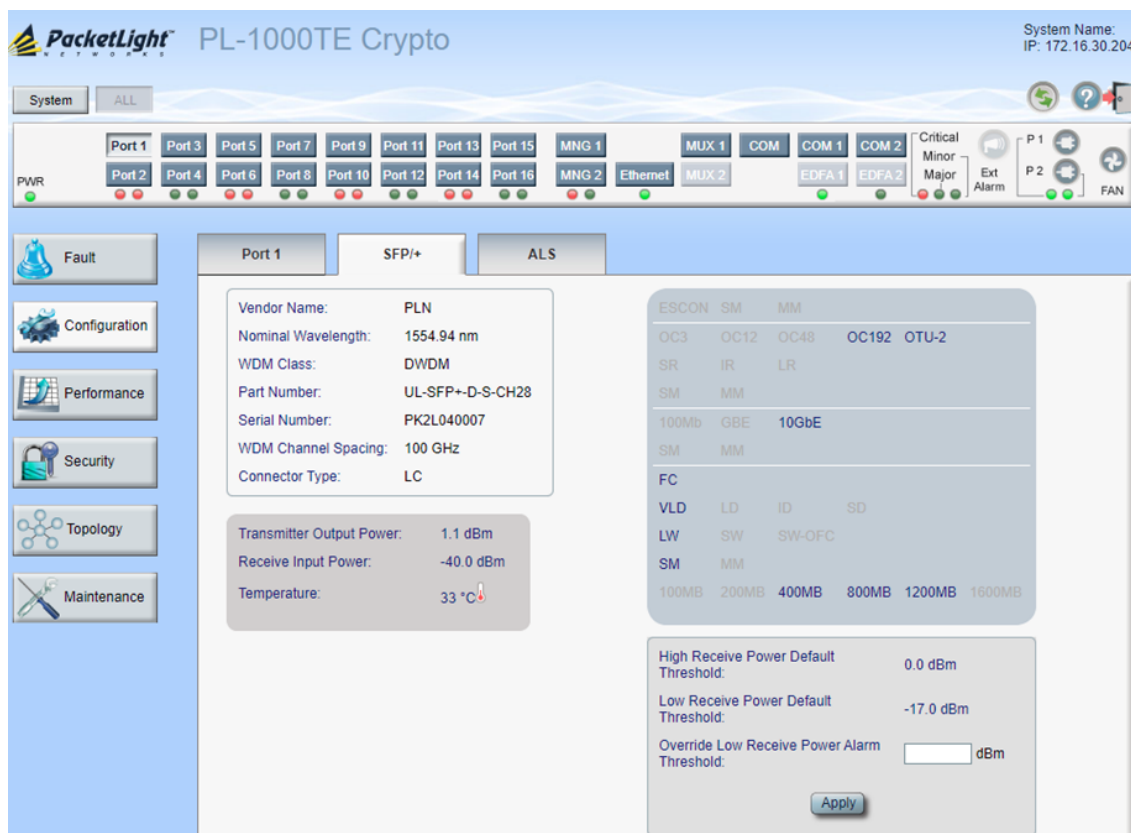


Figura 3.7 Apartado SFP/+ en puerto Uplink.

En el mismo apartado de SFP/+ se pueden obtener los valores de potencia óptica con los que trabaja el SFP+ conectado a ese puerto seleccionado del PL-1000TE. En la Figura 3.8 se puede apreciar que la potencia óptica emitida por el láser que tiene el SFP+ es de 1.1 dBm y que la potencia mínima que puede recibir el SFP+ es de -40 dBm. En esta misma sección se puede apreciar su temperatura de funcionamiento, para este caso el SFP+ tiene una temperatura de 33°C.

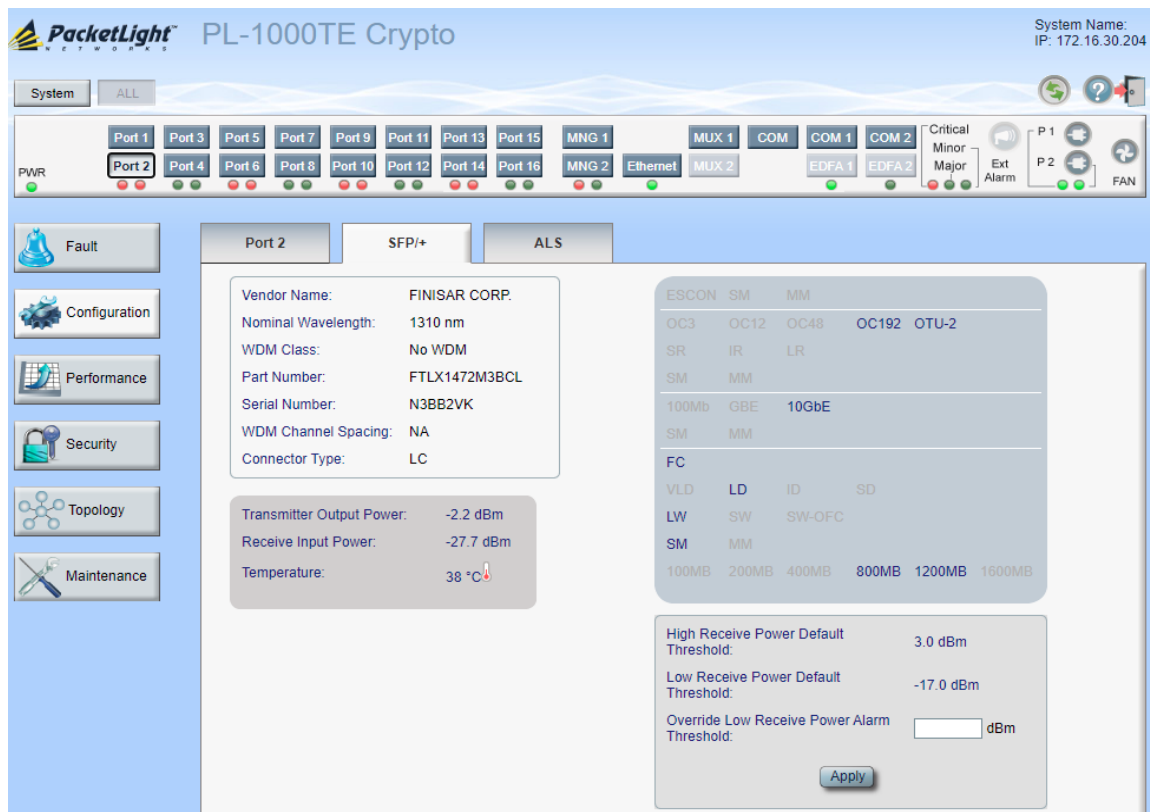


Figura 3.8 Apartado SFP/+ en puerto Service.

Una configuración de prevención en los puertos de red del PL-1000TE es el envío de alarmas. Se pueden configurar umbrales de potencia altos y bajos, es decir, para que el sistema no provoque ninguna alarma la potencia óptica debe de encontrarse dentro un rango de umbrales impuestos por el administrador de red, al salirse la potencia óptica de este rango, ya sea con potencia mayor o menor, el PL-1000TE emitirá una alarma con irregularidades en la red; esta medida prevé que la señal llegué tenue y pueda generar errores a causa de valores bajos de potencia óptica o por el contrario la señal llegue con valores altos de potencia óptica causando que el receptor pueda resultar dañado.

Las pestañas Port N y SFP/+ se encuentran disponibles para todos los puertos de red del PL-1000TE, por lo que tanto para los SFP+ DWDM correspondientes a los puertos de *Uplink* como los SFP+ grises correspondientes a los puertos Service pueden ser configurados y monitoreados sin alguna distinción. Tal es el caso que la Figura 3.8 muestra la misma pestaña SFP/+, pero desde un puerto de servicio correspondiente a un SFP+ gris. En la figura se puede apreciar que es un SFP+ provisto por FINISAR CORP a una longitud de onda de 1310 nm, lo cual indica que no es WDM, por lo que no aplica el espaciamiento espectral porque en esa lambda es un canal único. También se puede observar el mismo número de serie que tiene



grabado en su carcasa que es N3BB2VK, así como el tipo de conector que previamente se confirmó, el cual es LC/UPC.

De la misma forma, se puede apreciar en la Figura 3.8 los valores de potencia óptica que el SFP+ maneja, tanto los valores de transmisión como de recepción, los cuales para este SFP+ es de -2.2 dBm y -27 dBm respectivamente. También es posible conocer la temperatura del SFP+ que es de 38°C.

El puerto COM es el que contiene a los canales DWDM multiplexados como una sola señal. La aplicación web brinda información general en la pestaña COM, en ella indica el tipo de puerto, el estatus en el que se encuentra, ya sea prendido, apagado, en funcionamiento y/o sin funcionar, también muestra la potencia mínima que puede recibir el puerto. La Figura 3.9 muestra que el estatus general del PL-1000TE, en ella se puede apreciar que la potencia óptica mínima que acepta es de -44 dBm. En esta pestaña también es posible controlar la dirección de la transmisión, ya sea en modo recepción, transmisión o ambas. Para este caso el puerto COM está tanto en transmisión como en la recepción. Al igual que en los puertos de red, este puerto se enciende con el botón *Admin Up* de color verde y se apaga con el botón *Admin Down* de color rojo.

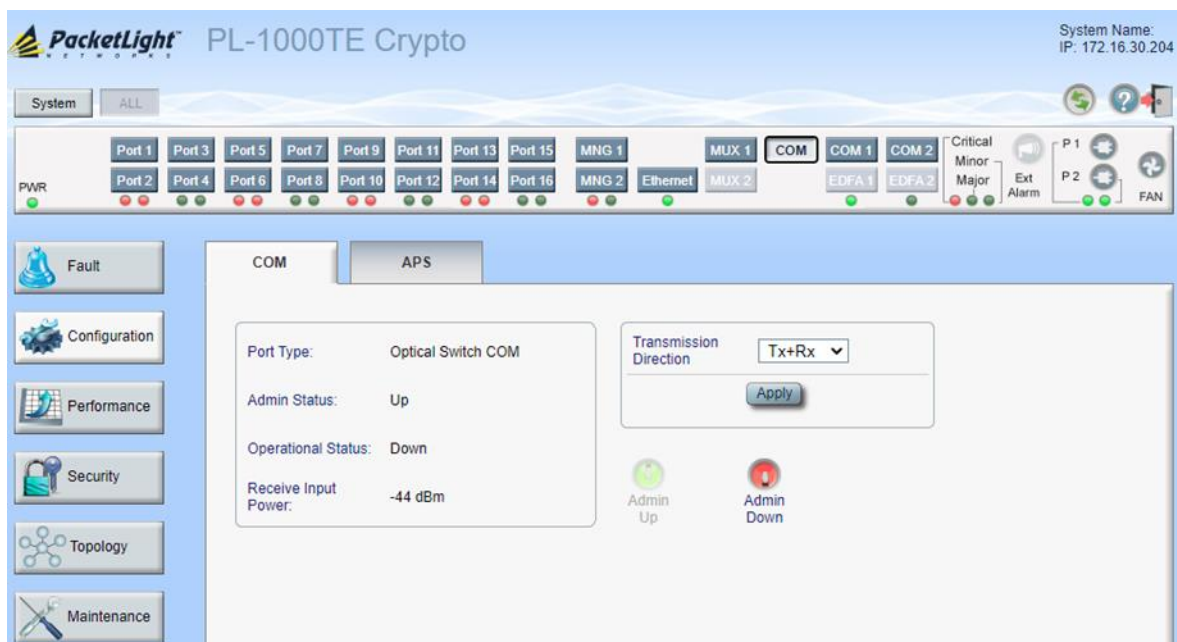


Figura 3.9 Apartado del puerto COM.

### 3.2.3 Lectura general del sistema PL-1000TE

Las herramientas descritas anteriormente son para obtener información en específico sobre un puerto dentro del sistema PL-1000TE, sin embargo, el gestor del PL-1000TE posee una

vista general de todos los canales ópticos del sistema, incluyendo los 8 canales DWDM, los puertos del transpondedor no WDM, los puertos de MNG para monitoreo, el puerto multiplexado COM 1 y su puerto de respaldo COM 2. En esta pestaña del PL-1000TE sólo se incluyen los puertos con parámetros ópticos y se excluyen los puertos de administración como el puerto ethernet o el de consola. Este apartado resulta muy útil para un monitoreo general y una detección de alguna irregularidad de forma rápida, puesto que además de ofrecer cada valor de los parámetros ópticos, esta herramienta también indica si hay una conexión establecida o no, es decir, si los dispositivos conectados al PL-1000TE son capaces de establecer comunicación entre ellos. Esto último puede referirse a los protocolos que utiliza cada elemento de la red, ya que aun cuando la red tenga parámetros óptimos en sus comunicaciones ópticas, si los elementos de red poseen protocolos diferentes, la comunicación resultará imposible.

En realidad, la indicación de la comunicación establecida solo es un valor binario, puesto que hay diversos factores relacionados para completar esta tarea, en los que el gestor del PL-1000TE no es capaz de detectar, un claro ejemplo se muestra en la Figura 3.19, en ella se aprecian los parámetros ópticos más significativos de todos los puertos de red que posee el PL-1000TE. Se puede notar todos los SFP+ conectados al PL-1000TE, el gestor indica el nombre del fabricante, si es WDM o no, la longitud de onda a la que opera, la potencia óptica de transmisión, la sensibilidad que es capaz de soportar en la recepción de potencia óptica y la temperatura a la que se encuentra el SFP+. Sin embargo, nos muestra a los puertos en color rojo, que significa que no hay conexión.

En la Figura 3.10, la razón del color rojo en los puertos que indica que no hay comunicación es que en los puertos del PL-1000TE sólo se encuentran los SFP+ conectados, pero no existen dispositivos de red que vayan a cada puerto del PL-1000TE. Por lo que, se puede confundir con afectaciones en la fibra óptica, como cortes, pérdidas de potencia óptica por atenuaciones excesivas o problemas de incompatibilidad en los protocolos que utiliza cada dispositivo de red.

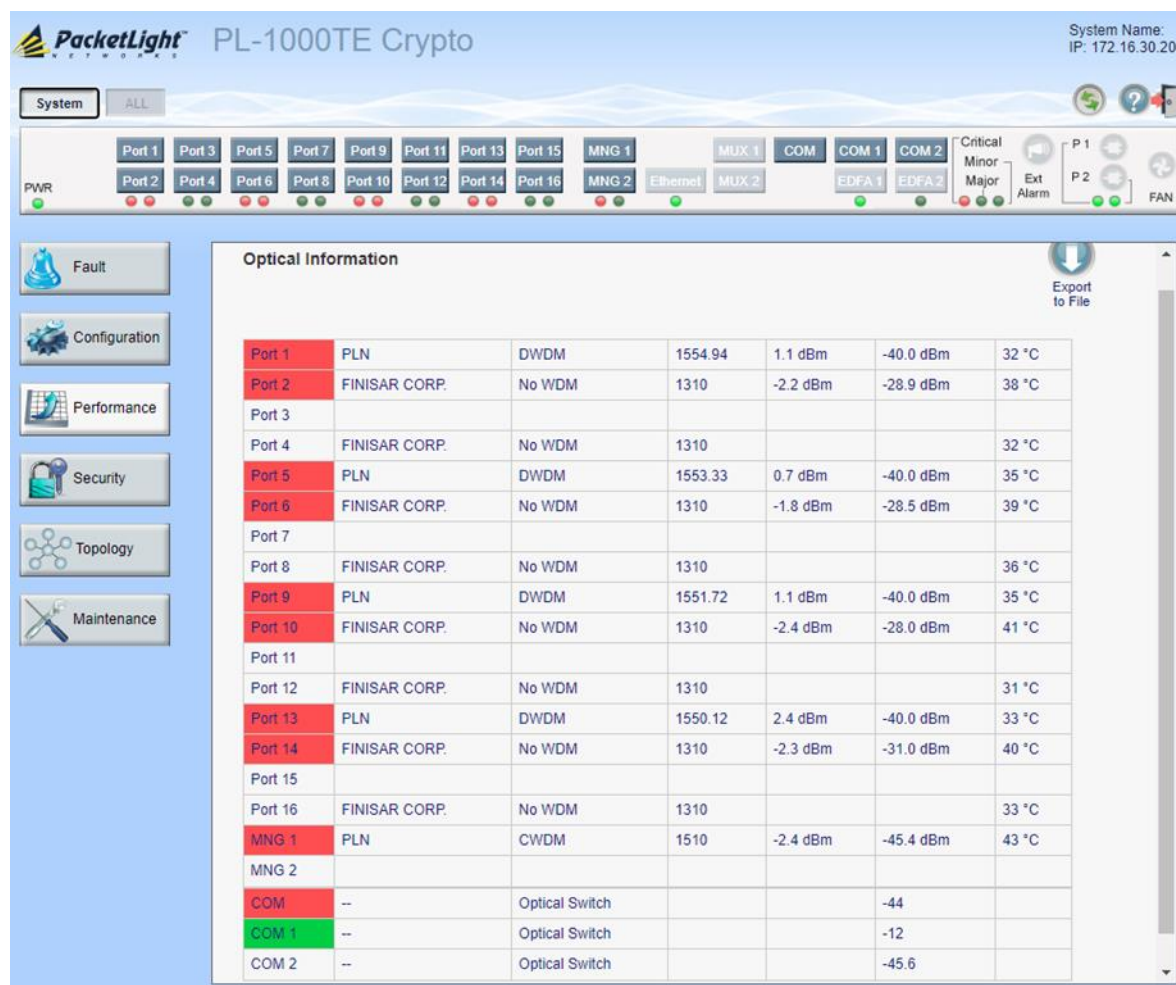


Figura 3.10 Vista general de los puertos ópticos.

Esta lectura general del PL-1000TE resulta muy útil únicamente en los parámetros ópticos de cada SFP+ conectado al sistema mismo, sin embargo, para poder interpretar errores externos a los SFP+ dentro del PL-1000TE es necesario tener otras herramientas de medición para realizar interpretaciones más acertadas y solucionar problemas de comunicación.

### 3.3 Identificación de conectores y cables

Los conectores y cables ópticos son el medio que permiten la transmisión entre equipos de red en una red óptica. Si bien no son propiamente el medio principal de transmisión, es decir, no es el enlace que recorrerá la distancia meta como red de transporte, sí son los que permiten

la interconexión entre los equipos de un mismo sitio. Por lo que es importante identificar el tipo y el lugar indicado donde corresponde cada uno de ellos.

### 3.3.1 Cable ribbon

El cable principal del PL-1000TE es el cable ribbon el cual es full-dúplex, tiene en sus terminales la entrada MPO y en el otro lado cuenta con conectores LC/UPC. Las conexiones MPO son dos, estas van hacia el MUX y DEMUX respectivamente. Mientras que los conectores LC/UPC están destinadas a los puertos *LINK* DWDM del PL-1000TE, los cuales corresponden a los puertos *Uplink*. También un conector LC/UPC está destinado al puerto OSC, con la finalidad de monitorear al sistema.

El cable ribbon dirige las señales DWDM hacia el MUX/DEMUX para multiplexar y demultiplexar los canales del sistema; esta es la razón de su bi-entrada MPO, ya que permite una conectividad full-dúplex. El cable ribbon del PL-1000TE tiene 9 salidas con conectores LC/UPC, ya que este equipo posee la habilidad de transmitir 8 canales de datos y un canal de supervisión. La Figura 3.11 muestra una fotografía del cable ribbon, con sus respectivos conectores.

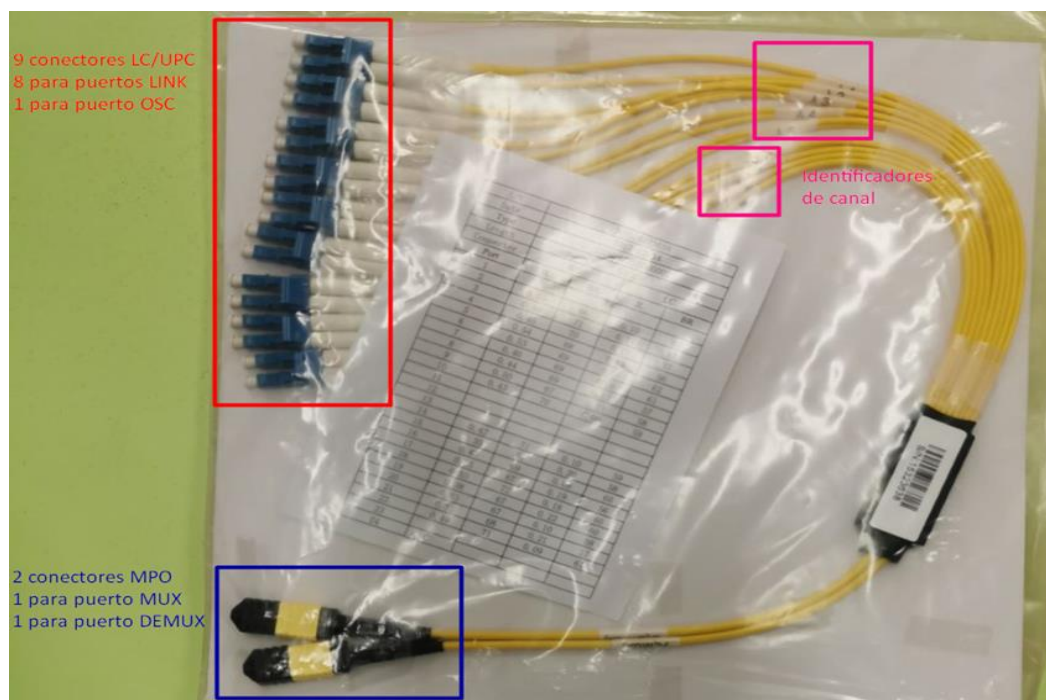


Figura 3.11 Cable Ribbon.

### 3.3.2 Conectores

Los conectores que predominan en el armado del sistema son los conectores LC/UPC, ya que ellos se conectan en todos los SFP+, ya sean DWDM o no. Estos son conectores tipo Lucent o pequeños, los cuales están diseñados para conexiones de alta densidad, además de ser push-

pull. Los conectores UPC se caracterizan por ser azules, lo que indica que son conectores de ultra contacto físico.

Los conectores utilizados en el armado del sistema son LC/UPC son dúplex, ya que los SFP+ transmiten y reciben la luz en un mismo espacio físico, logrando una comunicación full-dúplex, es decir, en *downstream* y *upstream* (subida y bajada). Ambas puntas del cable tendrán el mismo tipo de conector. La Figura 3.12 muestra un cable con conectores LC/UPC en ambos extremos.



*Figura 3.12 Conectores LC/UPC a LC/UPC dúplex.*

### **3.4 Características de las componentes del *Fronthaul* Activo**

#### **3.4.1 Capacidades de los transpondedores PL-1000TE**

El equipo PL-1000TE de PacketLight es un producto de transporte óptico avanzado que admite hasta 8 transpondedores con una combinación flexible de protocolos basados en estándares que se utilizan actualmente en la industria. El dispositivo se muestra en la Figura 3.13.

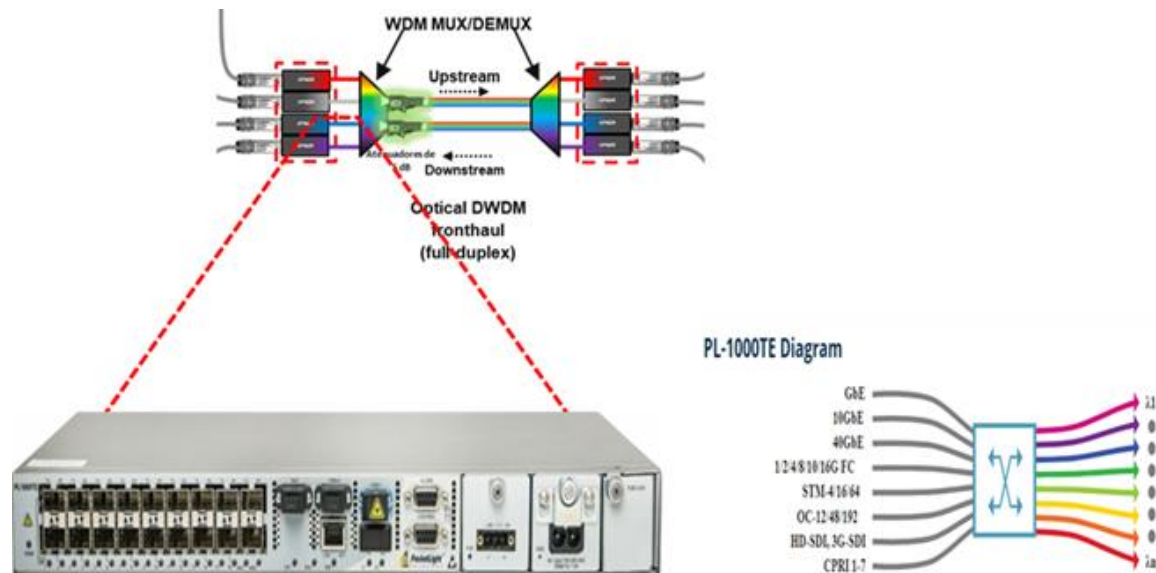


Figura 3.13 Diagrama del equipo PL1000TE empleado para el fronthaul óptico activo.

Este dispositivo permite la máxima flexibilidad en escalabilidad en cuanto a conectividad por fibra óptica se refiere, cuando se combina varios de los servicios multitas que soporta.

El PL-1000TE está diseñado para aplicaciones DWDM, CDWM y fibra oscura que requieren alto desempeño, baja latencia, almacenamiento de datos y conectividad TDM. Este dispositivo tiene la ventaja de que puede ser fácilmente mejorado añadiendo módulos o transceptores ópticos conocidos como SFP o SFP+ según los requerimientos que necesite la aplicación o arquitectura que se esté llevando a cabo en el momento.

Algunas de las características principales que presenta el PL-1000TE son:

- Multi tasa y multi protocolo que puede ser mezcla de los 8 transpondedores, configurable desde 622M hasta 40G.
- Soporte de los siguientes tipos de servicios.
  - ✓ Datos: GbE, 10GbE y 40 GbE.
  - ✓ Almacenamiento: 1G/2G/4G/8G/10G/16G FC
  - ✓ SONET/SDH: OC-12/STM-4, OC-48/STM-16, OC-192/STM-64
  - ✓ Video: HD-SDI/3G-SDI (PAL y NTSC)
  - ✓ Wireless: CPRI 1-7 (tasas de 614M a 9.8G)
- Conectividad con baja latencia.
- Interfaces para SFP/SFP+ para canales WDM y servicios.

- Soporta SFP+ DWDM reconfigurable para toda la banda C.
- Opción de integración de EDFAs, MUX/DEMUX, DCM y switch óptico.
- Desempeño bidireccional para monitoreo de todos los servicios.
- Soporta infraestructura para fibra única o doble.
- Soporta topologías punto a punto, ADM lineales y anillos con facilidad de enlaces de subida y protección de servicios.

Como se mencionó anteriormente el PL-1000TE se compone de 8 pares de transpondedores y 2 multiplexores el cual permite la interconexión los equipos USRP y las PCs empleando tecnología DWDM y haciendo uso de transeivers denominados SFP+ (Small Form factor Pluggable) que estarán operando a 10 Gb/s.

Cabe recordar nuevamente que para estos transpondedores se emplearán los canales DWDM de la ITU 28, 30, 32 y 34 que se encuentran espaciados 200 GHz entre sí y propiamente se describen en la Tabla 3.4 con su frecuencia portadora y longitud de onda.

*Tabla 3.4 Canales DWDM de la ITU empleados para implementar el fronthaul óptico activo.*

Canal	f [THz]	$\lambda$ [nm]
28	192.8	1554.94
30	193	1553.32
32	193.2	1551.72
34	193.4	1550.11

En la Figura 3.14 también se aprecian los puertos MUX/DEMUX, estos puertos son los que se conectarán a los SFP+ DWDM por medio de un cable MPO/APC (ribbon cable) el cual viene incluido con el equipo. Las señales de los SFP+ DWDM individualmente viajarán al MUX por medio del cable MPO/APC, al llegar al MUX estas señales se van a multiplexar y tendrán salida en uno de los dos puertos denominados COM.

