



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES ÓPTICAS DE ACCESO CON BAJA LATENCIA

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros de Sistemas

**AUTORES: EDWIN ANDRÉS LEIME CAJAMARCA
JOSÉ MANUEL ROMERO GUALÁN**

TUTOR: JOSÉ LUIS AGUAYO MORALES

Quito – Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros Edwin Andrés Leime Cajamarca con documento de identificación N° 1723177919 y José Manuel Romero Gualán con documento de identificación N° 1719359885, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 26 de julio del año 2023

Atentamente,



Edwin Andrés Leime Cajamarca
1723177919



José Manuel Romero Gualán
1719359885

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros Edwin Andrés Leime Cajamarca con documento de identificación N° 1723177919 y José Manuel Romero Gualán con documento de identificación N° 1719359885, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del artículo académico: “Estado del arte de las redes ópticas de acceso con baja latencia”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros de Sistemas, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de julio del año 2023

Atentamente,



Edwin Andrés Leime Cajamarca
1723177919



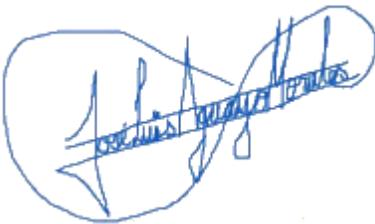
José Manuel Romero Gualán
1719359885

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Luis Aguayo Morales con documento de identificación N° 1709562597, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES ÓPTICAS DE ACCESO CON BAJA LATENCIA, realizado por Edwin Andrés Leime Cajamarca con documento de identificación N° 1723177919 y José Manuel Romero Gualán con documento de identificación N° 1719359885, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de julio del año 2023

Atentamente,



Ing. José Luis Aguayo Morales, Msc
1709562597

ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES ÓPTICAS DE ACCESO CON BAJA LATENCIA

STATE OF THE ART OF LOW LATENCY OPTICAL ACCESS NETWORKS

Edwin Leime¹, José Romero², José Aguayo³

Resumen - La incursión en el internet de las cosas IoT, inteligencia artificial, entre otros, han llevado a buscar nuevas soluciones en cuanto a tecnologías de acceso en telecomunicaciones, puesto que su infraestructura debe también de evolucionar acorde a las necesidades que requieran los usuarios, basándose en parámetros como latencia, eficiencia, ancho de banda, etc. Lo antes mencionado es la base sobre la cual se ha trabajado en la presente investigación, mediante la elaboración de un estado del arte de las redes ópticas de acceso con baja latencia. Primero, se empezó por la extracción de la información necesaria de diferentes repositorios electrónicos para cumplir con el método PICOC. Una posible solución es el empleo de una red Fronthauling óptica junto a red de acceso de radio 5G. Se encontró, además, que la arquitectura Radio sobre Fibra (RoF) ofrece la ventaja de que el mantenimiento de las estaciones base representa un coste significativamente bajo. Adicional también se presentan la tecnología Fi-Wi, la misma que se conforma de una red WDM-PON conjuntamente con la tecnología inalámbrica OFDM, con el fin de obtener una red con mayores beneficios propios de emplear fibra óptica más una red de radio.

Palabras clave – C-RAN, Fi-Wi, Fronthaul, OFDM, RoF.

Abstract - The incursion into the Internet of Things IoT, artificial intelligence, among others, have led to the search for new solutions in terms of telecommunications access technologies, since its infrastructure must also evolve according to the needs required by users, based on parameters such as latency, efficiency, bandwidth, etc. The aforementioned is the basis on which work has been done in this research, through the development of a state of the art of low latency optical access networks. First, it began by extracting the necessary information from different electronic repositories to comply with the PICOC method. One possible solution is the use of an optical Fronthauling network together with a 5G radio access network. It was also found that the Radio over Fiber (RoF) architecture offers the advantage that the maintenance of the base stations represents a significantly low cost. Additionally, Fi-Wi technology is also presented, which is made up of a WDM-PON network together with OFDM wireless technology, in order to obtain a network with greater benefits of using fiber optics plus a radio network.

Keywords – C-RAN, FI-WI, Fronthaul, OFDM, RoF.

¹Estudiante de Ingeniería de Sistemas – Universidad Politécnica Salesiana, Egresado – UPS – Sede Quito Autor para correspondencia: eleime@est.ups.edu.ec

²Estudiante de Ingeniería de Sistemas – Universidad Politécnica Salesiana, Egresado – UPS – Sede Quito Autor para correspondencia: jromerog@est.ups.edu.ec

³Magister en Redes de Comunicaciones y Ciberseguridad, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Profesor de Ingeniería en Sistemas– UPS – Sede Quito. Email: jaguayo@ups.edu.ec

1. Introducción

La tecnología, actualmente ha llegado a ser imprescindible en distintos ámbitos de la vida cotidiana, que evoluciona acorde a las exigencias y requerimientos de los usuarios.

Como consecuencia, la infraestructura de cualquier tipo de red tiene, también debe estar en constante evolución, con el fin de adaptar equipos sofisticados que soporten la cantidad de tráfico que las aplicaciones que se deseen manejar, pero este cambio no debe ser brusco, sino más bien debería ser imperceptible para el usuario, con el fin de no tener que recurrir al cambio de equipos terminales o incurrir en costos más elevados [1].

En las últimas décadas, los servicios punto-a-punto (P2P), tales como intercambio de archivos, video de alta definición, redes sociales y atención médica en línea, se han incrementado considerablemente llegando a ocupar mayor capacidad del tráfico total dentro de una red [2]. Es por esto, que representa un gran desafío habilitar la red con la capacidad de manejar un gran tráfico con el fin de mejorar el arqueo de intercambio de información en la red empleada.

Alrededor del año de 1840, diez años después que comenzara la era moderna de las comunicaciones, los físicos Collodon Daniel y Babinet Jacques, aclararon que la luz se transmitía a través flujo de agua que salía de una fuente.

A mediados del siglo XX, exactamente en el año 1960 Theodore Maiman pone fin a un periodo de casi cien años de dominio de los sistemas de comunicación eléctricos y analógicos, mediante su demostración con el primer láser, cuyo propósito era el de contar con una luz coherente e intensa, con lo que surge un nuevo sistema de comunicación, el mismo que en 1966, comenzó a emplear las primeras fibras

ópticas, sin embargo, éstas presentaban una atenuación de señal exageradamente alta, en el orden de 1dB/m, lo cual las tornó imprácticas para aplicaciones reales. El gran avance se produjo en 1970, cuando D. Keck, P. Schultz y R. Maurer construyeron con éxito la primera fibra óptica (FO) de baja atenuación a lo largo de varios cientos de metros.

El advenimiento de fibras ópticas de baja atenuación y fuentes de luz adecuadas ha promovido grandiosamente el acrecentamiento de estructuras de comunicación ópticas de alto volumen, y todavía se está mejorando hasta el día de hoy, y se han logrado buenos resultados en el desarrollo de este método de transmisión. En general, las redes de telecomunicaciones suelen dividirse jerárquicamente en diferentes capas según sus elementos técnicos y funciones dentro de la red, tales como: parte de servicio, núcleo (core), capas de acceso y área de usuario.

