



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Evaluación de redes ópticas pasivas mediante asignación de ancho de banda y longitud de onda con tecnología coexistente Tx-Rx en redes convergentes**

AUTOR:

Freire Castellanos, Jorge Santiago

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de  
**MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 24 de agosto del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Freire Castellanos, Jorge Santiago** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 24 de agosto del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES  
**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Freire Castellanos, Jorge Santiago**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación “**Evaluación de redes ópticas pasivas mediante asignación de ancho de banda y longitud de onda con tecnología coexistente Tx-Rx en redes convergentes**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 24 de agosto del 2020

EL AUTOR

---

Freire Castellanos, Jorge Santiago



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Freire Castellanos, Jorge Santiago**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulada: **“Evaluación de redes ópticas pasivas mediante asignación de ancho de banda y longitud de onda con tecnología coexistente Tx-Rx en redes convergentes”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 24 de agosto del 2020

EL AUTOR

---

Freire Castellanos, Jorge Santiago

# REPORTE DE URKUND

<b>Documento</b>	<a href="#">Freire_Jorge_MET2019.docx</a> (D77315837)
<b>Presentado</b>	2020-07-30 02:00 (-05:00)
<b>Presentado por</b>	fernandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
<b>Mensaje</b>	Revisión TT Diego Freire <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 1% de estas 25 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

⊕	Categoría	Enlace/nombre de archivo
⊕	>	<a href="https://docplayer.es/114440847-Universidad">https://docplayer.es/114440847-Universidad</a>
⊖	Fuentes alternativas	
⊕	Fuentes no usadas	

1 Advertencias. Reiniciar Exportar

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Evaluación de redes ópticas pasivas mediante asignación de ancho de banda y longitud de onda con tecnología coexistente Tx-Rx en redes convergentes

AUTOR: Freire Castellanos, Jorge Santiago

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

19 de julio del 2020

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster Freire, Jorge como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

## **Dedicatoria**

A Dios por darme una segunda oportunidad de vida.

A mis padres, Lcdo. Jorge Enrique Freire Supliguicha y la Dra. Gladys Marlene Castellanos Escalante M. Sc., mis dos grandes Amores y motivadores.

A mis abuelitos que siempre han tomado de mí un modelo a seguir para las nuevas generaciones.

A la familia por ser una inspiración de mi vida.

A mis Padrinos que siempre me han brindado su apoyo moral para lograr esta meta.

A Marcia Meza Ardila, mi amor y motivación para obtener este nuevo título.

A mi Tutor M. Sc. Edwin Fernando Palacios Meléndez, y demás docentes quienes brindaron sus enseñanzas y conocimiento en este sistema de posgrado.

**JORGE SANTIAGO FREIRE CASTELLANOS**

## **Agradecimientos**

A Dios por darme la sapiencia para estudiar este sistema de posgrado.

A mis padres, Jorge Enrique Freire Supliguicha y Gladys Marlene Castellanos Escalante que han sido dos grandes pilares en mi formación profesional, gracias a ellos he podido terminar mi Maestría en Telecomunicaciones, solo quiero decirles que los amo mucho y me siento honrado.

A mis maestros que han colaborado con sus conocimientos enseñándome cada detalle que debe tener un profesional en telecomunicaciones.

A mi Tutor M. Sc. Edwin Fernando Palacios Meléndez por ser un guía incondicional para la elaboración del presente trabajo de titulación.

A mi amor, Marcia, quien me ha brindado su amor incondicional y ha sido muy fundamental durante mi formación profesional y laboral.