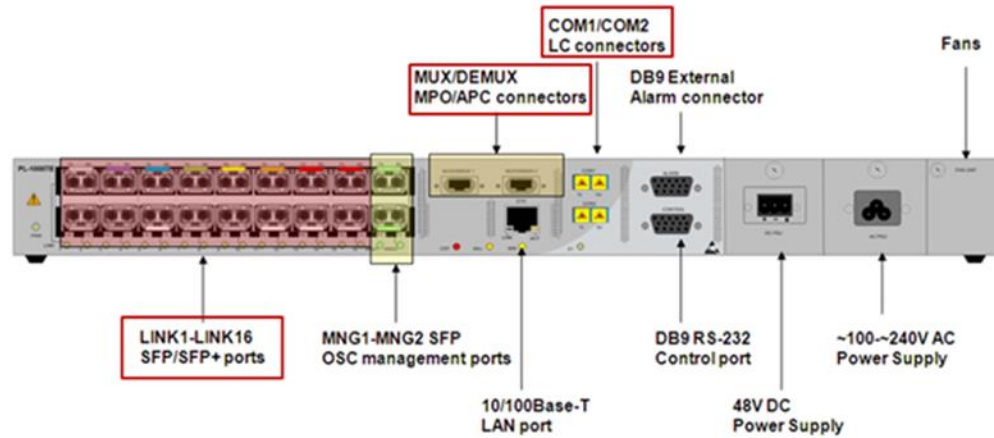


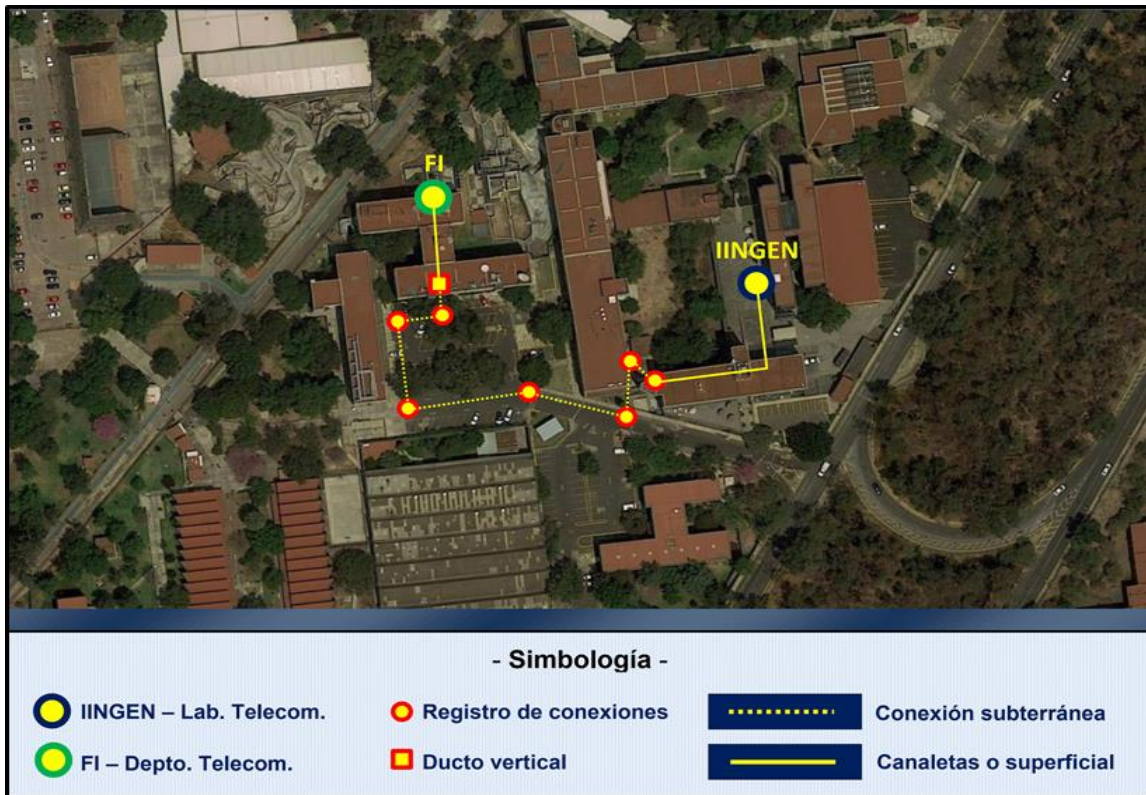
Figura 3.14 Diagrama de los puertos del PL1000TE que se utilizarán para el fronthaul.

### 3.4.2 Características del enlace de fibra óptica instalada

La fibra óptica que se va a utilizar en el *fronthaul* fue un enlace entre el laboratorio de radiofrecuencia del anexo de la Facultad de Ingeniería (FI) y el laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería (IINGEN). La planeación del enlace IINGEN – FI fue crucial, ya que permitió prevenir múltiples dificultades durante su instalación. Inicialmente se hicieron dos propuestas para el tendido de la fibra. La primera de ellas consistía en comunicar a las dos dependencias a través de un enlace aéreo, lo que permitiría una instalación sencilla pero expuesta a más factores de riesgo al requerir pasar por encima de otras dependencias de la UNAM. La segunda opción, por la cual nos decidimos, fue realizar el cableado empleando la red de ductos subterráneos de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (DGTIC) de la UNAM, la cual está diseñada especialmente para albergar enlaces de fibra óptica.

Como parte del proceso de planeación se comprobó la ruta que se seguiría en la instalación del cable de fibra, esto se llevó a cabo con la información que nos proporcionó la DGTIC sobre la distribución de su red subterránea y a través de la apertura de tapas y registros dado que la información adquirida fue insuficiente. La Figura 3.15 muestra el trazo de la ruta planeada entre el IINGEN y la FI, ambas entidades se encuentran ubicadas dentro de Ciudad Universitaria. El punto indicado como IINGEN corresponde al Laboratorio de Telecomunicaciones, mientras que el punto FI hace referencia al Laboratorio de Radiofrecuencia.





*Figura 3.15 Trazo de la ruta planeada para el enlace por fibra óptica IINGEN – FI.*

En función de la capacidad, costo, tolerancia a ambientes externos y características de transmisión, se decidió emplear un cable de fibra óptica de 48 hilos de la marca YOFC, siendo cada uno de estos hilos una fibra óptica monomodo fabricada bajo la norma internacional ITU-T G.652.D, la cual resulta adecuada para realizar transmisiones WDM. A continuación, en la Tabla 3.5, se indican las características principales del cable de fibra óptica empleado.

*Tabla 3.5 Características principales del cable de fibra óptica instalado.*

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

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

De esta forma fue posible establecer un enlace entre el Laboratorio de Telecomunicaciones del IINGEN y el Laboratorio de Radiofrecuencia de la FI. La Figura 3.16 muestra un plano simplificado del enlace IINGEN – FI. En él se pueden apreciar las longitudes aproximadas de cada tramo excluyendo los enrollamientos de la fibra, además se incluyen una serie de evidencias fotográficas que facilitan la identificación de cada punto de interés.



Figura 3.16 Plano simplificado del enlace IINGEN - FI.

La medición de la longitud del enlace de fibra óptica entre el IINGEN y la FI usando un equipo OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*), fue de 555 metros. Este es el valor real de la longitud del cable entre el IINGEN y la FI, y es el que se utilizará para los cálculos y mediciones que se presentan más adelante en el presente escrito.

Una vez que se realizó el tendido de la fibra óptica se procedió a instalar la infraestructura necesaria para llevar a cabo la caracterización del enlace IINGEN – FI. En el caso del

Laboratorio de Telecomunicaciones solamente se instaló un patch panel (Figura 3.17a), mientras que en el Laboratorio de Radiofrecuencia fue necesario instalar un rack junto con su respectivo patch panel (Figura 3.17b).

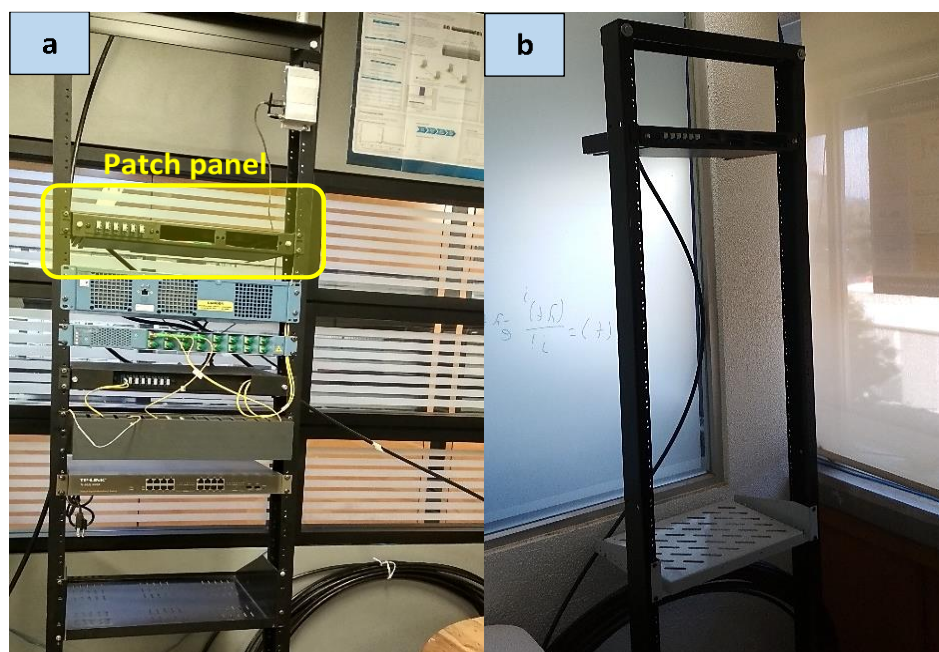


Figura 3.17 a. Instalación del patch panel en el IINGEN, b. Instalación del rack y el patch panel en la FI.

Ambos conjuntos siguen una configuración “Ping-Pong” entre el rack ubicado en la FI y el rack que se encuentra en el IINGEN, tal y como se aprecia en la Figura 3.18.

Es importante mencionar que el cable de fibra instalado entre el IINGEN y la FI es un cable que consta de 48 hilos de fibra óptica, siendo cada hilo de fibra óptica recubierto con un polímero plástico de diferente color para su fácil identificación. Si en lugar de considerar un enlace de fibra de 555m se unen los extremos de algunos hilos de fibra óptica tal como se indica en la Figura 3.18, es posible contar con los siguientes conjuntos de enlaces full dúplex de fibra óptica:

Conjunto A) Un enlace por seis hilos que se unieron por medio de conectores mecánicos para tener la posibilidad de variar la longitud del enlace en secciones de 555 m durante las pruebas. Este enlace alcanzó una distancia máxima de 3.33 km (o sea,  $6 \times 555 \text{ m} = \underline{3.33 \text{ km}}$ ).

Conjunto B) Un enlace formado por los 18 hilos restantes del cable. Estos fueron empalmados entre sí (en lugar de usar conectores mecánicos) para reducir las pérdidas del enlace total y así formar un tramo de fibra óptica que alcanzó una distancia máxima de 9.99 km (o sea,  $18 \times 555 \text{ m} = \underline{9.99 \text{ km}}$ ).

Estos dos conjuntos de enlaces full-duplex para poder transmitir señales *downstream* y *upstream* se pueden observar en la Figura 3.18.

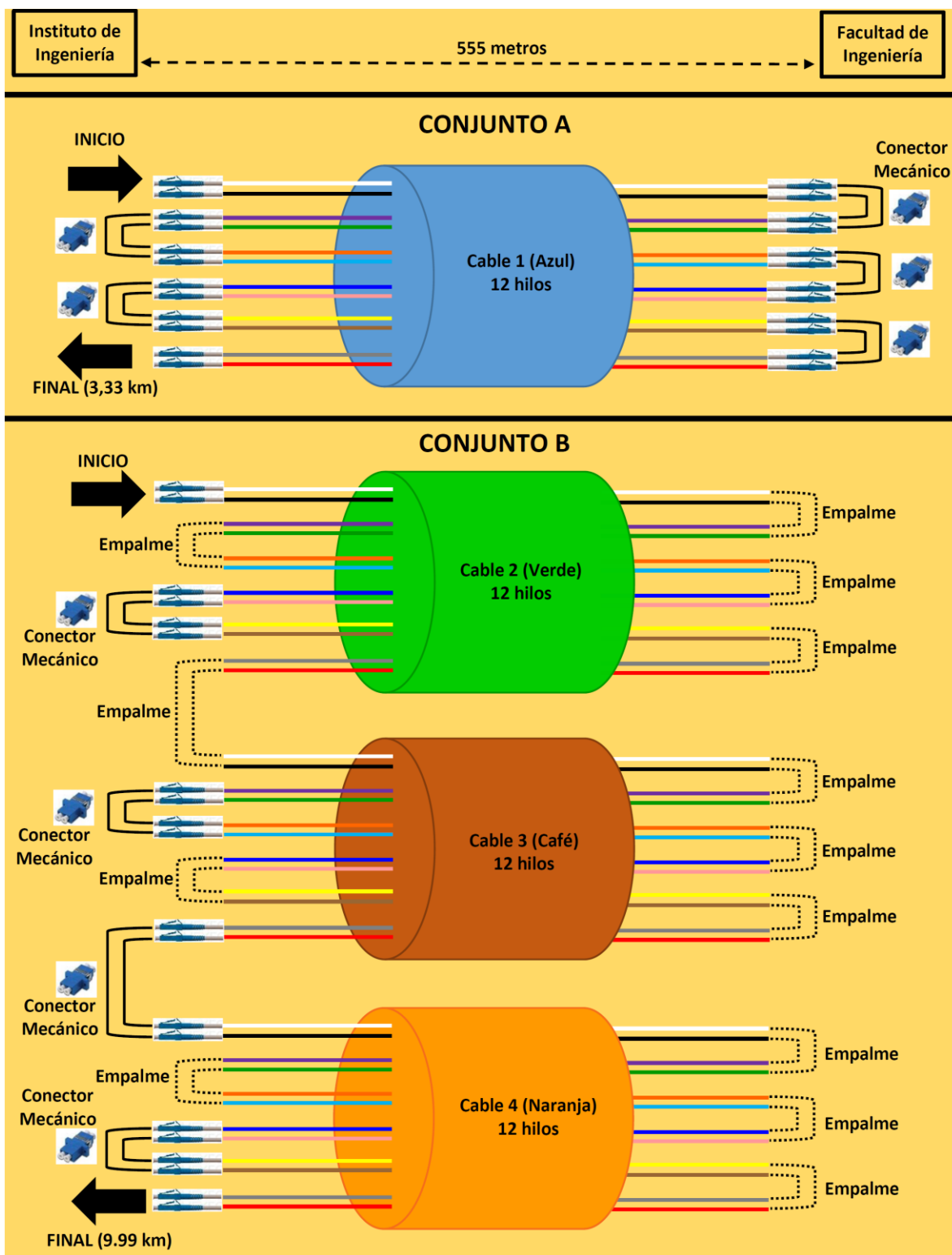
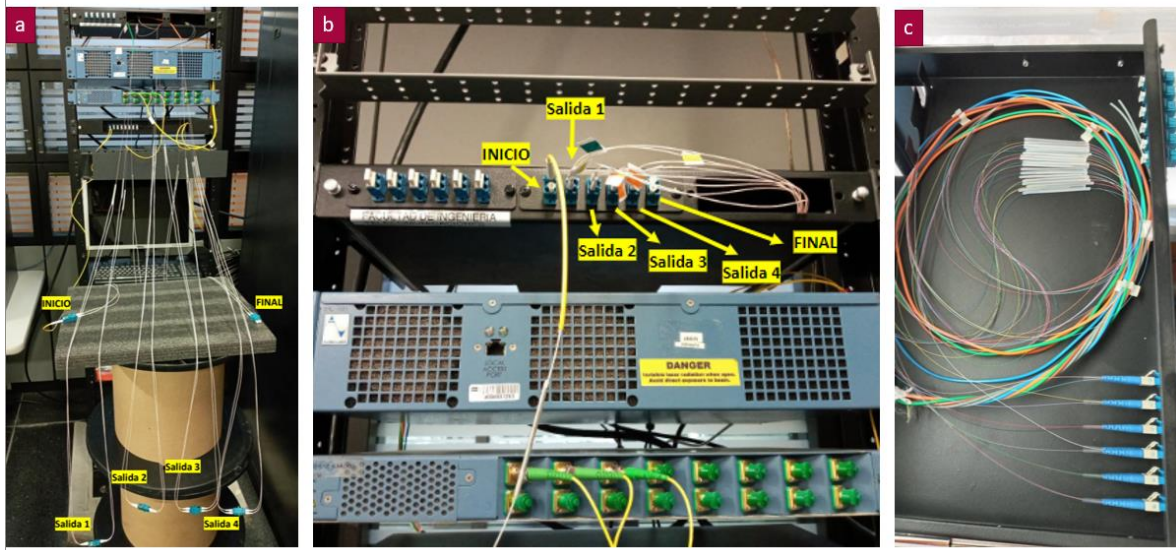


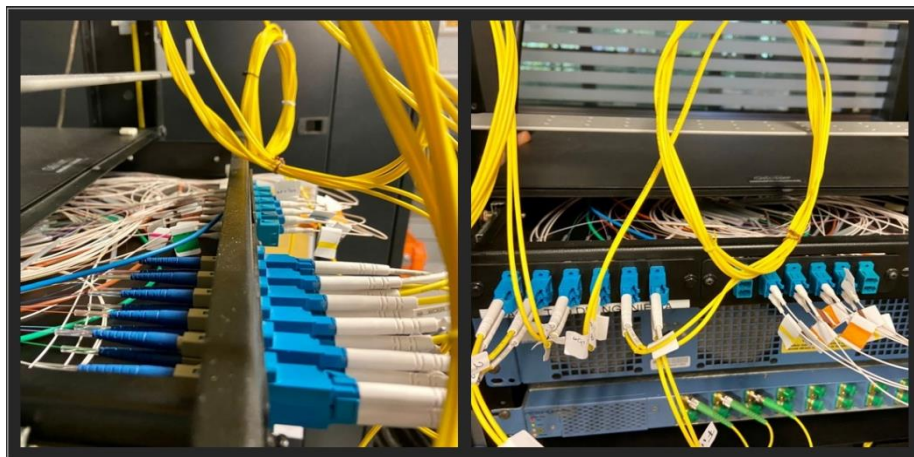
Figura 3.18 Enlaces de fibra óptica de 3km y 10km.

Una vez realizados los empalmes y conectores mecánicos, estos se acomodaron en los racks del Instituto de Ingeniería y de la Facultad de Ingeniería para un manejo óptimo y una mejor organización. La Figura 3.19 muestra los racks en los que se acomodaron las partes terminales de los enlaces. La Figura 3.19a y 3.19b muestra el rack del Instituto de Ingeniería con los conectores y empalmes acomodados, mientras que en la Figura 3.19c se puede observar el rack de la Facultad de Ingeniería con los empalmes acomodados.



*Figura 3.19 Adecuación del cable de fibra óptica acondicionada para un fronthaul variable.*

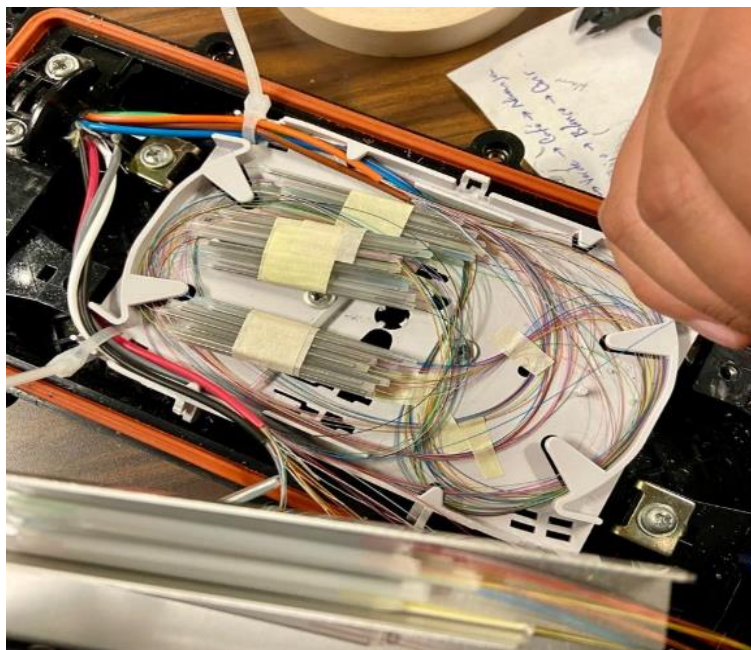
Es importante tener los conectores limpios, en buen estado y con los hilos de fibras libres de dobleces o curvaturas excesivas, puesto que cualquiera de estos factores puede causar grandes atenuaciones, incluso si los empalmes están bien realizados. La Figura 3.20 muestra los hilos de fibra óptica dentro del rack perteneciente al IINGEN, los cuales se colocaron con sumo cuidado para evitar factores que pudieran causar atenuación en la señal.



*Figura 3.20 Colocación de la fibra dentro del rack del IINGEN.*

Posteriormente a la realización de estos dos conjuntos de enlaces de A) 3km y B) 10km, se decidió 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. Este análisis puede resultar interesante para ciertas aplicaciones. En este sentido, se realiza un enlace adicional partiendo de un carrete de 350 m de longitud que se encontraba disponible en el laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería. Dicho carrete también consta de 48 hilos de fibra óptica y por medio de la unión de algunos hilos de fibra en los extremos del carrete a través de empalmes de fusión se obtuvieron 24 enlaces full dúplex interconectados entre sí. La longitud de este enlace que denominaremos C) fue de  $24 \times 350\text{m} = \underline{8.4 \text{ km}}$ . Se tuvo cuidado en que las características de la fibra óptica fueran las mismas que la de los enlaces de los conjuntos A) y B) mencionados anteriormente, garantizando así compatibilidad.

En el caso del enlace de fibra del conjunto C, los empalmes no fueron acomodados en un rack, sino en una caja de empalmes tal como se aprecia en la Figura 3.21, la cual no ha sido diseñada para albergar los 46 empalmes que requiere el carrete, por lo que es de suma importancia el acomodamiento de estos empalmes, para garantizar comunicación con las menores pérdidas de potencia posibles.



*Figura 3.21 Empalmes del Conjunto C acomodados en una caja de empalmes.*

Teniendo todos los empalmes realizados tanto de la fibra tendida como los del carrete ubicado en el Instituto de Ingeniería, se puede enunciar en resumen que para la implementación del *fronthaul* óptico y la realización de las pruebas correspondientes, se dispuso de tres enlaces principales que, de acuerdo, a las necesidades se conectaron entre sí:

- i) Un enlace compuesto por el conjunto A) y cuya longitud máxima alcanza los 3.33 km.
- ii) Un enlace fijo, compuesto por el conjunto B) y cuya longitud es de 10 km.
- iii) Un enlace adicional compuesto por el conjunto C) y cuya distancia máxima es de 8.4 km, el cual fue obtenido usando un carrete ubicado en el Instituto de Ingeniería.

Para la realización de las pruebas que se mencionan más adelante, se optó por el análisis de un *fronthaul* con tres longitudes principalmente: 10 km, 18.4 km (constituido por la unión de i y iii) que se le denomina enlace de 18 km, y 21.7 km (constituido por la unión de i, ii y iii) que se le denomina enlace de 21 km.

La Figura 3.22 muestra la distribución y la construcción del enlace completo para el *fronthaul* óptico pasivo de longitud variable.

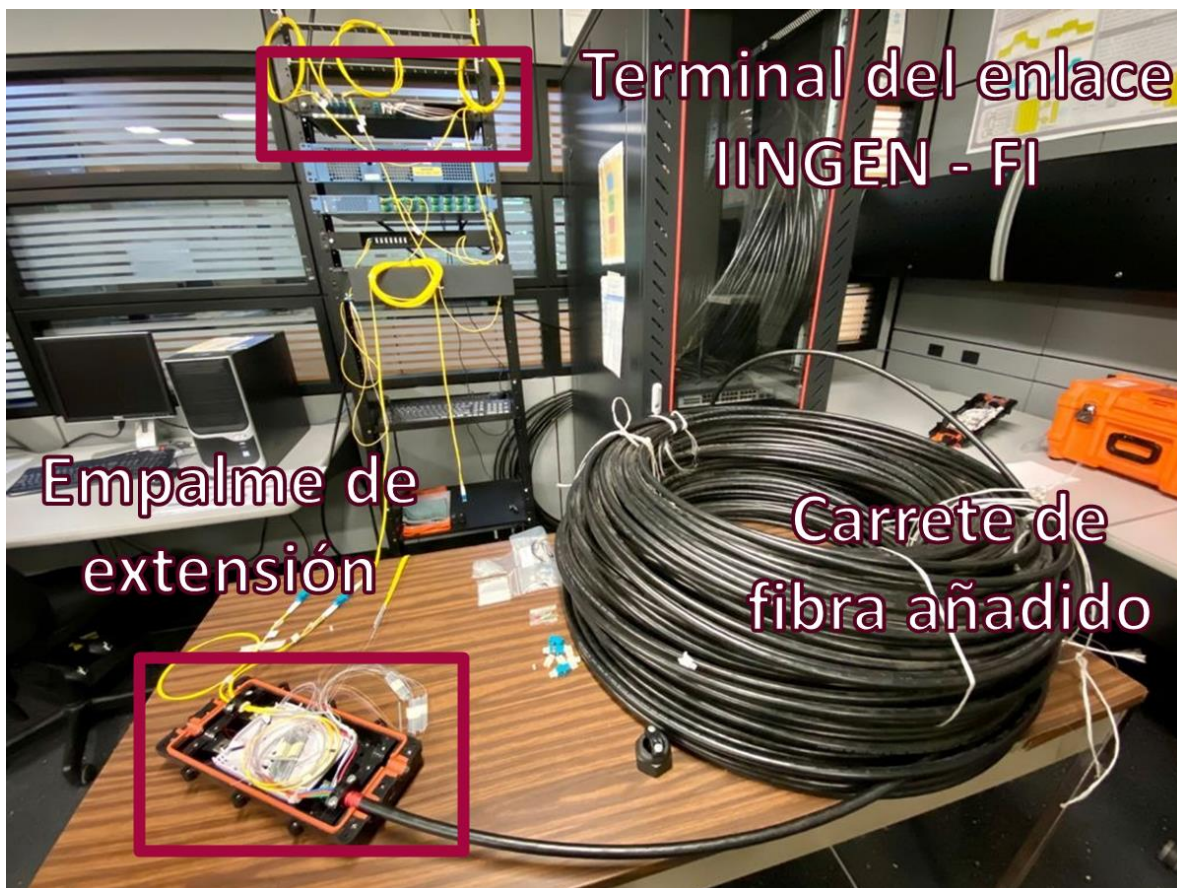


Figura 3.22 Enlaces de fibra óptica para el *fronthaul* óptico.

A continuación, en la Tabla 3.6 se muestran los 3 diferentes enlaces empleados para formar el *fronthaul* de fibra óptica, los cuales han sido caracterizados con el OTDR. Para identificarlos con mayor claridad se les ha asignado con el nombre de Link 1, 2, y 3.

Tabla 3.6 Identificación de los enlaces según su longitud.

<i>ID Link</i>	<i>Longitud del enlace</i>
1	10km
2	18km
3	21km

### 3.5 Mediciones del enlace de fibra óptica usado en el *Fronthaul Activo*

Para realizar las mediciones de atenuaciones y longitudes de la fibra óptica que se emplea para el *fronthaul* óptico activo el cual se compone por 3 *links* descrito en la Tabla 3.6, se utiliza un equipo llamado *Optical Time Domain Reflectometer* (OTDR, por sus siglas en inglés). En este sentido, se conectó el OTDR en el *Link* 1. En este punto cabe recordar que el enlace del *link* 1 es full-duplex, es decir posee dos hilos de fibra óptica, uno usado para *upstream* (subida) y otro para *downstream* (bajada). Para una comunicación full-dúplex es necesario caracterizar tanto el sentido *upstream* como el sentido *downstream*.