Actualmente, el empleo de la fibra óptica es la medida más óptima en redes de telecomunicaciones, ya sea a nivel de transporte (cables submarinos) o en redes de acceso como FTTH. Servicios como el streaming, videoconferencias, VoIP, pueden ser transmitidas, mediante la fibra óptica, con su ancho de banda y bajas latencias por distancia permite cumplir con las necesidades de transporte de datos [4].

El empleo de la tecnología GPON mediante la implementación de fibra óptica DROP y splitter ópticos pasivos permiten la optimización de estos recursos, los cuales combinados a una multiplexación de onda (λ) que se realiza en traslado y recepción, hacen que solo sea necesario un hilo de fibra para lograr una transmisión de datos de alta capacidad usando un solo hilo de fibra [5].

Con lo expresado, y dado al incremento de la demanda de la fibra óptica para la construcción

de redes de acceso, diversos investigadores han propuesto soluciones de implementación de nuevas tecnologías en conjunto con la fibra óptica de tal manera que ayuden a suplir la alta demanda de usuarios y aplicaciones, como lo es la inmiscuían de la red 5G y hasta 6G ya en algunos países [4].

5G presenta un cambio extremo en relación a 4G, que consiste en Network Slicing (Division de Red), puesto que así cada dispositivo utiliza las necesidades dependiendo del servicio, es decir, conociendo la amplia gama de aplicaciones cada uno de ellos tiene características propias que crean sus necesidades, como latencia, BW, etc. Dicho esto, 5G facilita aumentar la eficiencia. de la red y expandir las actividades comerciales en la misma en la propia infraestructura física, todo ello logrado a través de la virtualización de la red [6].

Una vez revisada a fondo la información necesaria se realiza un Systematic Mapping o Mapeo Sistemático (S_M) mediante la aplicación de una S_L_R o Revisión Sistemática de la Lectura [7].

La investigación se la estructuró de la siguiente manera: i) Se procede a realizar S_M y S_L_R que se basa en el tema principal de baja latencia en redes ópticas. ii) Se continua con el estudio de redes C-RAN, luego los diferentes estándares de las tecnologías de acceso PON con sus características sobresalientes y, además, se presenta la tecnología de fronthaul en redes 4G y 5G. iii) Acabado el punto anterior, se extraen las principales ventajas del empleo de una red 5G con un fronthaul óptico en cuanto a términos de latencia para los servicios requeridos por el usuario. iv) Resaltar los aspectos sobresalientes de las redes de acceso ópticas orientadas a redes 5G.

2. Metodología

Durante la ejecución del presente trabajo se emplearon las metodologías expresadas anteriormente S_M y S_L_R. Mediante el S_M se logra obtener una clasificación u orden las redes ópticas de baja latencia, mientras que S_L_R permite proyectar, elaborar y obtener la S_M, con el fin de obtener mejores resultados acerca de investigaciones realizadas en la última década. Dentro de la investigación efectuada, el uso de S_M y S_L_R se organizó mediante fases, descritas a continuación: La primera fase presenta los objetivos de las normas de preferencia. Seguidamente, en la siguiente fase, se recopilan los contenidos más importantes del trabajo a realizar, la misma que se la divide en dos sub fases. Por último, en la tercera fase se presenta el estudio realizado clasificándolo en distintas categorías con el fin de entender la literatura, sacar los resultados y así consumir con el S_M y S_L_R.

A. Fase 1

El método PICOC, que se utilizó para describir los términos de búsqueda se muestra en la Tabla I, el mismo que se empleó para recuperar artículos relacionados con diferentes estudios de redes ópticas de acceso de baja latencia.

TABLA I
METODO PICOC

Population (P): ¿Quién?	Redes ópticas de acceso de baja latencia
Intervention (I): ¿Qué? ¿Cómo?	Clasificación de las redes ópticas de acceso
Comparison (C): ¿Con qué comparar?	Estudios que realicen el estudio de redes ópticas de baja latencia
Outcomes (O): ¿Qué se busca alcanzar?	Ventajas y limitaciones de los diferentes redes ópticas de acceso
Context (C): ¿Bajo qué circunstancias?	Revisar estudios existentes sobre las redes ópticas de acceso

Una vez establecidos los parámetros del método PICOC, se procede a definir la terminología que se empleara para la elaboración de las cadenas de búsquedas, lo cual se puede observar en la Tabla 2. Expresiones booleanas como *AND* u

OR se emplearon en la presente investigación (Access Network OR Optical Networks OR Wireless Networks OR RoF) AND (PON OR GPON OR FTTH) AND (Latency OR Low Latency OR BW, OR Fronthauling).

TABLA II
TÉRMINOS PARA CADENA DE BUSQUEDA

Terminología	Semejantes
Access Network	Optical Networks, Wireless Network, RoF
PON	GPON, FTTH
Latency	Low Latency, BW, Fronthauling

1) *Criterios de selección de estudios:* Debido a la alta cantidad de información existente, se usaron dos criterios para realizar una selección reducida de los estudios más relevantes, estos criterios son: de aceptación y rechazo de las S_M y S_L_R

- Criterios de rechazo de la publicación: Se excluyen todos los artículos que no estén en inglés, artículos con menos de cinco páginas, artículos duplicados de conferencias y revistas, artículos no relacionados con redes de acceso.
- Criterios de aceptación de la publicación: Se propusieron variedad de repositorios electrónicos con el fin de alcanzar los criterios de búsqueda, los de más relevancia se muestran en la Tabla 3, donde se buscó investigaciones de evidencia acerca redes ópticas de acceso con baja latencia.

TABLA III
REPOSITORIOS UTILIZADOS

Repositorio	Cadena de Búsqueda	Type	Filter 1	Filter 2	Filter 3
IEEE	("Access Network" OR "Optical Networks" OR "Wireless Networks" OR "RoF") AND ("PON" OR "GPON" OR "FTTH") AND ("Latency" OR "Low Latency OR "BW", OR "Fronthauling").	Revistas	1115	560	30
SCOPUS	("Access Network" OR "Optical Networks" OR "Wireless Networks" OR "RoF")	Revistas	304	109	10
UPS	("Access Network" OR "Optical Networks" OR "Wireless Networks" OR "RoF") AND ("PON" OR "GPON" OR "FTTH") AND ("Latency" OR "Low Latency OR "BW", OR "Fronthauling").	Tesis	1346	150	15
TOTAL			2765	819	55

B. Fase_2

1) *Formulación de preguntas para la investigación:* Con el propósito de obtener un estado de arte novedoso y reciente de redes ópticas de baja latencia se definen las siguientes preguntas para el S_M_P_# y (S_L_R_P_#):

- S_M_P_1: ¿Cómo se clasifican las redes ópticas de baja latencia?
- S_M_P_2: ¿Cuáles son las investigaciones actuales de redes ópticas de baja latencia?
- S_L_R_P_1: ¿Qué ventajas ofrece la evolución de GPON?
- S_L_R_P_2: ¿Qué importancia tiene dentro del desarrollo de redes de acceso el empleo de un Fronthauling eficaz?
- S_L_R_P_3: ¿Cuáles son las principales diferencias existentes entre d-RoF y A-RoF?
- S_L_R_P_4: ¿Qué beneficios presenta el empleo de una red Fronthaul basada en WDM??
- S_L_R_P_5: ¿Existe alguna otra tecnología que brinde red de acceso de baja latencia?