**JORGE SANTIAGO FREIRE CASTELLANOS**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**  
TUTOR

---

**ZAMORA CEDENO, NESTOR ARMANDO**  
REVISOR

---

**CORDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO**  
REVISOR

---

**ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS**  
DIRECTOR DEL PROGRAMA



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
Resumen.....	XIV
Abstract.....	XV
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Antecedentes.....	17
1.3. Definición del problema.....	18
1.4. Justificación del problema a investigar.....	18
1.5. Objetivos.....	20
1.6. Hipótesis.....	21
1.7. Metodología de investigación.....	21
Capítulo 2: Conceptos básicos de las redes de fibra óptica.....	22
2.1. Descripción general de las redes de transporte.....	22
2.2. Redes de acceso óptico.....	22
2.3. Impacto de las aplicaciones punto a punto en la infraestructura de red.....	23
2.4. Tecnologías de acceso de banda ancha.....	25
2.5. Backhaul basado en microondas.....	26
2.6. Tecnologías de fibra.....	28
2.6.1. Red óptica activa (Active Optical Network, AON).....	31
2.6.1.1.Arquitectura estrella activa.....	31
2.6.1.2.Arquitectura home run.....	32
2.6.2. Red óptica pasiva (Passive Optical Network, PON).....	33
Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.....	34
3.1. Definición del tiempo de ciclo.....	34
3.2. Análisis de resultados obtenidos.....	36
3.2.1. Estructura de simulación genérico.....	36

3.2.2.	Estructura de simulación que varía los parámetros de red. ....	37
3.2.3.	Análisis de resultados obtenidos de la simulación genérica....	38
3.2.4.	Evaluación de rendimiento que varía los parámetros de red. .	41
3.3.	Evaluación de ganancia de multiplexación .....	44
3.4.	Soluciones de redes ópticas pasivas de largo alcance WDM/TDM para la convergencia móvil fija de la red de retorno. ....	46
3.5.	Asignación dinámica de ancho de banda compatibles con tecnología de transceptores. ....	47
3.5.1.	Propuesta de DBWA con reconocimiento de transceptores....	48
3.5.2.	Matriz de láseres sintonizados fijos con capacidad de ajuste limitada. ....	49
3.6.	Resultados y discusión.....	50
3.6.1.	Antecedentes de la evaluación de escenarios de simulación.	50
3.6.2.	Evaluación de asignaciones dinámicas de ancho de banda básicos contra los compatibles con TT.....	51
3.6.3.	Evaluación del retardo promedio: matriz de láseres sintonizados fijos con capacidad de ajuste limitada.....	56
	Conclusiones.....	59
	Recomendaciones.....	60
	Bibliografía.....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Cambios proyectados en la tecnología de retorno. ....	26
Figura 2. 2: Ejemplo de backhaul de microondas de salto múltiple con enlaces PtP .....	27
Figura 2. 3: .....	29
Figura 2. 4: Red de acceso óptico (a) sin consolidación de nodos, (b) con consolidación de nodos.....	30
Figura 2. 5: Esquemático de la arquitectura de estrella activa. ....	32
Figura 2. 6: Esquemático de la arquitectura Home Run. ....	32

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Comparación promedio de retardo de paquetes. ....	38
Figura 3. 2: Reducción del retardo promedio en comparación con el esquema EFT.....	39
Figura 3. 3: Comparación promedio de retardo de paquetes de EFT-Parcial-VF MT que varía el valor de N. ....	41
Figura 3. 4: Comparación de retardo promedio de paquetes promedio del algoritmo EFT-Parcial-VF MT que varía el valor de W.....	42
Figura 3. 5: Retardo promedio de paquetes para escenario desequilibrado y equilibrado.....	43
Figura 3. 6: Promedio de retardo de paquetes del algoritmo EFT en escenarios de red con diferentes longitudes de onda.....	45
Figura 3. 7: Ejemplo de la asignación de transmisión de una ONU en N1 donde ocurre un retorno y es necesario agregar un retardo para volver a sintonizar el láser.....	49
Figura 3. 8: Comparación promedio de retardo para el escenario 1 donde la distribución de distancia ONU-OLT está entre 500 m y 100 km.....	52
Figura 3. 9: Reducción de retardo promedio para los parámetros del escenario 1 de la tabla 3.3. ....	53