La caracterización del *link* 1 de 10 km en sentido *upstream* y *downstream* se encuentran representados en las trazas OTDR de las Figura 3.23 y 3.25. Los detalles de la traza que se presentan en las Figura 3.24 y 3.26 muestran que se ha obtenido una distancia total de 9.918 km con pérdidas de potencia acumuladas de 2.793 dB para el sentido *upstream*, mientras que en el sentido *downstream* el final del enlace alcanzó una distancia de 9.920 km con pérdidas acumuladas de 2.83 dB.



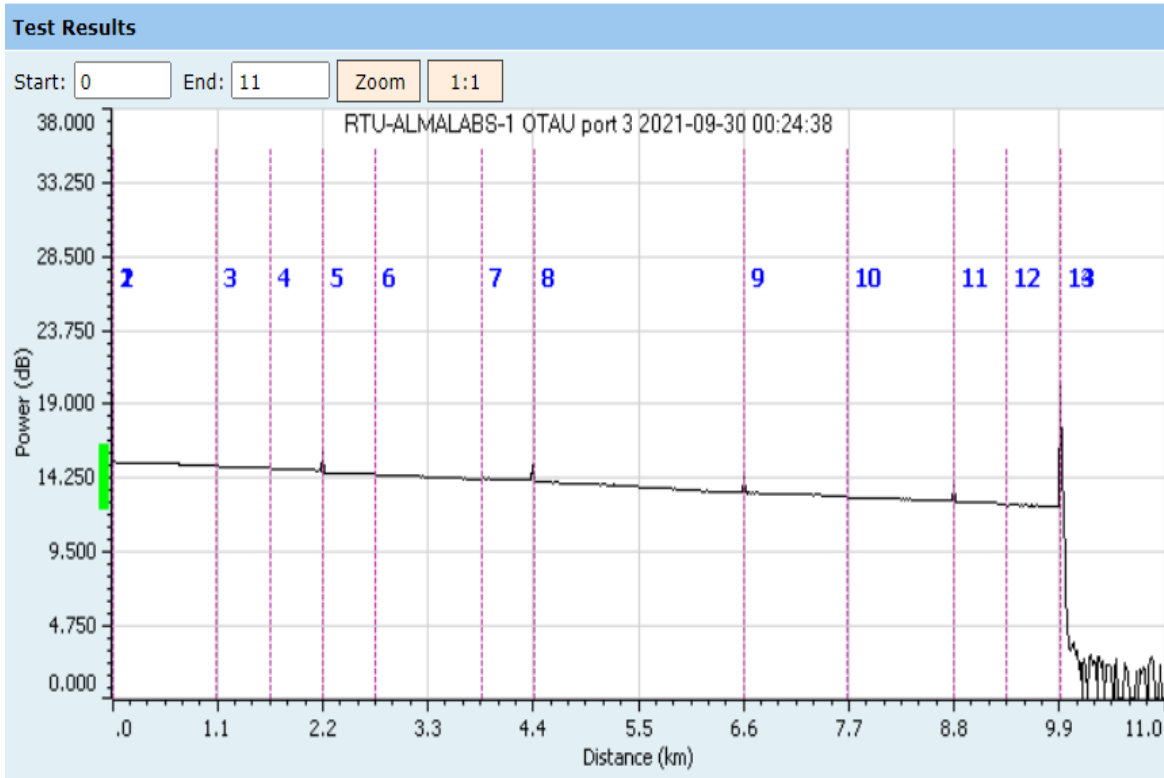


Figura 3.23 Traza OTDR 10 km en sentido upstream.

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

Distancia [km]

Reflectancia [dB]

Pérdidas acumuladas [dB]

Figura 3.24 Detalle de traza OTDR a 10 km en sentido upstream

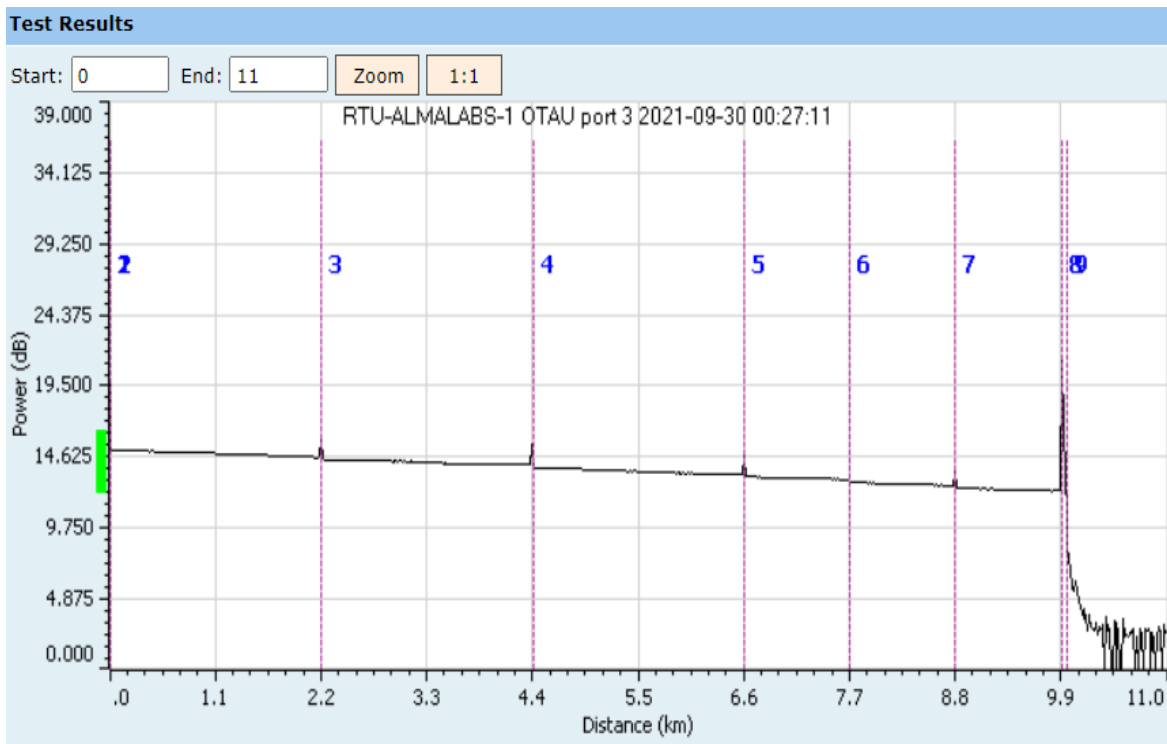


Figura 3.25 Traza OTDR 10 km en sentido downstream

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

Distancia [km]

Reflectancia [dB]

Pérdidas acumuladas [dB]

Figura 3.26 Detalle de traza OTDR a 10 km en sentido downstream.

La caracterización del *link* 2 de 18 km en sentido *upstream* se encuentra representado en la traza OTDR de la Figura 3.27. Los detalles de la traza que se presentan en la Figura 3.28 muestran que el final del enlace alcanza una distancia de 18.465 km con pérdidas acumuladas de potencia óptica de 5.96 dB.

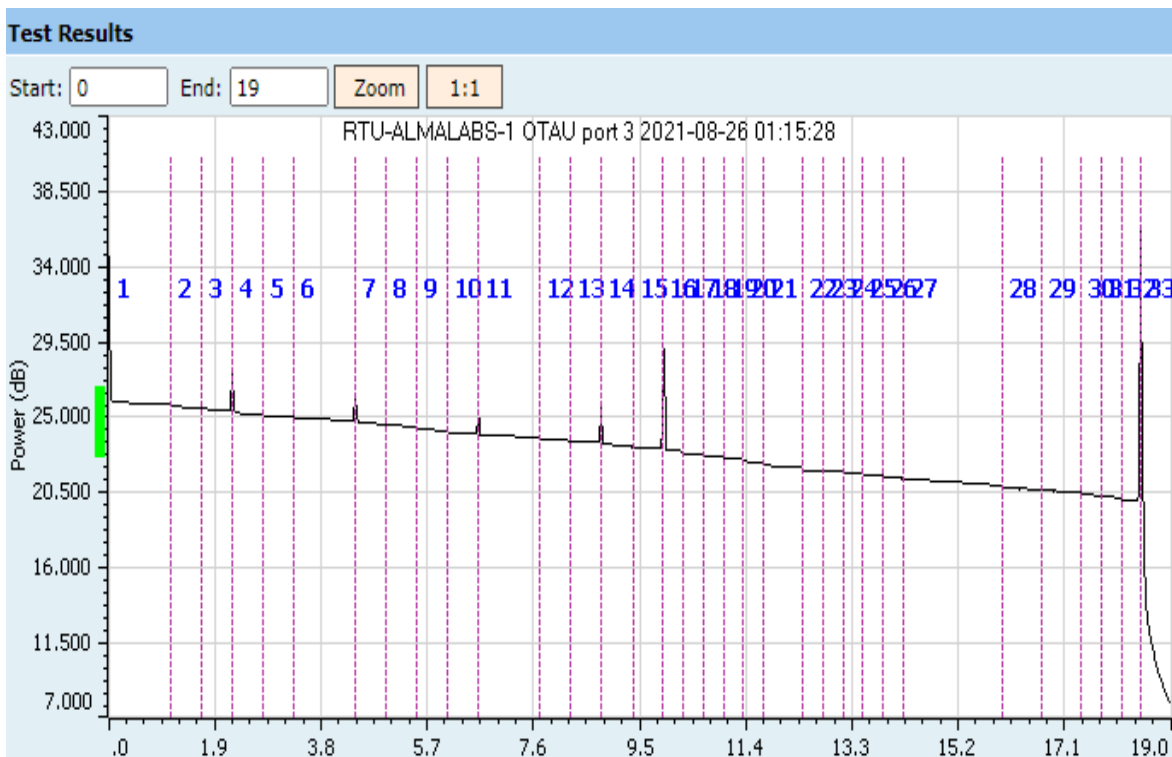


Figura 3.27 Traza OTDR para el enlace de 18 km en sentido upstream.

Number	32		33
Type			
Position (km)	8.116	18.11	18.465
Length (km)	0.027	0.349	0.407
Curve Level (dB)	20.188	-	19.998
Loss (dB)	0.128	0.063	-
Attenuation (dB/km)	-	0.180	-
Reflection (dB)	-	-	17.259
Reflective Peak (dB)	20.175	-	42.036
Cumulative Loss (dB)	5.897	5.960	5.960

Figura 3.28 Detalle de traza OTDR a 18 km en sentido upstream.

Para obtener la caracterización completa del enlace de 18 km, se repitió el procedimiento anterior, pero ahora en sentido *downstream*. La Figura 3.29 muestra la traza OTDR del enlace de 18 km en sentido *downstream*. La Figura 3.30 muestra el detalle de la traza OTDR. En ella se puede apreciar que el final del enlace corresponde a una distancia de 18.466 km con pérdidas acumuladas a lo largo del medio de 5.898 dB.

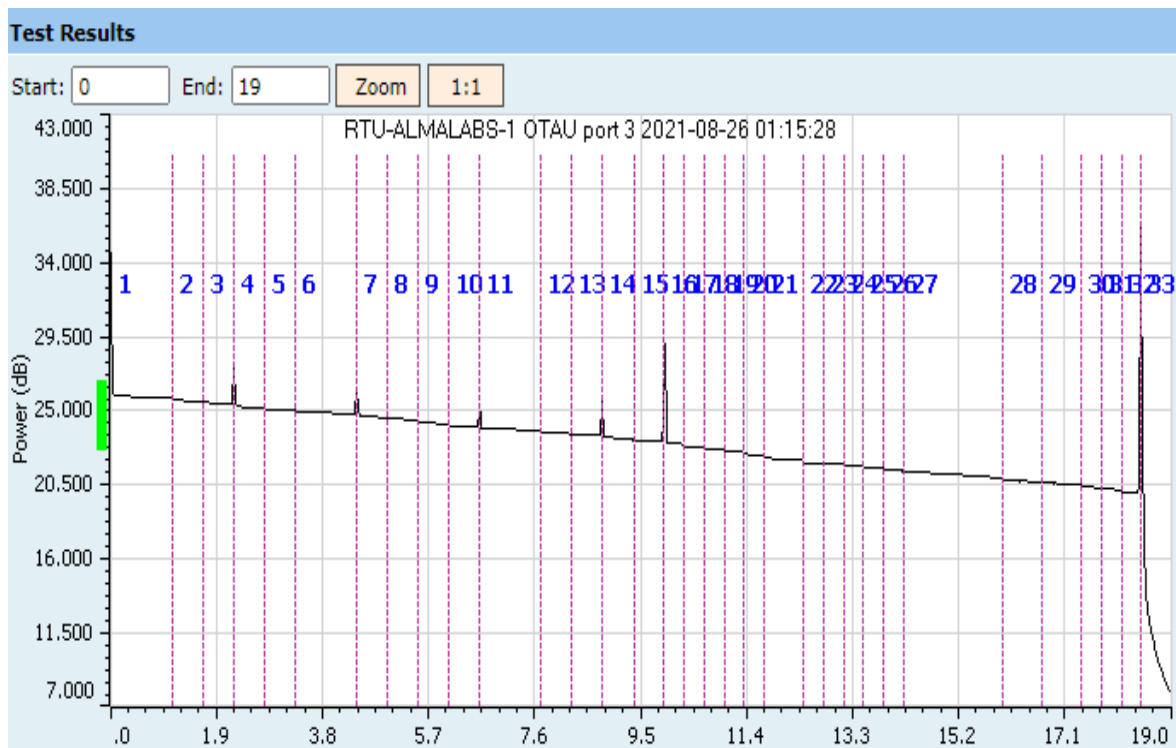


Figura 3.29 Traza OTDR 18 km en sentido *downstream*.

Number	26	27
Type		
Position (km)	18.119	18.466
Length (km)	0.026	0.437
Curve Level (dB)	20.091	19.911
Loss (dB)	0.107	0.074
Attenuation (dB/km)	-	0.212
Reflection (dB)	-	15.077
Reflective Peak (dB)	20.079	43.039
Cumulative Loss (dB)	5.825	5.898

Distancia [km]

Reflectancia [dB]

Pérdidas acumuladas [dB]

Figura 3.30 Detalle de traza OTDR a 18 km en sentido *downstream*.

Por último, se realizó la caracterización del *link* 3 con una longitud de 21km en sentido *upstream*. La Figura 3.31 muestra la traza OTDR de este enlace, mientras que la Figura 3.32 muestra el detalle de la lectura de la traza. En ella se puede observar que el final del enlace alcanza una distancia de 21.769 km con pérdidas acumuladas de 9.118 dB.

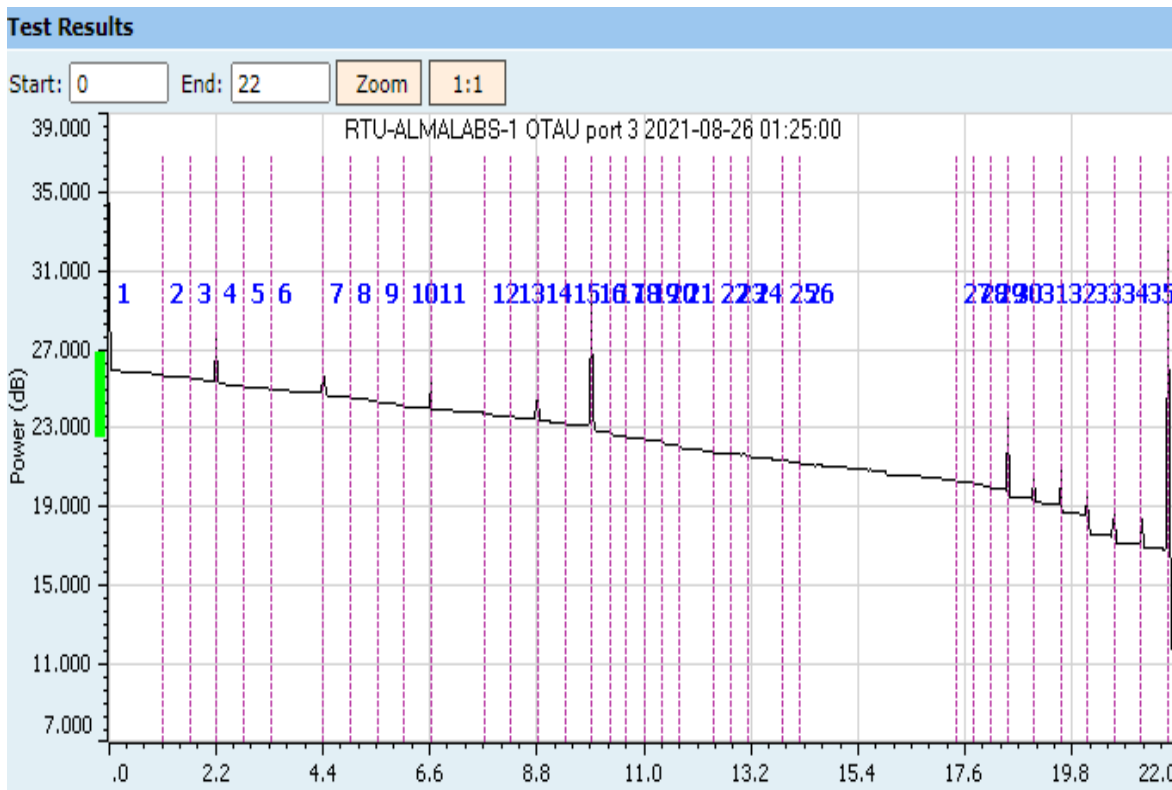


Figura 3.31 Traza OTDR 21 km en sentido upstream.

Event	Number	35	36
	Type	Π	Π
	Position (km)	21.220	21.769
	Length (km)	0.041	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	9.118

Distancia [km]

Reflectancia [dB]

Pérdidas acumuladas [dB]

Figura 3.32 Detalle de traza OTDR a 21 km en sentido upstream.

Se repitió el procedimiento para el *link* 3 de 21 km en sentido *downstream*. La Figura 3.33 muestra la traza OTDR del enlace de 21 km en sentido *downstream*, en tanto, la Figura 3.34 muestra el detalle de la traza OTDR. En ella se puede notar que el final del enlace alcanza una distancia de 21.772 km con pérdidas acumuladas de 9.122 dB.

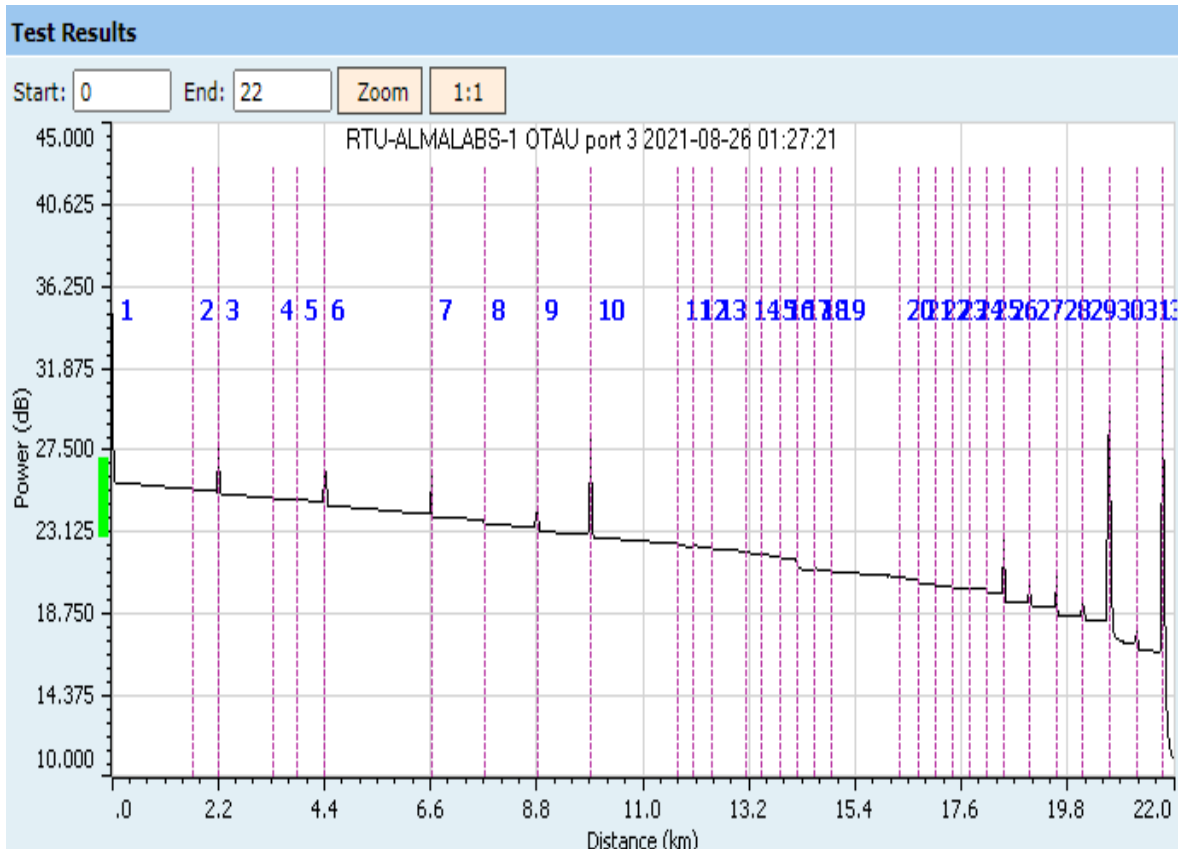


Figura 3.33 Traza OTDR 21 km en sentido *downstream*.

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

Figura 3.34 Detalle de traza OTDR a 21 km en sentido *downstream*.

Es importante aclarar que el utilizar tres diferentes *links* de fibra óptica full-duplex para instalar el enlace de fibra óptica que corresponde al *fronthaul* en lugar de un solo *link*, no representa falta de previsión en el proyecto. Las circunstancias propias durante el desarrollo del mismo, fueron las que nos obligaron a improvisar de esta manera, resultando en enlaces, si bien no óptimos por las pérdidas que presentan, sí con las características necesarias para los fines del proyecto. La primera de estas circunstancias fue la necesidad de incrementar la distancia de prueba más allá de 10 km, longitud que en un principio se había previsto, ya que es la distancia máxima que normalmente se define en sistemas como el presentado en este proyecto. Esta necesidad de incrementar el alcance del *fronthaul* se derivó de los excelentes resultados preliminares que se obtuvieron en cuanto a desempeño para el sistema en estudio. Dichos resultados motivaron a incrementar el alcance de la fibra óptica y así realizar pruebas más ambiciosas, estresando el sistema y, por tanto, adquiriendo mayor cocimiento y extendiendo los límites del estudio original, con las respectivas ventajas que ello conlleva. La segunda de estas circunstancias fue el confinamiento que produjo la emergencia sanitaria por todos conocida. El acceso restringido a las facilidades de la UNAM durante un periodo de varios meses nos impidió hacer un tendido convencional de fibra óptica entre el Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería. Consecuentemente, se decidió hacer uso de la infraestructura que disponíamos en el Laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería, que es donde se realizó la mayor parte del trabajo práctico, para solventar nuestras necesidades. Afortunadamente, disponíamos de un carrete del tipo de fibra requerido y así fue como generamos (casi de manera artesanal) el tercer elemento que forma el enlace total, utilizando el carrete de fibra añadido. Asimismo, y debido a las circunstancias extraordinarias que presentó el confinamiento de la emergencia sanitaria optamos por limitar el acceso al laboratorio de la FI, concentrando las actividades laborales en el Laboratorio del Instituto de Ingeniería. Para ello, utilizamos jumpers de fibra óptica para interconectar las terminaciones de los enlaces ubicados en la FI, “puenteándolos”, de manera que formaran un solo enlace con inicio y terminación en el Instituto de Ingeniería.

## Capítulo 4 Implementación preliminar y caracterización del sistema propuesto

En este capítulo se da a conocer la implementación de un *fronthaul* óptico con arquitectura activa de una red 4G/5G dentro de las instalaciones de Ciudad Universitaria. Una vez implementado es necesario verificar que todas las partes de la arquitectura funcionen correctamente, por esta razón se realizaron una serie de pruebas para corroborar que cada dispositivo funcione adecuadamente y el *fronthaul* cumpla con los requisitos de una red 4G/5G, así mismo se deben de verificar que todas los dispositivos cumplan con lo mencionado por el fabricante en su hoja de especificaciones y se encuentren dentro de la norma, de esta manera se garantiza una integración completamente funcional y optima en la arquitectura final de la red propuesta.

### 4.1 Descripción de pruebas a realizar en equipos y componentes por separado

La verificación del funcionamiento de cada equipo óptico en el *fronthaul* es fundamental, puesto que es el medio principal de transporte de la red entre las radio-bases y sus unidades de procesamiento.

Para un funcionamiento eficiente de la red es imprescindible realizar la caracterización en potencia óptica y longitud de onda del equipo óptico empleado en la red óptica, ya que esto determinará el desempeño que la red tendrá, además de proveer un margen de seguridad para futuros imprevistos o daños que puedan surgir en los mismos equipos ópticos. Previo a la caracterización del equipo, es importante identificar cada elemento tal como se describe a continuación.

#### 4.1.1 Pruebas a los transceptores SFP+

Los SFP+ son transceptores ópticos que permiten a los dispositivos de red transmitir y recibir luz. Estos SFP+ tienen 2 puertos, uno para el transmisor láser, y otro para el receptor óptico, los cuales admiten conectores tipo LC. Cada SFP+ admite un cierto tipo de longitud de onda en transmisión y recepción de la señal láser, estas están indicadas en la carcasa del mismo SFP+. Los SFP+ estarán insertados en cada equipo de red perteneciente al *fronthaul* óptico, ya que los SFP+ son los que les brindan la capacidad a los equipos de red conectarse a una red óptica. Normalmente los SFP+ se conectan a una tarjeta de red integrada en los equipos, la cual tiene la capacidad de admitir transceptores ópticos, ya que, sin esta característica, el equipo de red sería incapaz de ser parte de cualquier red óptica.

Los SFP+ que utilizará el sistema son en su mayoría los que operan a una longitud de onda de 1310 nm también llamados SFP+ “grises” como se les conoce coloquialmente, aunque también se requerirán SFP+ DWDM que operan a longitudes de onda alrededor de 1550nm, que también se les conoce como SFP+ “coloreados”. En particular, en el proyecto se utilizan



SFP+ coloreados que operan en los canales: 28, 30, 32 y 34 con longitudes de onda de 1554.94nm, 1553.33nm, 1551.72nm, y 1550.12nm respectivamente. Estos canales corresponden a la recomendación G.694.1 de la ITU-T [ITU-T Rec. G.694.1] para la transmisión de canales DWDM en un *fronthaul* óptico activo. La Figura 4.1 muestra los diferentes SFP+ que se utilizarán en el sistema propuesto. Es muy importante interconectar estos SFP+ 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.

En la Figura 4.1, los SFP+ delimitados por el perímetro color verde se emplearon en una configuración de arquitectura pasiva, mientras que los SFP+ delimitados por el perímetro anaranjado son los que se utilizaron en la implementación del *fronthaul* activo descrito en este proyecto.