2) *Estrategias de Indagación:* En la Tabla III, se puede observar que los repositorios con mayor información relevante son 3, en los cuales se emplearon las cadenas de texto antes mencionadas con el fin de buscar un número de artículos necesarios para efectuar el S_M y S_L_R. Se aplicaron 3 filtros para conseguir información precisa. En el primero se ensalzaron 2765 estudios. Segundo, se empleó un filtro de búsqueda de hasta 10 años atrás mediante el software EndNote x9, donde el número de artículos y tesis se resumieron a 819 estudios. Posteriormente en el tercer filtro, se encasillaron los temas más relevantes, los cuales fueron revisados uno a uno, quedando finalmente 55 estudios.

C. Fase_3

Con el propósito de desarrollo del presente artículo académico, se plantea el siguiente marco teórico, con el fin de comprender ciertos términos empleados en las diferentes tipologías de redes de acceso (AN) y así entender los resultados de la investigación.

1) *CRAN: Red de Acceso de Radio Centralizado*

Las redes C-RAN se diseñaron y desplegaron con el fin de solventar los gastos en CAPEX y OPEX, en las redes 4G LTE y su coexistencia con redes 2G y 3G. C-RAN surgen para prevenir los costos excesivos del despliegue las BS (estaciones base)[8].

Esta modificación de la RAN habitual, admite distintos estándares y protocolos que permiten que se acoplen con nuevas tecnologías con el fin de mejorar el acceso mediante el rendimiento, capacidad y latencia.

Las redes C-RAN se encuentran definidas por dos partes sobresalientes, la Unidad de Banda Base (BBU) y las Estaciones de Radio Remotas

(RRH) mediante un enlace denominado fronthaul como se muestra en la Figura 1.

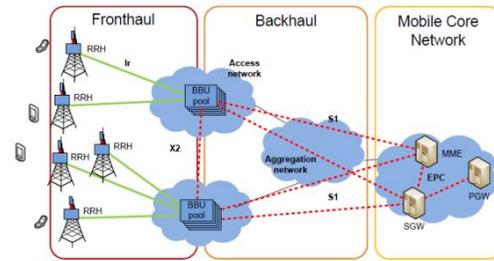


Fig. 1. Arquitectura C-RAN

Las C-RAN pioneras se implementaron en las redes 4G LTE-Advanced y ofrecían velocidad de transmisión entre 100 Mbps y 1Gbps.

C-RAN cuenta con la capacidad de adaptarse a distintas técnicas, como codificación, gestión de energía, entre otros, para de tal manera mejorar la utilidad de la red y de esta manera habituarse a las nuevas redes 5G.

Cabe recalcar, que la implementación de C-RAN incrementa elevadamente el envío de datos hacia la nube, de casi 50 veces más de lo que se realiza actualmente en los entre RRU y BBU.

2) *Redes de acceso basadas en fibra óptica*

Dado que la actual demanda de ancho de banda (BW) está aumentando, se debe optar por una red de acceso de mayor capacidad con el fin de suplir estas necesidades. Es así, que dichos requerimientos solo pueden ser cumplidos por una red de acceso que utilice fibra óptica como medio de transmisión, debido a que la fibra óptica tiene varias utilidades sobre las redes de acceso tradicionales basadas en cobre, tales como: alto BW, baja latencia, mayor distancia de transmisión, mayor seguridad, etc.

Estas redes ópticas de acceso se dividen en dos categorías: AON (Red Óptica Activa) y PON (Red Óptica Pasiva). Para el presente estudio se enfocará en las redes PON ya que son las más

utilizadas por las empresas de telecomunicaciones en el país.

3) Redes PON

Una red PON está básicamente conformada por 3 elementos principales los mismos que son:

- **OLT:** Es el terminal de línea óptica, un elemento activo que distribuye el servicio otorgado por el proveedor, cuya función es el de controlar y gestionar el flujo de información que se transmite tanto en el sentido de bajada (downlink) y el de subida (uplink).

- **Splitters Ópticos:** Son elementos pasivos que distribuyen el haz de luz de una fibra para todos los usuarios que se encuentren en un mismo puerto de la OLT.

- **ONT/ONU:** La Unidad de Red Óptica es un elemento activo ubicado en el cliente final, cuya función es la de recibir los datos enviados desde la OLT (downlink) o mediante encapsulación enviar la información hacia la LT (uplink).

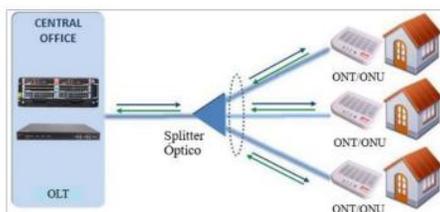


Fig. 2. Red PON: Elementos

Fibra Óptica: Parámetros

En los últimos años, el medio de transmisión, fibra óptica, se convirtió en el más popular e importante en las redes metropolitanas y de acceso. Incluso los servicios móviles han promovido este medio más aún en las redes de acceso por radio, debido al despliegue de 5G, en las que se requiere BW con una latencia baja, cuyo fin es brindar una mejor experiencia al usuario [9].

Debido a que la fibra óptica es el medio de transmisión que se estudiará a lo largo de este artículo, se presentan ciertos parámetros de importancia.

- **Ventanas de transmisión:** La transmisión de los pulsos de luz dentro de una FO se la realiza en la región infrarroja del espectro electromagnético, abarcando longitudes de onda λ en el rango de los 750nm a 1675 nm [10] denominadas ventanas de transmisión existiendo unas con menos atenuación que otras, como así mismo, la ITU las agrupa mediante bandas de operación

TABLA IV
VENTANAS Y BANDAS DE TRANSMISIÓN

Ventana Tx	Banda Tx (ITU)	Rango λ (nm)	λ Central (nm)	Atenuación (dB/km)
1	-	820-880	850	2.50
2	O	1260-1360	1310	0.34
-	E	1360-1460	-	0.31
5	S	1460-1530	1470	0.25
3	C	1530-1565	1550	0.20
4	L	1565-1625	1625	0.22
-	U	1625-1675	-	-

- **Dispersión de la FO:** Es el fenómeno que limita la capacidad máxima de transmisión por unidad de longitud. Esta dispersión también produce que los pulsos ópticos lleguen a superponerse provocando ISI (interferencia entre símbolos), lo cual lógicamente también llega a afectar la velocidad de Tx. En las presentes redes PON se utilizarán fibras monomodos SM, las cuales experimentan dos tipos de dispersiones, la cromática y la de polarización.

4) Estándares PON

La familia de estándares PON emplean un término común para diferenciar los diferentes estándares, xPON, y la vez que todas las operadoras deben respetar estas recomendaciones a fin de garantizar la interoperabilidad.

Los estándares xPON, por sus siglas en inglés, de mayor relevancia son: APON, BPON,

GPON, 10G-EPON, XGPON, NGPON2, EPON extendido, XGS-PON, WDM PON.