Figura 3. 10: Reducción de retardo promedio para los parámetros del escenario 3 de la tabla 3.3. ....	54
Figura 3. 11: Retardo promedio para EFT+TT.....	58
Figura 3. 12: Retardo promedio para EFT-VF+TT.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Configuración de parámetros para los escenarios de simulación. .....	37
Tabla 3. 2: Configuración de parámetros de diferentes escenarios de red para la evaluación del algoritmo EFT. ....	44
Tabla 3. 3: Configuración de parámetros de escenarios de red para DBWA. .....	50

## Resumen

El presente trabajo de titulación de examen complejo consistió en realizar el diseño y evaluación de escenarios de simulación de redes ópticas pasivas (PON) multiplexadas por longitud de onda y división de tiempo (WDM/TDM) ya sean de corto y largo alcance utilizando la asignación dinámica de ancho de banda (DBWA). En el capítulo 1, se describe las generalidades del proyecto, entre las más destacadas, la definición del problema a investigar, el objetivo general y los objetivos específicos. En el capítulo 2, se describe los fundamentos teóricos para redes de transporte, redes de acceso ópticos tanto activas (AON) como las pasivas (PON), impacto de las aplicaciones punto a punto (PtP) y tecnologías de banda ancha. En el capítulo 3, se diseñan los escenarios de simulación para redes ópticas pasivas para diferentes distancias entre la OLT y ONU, y finalmente, se evaluaron los resultados obtenidos en la simulación de cada uno de los escenarios.

**Palabras claves:** REDES, ACCESO, TRANSPORTE, ANCHO DE BANDA (BW), MULTIPLEXACIÓN, TIEMPO

## **Abstract**

The present work of degree of complexive examination consisted in carrying out the design and evaluation of simulations of passive optical networks (PON) multiplexed by wavelength and time division (WDM / TDM), both short and long range using the allocation bandwidth dynamics (DBWA). Chapter 1 describes the generalities of the project, among the most outstanding, the definition of the problem to be investigated, the general objective and the specific objectives. Chapter 2 describes the theoretical underpinnings for transport networks, both active (AON) and passive (PON) optical access networks, point-to-point application (PtP) impact, and broadband technologies. In Chapter 3, the simulation scenarios for passive optical networks for different distances between the OLT and ONU are designed, and finally, the results obtained in the simulation of each of the scenarios were evaluated.

**Keywords:** NETWORKS, ACCESS, TRANSPORTATION, BANDWIDTH (BW), MULTIPLEXATION, TIME

## **Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.**

### **1.1. Introducción.**

El segmento de acceso-agregación de las redes de telecomunicaciones de hoy en día está siendo presionado por el continuo crecimiento del ancho de banda de los servicios de redes fijas y móviles. Los operadores de telecomunicaciones se enfrentan al gran desafío de proporcionar los mejores servicios de banda ancha al menor costo. Los operadores deben evolucionar sus redes para ser más eficientes y flexibles, brindando la mejor Calidad de Servicio (QoS) o Calidad de Experiencia (QoE) a sus clientes con el mínimo costo.

Actualmente se están investigando soluciones novedosas para realizar backhaul rentable de diferentes servicios en este segmento de red. Entre ellos, el concepto de redes fijas-móviles convergentes (FMC) está ganando atención. Una red FMC es una red de agregación de acceso convergente que proporciona backhauling simultáneo de tráfico móvil y fijo en una sola infraestructura.

El servicio provisto a través de una red FMC tiene que utilizar redes alámbricas e inalámbricas/celulares de manera transparente, unificando estas dos tecnologías en una sola red de acceso para todo tipo de servicios. Estas dos redes (es decir, fijas y móviles) han crecido independientemente una de la otra y actualmente están basadas en diferentes tecnologías y protocolos, y funcionan de diferentes maneras. Durante los últimos años, está apareciendo un cierto grado de convergencia con la introducción de todos los servicios IP y las plataformas del Subsistema Multimedia IP (IMS).