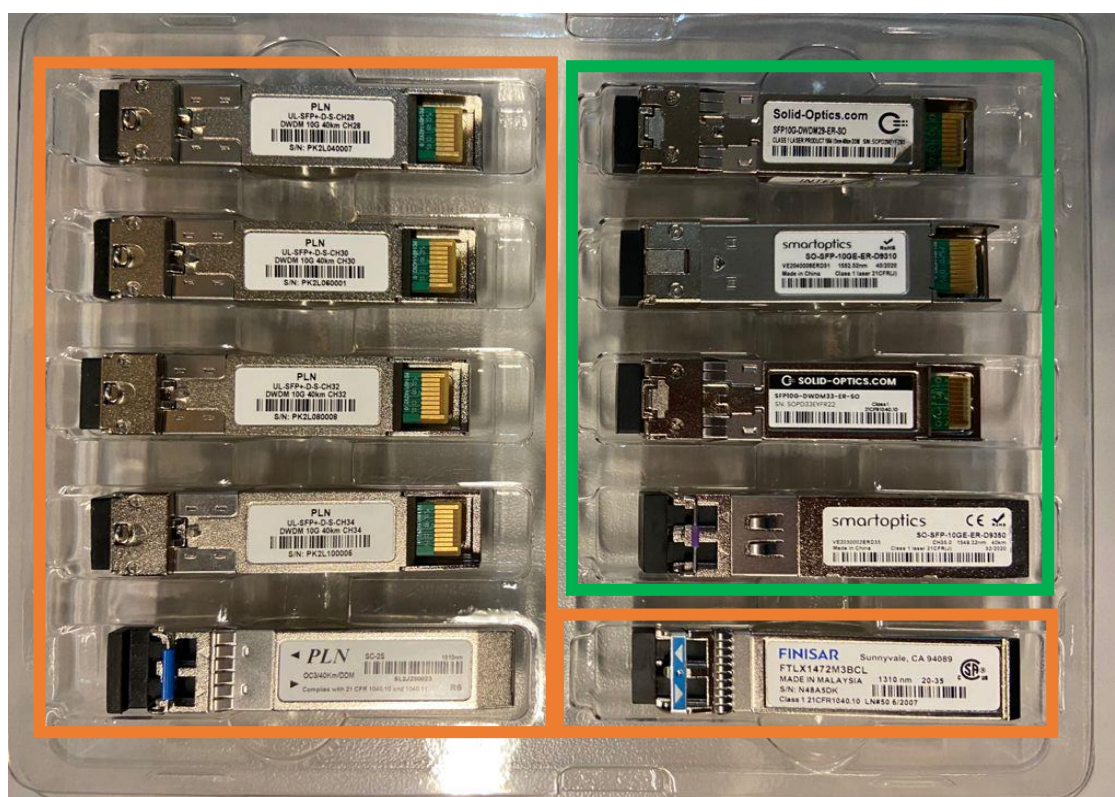


Figura 4.1 Todos los tipos de SFP+ coloreados que se utilizaran en las diferentes configuraciones del fronthaul.

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 para asignarlos exclusivamente a un puerto, ya sea del PL-1000TE o de un dispositivo de red. La

Figura 4.2 muestra 16 SFP+ que operan a una longitud de onda de 1310 nm, y que fueron utilizados en el proyecto.



Figura 4.2 SFP+ @1310 nm empleados.

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 a las señales ópticas.

Los SFP+ grises proveerán la comunicación entre los dispositivos de red en los extremos del *fronthaul* con el equipo óptico principal. Cabe resaltar que esta interconexión es de corto alcance, de aproximadamente 10 metros, por lo que la potencia en estos casos no cobra mayores inconvenientes en términos de pérdidas, sin embargo, se tiene que prever de rebasar los umbrales superiores de la sensibilidad en la potencia que pueda llegarle al receptor.

Como se mencionó previamente, los SFP+ DWDM son los canales del sistema, por lo que, tanto su potencia como su frecuencia de operación son determinantes, ya que estos son los que recorrerán el enlace que proporciona el transporte del *fronthaul*, además de que al pasar por el MUX/DEMUX estos SFP+ DWDM compartirán el mismo medio con otras señales de

distintos SFP+ DWDM de diferente longitud de onda, en otras palabras, 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 como el OSNR, SMSR y el ancho de línea espectral cobran relevancia en el sistema.

Previo a la lectura de los valores de cada uno de los parámetros, es importante identificar cada uno de los SFP+ que formarán parte del *fronthaul* óptico, para este fin, se le ha dado un identificador ID SFP+ a cada SFP+ a través de su número de serie. La Tabla 4.1 muestra la relación de cada SFP+ empleado en el *fronthaul*

*Tabla 4.1 Identificador de SFP+ a través de su número de serie.*

ID SFP+	No. Serie	ID SFP+	No. Serie	ID SFP+	No. Serie
<b>1</b>	N3BB2VK	<b>9</b>	N48ADV7	<b>CH28 A</b>	PK2L040007
<b>2</b>	N3BB1EH	<b>10</b>	N46BMJX	<b>CH30 A</b>	PK2L060001
<b>3</b>	N3BB18N	<b>11</b>	N48A5DK	<b>CH32 A</b>	PK2L080008
<b>4</b>	N46BMKP	<b>12</b>	N46BMJV	<b>CH34 A</b>	PK2L100005
<b>5</b>	N48A5DF	<b>13</b>	N48A765	<b>CH28 B</b>	PK2L040006
<b>6</b>	N3BBMWH	<b>14</b>	N48A5FP	<b>CH30 B</b>	PJ8U170006
<b>7</b>	N3BB18V	<b>15</b>	N47C1S4	<b>CH32 B</b>	PK2L080007
<b>8</b>	N3BB1LV	<b>16</b>	N48A7X6	<b>MNG A</b>	SL2J250023
				<b>MNG B</b>	PL2SP30023

En una prueba preliminar, el equipo PL-1000TE se configurará para realizar transmisión en uno de los cuatro canales DWDM que se emplearan. Esta primera configuración es conocida como BtB (Back to Back), puesto que no es necesaria una red completamente funcional, el objetivo de esta primera prueba es comprobar que los equipos ópticos operan en sus frecuencias y potencias nominales, es decir, que el equipo óptico funciona sin ningún problema.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento en un canal simple, se añadieron tres canales más, resultando en una red BtB de cuatro canales DWDM, los cuales son: 28, 30, 32 y 34, como anteriormente se había mencionado. Esta red de 4 canales es la que se escalaría para la implementación completa y funcional de la red 4G/5G.

Los equipos de medición que se utilizarán para obtener los valores de los parámetros planteados son: el medidor de potencia óptica (Power Meter), el analizador de espectro óptico

(OSA, *Optical Spectrum Analyzer*) y el gestor interno del PL-1000TE ya que este brinda la información del estado de los SFP+ que se encuentran conectados.

Se muestran los parámetros que poseen los SFP+ DWDM proporcionados por el fabricante, mediante los cuales se consideran aceptables para un correcto funcionamiento. La Tabla 4.2 muestra las especificaciones que indica el fabricante para un SFP+ DWDM funcionando como transmisor (Tx), mientras que la Tabla 4.3 muestra las especificaciones del SFP+ DWDM trabajando como un receptor (Rx).

*Tabla 4.2 Especificaciones en Tx de los SFP+ DWDM*

Parameter	Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Input/Output Data rate			9.95	10.3125	11.1	G <sub>b/s</sub>
Average Launch Power	Power coupled into a 9/125μm	P <sub>O, AVG</sub>	-1.0		+3.0	dBm
Optical Extinction Ratio		ER	8.2			dB
Side-Mode Suppression Ratio		SMSR	30		-30	dB
Transmitter and Dispersion Penalty	@800 ps/nm @10.3Gb/s	TDP			3	dB
Relative Intensity Noise		RIN			-128	dB/Hz
Average Launch Power of OFF Transmitter					-30	dBm

*Tabla 4.3 Especificaciones en Rx de los SFP+ DWDM*

Parameter	Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Sensitivity	Measured with average power; BER < 10 <sup>-12</sup> and PRBS 2 <sup>31</sup> -1				-16	dBm
overload		P <sub>MAX</sub>	-1	-	-	dBm
Optical Center Wavelength		λ <sub>c</sub>	1260		1620	nm
Optical Return Loss		ORL			-27	dB
LOS De-Assert	Transition: low to high	LOS <sub>D</sub>	-	-	-16	dBm
LOS Assert	Transition: high to low	LOS <sub>A</sub>	-28	-	-	dBm

Los SFP+ DWDM son los que marcan las características del canal, sin embargo, los SFP+ @1310 nm son los que se encargan de la transmisión y recepción directa en los equipos de red del *fronthaul* activo. Por lo que, su comparación entre valores medidos y valores indicados por el fabricante son de suma importancia. La Tabla 4.4 muestra las especificaciones de los SFP+ @1310 nm, que en principio poseen las mismas características, es decir, son idénticos entre ellos.

Tabla 4.4 Especificaciones de SFP+ @1310 nm

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Ref.
<b>Transmitter (Tx)</b>						
Optical Modulation Amplitude (OMA)	$P_{OMA}$	-5.2			dBm	1
Average Launch Power	$P_{AVE}$	-6		-1	dBm	
Optical Wavelength	$\lambda$	1290		1330	nm	
Side-Mode Suppression Ratio	SMSR	30			dB	
Optical Extinction Ratio	ER	6			dB	
Path Penalty	$TDP_S$			1	dB	2
Transmitter and Dispersion Penalty	$TDP_E$			3.2	dB	1
Average Launch power when transmitter is OFF	$P_{OFF}$			-30	dBm	
Tx Jitter 20kHz-80MHz	$TX_{j1}$			0.3	UI	2,3
Tx Jitter 4MHz – 80MHz	$TX_{j2}$			0.1	UI	2,3
Relative Intensity Noise	RIN			-128	dB/Hz	
<b>Receiver (Rx)</b>						
Sensitivity (Average Power)	9.95/10.7Gb/s	$R_{SENS1}$		-11.0	dBm	4
	10.3/10.5Gb/s	$R_{SENS2}$		-14.4	dBm	5
	11.1/11.3Gb/s	$R_{SENS3}$		-13.4	dBm	6
Sensitivity (OMA)	8.5Gb/s	$R_{SENS4}$		-13.8	dBm	7
	10.3/10.5Gb/s	$R_{SENS5}$		-12.6	dBm	
Stressed Sensitivity (OMA)	10.3Gb/s	$R_{SENS6}$		-10.3	dBm	6
Overload (Average Power)	$P_{AVE}$			+0.5	dBm	
Optical Center Wavelength	$\lambda_C$	1260		1600	nm	
Receiver Reflectance	$R_{RX}$			-14	dB	
LOS De-Assert	$LOS_D$			-17	dBm	
LOS Assert	$LOS_A$	-30			dBm	
LOS Hysteresis	$LOS_H$	0.5			dB	

## 4.2 Medición de la potencia emitida por los SFP+ conectados al USRP

Para fines prácticos se definió el equipo PL-1000TE conectado a los USRP como sitio A de esta manera todas las mediciones realizadas en este equipo llevaran la misma identificación.

En la Figura 4.3 se muestra un diagrama de cómo es que se medirán los SFP+ conectados a los radios USRP.



Figura 4.3 Diagrama de conexiones para medir potencia en los SFP+ equipados en los USRP

Ahora bien, una vez que se explicó cómo es que se tomaron las mediciones y considerando las herramientas de medición con las que se cuentan, se han tomado dos diferentes mediciones, la primera con el Power Meter (Figura 4.4), mientras que la segunda se consiguió directamente con el gestor interno del PL-1000TE. Ambas lecturas se han comparado con los valores nominales que promete el fabricante, a estas lecturas se les ha agregado el apartado en donde se determina si el SFP+ se encuentra dentro del intervalo de operación.



*Figura 4.4 Medición de potencia óptica de los SFP+ de 1310 nm a través del Power Meter.*

Los SFP+ se dividieron en dos grupos según al equipo PL-1000TE al que pertenecen. La Tabla 4.5 muestra la comparación entre los valores nominales y los valores de potencia óptica del transmisor obtenidos con el Power Meter en el sitio A. En ella también se muestran todos los SFP+ que operan a 1310 nm del sitio A, los cuales se encuentran dentro de los valores nominales que el proveedor menciona en su hoja de especificaciones, lo que significa una correcta operación de los transceptores, al menos en lo que se refiere a este importante parámetro.

Tabla 4.5 Comparación de la potencia óptica medida con el power meter y los valores nominales en el sitio A.

Equipo A		Potencia [dBm]	
ID SFP+	Valor Nominal	Power Meter	¿Cumple?
1	(-6) - (-1)	-2.35	Sí
2	(-6) - (-1)	-2.57	Sí
3	(-6) - (-1)	-2.50	Sí
4	(-6) - (-1)	-3.09	Sí
5	(-6) - (-1)	-2.11	Sí
6	(-6) - (-1)	-3.94	Sí
7	(-6) - (-1)	-2.8	Sí
8	(-6) - (-1)	-2.46	Sí

La Figura 4.5 muestra el reconocimiento de cada SFP+ de 1310 nm, identificando la potencia óptica en la transmisión. En ella se puede apreciar que los puertos seleccionados para cada SFP+ que opera a 1310 nm en el PL-1000TE son los puertos: 2, 6, 10 y 14.

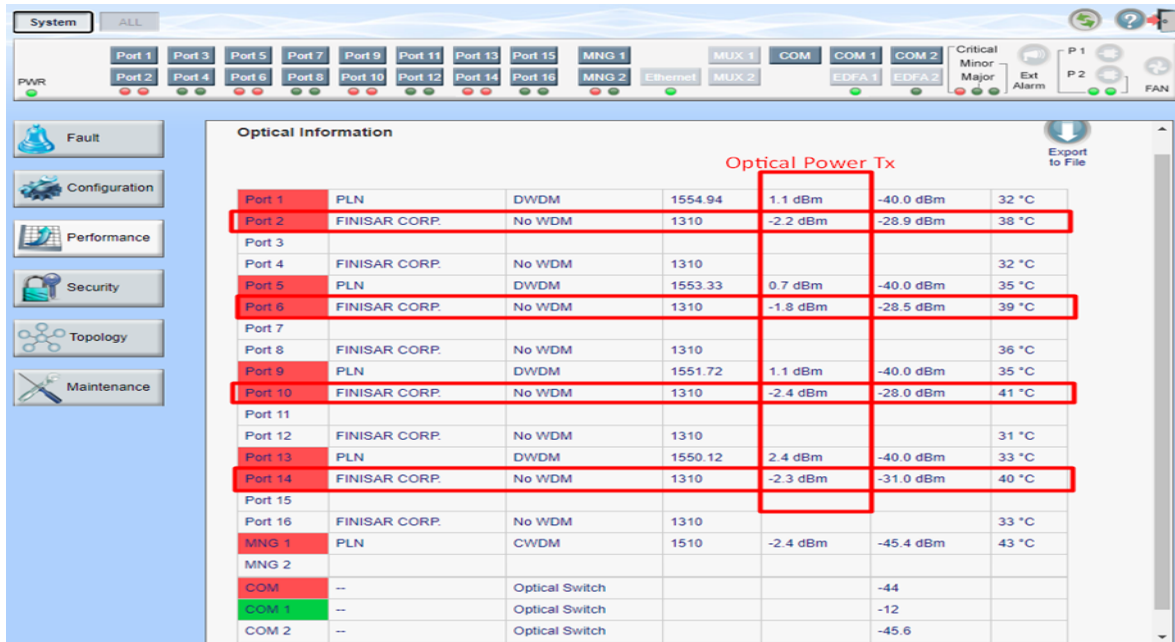


Figura 4.5. Vista general de la aplicación web del PL-1000TE.

Una vez que se han reconocido los valores de cada SFP+ de 1310 nm en el PL-1000TE correspondiente al sitio A, es importante hacer una comparación con los valores nominales especificados por el fabricante. En la Tabla 4.6 se muestran los valores arrojados por la aplicación web de los SFP+ del sitio A. En ella también se puede apreciar que todos los SFP+ están dentro de los valores nominales.

*Tabla 4.6 Comparación de la potencia óptica medida con la aplicación web y los valores nominales en el sitio A.*

<b>Equipo A</b>	<b>Potencia [dBm]</b>		
<b>ID SFP+</b>	<b>Valor Nominal</b>	<b>Aplicación web PL1000</b>	<b>¿Cumple?</b>
<b>1</b>	(-6) - (-1)	-2.3	Sí
<b>2</b>	(-6) - (-1)	-2.0	Sí
<b>3</b>	(-6) - (-1)	-1.8	Sí
<b>4</b>	(-6) - (-1)	-3.7	Sí
<b>5</b>	(-6) - (-1)	-2.4	Sí
<b>6</b>	(-6) - (-1)	-3.3	Sí
<b>7</b>	(-6) - (-1)	-2.3	Sí
<b>8</b>	(-6) - (-1)	-2.7	Sí

En las Tablas 4.5 y 4.6 se comprueba que tanto las lecturas del Power Meter como los valores arrojados por la aplicación web del PL-1000TE están dentro de los valores nominales de potencia óptica presentados por el fabricante. Sin embargo, presentan ligeras diferencias, la Tabla 4.7 muestra la comparación de las lecturas obtenidas a través de estos dos instrumentos de medición. En ella se puede apreciar que la variación va de 0.05 dBm a una máxima variación de 0.7 dBm.

*Tabla 4.7 Diferencia de potencia óptica entre las lecturas del Power Meter y la aplicación web en el sitio A.*

<b>Equipo A</b>	<b>Potencia [dBm]</b>
<b>ID SFP+</b>	<b>Diferencia entre la App Web y Power Meter</b>
<b>1</b>	0.05
<b>2</b>	0.57
<b>3</b>	0.7
<b>4</b>	0.61
<b>5</b>	0.29
<b>6</b>	0.64
<b>7</b>	0.5
<b>8</b>	0.24

Es común que las herramientas de medición presenten diferencias entre ellas incluso aun perteneciendo al mismo fabricante, puesto que las herramientas de medición suelen presentar rangos de error. Para este caso en dónde las diferencias de medición son muy pequeñas, se puede tener la certeza de que ambas mediciones son confiables y se hicieron de la manera correcta, con estas mediciones hechas se puede concluir que los transceptores que operan a 10 Gb/s con una longitud de onda de 1310 nm conectados en el sitio A se encuentran dentro de los valores nominales descritos por el fabricante, lo que permitirá una confiabilidad en la red.



Analizando cada valor individual de los SFP+ de 1310 nm y comparándolas con el resto, se puede apreciar que hay SFP+ de 1310 nm que emiten mayor potencia. Para saber si esto es provocado por los puertos del PL-1000TE o por los mismos SFP+ de 1310 nm se ha seleccionado el puerto 2 del PL-1000TE llamada *LINK1* para medir la potencia óptica de todos los SFP+ de 1310 nm medidos previamente. La Figura 4.6 muestra el puerto seleccionado del PL-1000TE.



Figura 4.6 Puerto del PL-1000TE seleccionado para medir todos los SFP+ que operan a 1310.

Una vez registrados todos los valores medidos en el puerto *LINK 1* del PL-1000TE de cada SFP+ de 1310 nm se hizo una comparación con los valores medidos en su puerto asignado. Los resultados se encuentran en la Tabla 4.8, en ella se puede notar todas las variaciones que presentaron los SFP. Se puede observar que la variación de potencia en cada SFP+ mencionado depende del propio SFP+ y no influye el puerto asignado del PL-1000TE, lo cual garantiza la correcta operación del equipo adquirido.

Tabla 4.8 Comparación de los valores de potencia óptica emitida de los SFP+ de 1310 nm según el puerto asignado en el sitio A.

Equipo A/ Link 1	Potencia [dBm]				
	ID SFP+	Puerto Asignado	Power Meter	Diferencia	% de diferencia
1		-2.35	-2.33	0.02	0.85%
2		-2.57	-2.33	0.24	9.34%
3		-2.5	-2.24	0.26	10.40%
4		-3.09	-3.39	0.30	9.71%
5		-2.11	-1.86	0.25	11.85%
6		-3.94	-3.11	0.83	21.07%
7		-2.8	-2.77	0.03	1.07%
8		-2.46	-2.35	0.11	4.47%

Al finalizar las mediciones de potencia de todos los SFP+ que operan a 1310 nm se prosiguió a medir los SFP+ DWDM que corresponden a cada uno de los canales del sistema.

Los resultados se muestran en la Tabla 4.9 En ella se puede observar que los niveles de potencia óptica de cada uno de los SFP+ DWDM pertenecientes al sitio A se mantienen dentro de los intervalos de potencia predeterminados. En esta misma tabla se incluyó el canal de supervisión, puesto que es un canal que, si bien se encuentra alejado del espectro de los canales de comunicación considerablemente, es un canal que viaja y funciona a través de la misma multiplexación que los canales de transporte del sistema. Sin embargo, hay que tener presente que no es un canal propiamente utilizable dentro del *fronthaul*.

*Tabla 4.9 Medición y comparación de los valores de potencia óptica emitida en los SFP+ DWDM en el equipo A con el Power Meter.*

<b>Equipo A</b>	<b>Potencia [dBm]</b>		
<b>ID SFP+</b>	<b>Valor Nominal</b>	<b>Power Meter</b>	<b>¿Cumple?</b>
<b>CH28-A</b>	(-1) - 3	1.60	sí
<b>CH30-A</b>	(-1) - 3	1.10	sí
<b>CH32-A</b>	(-1) - 3	1.04	sí
<b>CH34-A</b>	(-1) - 3	2.38	sí
<b>MNG A</b>	(-1) - 3	-1.92	no

Como se hizo previamente, se obtuvieron ahora los valores de potencia óptica a través de la aplicación web que brinda el PL-1000TE y se compararon con los presentados por el fabricante. La Tabla 4.10 muestra que todos los valores de potencia óptica se mantienen dentro del intervalo nominal designado por el fabricante, a excepción del MNG A, que muestra un valor menor al esperado. Esto en realidad no presenta mayor problema ya que corresponde al canal de supervisión y la tasa de transmisión, por ende, es muy baja.

*Tabla 4.10 Medición y comparación de los valores de potencia óptica en los SFP+ DWDM en el equipo A con la app web.*

<b>Equipo A</b>	<b>Potencia [dBm]</b>		
<b>ID SFP+</b>	<b>Valor Nominal</b>	<b>App web</b>	<b>¿Cumple?</b>
<b>CH28-A</b>	(-1) - 3	1.4	Sí
<b>CH30-A</b>	(-1) - 3	0.7	Sí
<b>CH32-A</b>	(-1) - 3	1.1	Sí
<b>CH34-A</b>	(-1) - 3	2.4	Sí
<b>MNG A</b>	(-1) - 3	-2.4	no

En la Tabla 4.11 muestra la diferencia entre cada uno de los SFP+ DWDM medidos con el power meter y la aplicación web en el PL-1000TE. Como se puede apreciar la diferencia más

grande es la del SFP+ MNG-A; sin embargo, al ser un canal no utilizable para transmisión de datos, no representa inconvenientes para el sistema.

Al haber muy pocas variaciones y por previamente haber comprobado que las herramientas de medición son confiables, ya no es necesario comprobar la potencia de cada SFP+ DWDM en un puerto en común.

Tabla 4.11 Diferencia de potencia óptica entre las lecturas del Power Meter y la aplicación web en el sitio A de SFP+ DWDM.

Equipo A	Potencia [dBm]
ID SFP+	Diferencia entre App y Power meter
CH28 A	0.20
CH30 A	0.40
CH32 A	0.06
CH34 A	0.02
MNG A	0.48

### 4.3 Medición de la potencia emitida por los SFP+ conectados a la PC

De igual que en el punto anterior para fines de practicidad de estudio se denominó el punto en donde se conectaron los SFP+ a las PC como sitio B donde la Figura 4.7 muestra un diagrama de cómo es que se conectaron los SFP+ a las PC.



Figura 4.7 Medición de potencia en los SFP+ conectados a las PC

Al verificar que todos los SFP+ que operan a 1310 nm del sitio A operan con valores nominales dentro del rango descrito por el fabricante, se procedió a realizar la misma caracterización, pero ahora para los SFP+ de 1310 nm correspondientes al sitio B. Se realizaron las mismas pruebas utilizando las mismas herramientas de medición, realizando las adecuaciones pertinentes en el gestor del PL-1000TE, ya que posee la misma interfaz y comportamiento que la aplicación web integrado en el PL-1000TE del sitio A.

Al igual que en el sitio A, se compararon los valores de potencia óptica emitida obtenidos con el *power meter* con los valores que indica el fabricante y se registraron en la Tabla 4.12; en ella se puede apreciar que todos los SFP+ de 1310 nm en el sitio B se encuentran dentro del intervalo de valores nominales.

Tabla 4.12 Comparación de la potencia óptica medida con el power meter y los valores nominales en el sitio B.

Equipo B	Potencia [dBm]		
ID SFP+	Valor Nominal	Power Meter	¿Cumple?
1	(-6) - (-1)	-2.38	Sí
2	(-6) - (-1)	-2.26	Sí
3	(-6) - (-1)	-2.70	Sí
4	(-6) - (-1)	-2.47	Sí
5	(-6) - (-1)	-1.66	Sí
6	(-6) - (-1)	-3.06	Sí
7	(-6) - (-1)	-2.36	Sí
8	(-6) - (-1)	-2.41	Sí

Posteriormente, se obtuvieron los valores que presenta la *app web* y se registraron en la Tabla 4.13, la cual hace una comparación con los valores nominales a los que debe de operar, según el fabricante. En esta tabla se puede ver que todos los SFP+ que operan a 1310 en el sitio B se encuentran dentro del intervalo nominal.

Tabla 4.13 Comparación de la potencia óptica medida con la aplicación web y los valores nominales en el sitio B.

Equipo B	Potencia [dBm]		
ID SFP+	Valor Nominal	App Web	¿Cumple?
1	(-6) - (-1)	-2.3	Sí
2	(-6) - (-1)	-2.4	Sí
3	(-6) - (-1)	-2.9	Sí
4	(-6) - (-1)	-2.5	Sí
5	(-6) - (-1)	-3.0	Sí
6	(-6) - (-1)	-3.0	Sí
7	(-6) - (-1)	-3.0	Sí
8	(-6) - (-1)	-3.1	Sí

Al igual que en el sitio A, las lecturas de la potencia óptica de los SFP+ operando en banda O fueron medidos mediante el *power meter* y la *app web*, dichas mediciones resultaron con variaciones, por lo que se hizo una comparación, mostrada en la Tabla 4.14, que permite observar que las diferencias entre los valores son mínimos y que las herramientas de medición son confiables, pero sobre todo verificar que efectivamente los transceptores cumplen con las especificaciones que nos permiten garantizar el buen funcionamiento del sistema y un cálculo confiable del presupuesto de potencia, elemento fundamental en el diseño del enlace.

Tabla 4.14 Diferencia de potencia óptica entre las lecturas del power meter y la aplicación web en el sitio.

Sitio B	Potencia [dBm]
ID SFP+	Diferencia entre la App Web y Power Meter
1	0.08
2	0.14
3	0.20
4	0.03
5	1.34
6	0.06
7	0.64
8	0.69

Dado que en el sitio B también se presentaron variaciones de valores entre los SFP+ correspondientes a 1310 nm, al igual a lo realizado en el sitio A, se optó por medir cada SFP+ que opera en banda O en el puerto 2 denominado *LINK1* en el PL-1000TE del sitio B para comprobar que la variación depende de cada SFP+ y no del puerto en el que se conecta. La Tabla 4.15 muestra valores muy similares entre el valor en el puerto asignado y el puerto en común, lo que indica una vez más que la variación de valores es debido a cada SFP+ y no al puerto en que se conecta.

Tabla 4.15 Comparación de los valores de potencia óptica emitida de los SFP+ grises según el puerto asignado en el sitio B con el Power Meter.

Equipo B/ Link 1	Potencia [dBm]			
ID SFP+	Puerto Asignado	Power Meter	Diferencia	% de diferencia
1	-2.38	-2.38	0	0.00%
2	-2.26	-2.10	0.16	7.08%
3	-2.70	-2.93	0.23	8.52%
4	-2.47	-2.51	0.04	1.62%
5	-1.66	-1.53	0.13	7.83%
6	-3.06	-3.23	0.17	5.56%
7	-2.36	-2.25	0.11	4.66%
8	-2.46	-2.33	0.13	5.28%

Para completar la caracterización de potencia óptica de todos los SFP+ DWDM correspondientes al *fronthaul* activo, se midieron los SFP+ DWDM pertenecientes al PL-1000TE del sitio B, en esta medición también se incluyó el MNG B. La Tabla 4.16 muestra que los valores de potencia óptica medidos con el power meter pertenecientes al sitio B se encuentran dentro de los valores dados por el fabricante, a excepción del SFP+ denominado MNG B. Como se comentó anteriormente, esto no representa un problema.