- **Asynchronous Transfer Mode PON (APON):** Es una red pasiva pionera, aprobada por la ITU-T en la recomendación G.983, basada en ATM (Asynchronous Transfer Mode), donde los datos son transmitidos en paquetes que contienen la ONU de destino como encabezado.

- **Broadband Passive Optical Network (BPON):** se basa en APON bajo la misma recomendación, surge para servicios de BW como la difusión de video y Ethernet de alta velocidad, con conductos simétricos de hasta 622 Mbps y asimétricos de 622 Mbps para DL y 155 Mbps en UL.

- **Ethernet PON (EPON):** Este estándar se encuentra definido por la recomendación IEEE 802.3ah, y es aquel que proporcionó los conceptos para la retribución de ancho de banda dinámico, permitiendo conexiones punto a punto en longitudes de onda de 1490 nm en DL y 1310 en UL y velocidades de transmisión de 1.25 Gbps.

- **Gigabit Passive Optical Networks (GPON):** es una evolución de la infraestructura PON inicialmente centrada en la capa de acceso. Soporta la mayoría de tecnologías de multiplexación, tales como: División por multiplexación en tiempo (TDM), transporte de modo asíncrono (ATM), ethernet entre otras, capaces de soportar las soluciones triple-play en su infraestructura FTTH (Fiber to the Home”). GPON soporta velocidades simétricas de 1.2 Gbps o asimétricas de 2.4Gbps en DL y 1.2Gbps en UL [11].

La arquitectura de GPON es en modo árbol, como se muestra en la Figura 3 y se compone básicamente de 5 partes. El tráfico de *Uplink* pasa por un switch de agregación y se enmascara en la OLT para distribuirse a cada

ONU/ONT que lo transforman para llegar al usuario. La OLT, se puede considerar como el cerebro de esta comunicación, puesto que se encarga de la difusión, encolamiento y distribución de BW para cada usuario terminal. Se pueden encontrar diferentes diseños de redes GPON, como A, B+, C y C+, en donde la clase B+ es la más empleada permitiendo alcanzar una capacidad de hasta 64 equipos en una distancia de 20 km.

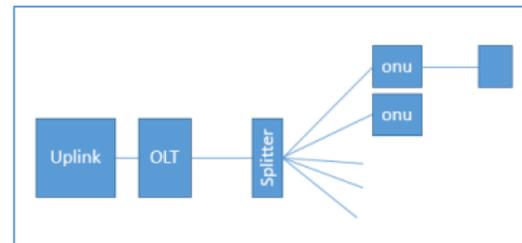


Fig. 2. Arquitectura GPON básica

La comunicación en esta infraestructura, al emplear una sola fibra, se da por WDM (multiplexación por longitud de onda) (WDM), así para UL se emplea un λ de 1310 nm mientras que en DL se usa de 1490 nm un λ de 1550 nm, se emplea exclusivamente para la difusión de video en este tipo de enlaces, concebido para servicios de televisión IPTV. Dependiendo del diseño de la red, la potencia a los equipos terminales resultará afectada, debido a la distancia y el empleo de splitter ópticos que posea la misma. Estos splitter son elementos pasivos, cuya función es distribuir la señal de información en broadcast a las ONT y éstas deberán filtrar el tráfico que le corresponde [12].

La encapsulación GEM consiste en generar un puerto virtual para asignar un flujo de tráfico particular, de modo que un solo puerto PON posea hasta 8 colas separadas según el tráfico enviado. GEM es el protocolo que emplea GPON para establecer esta comunicación, el mismo que se encuentra estandarizado bajo la G.984s de la ITU-T

A pesar de que el estándar GPON llegó a cubrir necesidades de ocupación de banda ancha, la aparición de nuevas aplicaciones que requieren la demanda de velocidades superiores, impulsó a la IEEE a publicar un nuevo estándar basado en 802.3av, el mismo que se le conoce como 10G-EPON capaz de permitir velocidades simétricas de 10Gbps y también de modo asimétrico con 10 Gbps en DL y 1 Gbps en UL, es llamado también NG-EPON (EPON de próxima generación). A la par, la ITU-T publica la recomendación G.987 que consta de dos opciones, una llamada XGPON1 que permite velocidad en DL de 10 Gbps y en UL de 2.5Gbps, mientras que la segunda denominada XGPON2 permitía transmitir simétricamente con 10 Gbps.

En el año 2013, la IEEE introduce el estándar 802.3bk, llamado Extended EPON PDM (Physical Medium Dependent) que presentan velocidades de transmisión variadas como 1G-EPON, 10/1G-EPON o 10/10G-EPON. Dos años más tarde, es publicada la recomendación ITU-T G.989 que ofrece TWDM mediante la combinación de TDM y WDM, llamado NGPON2 llegando a poseer velocidades de hasta 40 Gbps.

Predecesora de este estándar se tiene la recomendación ITU-T G.9807 también

conocida como XGS-PON que brinda una red XG-PON simétrica con velocidades de 10 Gbps en ambos sentidos de transmisión.

- *WDM-PON*: Las redes PON por multiplexación de división de onda, se basan en una red punto-multipunto (PtP) sin elementos activos, mediante el empleo de Array Waveguide Grating (AWG), para multiplexar/demultiplexar las longitudes de onda, de modo que las pérdidas sean más bajas que en el caso de TDM-PON lo cual lo hace óptimo para redes de largas distancias. WDM-PON se encuentra clasificada en el estándar 10GPON con velocidades de transmisión en DL de 10 Gbps y en UL de 2,5 Gbps.

- *25G WDM-PON*

Dado a la alta demanda de BW que presenta la red móvil 5G, se ha iniciado la propuesta para ahondar en la investigación de la tecnología WDM-PON de 25Gbps, donde la ITU-R se encargará de lo relacionado con la red de radio 5G, mientras que el ITU-T se encargará de los aspectos que no se relacionan al radio [13].

La Tabla 5, resume una breve comparación de las tecnologías PON existentes y sus principales características [14].

TABLA V
ARQUITECTURAS DE PON
(Tomado de [11])

TECNOLOGIA PON	ESTANDAR	ANCHO DE BANDA	LONGITUD DE ONDA DL	LONGITUD DE ONDA UL	NIVEL DE SPLITTER	DISTANCIA	COSTO	ANCHO DE BANDA USER
APON/BPON	ITU G83/FSAN	DL: 622 Mbps UL: 155/622 Mbps	1490 y 1550 nm	1310 nm	32	20 km	Low	20-40 Mbps
EPON(GEPON)	IEEE 802.3h	DL: 1.2 Gbps UL: 1.2 Gbps	1550 nm	1310 nm	32	20 km	Low	30-60 Mbps
GPON	ITU G.984	DL: 2.5 Gbps UL: 1.2 Gbps	1490 y 1550 nm	1310 nm	64	60 km	Medium	40-80 Mbps
10 GEPON	IEEE P802.3av	DL: 10 Gbps UL: 2.5 Gbps	1550 nm	1310 nm	128	10 km	High	>100 Mbps
10 GPON(XGPON)	ITU-T G.987/FSAN	DL: 10 Gbps UL: 2.5 Gbps	1577 nm	1270 nm	128	20 km	High	>100 Mbps
WDM PON	ITU G.983	1-10 Gbps ambos sentidos	Independiente por canal	Independiente por canal	16-32		Very High	1-10 Gbps

5) Fronthaul

Como se mencionó anteriormente, en una red C-RAN surge el concepto de *Fronthaul*, la misma que tiene a la FO como medio de transmisión principal y cuya función principal es la de unir la RAN conformada por los RRH y las bases BBU, como se presenta en la Figura 4.

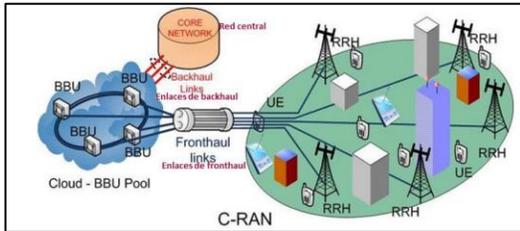


Fig. 3. Fronthaul en una red C-RAN

El Fronthaul permite la interoperabilidad entre BBU y RRH de los diferentes proveedores mediante 3 protocolos, el más importante es CPRI (Protocolo de la Interfaz de Radio Pública Común) [15], el segundo se basa en una arquitectura OBSAI y el tercero es la ORI (Interfaz de Radio Abierta).

A raíz de la aparición de CPRI, para controlar fronthaul óptico en las redes 4G, surgen 2 variantes, la primera es la red D-RoF (Radio Digital sobre Fibra), mientras que la segunda se denomina A-RoF (Radio Analógica sobre Fibra).

- *D-RoF*: Con el fin de optimizar esta variante, nace eCPRI (CPRI mejorado), que es una interfaz que acepta el protocolo ethernet que conecta al eREC (control de equipo de radio eCPRI) con la eRE (equipo de radio eCPRI) por medio de una red fronthaul. Esta interfaz descompone los protocolos de Banda Base mediante diferentes capas en base al empleo de la terminología E-UTRA):
 - RRC (Control de Recursos de radio)
 - PDCP (Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos)
 - RLC (Control de Enlace de Radio)

- MAC (Control de Acceso al Medio)
- PHY (Capa Física)

La gran ventaja que ofrece eCPRI es que, a mayor división de protocolos, es menor la tasa de Tx que se le exigirán al fronthaul. En lo que respecta a la capa física, eCPRI referencia velocidades Ethernet entre 10 a 100 Gbps.

Para que puedan interactuar el eREC y el eRE es necesario tres planos, los mismos que son: usuario, sincronización y de control. eCPRI define al primero y da referencia para definir los otros dos planos, es así que un proveedor tiene libre elección para la sincronización, ya sea por medio del protocolo PTP (precisión de tiempo), Ethernet síncrono o GPS (sistema de posicionamiento global).

La interfaz eCPRI ofrece la ventaja de integrarse con las SDN (redes definidas por software) lo cual permite controlar a la red de forma inteligente y centralizada empleando programas o software, como se presenta en [16] donde se desarrolla un módulo de procesamiento eCPRI en una red fronthaul 5G C-RAN mediante el uso de una FPGA. Sin embargo, eCPRI tiene el inconveniente de que se presentan ciertos problemas de temporización y sincronización, por lo que no existe la universalidad de esta red.

Una arquitectura de fronthaul de próxima generación eficiente en comparación con CPRI [17], es utilizar radios agregados de canal de fibra compatible con procesamiento de señal digital (DSP) para ahorrar BW.

- A-RoF

Esta tecnología es muy empleada en sistemas de antenas distribuidas, donde presentan altas tasas de transmisión en el fronthaul, llegando a obtener velocidades de eCPRI de hasta 147,4 Gbps [18]

- *Red 4G*

Las telecomunicaciones, en la última década, han experimentado una evolución continua en lo referente a las tecnologías móviles digitales. Por lo tanto, debido al crecimiento de transmisión de datos, se implementaron comunicaciones móviles 4G LTE de cuarta generación basadas en el protocolo IP.

4G LTE se introdujo por primera vez de acuerdo al estándar 3GPP Release 8, siendo la alta eficiencia espectral, alta velocidad pico, tiempo de latencia reducido, flexibilidad de frecuencia y ancho de banda [19] sus puntos fuertes, actualmente 4G LTE continúa desarrollándose con Release 14 y 15, de acuerdo a las necesidades precedentes con la aparición de nuevas tecnologías móviles.

Tres son las posibles tecnologías de transporte para una red fronthaul:

- Radio Enlaces
- Ethernet (CPRI)
- Redes Ópticas

A continuación, es mostrado un cuadro comparativo con las principales características de cada uno de éstos.

TABLA VI
CARACTERISTICAS DE LAS TECNOLOGIAS DE TRANSPORTE
Tomado de [20]

Fronthaul Technology	One-Way Latency	Per-Hop Latency	Throughput
NG-PON	2,5 us	5 us/km	10Mbps-40 Gbps
GE-PON	10-30 ms	1 ms	10Mbps-10Gbps
EPON	5-10 ms	1 ms	10Mbps-1 Gbps
Digital Subscriber Line Access	5-35 ms	5-35 ms	10-100 Mbps
Cable	25-35 ms	25-35 ms	10-100 Mbps
Wireless Communication	5-10 ms	5 ms	50 Mbps-1Gbps
Microwave	< 1 ms	200 us	100Mbps-1Gbps
Millimeter Wave Radio	< 1ms	200 us	500Mbps-2Gbps

- *Red 5G*

A partir del año 2020 se comenzó con el desarrollo e implementación de la red de radio de comunicaciones de quinta generación (5G), con la cual los usuarios alcanzan velocidades de

transmisión móvil de 1-5 Gbps. Para ello, es indispensable el manejo de técnicas multiplexación, entre estas el empleo de MIMO (Múltiple Entrada Múltiple Salida), la misma que se basa en la construcción de varias antenas en Tx y Rx para asegurar la transmisión simultánea de flujos de información [19].

En el empleo de la red C-RAN (RAN Centralizada en la Nube) existe un punto en donde se conectan las redes móviles y las ópticas, formada por una RAN 5G y una red Fronthaul de FO más un protocolo CPRI (Common Public Radio Interface), como lo indica la Figura 5, que ya es empleado en 4G [21]. C-RAN permite agregar una gran cantidad de RHH con una oficina central (CO) con procesamiento de señal de radio, permitirá lograr alto BW y baja latencia [22]. La red inalámbrica 5G tiene características importantes, que incluyen:

- Tecnologías de múltiple acceso.
- Red escalable.
- Alta disponibilidad, alto throughput y mayor confiabilidad.
- Baja latencia.
- Menor cantidad de interrupciones en ambientes densamente poblados.
- Inclusión de aplicaciones en tiempo real.