Tabla 4.16 Medición y comparación de los valores de potencia óptica en los SFP+ DWDM en el equipo B con el Power Meter.

Equipo B	Potencia [dBm]		
ID SFP+	Valor Nominal	App web	¿Cumple?
CH28 B	(-1) - 3	0.6	Sí
CH30 B	(-1) - 3	1.3	Sí
CH32 B	(-1) - 3	0.3	Sí
CH34 B	(-1) - 3	1.9	Sí
MNG B	(-1) - 3	-2.4	no

Para verificar los valores de potencia óptica obtenidos a través del *power meter*, se leyeron los valores arrojados por la aplicación web. La Tabla 4.17 muestra que los SFP+ DWDM del sitio B emiten las señales ópticas dentro de los valores de potencia señalados por el fabricante, a excepción del transceptor MNG B.

Tabla 4.17 Medición y comparación de los valores de potencia óptica emitida en los SFP+ DWDM en el equipo B con la app web.

Equipo B	Potencia [dBm]		
ID SFP+	Valor Nominal	Power Meter	¿Cumple?
CH28 B	(-1) - 3	1.07	Sí
CH30 B	(-1) - 3	1.57	Sí
CH32 B	(-1) - 3	0.69	Sí
CH34 B	(-1) - 3	2.11	Sí
MNG B	(-1) - 3	-1.92	no

Al haber variaciones en las mediciones de potencia óptica, se compararon en la Tabla 4.18 y se observó que las variaciones no son significativas, además de que ambas se mantienen dentro de los umbrales descritos en la hoja de especificaciones, con excepción de MNG B, que presenta valores de potencia ligeramente debajo de lo esperado. Dado que este canal no transporta datos propiamente, podemos afirmar que el sistema, en términos de potencia, no tiene inconvenientes.

Tabla 4.18 Diferencia de potencia óptica entre las lecturas del Power Meter y la aplicación web en el sitio B de SFP+ DWDM.

Equipo B	Potencia [dBm]
ID SFP+	Diferencia entre App y Power meter
CH28 B	0.47
CH30 B	0.27
CH32 B	0.39
CH34 B	0.21
MNG B	0.48

#### 4.4 Medición de la longitud de onda de operación de los SFP+ conectados al USRP

Para continuar con la caracterización de los transceptores SFP+ se procedió a medir la longitud de onda con la que operan los que están conectados en el sitio A.

Comúnmente las bandas ópticas se determinan a través de la longitud de onda y no tanto por la frecuencia, sin embargo, ambas lecturas son igual de funcionales por esta razón y porque el equipo de medición lo permite se reportaron mediciones tanto en longitud de onda y en frecuencia. La banda O se encuentra en la segunda ventana de transmisión óptica, es decir que corresponde a longitudes de onda centrada en 1310 nm o bien el 228 THz. Con el OSA se midió la longitud de onda y frecuencias de los SFP+ grises en el sitio A y se corroboró a través de la Tabla 4.19 que los SFP+ medidos emiten a 1310 nm y que se encuentran dentro del rango impuesto por el fabricante.

Tabla 4.19 Mediciones de frecuencia y longitud de onda de los SFP+ conectados en el equipo A.

Equipo A	Frecuencia [THz]			Longitud de onda [nm]			
	ID SFP+	Valor Nominal	OSA	¿Cumple?	Valor Nominal	OSA	¿Cumple?
	1	225.4 - 232.4	229.10	sí	1290 - 1330	1308.53	Sí
	2	225.4 - 232.4	228.58	sí	1290 - 1330	1311.39	Sí
	3	225.4 - 232.4	228.78	sí	1290 - 1330	1310.01	Sí
	4	225.4 - 232.4	229.10	sí	1290 - 1330	1308.53	Sí
	5	225.4 - 232.4	228.61	sí	1290 - 1330	1311.35	Sí
	6	225.4 - 232.4	228.96	sí	1290 - 1330	1309.35	Sí
	7	225.4 - 232.4	228.88	sí	1290 - 1330	1309.80	Sí
	8	225.4 - 232.4	228.69	sí	1290 - 1330	1310.89	Sí

En la Tabla 4.20 se muestran la comparación entre los valores nominales de las longitudes de onda de los SFP+ WDM que se encuentran en el sitio A y su frecuencia con las que se encuentran en las hojas de especificaciones. Se puede observar que la longitud de onda y frecuencia de los SFP+ WDM correspondientes al equipo A se encuentran dentro de las especificaciones marcadas por el fabricante.

Tabla 4.20 Medición de frecuencia y longitud de onda en SFP+ DWDM en el sitio A.

Equipo A	Frecuencia [THz]		Longitud de onda [nm]			
	ID SFP+	Valor Nominal	OSA	Valor Nominal	OSA	¿Cumple?
	CH28 A	192.8	192.8	1554.94	1554.89	Sí
	CH30 A	193.0	193.0	1553.32	1553.30	Sí
	CH32 A	193.2	193.2	1551.72	1551.69	Sí
	CH34 A	193.4	193.4	1550.10	1550.14	Sí
	MNG A	198.6	198.4	1510.00	1510.00	Sí

#### 4.5 Medición de la longitud de onda de operación de los SFP+ conectados a la PC

Así como se hizo para el equipo instalado en el sitio A, en la Tabla 4.21 se observa la comparativa de los valores nominales en frecuencia y longitud de onda de los SFP+ instalados en el equipo que se encuentra en el sitio B, donde se comparan los valores medidos con el OSA contra los mostrados en las hojas de. Mediante esta tabla podemos determinar que estos SFP+ cumplen con los parámetros establecidos por el fabricante y, por lo tanto, son útiles para implementar la red óptica que nos interesa.

Tabla 4.21 Medición de frecuencia y longitud de onda de los SFP+ conectados en el sitio B

Equipo B	Frecuencia [THz]			Longitud de onda [nm]			
	ID SFP+	Valor Nominal	OSA	¿Cumple?	Valor Nominal	OSA	¿Cumple?
	9	225.4 - 232.4	228.86	sí	1290 - 1330	1309.88	Sí
	10	225.4 - 232.4	228.62	sí	1290 - 1330	1311.27	Sí
	11	225.4 - 232.4	228.70	sí	1290 - 1330	1310.82	Sí
	12	225.4 - 232.4	228.78	sí	1290 - 1330	1310.35	Sí
	13	225.4 - 232.4	228.81	sí	1290 - 1330	1310.19	Sí
	14	225.4 - 232.4	228.88	sí	1290 - 1330	1309.81	Sí
	15	225.4 - 232.4	228.75	sí	1290 - 1330	1310.55	Sí
	16	225.4 - 232.4	228.59	sí	1290 - 1330	1311.43	Sí

En la Tabla 4.22 se reportan los valores de longitud de onda y frecuencia que presentaron en los SFP+ DWDM y al igual que en las tablas anteriores se puede apreciar, que dichos valores cumplen con los que establece el fabricante en las hojas de especificaciones.

Tabla 4.22 Medición de longitud de onda y frecuencia de los SFP+ DWDM del sitio B.

Equipo B	Frecuencia [THz]		Longitud de onda [nm]			
	ID SFP+	Valor Nominal	OSA	Valor Nominal	OSA	¿Cumple?
	CH28 B	192.8	192.8	1554.94	1554.8	Sí
	CH30 B	193.0	193.0	1553.32	1553.3	Sí
	CH32 B	193.2	193.2	1551.72	1551.6	Sí
	CH34 B	193.4	193.4	1550.10	1550.1	Sí
	MNG B	198.6	198.4	1510.00	1510.0	Sí

#### 4.6 Medición de parámetros ópticos adicionales: Ancho de línea, SMSR y OSNR de cada canal DWDM

Para un desempeño óptimo del sistema DWDM propuesto es necesario tener canales estrechos y sin componentes adicionales por lo cual es de sumo interés e importancia analizar las componentes espectrales tales como el ancho de línea espectral (Linewidth), la razón de supresión de modo lateral (SMSR: Side Mode Supression Ratio) y la razón señal a ruido óptica (OSNR: *Optical Signal to Noise Ratio*), ya que estos parámetros pueden garantizar la transmisión de canales WDM o perturbar los mismos dentro de esta red.



### 4.6.1 Ancho de línea

El ancho de línea o linewidth de una señal óptica es el ancho espectral que ocupa esa señal sin ser modulada. Este es un parámetro importante, ya que nos brinda información acerca de la estructura y calidad de láser que se está empleando como fuente de luz. Este ancho de línea está linealmente relacionado con el retardo que sufren las ondas de luz que se propagan a través de la fibra óptica, por lo que su medición es relevante durante el proceso de diseño del enlace. En la Figura 4.8 se puede apreciar el espectro de una señal emitida por un SFP+ que opera a 1310 nm, donde su potencia máxima es de -17.63 dBm (resolución de 0.03 nm) y esto se alcanza para una longitud de onda de 1310 nm.

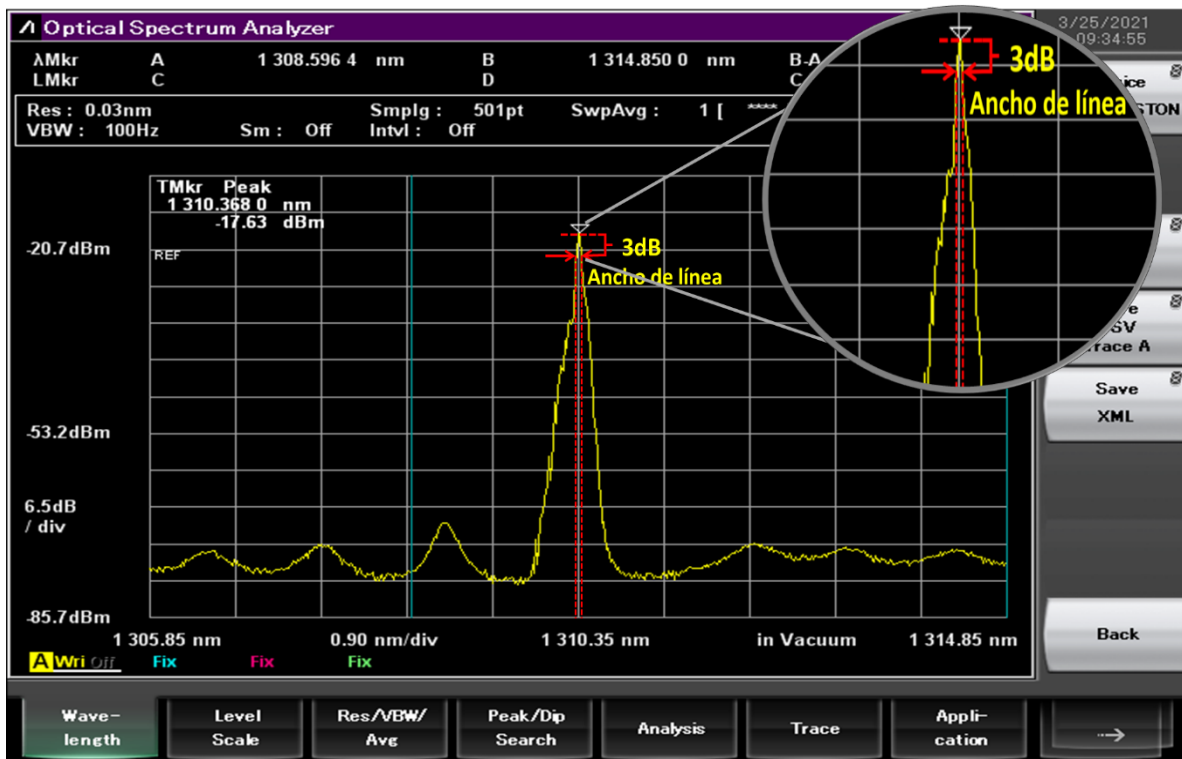


Figura 4.8 Espectro de la señal emitida por un SFP+ centrado en 1310 nm.

El ancho de línea se mide a partir de la potencia máxima de la señal hacia alguna referencia impuesta. Esta referencia es una pérdida de la potencia máxima, comúnmente se fija la referencia cuando la potencia disminuye a la mitad, es decir, a los 3 dB.

La importancia de medir este parámetro principalmente, entre algunas otras cosas, es para determinar qué tan eficientemente se utiliza la energía acumulada en un solo punto del espectro, ya que el ancho de línea se puede ver como la dispersión de la energía en sus componentes espectrales adyacentes. Además de que es un claro indicador de como la dispersión añadida por la distancia recorrida a través de la fibra óptica intrínsecamente afecta a las señales ópticas, que resulta en pérdidas de potencia (*power penalties*) ajenas a la atenuación del medio.

Para reportar las mediciones que se realizaron con ayuda del Analizador de Espectros Ópticos de los anchos de línea de los SFP+ conectados en el *Fronthaul* se incluirán tablas donde es posible corroborar su efectividad o ineficiencia según sea el caso. Siguiendo el orden establecido en este escrito primero se reportarán los anchos de línea de los SFP+ “grises” conectados tanto en los sitios A y B respectivamente, continuando con los SFP+ DWDM conectados en los distintos sitios.

La Tabla 4.23 muestra los anchos de línea pertenecientes a los SFP+ “grises” del sitio A. En esta tabla se puede apreciar que el espectro ocupado es en todos los casos menor a 0.115 nm, lo cual es un valor muy aceptable para este tipo de transmisores ópticos de corto alcance.

*Tabla 4.23 Medición de ancho de línea en SFP+ grises en el sitio A.*

<b>Equipo A</b>	<b>Linewidth a 3dB [nm]</b>
<b>ID SFP+</b>	<b>OSA</b>
<b>1</b>	0.115
<b>2</b>	0.055
<b>3</b>	0.061
<b>4</b>	0.057
<b>5</b>	0.072
<b>6</b>	0.087
<b>7</b>	0.057
<b>8</b>	0.095

La Tabla 4.24 muestra los anchos de línea medidos con el OSA que comprenden a todos los SFP+ que operan a 1310 nm que se encuentran en el sitio B. En esta tabla podemos ver que el SFP+ con el mayor ancho de línea corresponde a 0.096 nm.

*Tabla 4.24 Medición de ancho de línea en SFP+ grises en el sitio B.*

<b>Equipo B</b>	<b>Linewidth a 3dB [nm]</b>
<b>ID SFP+</b>	<b>OSA</b>
<b>9</b>	0.089
<b>10</b>	0.025
<b>11</b>	0.096
<b>12</b>	0.059
<b>13</b>	0.09
<b>14</b>	0.09
<b>15</b>	0.083
<b>16</b>	0.052

Con respecto a estas mediciones podemos apreciar que si bien no son iguales todas las lecturas tomadas a los SFP+ grises, las diferencias no son sustancialmente grandes o significativas, por lo que podemos emplear estos SFP+ indistintamente entre los puertos

asignados dentro del *fronthaul* ya que se consideran iguales entre sí además de emitir a la misma longitud de onda.

Con respecto a las mediciones de los anchos de línea de los canales DWDM la situación es distinta, puesto que estos emiten cada uno a diferente longitud de onda, ejemplo de ello son las Figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12, en las cuales se aprecian los espectros de los canales 28, 30, 32 y 34 correspondientes a las longitudes de onda de emisión 1554.94nm, 1553.33nm, 1551.72nm, y 1550.12nm respectivamente. En estas figuras la referencia espectral se ha dejado igual para todas las mediciones, para que se pueda apreciar el efecto de corrimiento entre cada emisión de diferentes SFP+ DWDM. Una forma sencilla para describir este efecto que, según la referencia impuesta en el OSA, el canal 28 se encontrará en el extremo derecho, al tener la frecuencia más alta, mientras que el canal 34 estará en el extremo izquierdo, al contar con la frecuencia más baja.

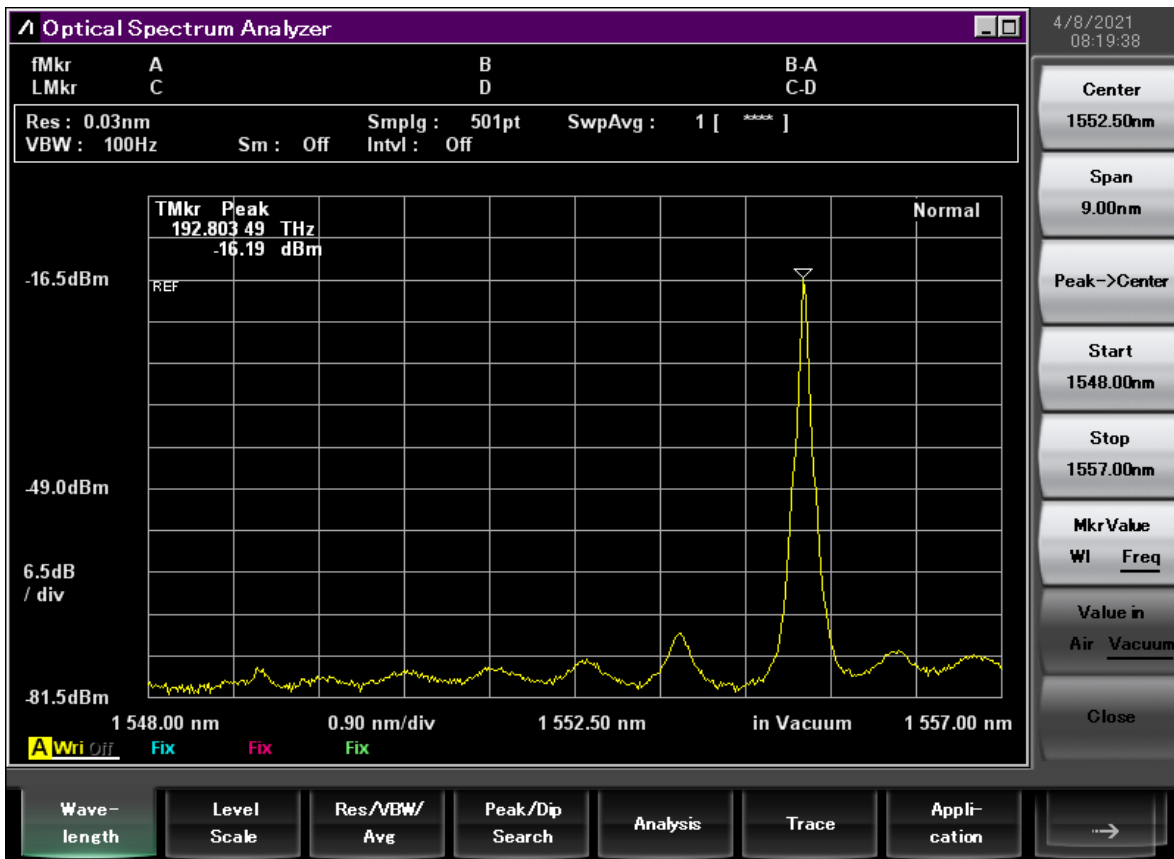


Figura 4.9 Espectro de emisión del SFP+ DWDM correspondiente al canal 28 en el sitio A.

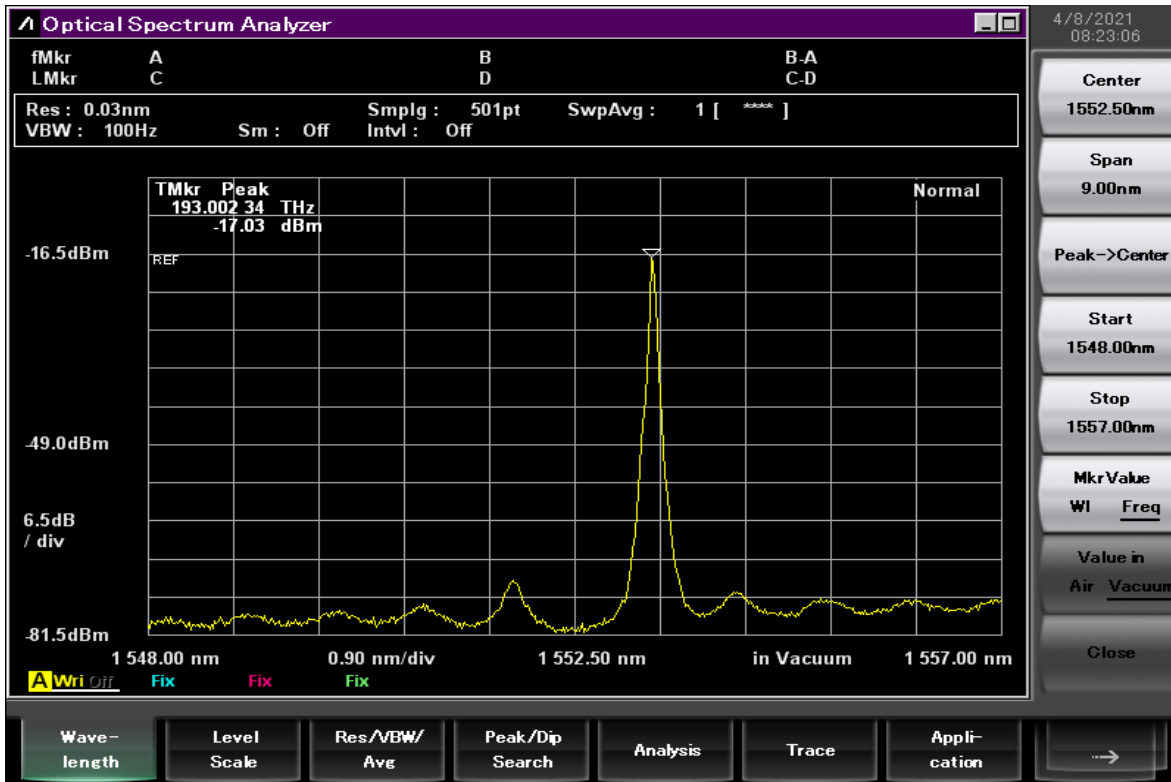


Figura 4.10 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal 30 en el sitio A.

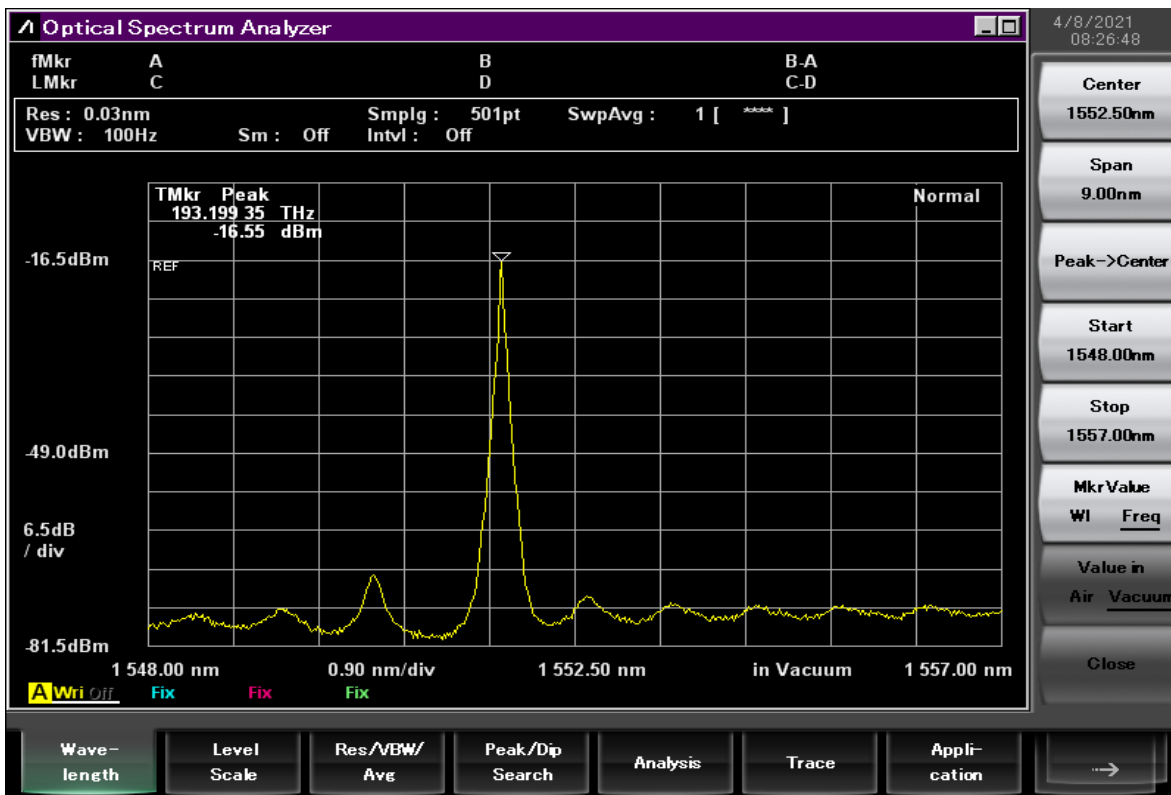


Figura 4.11 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal 32 en el sitio A.

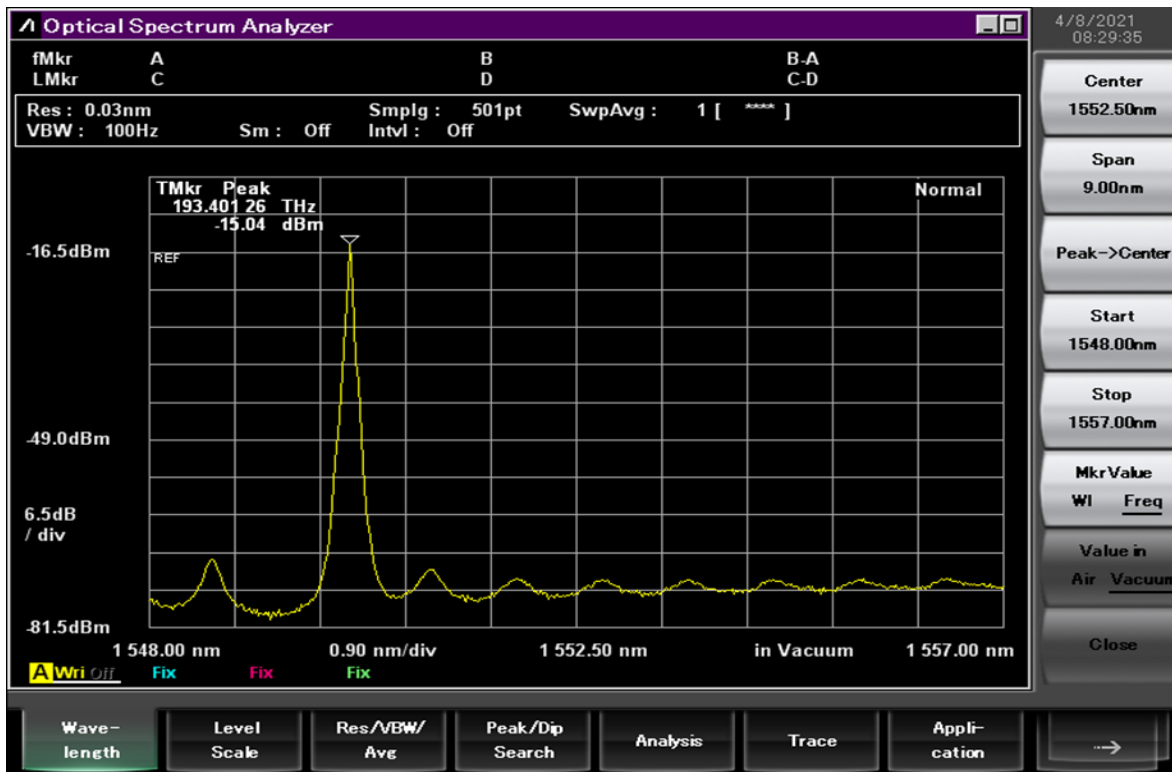


Figura 4.12 Espectro del SFP+ DWDM correspondiente al canal 34 en el sitio A.