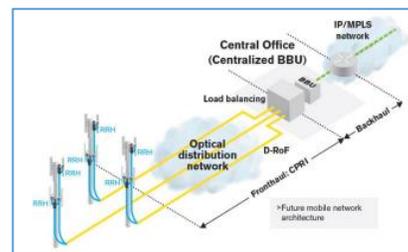


Fig. 4. Tecnología Fronthauling con CPRI

La clave para desplegar una red móvil 5G es la aplicación de sistemas de transporte dedicados capaces de satisfacer las demandas de tráfico, manteniendo los costos bajos. La UIT define para 5G, los siguientes puntos principales:

- *Banda ancha móvil mejorada (eMBB)*: la cual brindará tasas de velocidad de datos altas, de al menos 20 Gbps.
- *Comunicaciones de baja latencia ultra confiables (URLLC)*: brindando latencia de hasta 1 ms.
- *mMTC*: Son las comunicaciones de tipo máquina masiva que permitirán la interconexión de varios dispositivos aproximadamente 10^6 disp/km^2 .

En la Tabla 7 se comparan las variables más sobresalientes entre las redes móviles 4G y 5G.

TABLA VII
CUADRO COMPARATIVO ENTRE 4G Y 5G

Variables	TECNOLOGIA CELULAR	
	REDES 4G	REDES 5G
Latencia	45 ms	1 ms
Velocidad UL	50 Mbps	600 Mbps
Velocidad DL	10-14 Mbps	10 Gbps
Velocidad de Transmisión	100 Mbps	1 Gbps
Frecuencia de operación	800-1500 MHz 1800-2600 MHz	24.25-86 GHz
Número de usuarios	>200 usuarios/celda	<110 usuarios/celda

RoF, a nivel de acceso, ha logrado integrar la infraestructura inalámbrica con redes de fibra óptica, para las comunicaciones móviles. Esto se logra mediante el reemplazo de estaciones base (BS), por elementos pasivos, cuyo mantenimiento y soporte es notoriamente más bajo.

El procesamiento de señal, debido a al empleo del láser envuelve técnicas de pre-distorsión y post-distorsión que compensan los efectos de no linealidad de la fibra. La dispersión cromática más el alto costo que genera su implementación, ha generado la inclusión de un PDC (“Photonic Down Conversion”) el que reemplazaría el procesamiento eléctrico de la señal por uno empleando el dominio óptico en la oficina central (CO) que alimenta las radio bases [5].

Con lo mencionado en el párrafo anterior, no es raro encontrar varias propuestas que implican el uso de GPON y RoF. En [23] se muestra una

arquitectura que combina GPON y RoF mediante el uso de un elemento llamado FBG (“Fiber Bragg Grating”) el mismo que actúa como un filtro rechaza-banda que refleja la luz incidente bajo el principio de Fresnel centrado en la longitud de onda de Bragg.

El FBG en general se emplea para enrutamiento, control, amplificación y filtrado de señales ópticas, dado a sus ventajas como bajas pérdidas por inserción, amplio ancho de banda y fácil implementación.

6) Tendencias de Fronthaul

Según el estudio realizado en [8], reconoce a Fi-Wi como una de las tecnologías más importantes, ya que permite la integración de redes ópticas (PON o WDM) con tecnologías inalámbricas (OFDM). La tecnología Fi-Wi tiene como fin el de integrar los beneficios de la fibra óptica como el soporte de grandes BW que a su vez inducen a la alta tasa de transmisión con las ventajas de su contraparte inalámbrica que consiste en alcanzar mayor cobertura y alta movilidad.

En lo que respecta a WDM se pueden encontrar dos categorías, la primera CWDM (Multiplexación por división de longitud de onda gruesa) y la segunda DWDM (Multiplexación por división de longitud de onda densa).

Las redes de WDM, descritas anteriormente, juegan un papel muy importante en el desarrollo del Fronthaul óptico, debido a sus altas tasas y distancias de transmisión, en concreto DWDM es la que se convierte en indispensable para poder suplir con estos requerimientos.

En términos puntuales, 5G al implementar MIMO masivo en su arquitectura, DWDM resulta ideal para dar soporte en la parte óptica del sistema, debido a que cada una de las portadoras de MIMO masivo puede emparejarse

con las portadoras de DWDM, permitiendo tener BW variables acorde la demanda necesaria.

7) SMC

Así como se ha venido mencionando a lo largo de este artículo, la FO es el medio de transmisión que mejor se adapta a las exigencias de las últimas tecnologías móviles debido a su alta cabida y baja atenuación (0,2 dB por km) pero la movilidad anexa a esta tecnología celular hace que sea necesaria la integración de tecnologías inalámbricas. De esto nace la tecnología RoF, donde es posible el empleo de la fibra en la superioridad de la radio frecuencia, mediante un sistema denominado SCM.

La técnica de multiplexación Sub-Carrier Multiplexing (SMC división en subportadoras) se emplea para transportar información en sistemas Radio over Fiber (RoF), radica en la modulación en amplitud de señales RF sobre una portadora óptica, la señal resultante a la salida de un transmisor es una portadora en dominio de la frecuencia con dos bandas laterales correspondientes a la señal de RF, la misma que se lleva por fibra óptica hasta un detector que realizará el cambio de la señal óptica a eléctrica y quitará mediante filtrado cada uno de los armónicos y bandas adicionales para la demodulación y recuperación de la señal [19]

En la Figura 6, se aprecian los principales componentes de un sistema RoF, el paso del dominio eléctrico al dominio óptico, el transporte por fibra óptica y el cambio óptico/eléctrico final.

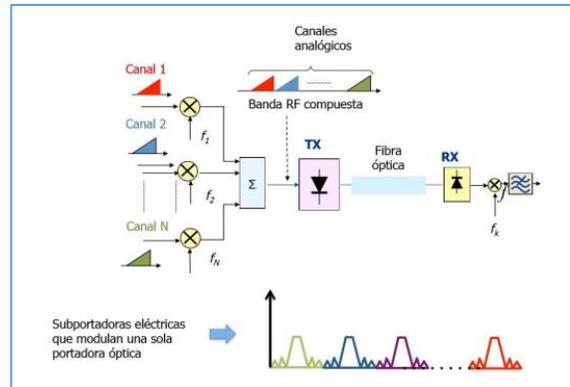


Fig. 5 Estructura SCM

SMC al ser un sistema con transporte de información analógica, soporta efectos de supresión de portadora y también distorsión por intermodulación. [24].

3. Resultados y Discusión

Una vez, recabada, estudiada toda la información pertinente y acorde a los temas más sobresalientes del presente artículo científico, se obtuvieron los siguientes resultados.

S_M_P_1: ¿Cómo se clasifican las redes ópticas de baja latencia?

Las redes ópticas se pueden clasificar en dos categorías: Redes Ópticas Activas AON o Redes Ópticas Pasiva. Dentro de las redes PON, sus principales referentes son GPON y EPON. Las redes EPON se encuentran definidas en el estándar IEEE 802.3ah, que a posterior publicarán los estándares 10G-EPON, conocido también como NG-EPON y Extended EPON PDM. A la par, ITU-T publicaría las recomendaciones XGPON1, XGPON2, NGPON2 y XGS-PON.

S_M_P_2: ¿Cuáles son las investigaciones actuales de redes ópticas de baja latencia?

Partiendo del tema de las redes ópticas pasivas (PON), en [5] al tomar características específicas de la tecnología móvil de última

generación (espacio espectral o distancia entre portadoras dinámico) con modulación por subportadoras u OFDM más el empleo de SCM para la modulación óptica ligados a ciertos conceptos de WDM se logra proyectar un diseño de red de transporte desde una oficina central hacia una estación base en un punto remoto.

Las redes de nueva generación (NG-PON2) soportan velocidades de hasta 40 Gbps, con ello dando lugar a emplearse en redes 5G debido a su baja latencia. Dentro de estas redes se encuentra WDM-PON, la misma que ofrecen escalabilidad, es así que ya existen estudios de una red 25G WDM-PON [25]

En [26] se presenta un estudio sobre el estándar 50G-PON, creado por la ITU-T en el año 2021 con el fin de incrementar las velocidades de transmisión en hasta 50 Gbps, con latencias inferiores a 1.5ms, empleando las infraestructuras existentes o sin tener que realizar grandes inversiones en las mismas. Dentro de este estándar se diferencian 3 tipos: 50G TDM PON, 50G TWDM pon y PtP WDM Pon, aunque este último aún se encuentra bajo estudio por parte de la ITU-T.

S_L_R_P_1: ¿Qué ventajas ofrece la evolución de GPON?

Desde sus inicios la red PON ha ofrecido sus innumerables ventajas, que de a poco han ido puliéndose hasta el punto de llegar indispensable para los sistemas de comunicaciones actuales. De acuerdo a la Tabla 4, WDM PON, sería la red más óptima para trabajar en conjunto con la tecnología 5G, al brindar una red simétrica con velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps, con la pequeña desventaja de su muy alto coste.

S_L_R_P_2: ¿Qué importancia tiene dentro del desarrollo de redes de acceso el empleo de un Fronthauling eficaz?

En teoría la obligación con los requisitos de ancho de banda tan alto con las tecnologías fronthaul existentes requiere la instalación de nuevos cables ópticos o transceptores de alta velocidad muy costosos, cual no resulta una solución sostenible, debido a que los proveedores de servicios tendrán que invertir más en sus infraestructuras de red de acceso móvil. Es por esto, que [27] considera alternativas para la interfaz RRU-BBU basadas en radio analógica sobre fibra (A-RoF).

S_L_R_P_3: ¿Cuáles son las principales diferencias existentes entre D-RoF y A-RoF para 5G?

Las redes 4G, casi en su totalidad se basa en D-RoF, empero, para los requerimientos de 5G resulta insuficiente, debido a que la digitalización de las señales representa demasiado consumo de BW. Mientras que en los sistemas A-RoF, las señales inalámbricas agregadas, que modulan una portadora óptica, pueden tener sus anchos de banda espectrales sin cambios, lo que lleva a un excelente ancho de banda relativamente alta en comparación con D-RoF. La eficacia del ancho de banda de una solución A-RoF puede mejorarse aún más a través de: multiplexación por división de frecuencia (FDM) o técnicas DSP que se basan en la transformación rápida de Fourier (FFT) y la FFT inversa (IFFT) La primera solución se conoce como frecuencia intermedia sobre fibra (IF-A-RoF), mientras que la última se denomina A-RoF asistida por DSP (o DSPA-RoF). Estas opciones se promocionan como técnicas eficientes de fronthauling móvil, ya que brindan soluciones con alta flexibilidad, capacidad y escalabilidad al mismo tiempo que admiten los requisitos de 5G y reducen los gastos operativos y de capital. Sin embargo, ambos tienen serios inconvenientes.

Aun así, el fronthaul basado en cualquiera de estas dos variantes presenta inconvenientes,

debido a que en A-RoF se estaría consiguiendo buena eficiencia espectral, sin embargo, resulta susceptible al ruido. Mientras que en D-RoF se lograría conseguir alta fidelidad de señal, pero con baja eficiencia espectral [8].

S_L_R_P_4: ¿Qué ventajas y desventajas presenta el empleo de una red Fronthaul basada en WDM?

En la era 5G, las redes fronthaul enfrentan nuevos desafíos debido a las nuevas arquitecturas de red, las nuevas tecnologías y las nuevas características de las aplicaciones. El sistema WDM-PON, surge con el fin de abastecer las necesidades de los usuarios con las ventajas en cuanto a latencia, ancho de banda, ahorro de fibra y mantenimiento, y ha ganado superioridad en aplicaciones de fronthaul 5G.

El inconveniente es su elevado costo de implementación, por lo que es necesario determinar estrategias o modelos que permitan reducir estos costos sin la necesidad de alterar las altas tasas de transmisión disponibles.

A pesar de que WDM es una red con altas capacidades y beneficios, el aumento rápido de la demanda en internet móvil, tráfico de datos, llevan a la construcción de una red 25G WDM-Pon, la misma que brindara ultra BWQ, baja latencia ONU plug-and-play y ventajas de bajo costo para implementación de fronthaul 5G.

S_L_R_P_5: ¿Existe alguna otra tecnología que brinde red de acceso de baja latencia?

Como ya se mencionó en el apartado anterior, las redes WDM logran suplir con las demandas actuales de ancho de banda y transmisión de datos, pero tienen la limitación de que no ofrecen mayores transmisiones a 100 Gbps en cada uno de sus canales debido a su diseño fixed-grid (espectro fijo de 50 GHz). Por lo tanto, una solución viable sería el empleo de una (flexi-grid), rejilla espectral flexible, de tal

manera que no tener ancho de banda libre y se desperdicie espectro en canales adyacentes. Por ello [28] presenta dos tecnologías basadas en O-OFDM (Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y en WDM ultra denso (Nyquist-WDM).

4. Conclusiones

Desde la aparición de las redes ópticas de acceso, se lograron suplir los requerimientos de ancho de banda, baja latencia, al realizar la transmisión y recepción de datos mediante el empleo de un mismo hilo.

Tanto la ITU-T y la IEEE, trabajan acorde a las necesidades requeridas con la constante evolución de las aplicaciones, de modo que actualmente en países desarrollados, se está llevando a cabo las pruebas de redes WDM que brinden velocidades de transmisión de al menos 50 Gbps en ambos canales.

Una modificación eficaz para el fronthauling óptico, es la arquitectura RoF (Radio sobre fibra) el cual combina beneficios de una red inalámbrica con los expresados que se obtienen mediante el empleo de la fibra óptica, llegando a ser importantes en implementaciones de tecnologías como lo es 5G, en donde se requiere mayor transmisión de datos con una latencia muy baja.

El sistema WDM-PON tiene ventajas en cuanto a latencia, ancho de banda, ahorro de fibra y mantenimiento, y ha ganado superioridad en aplicaciones de fronthaul 5G. Al implementar arquitecturas de red eficientes y flexibles, ONU y AMCC (Canal de control y administración auxiliar) de bajo costo, se pueden desarrollar soluciones fronthaul de alto rendimiento para impulsar el desarrollo y la comercialización de 5G.

El empleo de las redes elásticas, conjuntamente con las redes WDM-PON, permitirán aumentar significativamente la velocidad de transmisión por encima de los 100 Gbps para de esta manera desarrollar servicios tecnológicos novedosos que requieran mayores características de funcionamiento.