Posteriormente a obtener las mediciones de los SFP+ grises se continuó con los SFP+ DWDM donde estas mediciones resultan de mayor relevancia debido a que las señales de estos últimos viajan individualmente sobre un hilo de fibra óptica. En contraste, las señales emitidas por los SFP+ DWDM son multiplexados junto con otras señales DWDM, por lo que en un solo hilo de fibra óptica viajan varias señales emitidas por los SFP+ DWDM.

El ancho de línea de cada canal DWDM debe de ser apreciablemente menor al espaciamento espectral entre cada canal DWDM. Este sistema está diseñado con un espaciamento de 200 GHz. No obstante, el espaciamento diseñado por el fabricante del PL-1000TE es de 100 GHz. En una fuente emisora de luz, entre más angosto sea el ancho de línea, más eficiente es la fuente, puesto que esto significa tener un espaciamento inter-canal más reducido, que significan más canales dentro del mismo espectro y para el usuario final, más capacidad en el sistema. De igual forma que en los SFP+ que operan a una longitud de onda de 1310 nm, tener un ancho de línea reducido en los SFP+ DWDM significa tener una mejor utilización en la potencia óptica.

En la Tabla 4.25 se reportan los valores obtenidos del ancho de línea que presentan los SFP+ WDM localizados en el sitio A.

Tabla 4.25 Medición de ancho de línea en los SFP+ DWDM en el sitio A.

Equipo A	Linewidth a 3dB [nm]
<b>ID SFP+</b>	<b>OSA</b>
<b>CH28 A</b>	0.027
<b>CH30 A</b>	0.064
<b>CH32 A</b>	0.092
<b>CH34 A</b>	0.092
<b>MNG A</b>	0.097

En la Tabla 4.26 se reporta el ancho de línea que presentaron los SFP+ DWDM instalados en el equipo B. Estos anchos de línea de los láseres son semejantes a los SFP+ instalados en el equipo A. Esto era de esperarse debido a que son del mismo fabricante y son los mismos modelos.

Tabla 4.26 Medición de ancho de línea en los SFP+ DWDM en el sitio B

Equipo B	Linewidth a 3dB [nm]
<b>ID SFP+</b>	<b>OSA</b>
<b>CH28 B</b>	0.027
<b>CH30 B</b>	0.064
<b>CH32 B</b>	0.092
<b>CH34 B</b>	0.092
<b>MNG B</b>	0.097

#### 4.6.2 Razón de Supresión de Modo Lateral (SMSR: Side Mode Suppresion Ratio)

Es bien sabido que, en una emisión láser ideal, toda la potencia producida por el dispositivo se concentra y focaliza en un punto que se puede describir como una espiga, pero en la realidad, esto no sucede así; una emisión láser contiene picos adyacentes producidos por la supervivencia de los modos longitudinales que no son completamente suprimidos por el perfil de ganancia del láser y la función de transferencia propia del interferómetro. Estos picos podrían llegar a interferir con los canales adyacentes en un sistema WDM y por eso es de suma importancia medir su potencia en relación con la potencia del modo principal. Una medida comúnmente usada es el SMSR.

El SMSR describe la diferencia que existe entre la espiga central o modo principal y el siguiente modo lateral más largo expresada en decibeles. Es importante tener conocimiento de la longitud de onda y valor de potencia que presentan los modos laterales con respecto al modo central. Esto se debe a que se pueden traslapar con canales adyacentes y se puede llegar a traducir como ruido o generar diafonías entre ellos, lo que provocaría un mal desempeño en la transmisión de información a través de los canales WDM.

Se identificaron estos modos con ayuda del OSA y se denominó SMSR1 al modo que se encuentra de lado izquierdo del modo principal y SMSR2 al modo que se encuentra de lado derecho, tal y como se muestra en la Figura 4.13. En ella se pueden apreciar los SMSR del canal 28 y percibir que no afectarían en gran medida, debido a su baja potencia.

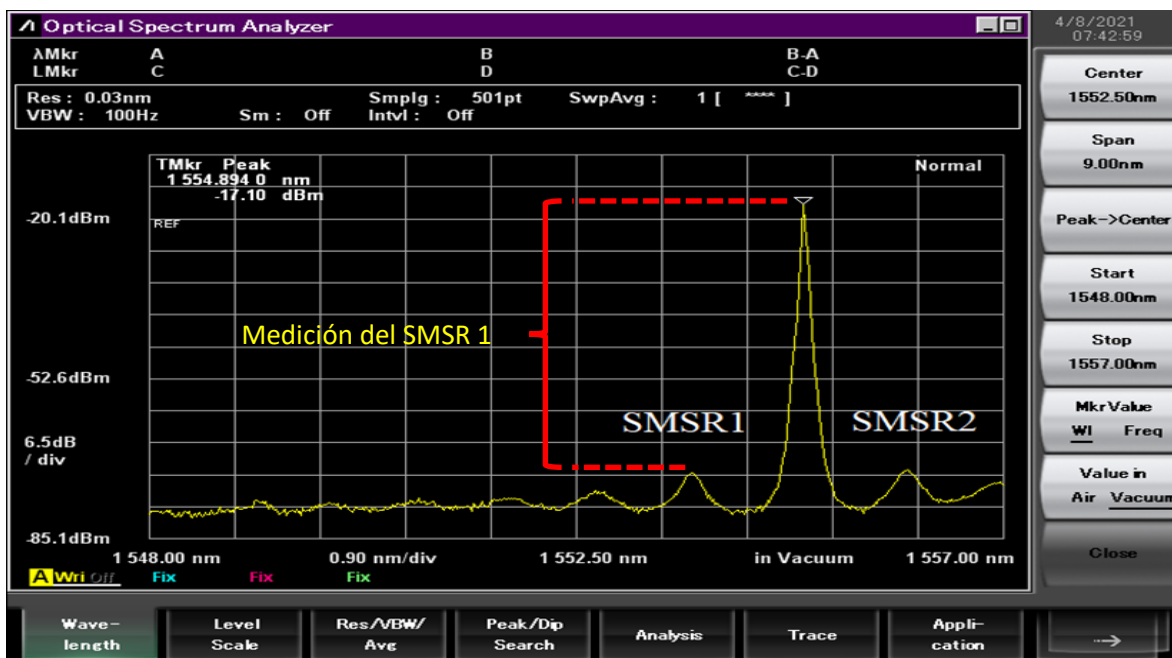


Figura 4.13 Identificación del SMSR de un láser empleado para transmitir canales DWDM.

El SMSR se puede medir desde dos perspectivas, la primera es la relación de potencia que se tiene desde la potencia máxima en la frecuencia central de la señal, con la misma potencia del pico lateral, es decir, se mide la potencia del SMSR y esta se le resta (en dB) a la potencia máxima de la señal. Para un análisis completo del SMSR basta con medir ahora cuando separado se encuentra el pico lateral de la frecuencia central de la señal. Este segundo parámetro resulta de bastante relevancia, puesto que, si se localiza lo bastante separado como para traslaparse con otro canal WDM, sería pertinente incluir un filtro capaz de eliminar estos picos laterales.

Continuando con el orden establecido se reportarán en tablas las mediciones del SMSR, primeramente, se reportarán los valores de los SFP+ conectados en el sitio A y posteriormente los que se encuentran en el sitio B.

Con ayuda del OSA se determinó el SMSR1 de los SFP+ WDM empleados en el sitio A. Los valores obtenidos se reportan en la Tabla 4.27. Se observa que los SFP tienen un mejor comportamiento con respecto al reportado por el fabricante en su hoja de especificaciones.

Tabla 4.27 Medición de la potencia del SMSR izquierdo para los SFP+ DWDM en el sitio A.

Equipo A	SMSR2 [dB]
ID SFP+	OSA
CH28 A	58.03
CH30 A	57.42
CH32 A	56.60
CH34 A	56.50
MNG A	53.28

En la Tabla 4.28 se reportó de igual manera el SMSR del modo que se encuentra del lado derecho al principal. Los cuales al igual que el anterior tienen un mejor comportamiento al que reporta el fabricante en la hoja de especificaciones.

Tabla 4.28 Medición de potencia del SMSR derecho para los SFP+ DWDM en el sitio A.

Equipo A	SMSR1 [dB]
ID SFP+	OSA
CH28 A	55.31
CH30 A	55.56
CH32 A	52.89
CH34 A	54.65
MNG A	51.73

Posteriormente con ayuda del OSA se midió qué tan separados se encontraban los modos contiguos del lado izquierdo al modo principal y se reportan en la Tabla 4.29. Se observa que el distanciamiento entre modos es menor a 1.52 nm, valor que es menor al espaciamiento inter-canal utilizado en el diseño en estudio, es decir, 200 GHz. Esta observación garantiza que no exista interferencia con el canal DWDM contiguo. Además, hay que tener presente que de cualquier modo la diafonía sería mínima ya que el SMSR en ningún caso es menor a 50 dB.

Tabla 4.29 Espaciamiento del modo lateral izquierdo en los SFP+ DWDM en el sitio A.

Equipo A	SMSR1 [nm]
ID SFP+	OSA
CH28 A	1.31
CH30 A	1.45
CH32 A	1.35
CH34 A	1.44
MNG A	1.52



De la misma forma, se midió el espaciamiento entre los modos laterales derechos y el modo principal de cada canal DWDM. Se reportan en la Tabla 4.30. Se puede ver que efectivamente estos modos no interfieren con los canales DWDM contiguos debido a que su espaciamiento es menor a 1.6 nm.

*Tabla 4.30 Espaciamiento del modo lateral derecho en los SFP+ DWDM en el sitio A.*

<b>Equipo A</b>	<b>SMSR2 [nm]</b>
<b>ID SFP+</b>	<b>OSA</b>
<b>CH28 A</b>	1.008
<b>CH30 A</b>	0.864
<b>CH32 A</b>	0.900
<b>CH34 A</b>	0.846
<b>MNG A</b>	1.350

En la Tabla 4.31 se reporta el SMSR derecho con respecto al modo principal medido para los canales que se encuentran en el equipo B, donde se puede observar que el promedio es de 53 dB. Nuevamente, el valor medido es muy conveniente, ya que garantiza que no va a existir interferencia con el modo principal, aun a pesar de que la separación espectral entre los modos longitudinales que se observan no sea la deseada.

*Tabla 4.31 Medición de la potencia del SMSR derecho para los SFP+ DWDM en el sitio B.*

<b>Equipo B</b>	<b>SMSR1 [dB]</b>
<b>ID SFP+</b>	<b>OSA</b>
<b>CH28 B</b>	53.50
<b>CH30 B</b>	52.84
<b>CH32 B</b>	54.83
<b>CH34 B</b>	55.93
<b>MNG B</b>	53.72

Se midió y se reporta en la Tabla 4.32 el SMSR izquierdo con respecto al modo principal de los canales que se encuentran en el equipo B. Igual al caso reportado en la tabla anterior y en las correspondientes tablas para el sitio A, el valor medido es más que aceptable, ya que su valor promedio se encuentra en 53 dB.

Tabla 4.32 Medición de la potencia del SMSR izquierdo para los SFP+ DWDM en el sitio B.

Equipo B	SMSR2 [dB]
ID SFP+	OSA
CH28 B	52.84
CH30 B	53.50
CH32 B	55.49
CH34 B	55.71
MNG B	53.28

Al igual que con el equipo anterior, se midió con ayuda del OSA la distancia de separación que tiene el SMSR derecho con respecto al modo principal de los canales que se encuentran en el equipo B y se reportó en la Tabla 4.33. Nuevamente, los valores reportados aseguran que los modos laterales no representarán un problema de transmisión en el sistema WDM. Lo mismo se puede decir del espaciado espectral del modo principal con respecto al modo adyacente que se ubica del lado izquierdo, para el equipo B. Las mediciones se muestran en la Tabla 4.34.

Tabla 4.33 Espaciado espectral del SMSR derecho para los SFP+ DWDM del sitio B.

Equipo B	SMSR1 [nm]
ID SFP+	OSA
CH28 B	1.16
CH30 B	1.30
CH32 B	1.20
CH34 B	1.37
MNG B	1.52

Tabla 4.34 Espaciado espectral del SMSR izquierdo para los SFP+ DWDM del sitio B.

Equipo B	SMSR2 [nm]
ID SFP+	OSA
CH28 B	1.07
CH30 B	0.97
CH32 B	1.00
CH34 B	0.87
MNG B	1.38

#### 4.6.3 Razón Señal a Ruido Óptica (OSNR: *Optical Signal to Noise Ratio*)

En los sistemas DWDM, la relación óptica de señal a ruido (OSNR) refleja la calidad que tendrán las señales transmitidas. Dado que no se considera el uso de amplificadores en el diseño del enlace de que trata este trabajo, el OSNR medido a la salida de los transceptores deberá mantenerse prácticamente constante. De ahí la importancia de medirlo para asegurar

que se encuentra por arriba de los niveles requeridos en el diseño y que, además, cumple con las especificaciones que provee el fabricante.

El OSNR es una lectura que se hace a través del OSA, el cual es la diferencia (en dB) de la potencia máxima de la señal óptica que se tiene en el transmisor con el ruido propio del sistema. Este ruido se puede apreciar en el OSA como una referencia de potencia, generalmente este ruido es bajo y se puede observar como si fuera un piso que envuelve a la señal en componentes internos y externos de la frecuencia de la señal. La Figura 4.14 muestra una captura del OSA, el cual mide la diferencia (en escala logarítmica) entre la potencia óptica máxima y la potencia del ruido, es decir, el OSNR.

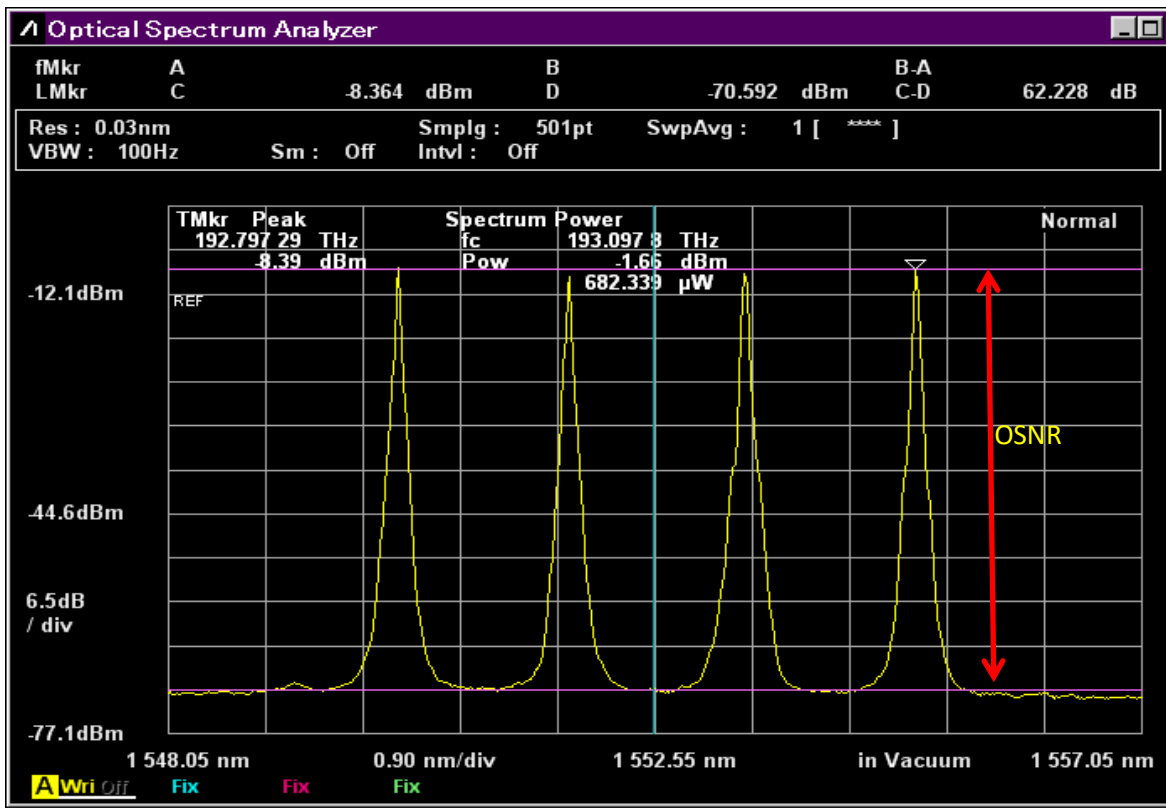


Figura 4.14 Medición de OSNR de los canales multiplexados en el sitio A.

La medición de este parámetro se realiza utilizando el OSA empleando una resolución de 0.03nm. Los valores correspondientes para los SFP+ DWDM ubicados en el sitio A se presentan en la Tabla 4.35.

*Tabla 4.35 Medición de OSNR en SFP+ DWDM en el sitio A.*

<b>Equipo A</b>	<b>OSNR [dB]</b>	<b>Res:0.03nm</b>
<b>ID SFP+</b>	<b>OSA</b>	
<b>CH28 A</b>	62.89	
<b>CH30 A</b>	59.79	
<b>CH32 A</b>	59.04	
<b>CH34 A</b>	59.67	
<b>MNG A</b>	55.71	

De acuerdo con la Tabla 4.35, los valores de OSNR superan con mucho los valores mínimos aceptables para un sistema como el estudiado en este trabajo, que debe ser de alrededor de 38 o 40 dB. Mediante estas mediciones se garantiza el buen desempeño del sistema de transmisión en cuanto a fuentes de ruido se refiere.

Para terminar con la caracterización de los SFP+ DWDM que se encuentran instalados en el sitio B, se midió el OSNR que presentaron todos los canales de manera individual y se reporta en la Tabla 4.36 Podemos observar que tiene un OSNR más que aceptable, ya que en promedio este es de 58 dB.

*Tabla 4.36 Medición de OSNR en SFP+ DWDM en el sitio B.*

<b>Equipo B</b>	<b>OSNR [dB]</b>	<b>Res:0.03nm</b>
<b>ID SFP+</b>	<b>OSA</b>	
<b>CH28 B</b>	59.03	
<b>CH30 B</b>	57.70	
<b>CH32 B</b>	59.03	
<b>CH34 B</b>	59.03	
<b>MNG B</b>	55.93	

## Capítulo 5 Análisis de la factibilidad técnica del sistema propuesto

La transmisión de los canales DWDM se hace a través del *fronthaul* una vez que las señales son multiplexadas al pasar a través del MUX. Los MUX utilizados soportan hasta 8 canales con una separación espectral inter-canal de 100 GHz o de aproximadamente 0.8 nm. El MUX abarca los canales del 28 al 35, de los cuales los canales pares están destinados para la arquitectura activa, mientras que, los canales nones corresponden a la arquitectura pasiva. La Figura 5.1 muestra el espectro óptico de los 8 canales disponibles del MUX con su separación espectral inter-canal que experimentalmente arroja valores de 99.9 GHz. En particular para la arquitectura de *fronthaul* activo propuesto se utilizan los canales 28, 30, 32, y 34 con un espaciamiento espectral inter-canal correspondiente a 200 GHz o aproximadamente 1.6 nm.

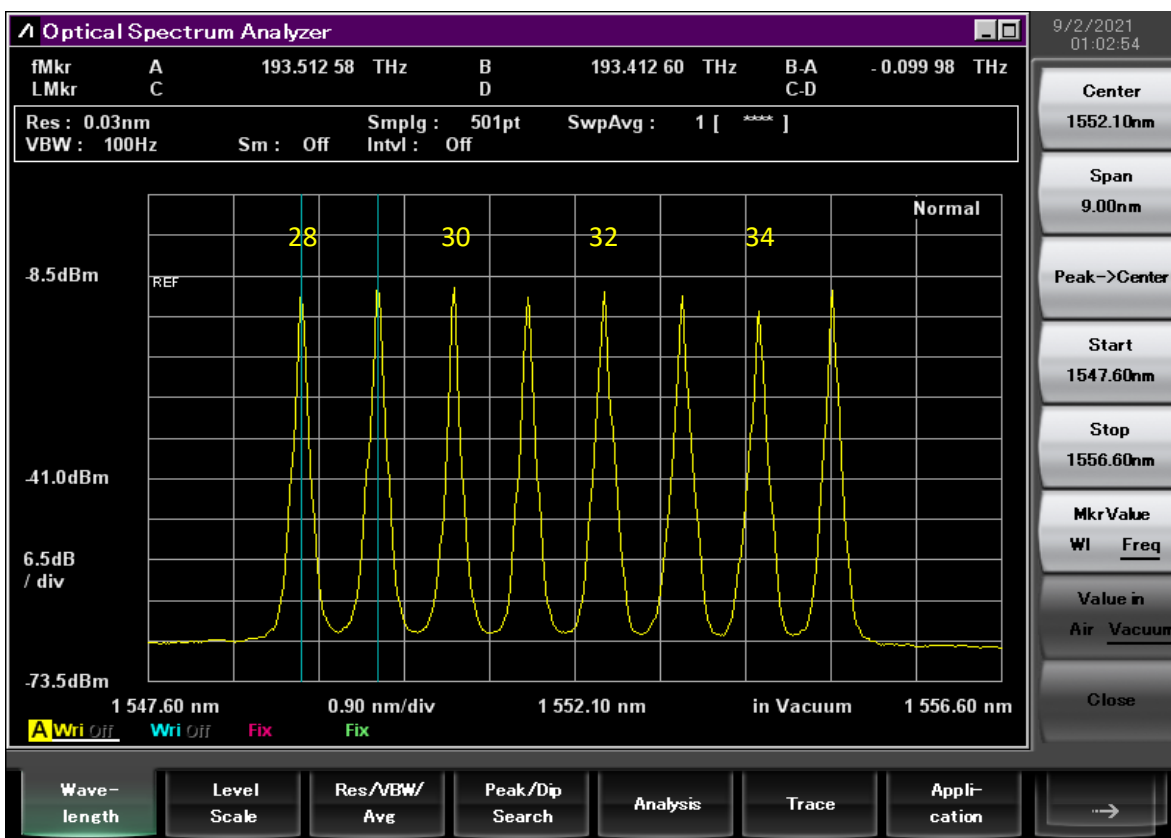


Figura 5.1 Espaciamiento espectral de canales DWDM empleados en el *fronthaul*.

Para verificar la transmisión de canales WDM a través del enlace y verificar la factibilidad técnica del sistema, se han considerado las tres diferentes longitudes del *fronthaul* que hemos manejado. Se realizó la caracterización de 10 km, 18 km y 21 km del *fronthaul* para conocer las pérdidas de potencia óptica acumuladas que cada variación de distancia posee a lo largo del *fronthaul*.

## 5.1 Análisis de presupuesto de potencia y pérdidas de inserción para cada canal DWDM

Un factor de suma importancia para poder determinar de manera óptima el desempeño de cualquier enlace de comunicaciones ópticas es el presupuesto de potencia, el cual, nos permite conocer las limitaciones que pueda llegar a tener nuestro enlace y nos permite garantizar la factibilidad de este. Para poder hacer el cálculo correspondiente es fundamental poder conocer las pérdidas que se presentan a lo largo del enlace, de preferencia para cada uno de los canales WDM que lo componen, ya que en muchas ocasiones existe variabilidad entre cada uno de ellos. Recordemos que teóricamente el presupuesto de potencia se puede obtener conociendo el nivel de potencia que ofrece nuestra fuente transmisora y la suma de todas las pérdidas y penalizaciones de potencia que presenta el enlace; con estos datos obtenidos y conociendo la mínima sensibilidad de nuestro fotodetector es posible determinar si en enlace cumple o no con el presupuesto de potencia óptimo y, por lo tanto, poder garantizar que opera adecuadamente.

A continuación, se presenta la medición de las pérdidas observadas a lo largo del enlace tanto para la arquitectura activa. El procedimiento fue el siguiente. Primeramente, para poder obtener la potencia de referencia, se midió con ayuda de un medidor de potencia la potencia inicial que salen de los SFP+ que se encuentran conectados directamente en los equipos terminales (USRP / eNodeB), tal y como se aprecia en la Figura 5.2.



Figura 5.2 Diagrama de conexiones que se empleó para determinar la potencia de referencia.

Una vez que se determinó la potencia óptica de referencia, se midieron los valores de potencia que se presentan en diferentes puntos a lo largo del enlace para conocer cómo se va reduciendo la potencia. Mediante la adecuada sustracción de los valores, es posible calcular el valor de las respectivas pérdidas de potencia en cada punto del enlace. Para el caso de la arquitectura de *fronthaul* activa estudiada en este proyecto, las mediciones de potencia se realizaron en los puntos destacados en la Figura 5.3. Dichos puntos se detallan en la Tabla 5.1. Dado que la conexión entre el eNodeB y el transpondedor y la conexión entre el USRP y el transpondedor se realizan con los SFP+ que operan alrededor de una  $\lambda$  de 1300 nm, el valor de potencia para el punto 5 resulta ser el mismo que el que se midió en el punto 1.

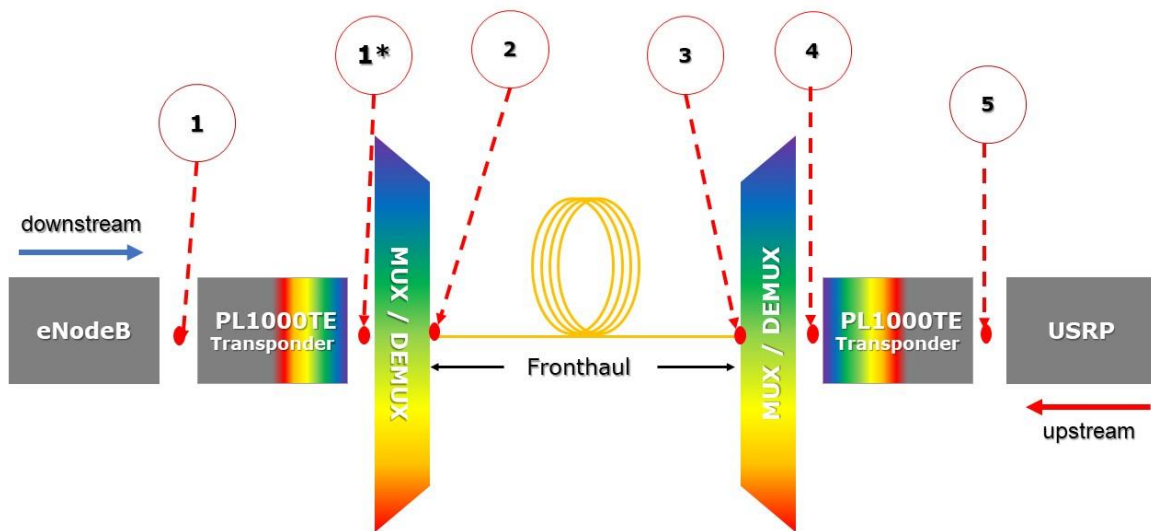


Figura 5.3 Diagrama de puntos de medición de potencia óptica en Fronthaul con configuración activa.

Tabla 5.1 Puntos de medición de las potencias del fronthaul en configuración activa

Punto de medición	Arquitectura Activa
1	Entrada del PL-1000TE
1*	Salida del SFP+ DWDM Packetlight
2	Puerto COM equipo A (salida MUX, pérdidas de los filtros)
3	Antes de entrar al DEMUX equipo B (después de enlace)
4	Después del DEMUX equipo B (entrada del SFP+ DWDM)
5	Entrada USRP (salida SFP+ @ 1310 nm)

En primer lugar, se presentan los valores de potencia medidos en los puntos de medición señalados anteriormente para la arquitectura activa. Las mediciones fueron realizadas para enlaces de diferente longitud, ya que es de particular interés para los fines de este proyecto conocer el desempeño de la red en diferentes circunstancias y más particularmente, para diferentes longitudes de la fibra óptica (o alcance). Nótese que las pérdidas asociadas a los jumpers que permiten realizar conexiones entre los diferentes elementos del sistema y que no representan fibra de transporte propiamente, se han despreciado.