5. Referencias

- [1] G. Kalfas, S. Markou, D. Tsiokos, C. Verikoukis, and N. Pleros, "Very High Throughput 60GHz wireless enterprise networks over GPON infrastructure," *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC 2013*, pp. 873–878, 2013, doi: 10.1109/ICCW.2013.6649357.
- [2] Y. Zheng, Z. Mao, L. Di, Z. Ge, X. Zhang, and X. Sun, "Low latency passive optical node for optical access network," *ICO CN 2017 - 16th International Conference on Optical Communications and Networks*, vol. 2017-January, pp. 1–2, Nov. 2017, doi: 10.1109/ICO CN.2017.8121485.
- [3] UIT-T G.701, "Vocabulario de Términos relativos a la transmisión y multiplexación digitales y a la modulación por impulsos codificados," Helsinki, 1993.
- [4] S. Qi, H. Gu, H. Zhang, and Y. Chen, "Testudo: A Low Latency and High-Efficient Memory-Centric Network Using Optical Interconnect," *2017 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2017 - Proceedings*, vol. 2018-January, pp. 1–6, Jul. 2017, doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254776.
- [5] D. Romero, "Diseño de una red de acceso basada en GPON/SCM para el transporte de datos móviles en tecnología 5G," 2022. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/29373/RomeroMeloDanielEduardo2022.pdf?sequence=1>
- [6] I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, and H. Flinck, "Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2429–2453, Jul. 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2815638.
- [7] L. G. De Almeida, A. D. De Souza, B. T. Kuehne, and O. S. M. Gomes, "Data analysis techniques in vehicle communication networks: Systematic mapping of literature," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 199503–199512, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034588.
- [8] M. Cervantes, "Implementación de un sistema de fibra óptica basado en WDM para un prototipo de fronthaul pasivo de una arquitectura de red de acceso de radio centralizada," Tesis de Maestría, UNAM, México, 2022.
- [9] B. Uscumlic, Y. Pointurier, A. Gravey, P. Gravey, and M. Morvan, "Optical receivers with multiple front-ends for low latency optical slot switching rings," *Conference Proceedings - 2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling, ONDM 2015*, pp. 110–115, Jun. 2015, doi: 10.1109/ONDM.2015.7127283.
- [10] A. F. Mosquera Casamín, "Análisis técnico comparativo de las redes de acceso ópticas pasivas de nueva

- generación : análisis técnico comparativo entre las redes de acceso 5G-EPON y NG-PON2.,” Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [11] L. Estepa, “DWDM, introducción a la tecnología e implementación en Cuba,” Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2010.
- [12] S. N. Elahmadi, S. Elahmadi, and A. Puc, “Forward Error Correction-Free Low Latency Direct Detection DWDM Optical 100 Gb/s Transmission in a Pluggable Form Factor for Network Edge Interconnect Application,” *2018 7th Annual IEEE Photonics Society Optical Interconnects Conference, OI 2018*, pp. 43–44, Jul. 2018, doi: 10.1109/OIC.2018.8422045.
- [13] A. Weissberger, “WDM-PON to Enable 5G+FTTH Converged Gigaband Access – Technology Blog,” 2019. <https://techblog.comsoc.org/2019/05/20/wdm-pon-to-enable-5gftth-converged-gigaband-access/> (accessed Jun. 06, 2023).
- [14] S. Hornung, R. Davey, D. Payne, and D. Nessel, “Evolution to next generation optical access networks,” *Conference Proceedings - Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS*, pp. 939–940, 2007, doi: 10.1109/LEOS.2007.4382720.
- [15] V. Solutions Inc, “Fibra óptica en redes 5G En el fronthaul, el midhaul y en todas partes: la fibra óptica se generalizará en la infraestructura 5G.” <https://www.c3comunicaciones.es/Documentacion/fibra-optica-en-redes-5g.pdf> (accessed Jun. 07, 2023).
- [16] D. T. Kiet, T. M. Hieu, N. Q. Hung, N. Van Cuong, V. T. Van, and P. N. Cuong, “Research and Implementation of eCPRI Processing Module for Fronthaul Network on FPGA in 5G-NR gNodeB Base Station,” *Proceedings - 2020 4th International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications and Computing, SigTelCom 2020*, pp. 1–5, Aug. 2020, doi: 10.1109/SIGTELCOM49868.2020.9199019.
- [17] G. V. Arévalo, M. Tipan, and R. Gaudino, “Techno-Economics for Optimal Deployment of Optical Fronthauling for 5G in Large Urban Areas,” *International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 2018-July, Sep. 2018, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473801.
- [18] J. Kim *et al.*, “OTA enabled 147.4 Gb/s eCPRI-equivalent-rate radio-over-fiber link cooperating with mmWave-based Korea Telecom 5G mobile network for distributed antenna system,” *Optics InfoBase Conference Papers*, vol. Part F160-OFC 2019, 2019, doi: 10.1364/OFC.2019.TH4C.5.
- [19] R. Calucho, “Análisis y estudio de un fronthauling óptico para redes 5g basado en micro-celdas comparando su rendimiento y costo con la red tradicional 4g basado en CPRI,” Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2021.
- [20] M. Peng, Y. Sun, X. Li, Z. Mao, and C. Wang, “Recent Advances in Cloud Radio Access Networks: System Architectures, Key Techniques, and Open Issues,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*,

- vol. 18, no. 3, pp. 7–8, Jul. 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2548658.
- [21] A. Viorreta Gómez, J. Antonio, and L. Barcelona, “Toward to design of 5G optical communications,” 2017, Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/107304>
- [22] F. Ponzini, K. Kondepu, F. Giannone, P. Castoldi, and L. Valcarengi, “Optical Access Network Solutions for 5G Fronthaul,” *International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 2018-July, Sep. 2018, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473985.
- [23] J. Singh and A. K. Garg, “Optimal Solutions of Integrated Optical and Wireless Applications Using GPON-RoF Technologies,” *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics and Communication and Aerospace Technology, ICECA 2019*, pp. 526–531, Jun. 2019, doi: 10.1109/ICECA.2019.8821884.
- [24] Al. Patiño, “Diseño de un sistema de radio sobre fibra óptica para ondas milimétricas en redes móviles 5G,” Tesis de Maestría, Universidad Estata Francisco Jose de Caldas, 2018. Accessed: Apr. 24, 2023. [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14500>
- [25] I. Sierra, “Diseño de red fronthaul sobre WDM para soportar acceso radio 5G,” Tesis de Maestría, Universitat Oberta de Catalunya, España, 2019.
- [26] C. Rábano, “Estudio tecno-económico del despliegue del estándar 50G-PON sobre infraestructura óptica heredada,” Master, Universitat Oberta de Catalunya, España, 2022.
- [27] A. Udalcovs *et al.*, “An Insight into the Total Cost of Ownership of 5G Fronthauling,” *International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 2018-July, Sep. 2018, doi: 10.1109/ICTON.2018.8474008.
- [28] J. Granada, A. Cárdenas, and N. Guerrero, “Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones,” vol. 20, no. 2, 2015.