En las tablas siguientes se presentan, primeramente, las mediciones para un enlace de fibra de 10 km. Dado que los enlaces analizados son del tipo full-duplex, se presentan tablas con mediciones hechas tanto en el sentido de subida (*upstream*), como de bajada (*downstream*). Las mediciones de potencia (en dBm) se presentan en las Tablas 5.2 y 5.3, respectivamente. La caracterización se hizo para los cuatro canales que se transmiten a lo largo de la

arquitectura activa, tal y como se explicó en la sección correspondiente de este informe. En la última columna de las tablas se presenta la pérdida total del enlace, la cual se determina como la diferencia de potencia (en dB) de las mediciones efectuadas en el punto 1\* y el punto 4. De particular relevancia para la solución activa, es también la potencia medida en el punto 4, ya que representa la potencia de la señal que llega al receptor y la cual debe estar por arriba del valor de sensibilidad del fotodetector utilizado, esto con el fin de garantizar la adecuada operación de la red.

Tabla 5.2. Potencias medidas para un enlace de fronthaul activo de 10 km en sentido downstream.

Canal	Potencia SFP+ 1310 nm [dBm]	Potencia SFP+ DWDM, en punto 1* [dBm]	Potencia en punto 2 [dBm]	Potencia en punto 3 (10 km) [dBm]	Potencia en punto 4 [dBm]	Pérdida total del enlace [dB]
CH28	0.8	1.15	-3.63	-6.42	-8.42	-9.57
CH30	0.8	1.68	-2.43	-5.22	-6.64	-8.32
CH32	0.8	0.57	-4.56	-7.35	-9.30	-9.87
CH34	0.8	1.71	-2.09	-4.88	-7.33	-9.04
MNGM	-	0.97	-2.40	-5.19	-7.19	-8.16

Tabla 5.3. Potencias medidas para un enlace de fronthaul activo de 10 km en sentido upstream

Canal	Potencia SFP+ 1310 nm [dBm]	Potencia SFP+ DWDM, en punto 1* [dBm]	Potencia en punto 2 [dBm]	Potencia en punto 3 (10 km) [dBm]	Potencia en punto 4 [dBm]	Pérdida total del enlace [dB]
CH28	0.8	1.67	-3.82	-6.65	-9.05	-10.72
CH30	0.8	0.48	-4.45	-7.28	-9.45	-9.93
CH32	0.8	1.18	-3.82	-6.65	-7.70	-8.88
CH34	0.8	2.44	-2.46	-5.29	-8.08	-10.52
MNGM	-	0.96	-2.74	-5.57	-6.90	-7.86

Del análisis de los datos recabados y organizados en las tablas anteriores es claro que las pérdidas totales para el caso *downstream* fluctúan entre -8.16 y -9.87, dependiendo del canal de que se trate, mientras que para el caso *upstream* la variación se encuentra en un intervalo mayor, ya que la fluctuación se encuentra entre -7.86 y -10.72. En cualquier caso, estas pérdidas se encuentran alrededor de los 9 dB, lo cual es un valor aceptable, considerando las características de la fibra óptica que se utilizó. Los valores de potencia que se miden justo antes del receptor son también, en ambos casos, lo suficientemente altos para no causar problemas de recepción y predecir una BER (*Bit Error Rate*) lo suficientemente baja.



Las tablas correspondientes a las mediciones de potencia para un enlace de 18 km se presentan en las Tablas 5.4 y 5.5. El formato de las tablas es el mismo que presentan las Tablas 5.2 y 5.3.

Tabla 5.4 Potencias medidas para un enlace de fronthaul activo de 18 km en sentido downstream.

Canal	Potencia SFP+ 1310 nm [dBm]	Potencia SFP+ DWDM, en punto 1* [dBm]	Potencia en punto 2 [dBm]	Potencia en punto 3 (18 km) [dBm]	Potencia en punto 4 [dBm]	Pérdida total del enlace [dB]
CH28	0.8	1.15	-3.63	-9.59	-11.59	-12.74
CH30	0.8	1.68	-2.43	-8.39	-9.81	-11.49
CH32	0.8	0.57	-4.56	-10.52	-12.47	-13.04
CH34	0.8	1.71	-2.09	-8.05	-10.5	-12.21
MNGM	-	0.97	0.08	-5.88	-6.77	-7.74

Tabla 5.5 Potencias medidas para un enlace de fronthaul activo de 18 km en sentido upstream.

Canal	Potencia SFP+ 1310 nm [dBm]	Potencia SFP+ DWDM, en punto 1* [dBm]	Potencia en punto 2 [dBm]	Potencia en punto 3 (18 km) [dBm]	Potencia en punto 4 [dBm]	Pérdida total del enlace [dB]
CH28	0.8	1.67	-3.82	-9.71	-12.11	-13.78
CH30	0.8	0.48	-4.45	-10.34	-12.51	-12.99
CH32	0.8	1.18	-3.82	-9.71	-10.76	-11.94
CH34	0.8	2.44	-2.46	-8.35	-11.14	-13.58
MNGM	-	0.96	-2.74	-8.63	-9.96	-10.92

Como era de esperarse, las pérdidas reportadas en la última columna para el caso de transmisión a lo largo de 18 km superan a aquellas calculadas para una transmisión de 10 km. Aun así, los valores de potencia óptica recibida son los suficientemente altos para garantizar el buen funcionamiento del sistema, tanto en *upstream* como en *downstream*.

Las tablas correspondientes a las mediciones de potencia que se realizaron para el enlace de 21 km se presentan a continuación en las Tablas 5.6 y 5.7.

Tabla 5.6 Potencias medidas para un enlace de fronthaul activo de 21 km en sentido downstream.

Canal	Potencia SFP+ 1310 nm [dBm]	Potencia SFP+ DWDM, en punto 1* [dBm]	Potencia en punto 2 [dBm]	Potencia en punto 3 (21 km) [dBm]	Potencia en punto 4 [dBm]	Pérdida total del enlace [dB]
CH28	0.8	1.15	-3.63	-12.74	-14.74	-15.89
CH30	0.8	1.68	-2.43	-11.54	-12.96	-14.64
CH32	0.8	0.57	-4.56	-13.67	-15.62	-16.19
CH34	0.8	1.71	-2.09	-11.20	-13.65	-15.36
MNGM	-	0.97	-2.40	-11.51	-12.40	-13.37

Tabla 5.7 Potencias medidas para un enlace de fronthaul activo de 21 km en sentido upstream.

Canal	Potencia SFP+ 1310 nm [dBm]	Potencia SFP+ DWDM, en punto 1* [dBm]	Potencia en punto 2 [dBm]	Potencia en punto 3 (21 km) [dBm]	Potencia en punto 4 [dBm]	Pérdida total del enlace [dB]
CH28	0.8	1.67	-3.82	-12.94	-15.34	-17.01
CH30	0.8	0.48	-4.45	-13.57	-15.74	-16.22
CH32	0.8	1.18	-3.82	-12.94	-13.99	-15.17
CH34	0.8	2.44	-2.46	-11.58	-14.37	-16.81
MNGM	-	0.96	-2.74	-8.638	-9.96	-10.92

Para el caso de transmisión a lo largo de 21 km, las pérdidas totales se incrementan bastante con respecto a los casos anteriores. Esto es debido a que la calidad de la fibra usada para los últimos kilómetros no es la idónea, ya que se formó a partir de la interconexión de varios tramos de fibra óptica, en lugar de usar un enlace dedicado. La razón de ello ya fue explicada en la sección correspondiente. En condiciones normales de operación no es difícil predecir que las pérdidas se verán reducidas en varios decibeles. Como consecuencia del uso de la fibra formada mediante añadidos, se alcanzan valores de pérdida total de hasta 17 dB, que son muy altos para un enlace de 21 km, aun considerando las pérdidas proporcionadas por el par MUX/DEMUX. Consecuentemente, la potencia óptica recibida es en general baja, pero no tanto como para no cumplir con el presupuesto de potencia asociado al enlace. Cabe señalar que independientemente de las altas pérdidas que presenta el enlace, gracias al uso del equipo transpondedor PL-1000TE, el cual permite regenerar la señal que es transmitida, las pérdidas se compensan parcialmente, por lo que se puede concluir que el enlace de fibra óptica utilizado cumple con lo requerido para implementar la red celular de que trata este proyecto.

Esto con el fin de asegurar una BER de  $1E-12$ , tal y como especifica la norma. Para determinar el valor exacto de la tasa de transmisión debemos utilizar un *bit-error-rate tester*,

del cual no disponemos. En cualquier caso, esto no debe presentar problemas para las pruebas que realizaremos, pero es importante tenerlo en cuenta para futuros experimentos. Claramente, la manera de solucionar este inconveniente es reduciendo las pérdidas que presenta la fibra, lo cual ocurre automáticamente en una instalación definitiva (no experimental o de prueba), ya que se usaría una fibra adecuada de bajas pérdidas y no un enlace formado por distintos añadidos. Es prudente recordar que la circunstancia del confinamiento debido a la emergencia sanitaria nos obligó a llevar a cabo improvisaciones que no se tenían contempladas, pero que nos han ayudado a lograr los objetivos del proyecto. Una de ellas fue realizar la extensión del enlace originalmente contemplado tal y como se explicó en el apartado correspondiente de este informe, en lugar de utilizar una fibra ya tendida y a la cual no tenemos acceso en este momento.

## 5.2 Verificación de inexistencia de efectos no lineales entre canales DWDM

Los efectos no lineales son principalmente perjudiciales en la transmisión de señales ópticas a través de largas distancias, los cuales no solo podrían degradar la señal en potencia sino también en su componente espectral, por esta razón es necesario poder verificar si nuestro enlace cuenta con algún efecto no lineal que pueda limitar el desempeño de la red o perjudicar la transmisión de los canales DWDM.

Una forma de demostrar que durante la transmisión de canales DWDM a lo largo del *fronthaul* no se presentan efectos no lineales es corroborando que el valor de OSNR y el ancho de línea medidos para todos los canales DWDM se conserven a un mismo valor o valores similares al inicio y al final del enlace tal como se puede observar en la Figura 5.4. En este sentido, para el *fronthaul* activo propuesto en el proyecto se demuestra que el OSNR y linewidth para todos los canales DWDM no se modifican comparando el espectro de los canales DWDM al inicio y al final del *fronthaul* de 21km.

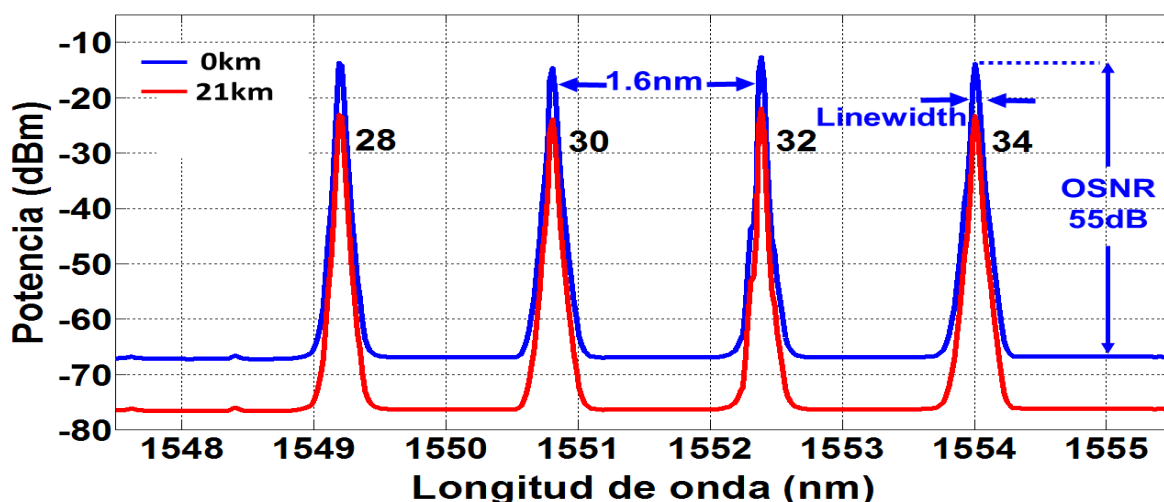


Figura 5.4 Canales DWDM al inicio y al final del fronthaul de 21km.

### 5.3 Verificación de inexistencia de efectos de dispersión en el *fronthaul*

Uno de los principales efectos con los cuales nos encontraríamos en la transmisión de canales DWDM en el *fronthaul* es la dispersión, la cual un factor importante a tomar en cuenta en el diseño de un enlace de fibra óptica. Esto se debe a que la dispersión ensancha y distorsiona los pulsos que se propagan debido a las diferentes velocidades de grupo que tiene cada longitud de onda en el medio óptico. La dispersión acumulada está directamente relacionada con la distancia a la cual la señal fue transmitida a través del medio óptico. Cuando la dispersión acumulada resulta demasiado grande, puede ocasionar interferencias intersimbólicas (ISI) o problemas para discernir entre valores altos o valores bajos en sistemas de modulación en intensidad y detección directa (IM/DD), como lo es el caso de este sistema. Razón por la cual es importante considerarla en la etapa de diseño y asegurarse de que no tendrá un impacto nocivo en el desempeño del sistema.

Para conocer la distancia máxima que un sistema de telecomunicaciones óptico puede alcanzar según el coeficiente de dispersión que posee la fibra óptica utilizada para el enlace, la tasa de transmisión y la longitud de onda utilizada se puede aplicar la siguiente fórmula (1), la cual es utilizada en sistemas con modulación NRZ (Non-Return Zero) iguales a este sistema:

$$L_{Dm\acute{a}x} = \frac{\epsilon c \pi}{B^2 \lambda^2 |D(\lambda)|} \quad (1)$$

Donde:

$L_{Dm\acute{a}x}$  Distancia máxima permitida por la dispersión en el medio [km]

$\epsilon$  0.491 (2 dB penalty) o 0.306 (1 dB penalty)

$c$  Velocidad de la luz [m/s]

$B$  Tasa de transmisión

$\lambda$  Longitud de onda de la señal

$D(\lambda)$  Coeficiente de dispersión de la fibra óptica [ps/nm-km]

Las características del enlace y de la transmisión del sistema DWDM se encuentran en la Tabla 5.8 Suponiendo una penalización por dispersión de 1 dB, se ha calculado la distancia máxima que el enlace puede alcanzar, la cual es de 70.612 km. También, realizando el cálculo para una penalización de 2 dB el resultado cambia a una distancia máxima de 113.302 km.

Tabla 5.8 Valores del enlace y la transmisión del sistema.

Características generales del enlace de fibra óptica	
ITU-T	G.652
$\lambda$ [nm]	1550
D [ps/nm-km]	17
B [Gb/s]	10

En cuanto a las distancias, a simple vista 70.612 km o 113.302 km son muy superiores a los 21 km que posee el enlace del sistema de transmisión DWDM que se propuso en este escrito, por lo que se puede decir que la penalización de dispersión es un problema irrelevante para el sistema a la tasa de 10 Gb/s, siempre y cuando no se rebase el máximo alcance que hemos estudiado.

#### 5.4 Análisis de validación preliminar del enlace empleando diferentes longitudes del *fronthaul* óptico

En primera instancia y como una validación preliminar del enlace basta con analizar los resultados obtenidos en el rendimiento de la señal al pasar por los módulos multiplexores de los PL-1000TE, gracias al análisis que se realizó con el OSA, podemos garantizar que el OSNR se mantiene estable después del recorrido que realiza la señal. Es imprescindible determinar que en el *fronthaul* no existen elementos que añadan ruido a la señal ni tampoco existen contribuciones de efectos no lineales, por lo cual únicamente basta con comprobar la potencia óptica obtenida y con base en esta se puede determinar si el *fronthaul* es operable o no.

Otro factor que puede llegar a afectar a la propagación de nuestra señal a través de la fibra óptica es la dispersión, la cual por sus efectos de ensanchar y disminuir el nivel de potencia del pulso de luz que se está transmitiendo podría verse la recepción del pulso de luz en el receptor óptico del SFP+.

Para comprobar la factibilidad técnica del enlace que forma el *fronthaul* se revisa en las especificaciones técnicas del módulo receptor SFP+ DWDM su sensibilidad que nos da un indicativo del valor de potencia mínima que puede recibir dicho receptor para garantizar una transmisión de datos con una razón de bit erróneos de  $BER < 10^{-12}$  con una tasa de 10Gb/s. En las especificaciones de los receptores se encuentra que la sensibilidad es de -16dBm, por lo que las potencias que se transmitan a través del *fronthaul* deben llegar al final del enlace con una potencia mayor a -16dBm para asegurar transmisiones a 10Gb/s. Estas validaciones se reportaron en las Tablas 5.9 a 5.14 las cuales demuestran que la potencia óptica recibida se encuentra en el rango de sensibilidad que permiten los SFP+.

Las tablas se ordenaron de acuerdo con los incrementos en la distancia que se le fue haciendo al *fronthaul* y se fueron reportando en primera instancia en sentido *upstream* y posteriormente *downstream*.

Tabla 5.9 Potencias del fronthaul de 10 km en sentido upstream.

10 km en sentido upstream.			
Canal	Potencia después del DEMUX [dBm]	Sensitividad máxima dBm BER < 10 <sup>-12</sup>	Funcional
CH28	-11.59	-16	si
CH30	-9.81	-16	si
CH32	-12.47	-16	si
CH34	-10.5	-16	si

Tabla 5.10 Potencias del fronthaul de 10 km en sentido downstream.

10 km en sentido downstream			
Canal	Potencia después del DEMUX [dBm]	Sensitividad máxima dBm BER < 10 <sup>-12</sup>	Funcional
CH28	-9.05	-16	si
CH30	-9.45	-16	si
CH32	-7.7	-16	si
CH34	-8.08	-16	si

Estas primeras tablas mostradas comprueban que las potencias ópticas tanto en sentido *upstream* (partiendo las señales desde el equipo A) como *downstream* (partiendo las señales desde el equipo B) se encuentran muy por encima de la potencia mínima que puede detectar el SFP+ cuando se encuentra operando a una tasa de 10 Gb/s, lo cual era de esperarse debido a que la longitud es la típica empleada dentro de la implementación de los *fronthaul* tradicionales.

Ahora, analizando el caso de un *fronthaul* de 18km, con la información mostrada en las Tablas 5.11 a 5.12 vemos que los valores de potencia siguen estando dentro del rango límite de sensibilidad permitido para operar, aun cuando la longitud física del *fronthaul* aumento considerablemente.

Tabla 5.11 Potencias del fronthaul de 18 km en sentido upstream.

18 km en sentido <i>upstream</i>			
Canal	Potencia en punto 4 [dBm]	Sensitividad máxima dBm BER < 10 <sup>-12</sup>	Funcional
CH28	-12.11	-16	si
CH30	-12.51	-16	si
CH32	-10.76	-16	si
CH34	-11.14	-16	si

Tabla 5.12 Potencias del fronthaul de 18 km en sentido downstream.

18 km en sentido <i>downstream</i>			
Canal	Potencia en punto 4 [dBm]	Sensitividad máxima dBm BER < 10 <sup>-12</sup>	Funcional
CH28	-8.42	-16	si
CH30	-6.64	-16	si
CH32	-9.3	-16	si
CH34	-7.33	-16	si

Con respecto a un *fronthaul* con un enlace de 21km, en las Tabla 5.13 podemos ver cuando las señales parten del equipo A para transmitirse a través del *fronthaul*, al final del enlace ya existen canales con las potencias cercanas al valor límite permitido de sensibilidad del receptor como lo son los canales 28 y 30. Mientras que en la Tabla 5.14 correspondiente al equipo B el canal 32 es el que se aproxima a la potencia mínima permitida.

Tabla 5.13 Potencias del fronthaul de 21 km en sentido upstream.

21 km en sentido <i>upstream</i>			
Canal	Potencia en punto 4 [dBm]	Sensitividad máxima dBm BER < 10 <sup>-12</sup>	Funcional
CH28	-15.34	-16	si
CH30	-15.74	-16	si
CH32	-13.99	-16	si
CH34	-14.37	-16	si

Tabla 5.14 Potencias del fronthaul de 21 km en sentido downstream.

21 km en sentido <i>downstream</i>			
Canal	Potencia en punto 4 [dBm]	Sensitividad máxima dBm BER <math>10^{-12}</math>	Funcional
CH28	-14.74	-16	si
CH30	-12.96	-16	si
CH32	-15.62	-16	si
CH34	-13.65	-16	si

Con los valores mostrados podemos determinar que aun con una longitud de más de 20 Km de enlace de *fronthaul* la potencia óptica aún está dentro de los parámetros permitidos. Cabe mencionar que aun cuando la hoja de especificaciones de los SFP+ DWDM menciona que el valor de sensitividad permitido es de -16 dBm aun cuentan con un margen de seguridad que consiste en 2 o 3 dB, pero con estos valores fuera del parámetro mencionado no se puede garantizar la completa operatividad del *fronthaul*.

Con estas tablas validamos de manera preliminar a nivel de potencia óptica lo cual es un parámetro óptico de suma importancia para determinar el correcto funcionamiento del enlace *fronthaul*.

Como se explicó en la sección de verificación de inexistencia de efectos no lineales, el penalty por dispersión se puede excluir ya que no se ve afectada la calidad de la señal debido a que la distancia máxima de 21 Km no contribuye en la existencia de efectos significativos de dispersión dentro del enlace, por lo que resulta incensario tomar en cuenta la perdida de potencia óptica que pudiera tener debido a este fenómeno de dispersión.

Para realizar una validación completa y objetiva se recomienda el uso de un equipo dedicado como es el BERT el cual además de cuantizar la tasa de bits en error (BER) que tendrá la señal enviada a través del *fronthaul*, puede determinar la latencia, el jitter, cuantificar la perdida de tramas y paquetes de la señal. Con ayuda de este equipo se constituye una forma de medir y monitorear la integridad de las señales que serán transportadas por el *fronthaul*. Cabe menciona que estas validaciones a nivel de capa 2 se pueden realzar a diferentes tasas de transmisión principalmente a 10 Gbps,



## Capítulo 6 Conclusiones

En este trabajo se concluye de manera satisfactoria la implementación de un fronthaul óptico activo con tecnología DWDM y basado en una arquitectura de red C-RAN para aplicaciones 4G/5G. El fronthaul óptico que preliminarmente consta de 4 canales ópticos con la posibilidad de ser escalado al doble si es necesario en un crecimiento de red a futuro.

Como el único medio de transmisión físico posible que actualmente permita alcanzar el objetivo de tener altas tasas de transmisión y baja latencia entre la radio bases y los ENodeB es la fibra óptica, el escrito se basó primordialmente en la descripción de la arquitectura activa del fronthaul. Obteniendo los siguientes logros y contribuciones:

- Se describe de manera satisfactoria el transpondedor óptico, elemento principal del fronthaul, el cual se encarga de realizar la conversión de longitudes de onda entre la banda O a la banda C y viceversa, añadiendo también una regeneración de la señal transmitida.
- El enlace óptico logró conectar satisfactoriamente un conjunto de radio bases que serán las encargadas de brindar el servicio primordialmente de telefonía celular, podrán emplearse en sistemas de IoT y servicios que requieran altas tasas de transmisión y baja latencia
- Se demuestra que la solución es completamente funcional desde el punto de vista técnico y operacional, para llevar a cabo una interconexión óptica con una distancia de hasta 20 km, la cual supera las propuestas establecidas tradicionalmente de 10km que son las más empleadas en estos tipos de redes actualmente.
- Todas las mediciones que se realizaron a las componentes del equipo DWDM demostraron que cumplen con las normas establecidas por la ITU y de igual manera con las especificaciones del fabricante, por lo que pueden ser empleadas para el diseño y para la realización de pruebas e incluso un futuro despliegue de una red basada en esta arquitectura.
- Como se describe en la sección 4.6.3, las mediciones realizadas sobre el OSNR, se demostró que este parámetro es constante a lo largo del enlace de fibra óptica, independientemente de la longitud que éste presentara, ya que en todo momento superó los 40 dB sin presencia de efectos no lineales.
- Se analizó un presupuesto de potencia óptica para determinar el máximo umbral de pérdidas que se puede tolerar dentro de la infraestructura instalada. Llegando a la conclusión de que el rendimiento del enlace puede mejorar instalando una fibra óptica dedicada sin fusiones y conectores intermedios, que debido a la premura del tiempo y las condiciones sanitarias en las que se trabajó no fue posible realizar

- Otro aspecto a tener en cuenta es que se debe de cuidar la manipulación de los conectores y procurar realizar una limpieza de estos de manera adecuada para poder así evitar los reflejos dentro de la fibra, los cuales son el principal problema que existe en las redes ópticas de nueva generación reduciendo la latencia y por ende generando mayores afectaciones en el BER.

Finalmente se puede decir que todas las pruebas, mediciones y análisis que se encuentran en este escrito demuestran fehacientemente que, por un lado, se realizó exitosamente la implementación del fronthaul basado en una arquitectura activa para una red C-RAN el cual podrá brindar los servicios pertinentes para las redes de acceso 4G/5G y la experiencia teórica y práctica ganada durante el desarrollo de todo el proyecto en general resultara de gran valor y beneficiara en gran manera el desarrollo del tema bajo investigación y sobre todo, generará un beneficio tecnológico a la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Ciudad de México y por ende al país entero.

Cabe mencionar que derivado a este proyecto y en conjunto con el equipo de investigadores a cargo de este, resulto el artículo intitulado “*Analysis of an active and passive optical fronthaul with DWDM for coexisting 4G/5G C-RAN architectures based on SDR*” [43] publicado en la revista Optical Engineering de USA indizada en JCR

## Referencias

- [1] P. Paudel y A. Bhattarai, «5G Telecommunication Technology: History, Overview, Requirements and Use Case Scenario in Context of Nepal,» de *Information Technology for Development (IT4D)*, Kathmandu, Nepal, 2018.
- [2] UIT, «Sentando las bases para la 5G: Oportunidades y desafíos,» Ginebra, Suiza, 2018.
- [3] K. S. Mohamed, *The Era of Internet of Things: Towards a Smart World*, Springer, 2019, 2019.
- [4] P. Xiao, *Practical Java Programming for IoT, AI, and Blockchain*, John Wiley & Sons, 2019.
- [5] C. G. Gheorghe, D. A. Stoichescu y R. Dragomir, «Latency requirement for 5G mobile communications,» de *10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Iasi, Romania, 2018.
- [6] A. A. Garba, «5G Overview,» de *ITU 22nd Meeting of Working Party 5D*, San Diego, 2015.
- [7] A. Ghosh, M. Nitin, R. Rapeepat, M. Bishwarup, C. Mark, V. Eugene, T. Timothy, A. Jeffrey, X. Ping, J. Han-Shin, D. Harpreet y N. Thomas, «Heterogeneous Cellular Networks: From Theory to Practice,» *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, n° 6, pp. 54-64, 2012.
- [8] P. Hindle, «Ericsson Mobility Report Nov 2018 Summary,» Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.microwavejournal.com/blogs/9-pat-hindle-mwj-editor/post/31405-ericsson-mobility-report-nov-2018-summary>. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [9] El *fronthaul* y su importante papel en las aplicaciones 5G avanzadas | eCPRI | VIAVI Solutions Inc. (s. f.). VIAVI Solutions | Network Test, Monitoring, and Assurance. <https://www.viavisolutions.com/es-mx/fronthaul>
- [10] B. Mahapatra, R. Kumar, A. K. Turuk y S. K. Patra, «SC-RAN: An Energy-Efficient Solution Toward C-IoT Implementation,» *2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pp. 1-6, December 2018.
- [11] M. Peng, L. Vincent, W. Yu y C. Wang, «Cloud computing based radio access network,» *China Communications*, vol. 12, n° 11, pp. 1-2, November 2015.
- [12] P. Chanclou, A. Pizzinat, F. Le Clech, T.-L. Reedeker y Y. Lagadec, «Optical fiber solution for mobile fronthaul to achieve cloud radio access network,» *2013 Future Network Mobile Summit*, pp. 1-11, July 2013.
- [13] A. D. O. D. T. Y. A.-N. y M.-S. A. H. Dahrouj, «Resource allocation in heterogeneous cloud radio access networks: advances and challenges,» *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 22, n° 3, p. 66–73, jun. 2015.
- [14] S. Uzma, T. Hina, H. Ekram y K. Dong In, «Wireless backhauling of 5G small cells: challenges and solution approaches,» *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, n° 5, pp. 22-31, October 2015.
- [15] R. F. V. W. V. A. y D. L. C. E. A. Ramos da Paixão, «Optimized load balancing by dynamic BBU-RRH mapping in C-RAN architecture,» *2018 Third International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, n° 10.1109/FMEC.2018.8364051, p. 100–104, abr. 2018.
- [16] Ericsson, «Ericsson Mobility Report 2019,» Estocolmo, Suecia, Noviembre, 2019.

- [17] Global System for Mobile Communications Association (GSMA), «La economía móvil de América Latina 2019,» Londres, Inglaterra, 2019.
- [18] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, «Transición a 5G: ¿Estamos preparados?,» Ciudad de México, 2019.
- [19] "Telcel y Ericsson, impulsando a México con 5G". Ericsson - Helping to shape a world of communication. <https://www.ericsson.com/es/5g/5g-in-mexico> (accedido el 14 de septiembre de 2022).
- [20] N. Lucas-Bartolo. "Telcel estrena su red 5G en México; arrancará en 18 ciudades del país". El Economista. <https://www.economista.com.mx/empresas/Telcel-estrena-su-red-5G-en-Mexico-arrancara-en-18-ciudades-del-pais-20220222-0040.html> (accedido el 14 de septiembre de 2022).
- [21] J. Ip, "High capacity WDM network components," 1999 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings: Nanostructures and Quantum Dots/WDM Components/VCSELs and Microcavities/RF Photonics for CATV and HFC Systems (Cat. No.99TH8455), 1999, pp. II7-II8, doi: 10.1109/LEOSST.1999.794647.
- [22] (s. f.). <https://www.prooptix.com/news/cwdm-dwdm-difference/>
- [23] R. Gaudino, «*Overview on optical fronthauling technologies for fixed-mobile convergence,*» Turín, Italia, 2019.
- [24] D. Wake, A. Nkansah y N. J. Gomes, «Radio Over Fiber Link Design for Next Generation Wireless Systems,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, n° 16, pp. 2456-2464, 2010.
- [25] Common Public Radio Interface (CPRI), «Interface Specification,» 2009. [En línea]. Available: [www.cpri.info](http://www.cpri.info).
- [26] OBSAI Technical Working Group, «Open Base Station Architecture Initiative: BTS System Reference Document, Version 2,» 2006.
- [22] C. Ranaweera, E. Wong, A. Nirmalathas, C. Jayasundara y C. Lim, «5G C-RAN architecture: A comparison of multiple optical *fronthaul* networks,» de *International Conference on Optical Network Design and Modeling 2017 (ONDM)*, Budapest, Hungría, 2017.
- [28] C. Ranaweera, E. Wong, A. Nirmalathas, C. Jayasundara y C. Lim, «5G C-RAN with optical *fronthaul*: An analysis from a deployment perspective,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, n° 11, pp. 2059-2068, 2018.
- [29] A. de la Oliva, J. A. Hernandez, D. Larrabeiti y A. Azcorra, «An overview of the CPRI specification and its application to C-RAN-based LTE scenarios,» *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, n° 2, pp. 125-159, 2016.
- [30] A. de Sousa, D. Melo y P. Monteiro, «A worst case analysis of C-RAN *fronthaul* coverage length with Ethernet based technologies,» de *19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Girona, España, 2017.
- [31] J. Madrazo Lorite, «Análisis y estudio de soluciones para *fronthaul* radio,» España, 2018.
- [32] I. A. Alimi, A. L. Teixeira y P. P. Monteiro, «*Toward an Efficient C-RAN Optical Fronthaul for the Future Networks: A Tutorial on Technologies, Requirements, Challenges, and Solutions,*» *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 20, n° 1, pp. 708-769, 2018.

- [33] H. Menendez, «Ethernet for 5G fronthaul,» Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.nokia.com/blog/ethernet-5g-fronthaul/>.
- [34] H. Menendez, «Ethernet for 5G fronthaul,» Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.nokia.com/blog/ethernet-5g-fronthaul/>.
- [35] J. Bohata, M. Komanec, J. Spáčil, Z. Ghassemlooy, S. Zvánovec y R. Slavík, «24-26 GHz radio-over-fiber and free-space optics for fifth-generation systems,» *Opt. Lett.*, vol. 43, n° 5, pp. 1035-1038, 2018.
- [36] I. Mesogiti, E. Theodoropoulou, K. Filis, G. Lyberopoulos, A. Ropodi, K. Tsagkaris, P. Demestichas, N. Pleros, G. Kalfas y C. Vagionas, «Fiber-Wireless Fronthaul/Backhaul Network Architectures for 5G,» *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pp. 1-5, 2018.
- [37] J. M. Galve, I. Gasulla, S. Sales y J. Capmany, «Reconfigurable Radio Access Networks Using Multicore Fibers,» *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 52, n° 1, pp. 1-7, 2016.
- [38] R. M. Borges, L. A. Melo Pereira, H. Rodrigues Dias Filgueiras, A. Carvalho Ferreira, M. Seda Borsato Cunha, E. Raimundo Neto, D. H. Spadoti, L. Leonel Mendes y A. Cerqueira S., «DSP-Based Flexible-Waveform and Multi-Application 5G Fiber-Wireless System,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, n° 3, pp. 642-653, 2020.
- [39] M. Morant y R. Llorente, «Performance analysis of multiple radio-access provision in a multicore-fibre optical fronthaul,» *Optics Communications*, vol. 436, pp. 161-167, 2019.
- [40] S. Rommel, D. Perez-Galacho, J. M. Fabrega, R. Muñoz, S. Sales y I. Tafur Monroy, «High-Capacity 5G Fronthaul Networks Based on Optical Space Division Multiplexing,» *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 65, n° 1, pp. 434-443, 2019.
- [41] C. Vázquez, J. D. López-Cardona, D. S. Montero, I. Pérez, P. C. Lallana y F. M. A. Al-Zubaidi, «Power over Fiber in Radio over Fiber Systems in 5G Scenarios,» de *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Angers, France, 2019.
- [42] A. O. Mufutau, F. P. Guiomar, M. .. Fernandes, A. Lorences-Riesgo, A. Oliveira y P. P. Monteiro, «Demonstration of a hybrid optical fiber-wireless 5G fronthaul coexisting with end-to-end 4G networks,» *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, n° 3, pp. 72-78, 2020.
- [43] Mario Alberto Hernández-Flores, Miguel Cervantes-Vázquez, David López-Mata, Kevin Guillermo Miceli-Ruiz, Irving Rendón-Salgado, Mauricio Guarneros-Lozano, José Bernardo Rosas-Fernández, Daniel Enrique Ceballos-Herrera, Víctor Rangel-Licea, Ramón Gutiérrez-Castrejón, "Analysis of an active and passive optical fronthaul with dense wavelength division multiplexing for coexisting 4G/5G cloud radio access network architectures based on software defined radio," *Opt. Eng.* 61(10), 108103 (2022), doi: 10.1117/1.OE.61.10.108103.

# Apéndice 1

## Configuración inicial del PL-1000TE

Antes de operar el PL-1000TE en una red y hacer que transmita tráfico, es necesario realizar algunas configuraciones preliminares para establecer los parámetros y acondicionar al equipo PL-1000TE con el diseño de la red, lo cual permite una convergencia entre las necesidades de la red y el funcionamiento del equipo óptico.

El equipo óptico PL-1000TE cuenta con un gestor, el cual permite el acceso para la modificación y monitoreo de la red y el equipo en general. El PL-1000TE tiene como herramienta de administración una aplicación web como GUI (Graphic Unit Interface) y asimismo cuenta con acceso a través de un CLI (Command Line Interface).

## Acceso al gestor de administración

El primer paso para la utilización del PL-1000TE es realizar la configuración preliminar, para la cual es necesario conocer el acceso al gestor de administración. En el PL-1000TE existen dos formas diferentes de acceder. Una de ellas es mediante el CLI a través de un conector serial y la segunda es por la aplicación web a través de un cable Ethernet.

Para este propósito el PL-1000TE cuenta con el puerto CONTROL, el cual es un conector hembra tipo D de 9 pines con interfaz DCE asíncrono RS-232. Además de contar con un puerto LAN compatible con cables para Ethernet con conectores RJ45. La Figura A.1 muestra los puertos dedicados para la gestión del PL-1000TE

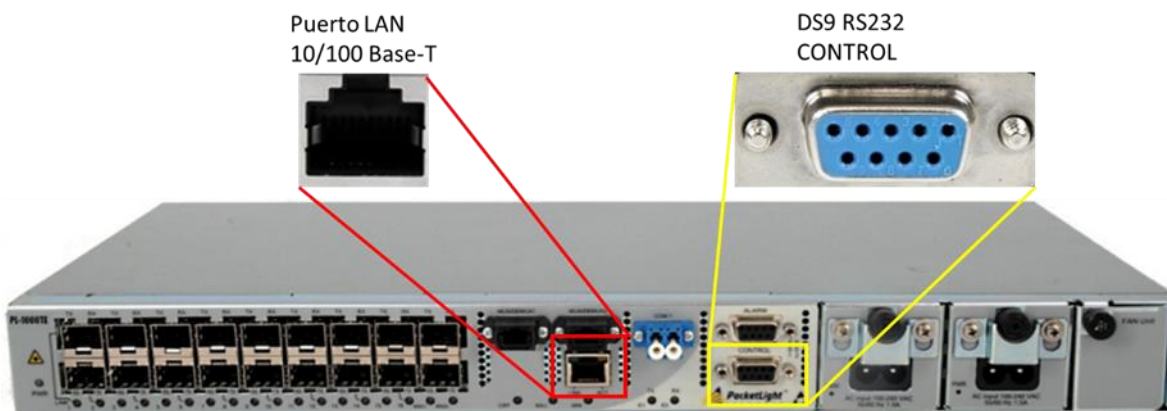


Figura A.1 Puertos de gestión en el PL-1000TE.

## **Acceso al CLI**

Para ingresar al CLI es necesario contar con un cliente SSH o Telnet. El cliente se debe encontrar alojado en el PC que gestionará al PL-1000TE. La conexión para ingresar al CLI es a través del puerto CONTROL. El cliente debe tener la siguiente configuración:

- 9600 kbps
- 1 bit de inicio
- 8 bits de datos
- 1 bit de detención
- Sin paridad
- Full-dúplex
- Control de flujo desactivado
- ECHO desactivado

Al ser un puerto serial RS232 es necesario contar con un PC con un puerto RS232 o por el contrario con un adaptador RS232 a USB y un respectivo controlador que permita a la PC poder reconocer los puertos con adaptadores del RS232. Como los puertos RS232 son prácticamente inexistentes en las PC actuales. Se optó por la utilización del adaptador con su respectivo controlador.

A continuación, se menciona una lista de los materiales utilizados para tener acceso al CLI del PL-1000TE:

- PL-1000TE
- Cable RS232 con conectores DB9
- Adaptador RS232 a USB
- PC con cliente Telnet o SSH y controlador RS232

## **Procedimiento de acceso al CLI**

Para que la PC pueda ingresar de manera exitosa hacia el CLI del PL-1000TE, es necesario cargarle un controlador RS232 e instalarle el cliente Telnet o SSH. Asimismo, el PL-1000TE debe de estar instalado en un espacio adecuado, con las condiciones de alimentación eléctrica necesarias, así como un espacio con dimensiones convenientes y con un ambiente con temperatura aceptable para el PL-1000TE. Se conectó el cable serial con el adaptador a USB. El conector USB va hacia la PC y el conector DB9 va hacia el PL-1000TE, como se muestra en la Figura A.2.

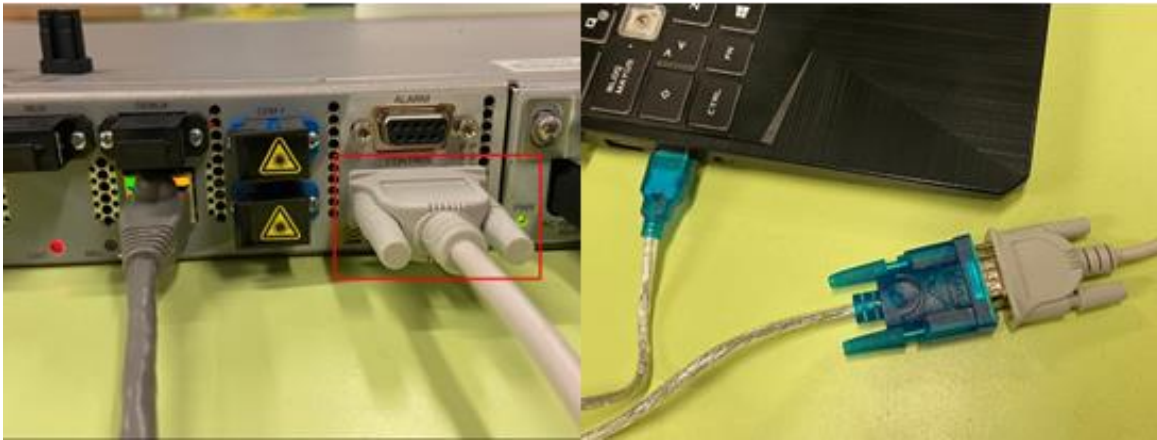


Figura A.2 Conexiones de la PC al PL-1000TE a través del puerto CONTROL.

Se utilizó PuTTY como cliente para ingresar al CLI del PL-1000TE.

La configuración de la terminal se realizó con las especificaciones descritas anteriormente.

La Figura A.3 muestra la pantalla de configuración del PuTTY. Una vez configurada la terminal, se seleccionó el botón Open.

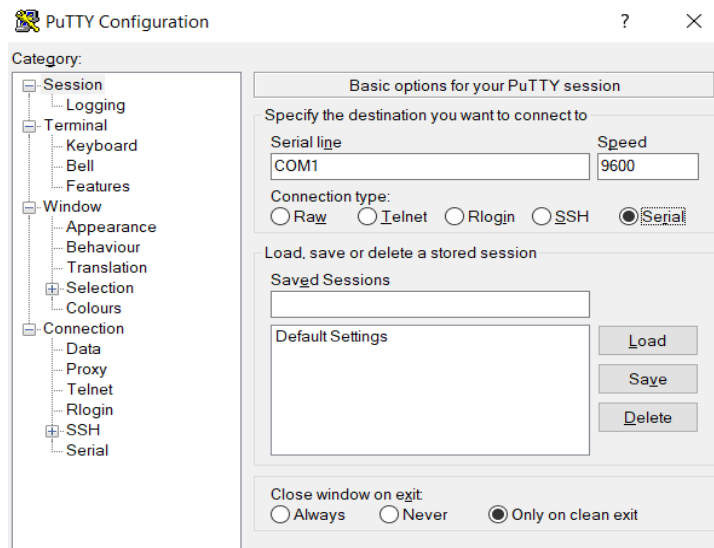


Figura A.3 Configuración básica en PuTTY.

Posterior a esto, se desplegó una pantalla, la cual es el CLI del PL-1000TE. En esta nueva pestaña se podrán realizar las configuraciones necesarias para adaptar al PL-1000TE según las especificaciones del diseño de la red. Para habilitar el acceso total al sistema PL-1000TE a través del CLI es necesario ingresar al perfil del administrador.

Se escribió el comando: *login*; para ingresar al perfil del administrador. El acceso está determinado por el usuario: *admin* y la contraseña: *admin*. La Figura A.4 muestra el ingreso por la terminal del PL-1000TE.



```
PL-1000TE Crypto>:0.0.0.0>>login
User: admin
Password:
0x20f46320 (tShell0): <108327> ----- EVENT User admin logged in (0)
PL-1000TE Crypto>:192.192.192.1>>0x2114c818 (tAM): <108338> ----- ERROR TRAP
P SYSTEM System Event Event Log
in/Logout Login admin CLI
PL-1000TE Crypto>:192.192.192.1>>0x2114c818 (tAM): <112619> ----- ERROR TRAP ETHERNET Link Down Event
0x2114c818 (tAM): <115019> ----- ERROR TRAP ETHERNET Link Up Event
```

*Figura A.4 Terminal después de ingresar como administrador en el PL-1000TE.*

Con el ingreso del comando login, el usuario y la contraseña, la CLI del PL-1000TE está preparada para aceptar comandos de gestión en el PL-1000TE.

### **Acceso a la aplicación web**

Para tener acceso a la aplicación web de gestión del PL-1000TE es necesario tener un algunos de los siguientes navegadores web:

- Microsoft® Internet Explorer® versión 8 o superior
- Mozilla® Firefox® versión 7 o superior
- Google Chrome™ versión 15 o superior

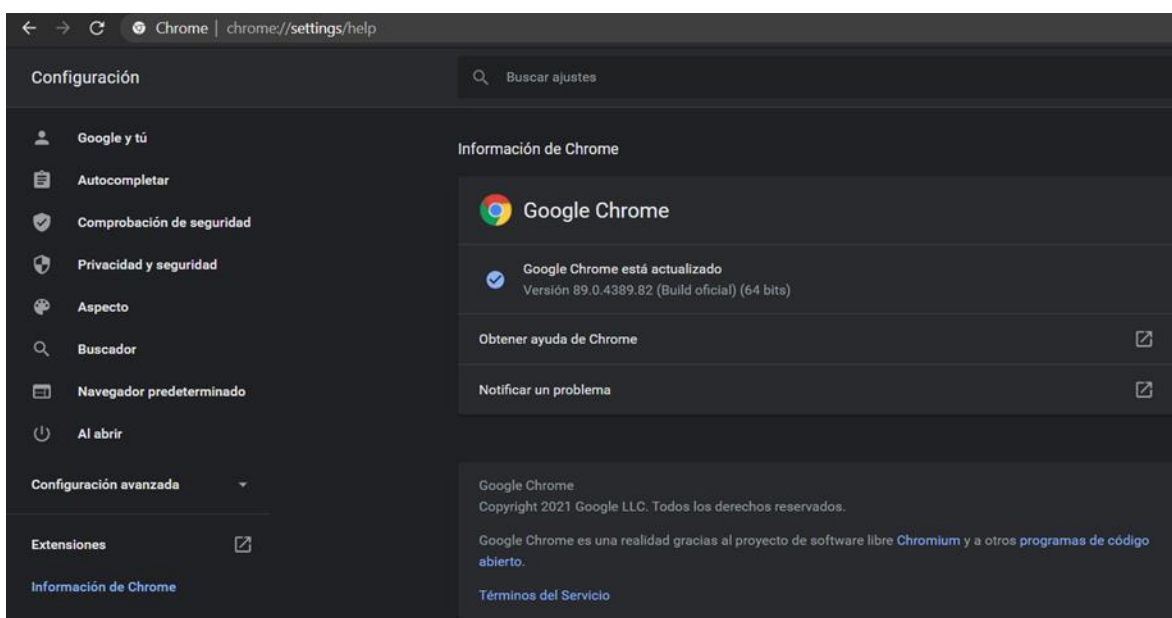
Cabe resaltar que las PC actuales ya no cuentan con Internet Explorer®, sino Microsoft Edge®. Sin embargo, este último se considera una versión superior de Internet Explorer®. Además de que algunas PC carecen del puerto LAN Ethernet, por lo que, en esos casos será necesario un adaptador LAN Ethernet a USB. En particular se optará por la opción con PC con puertos LAN Ethernet para conectores RJ45.

Material para acceso a la aplicación web

- PL-1000TE
- Cable LAN Ethernet con conectores RJ45
- PC con navegador web

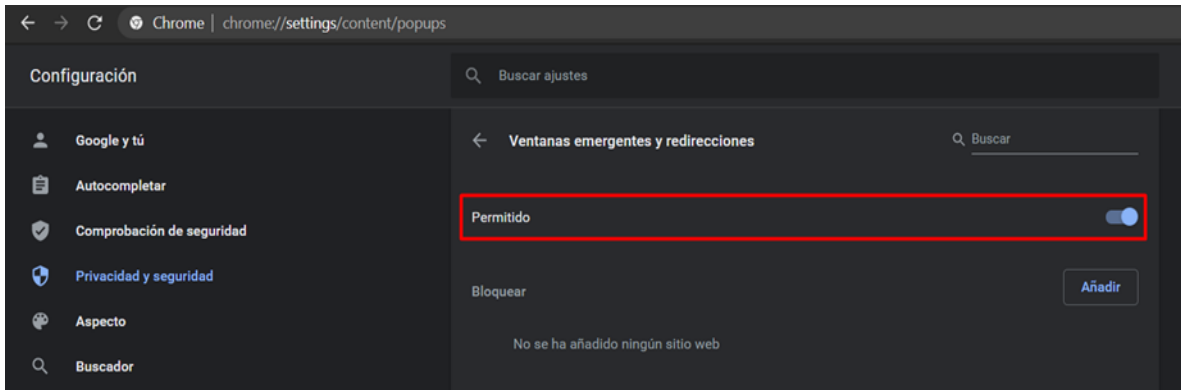
## Procedimiento de acceso a la aplicación web

Antes de ingresar a la aplicación web es necesario verificar la versión y preparar el entorno del navegador para que se habiliten todas las herramientas de la aplicación web. En este caso en particular se eligió a Google Chrome TM como navegador que desplegará a la aplicación web del PL-1000TE. En la barra de navegación se tecleó: `chrome://settings/help` para comprobar la versión. La Figura A.5 muestra la ventana de información, donde se muestra la versión del navegador.



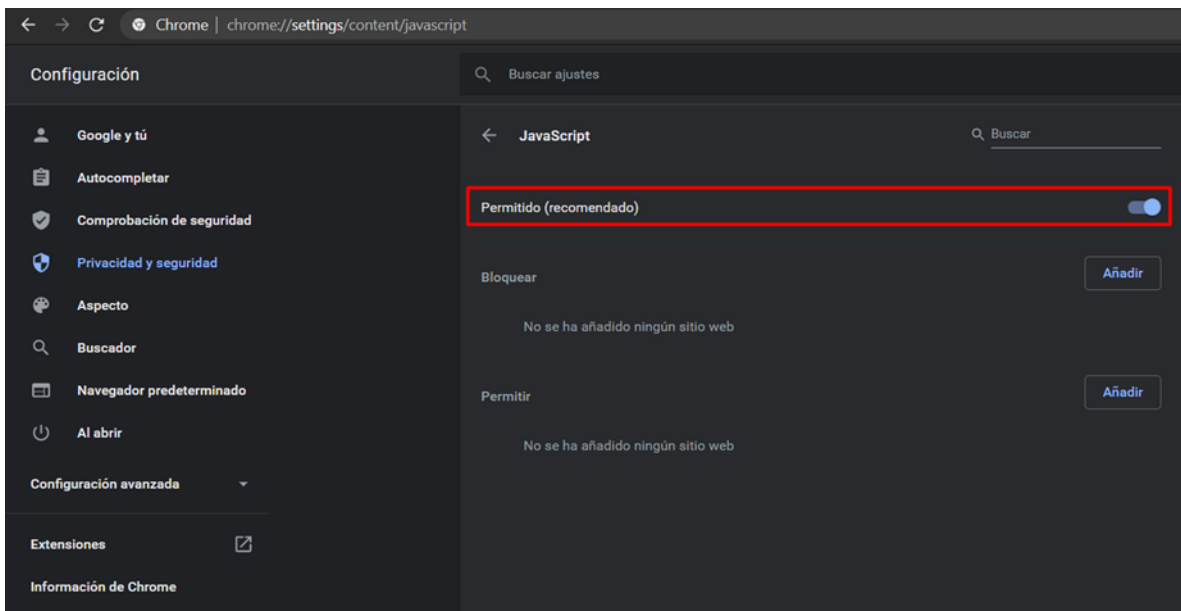
*Figura A.5 Verificación de la versión del navegador.*

En caso de tener una versión inferior a la solicitada, se tendrá que requerir una actualización del navegador. También se debe de desactivar cualquier software de bloqueo de ventanas emergentes o en su caso, habilitar esta opción en el navegador. En la barra de navegación se tecleó: `chrome://settings/content/popups` para habilitar las ventanas emergentes; ya que la aplicación web funciona por medio de ventanas emergentes. La Figura A.6 muestra una configuración de habilitar ventanas emergentes.



*Figura A.6 Ventanas emergentes permitidas en el navegador.*

Como última preparación para un entorno completo en el navegador es necesario habilitar JavaScript. En la barra de navegación se tecleó: `chrome://settings/content/javascript` y se habilitará JavaScript en el navegador. La Figura A.7 muestra la configuración de JavaScript habilitado en el navegador.

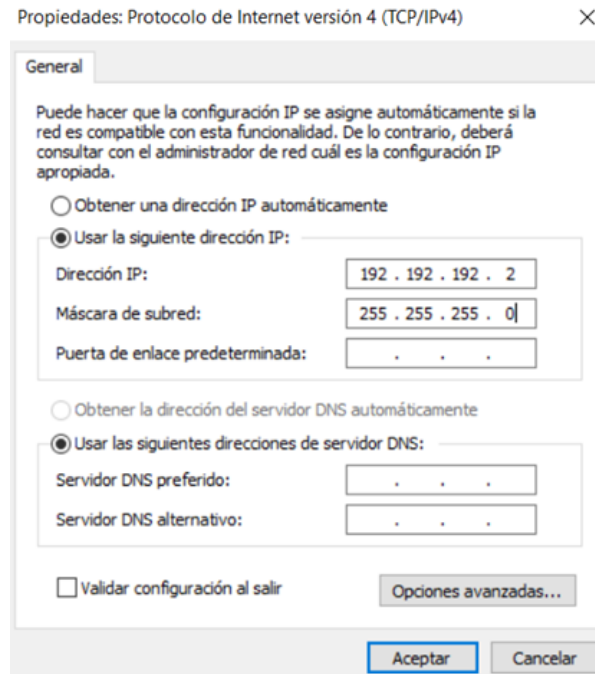


*Figura A.7 Habilitación de JavaScript en el navegador.*

Con estas tres configuraciones en el navegador, la aplicación web podrá ser capaz de funcionar de manera eficiente para la gestión del PL-1000TE.

El PL-1000TE tiene en el puerto LAN predeterminada la dirección IP: 192.192.192.1 con máscara: 255.255.255.0; se puede utilizar cualquier dirección de host dentro de esa subred para ingresar al PL-1000TE o también se le puede cambiar según las necesidades del usuario. En este caso en particular se mantendrá la dirección predeterminada en el PL-1000TE.

- En la PC de gestión se dirigirá a Panel de control → Redes e internet → Centro de redes y recursos compartidos → Cambiar configuración del adaptador → Ethernet → Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)
- Se cambió la configuración de IPv4 de DHCP a una dirección IP estática dentro de la subred. En este caso se configuró a la dirección 192.192.192.2 con máscara 255.255.255.0. La Figura A.8 muestra la configuración IP para que la PC pueda lograr comunicación con el PL-1000TE.



*Figura A.8 Configuración de dirección IP.*

Con el navegador acondicionado para la aplicación web y con la configuración IP, la PC de gestión ya se encuentra preparada para el despliegue del gestor interno del PL-1000TE.

- Se conectó el cable LAN Ethernet con conectores RJ45 tanto en la PC como en el PL-1000TE como se ve en la Figura A.9.



Figura A.9 Conexiones de PC al PL-1000TE a través del puerto LAN.

- Con el cable LAN conectado entre la PC y el PL-1000TE, se tecleó en la barra del navegador: 192.192.192.1 y se presionó la tecla “Enter”.

Se desplegará la ventana de ingreso de usuarios. Para poder gestionar los parámetros de funcionamiento del PL-1000TE es necesario tener permisos de administrador, por lo que se ingresará a este perfil. El acceso está determinado por el usuario: *admin* y la contraseña: *admin*. La Figura A.10 muestra la ventana de ingreso al GUI del PL-1000TE.



Figura A.10 Ventana de ingreso a la aplicación web del PL-1000TE.

Con el acceso como administrador al PL-1000TE. El usuario está listo para la gestión completa del PL-1000TE.