La convergencia de las redes fijas y móviles generará ahorros en los gastos de capital (CAPEX), en los gastos operativos (OPEX) y en el consumo de energía. La red CAPEX puede reducirse ya que se puede implementar una sola infraestructura para acomodar el tráfico de usuarios fijos y móviles. El OPEX de la red se puede reducir porque el uso de una sola red unificada conduce a una utilización más eficiente de la red.



Finalmente, el consumo de energía en las redes FMC se reduce porque, al tener una sola infraestructura de red, se reduce el número de nodos activos en comparación con el caso de dos redes de acceso separadas.

## **1.2. Antecedentes.**

Actualmente, FMC se basa principalmente en el nivel de servicio y los operadores han comenzado a construir una capa de control de servicio convergente, pero las redes fijas y móviles siguen funcionando de manera independiente y están compuestas por los mismos segmentos de red tradicionales: acceso, agregación y núcleo en el caso de redes fijas y red de acceso de radio (RAN) y red troncal móvil en el caso del segmento móvil. Las redes fijas se basan actualmente en tecnologías de acceso muy diferentes, como xDSL, CATV y FTTx, que pueden abarcar distancias de unos pocos kilómetros, combinadas con redes de agregación que normalmente cubren distancias de decenas o cientos de kilómetros con SONET/SDH, Ethernet y MPLS.

Además, las redes móviles se basan en diferentes tecnologías de radio, como LTE y LTE-Advanced, que proporcionan altas velocidades de bits, como 100 Mbps o 1 Gbps, respectivamente. Además, las redes móviles requieren una conexión fija para conectar la RAN a la red troncal móvil, lo que implica que se ha producido un tipo de convergencia entre las redes fijas y móviles a través de un backhaul que utiliza conexiones punto a punto como PDH, SDH y GbE.

Existen varios controladores de tráfico y económicos para la implementación de la red FMC. Primero, la necesidad de mayor capacidad en la red de acceso debido a i) el número creciente de suscriptores, ii) la movilidad de los usuarios y su necesidad de acceder a Internet en todo momento y en cualquier lugar, y iii) el número creciente de dispositivos conectados. Otro factor importante para el desarrollo de redes convergentes fijas y móviles es el número creciente de servicios Over-The-Top (OTT) que necesitan una gran cantidad de ancho de banda (por ejemplo, juegos en línea, telefonía IP, ...).

### **1.3. Definición del problema**

Necesidad de evaluar estrategias para administración eficiente de la capacidad del ancho de banda y asignación de longitud de onda en redes FMC que refiere a dos tipos diferentes de convergencia: i) Convergencia funcional, y ii) Convergencia estructural. Donde, la convergencia funcional se define como la convergencia de las funciones de red fija y móvil en la Capa 3 (la capa de red, por ejemplo, el protocolo IP) o inferior. Mientras que la convergencia estructural se define como la mutualización de infraestructuras y hardware de redes de acceso/agregación fijos y móviles (por ejemplo, plantas de cable, gabinetes, sitios, equipos, edificios). La convergencia estructural optimizará aún más el uso de la parte más costosa de las redes fijas y móviles, y disminuirá drásticamente el costo y el consumo de energía. Además, la convergencia estructural implica compartir la infraestructura y el equipo de las redes fijas y móviles.

### **1.4. Justificación del problema a investigar.**

Una prometedora tecnología de acceso de próxima generación que se utilizará como infraestructura de backhauling para las redes FMC es la red óptica pasiva (PON). Una PON está compuesta por una terminación de línea óptica (OLT) ubicada en la oficina central (CO) y varias unidades de red óptica (ONU). Una fibra de alimentación común conecta la OLT a un divisor/combinador óptico pasivo a través del cual se transmite la señal a cada una de las redes. Las ONU comparten el canal ascendente en el dominio del tiempo, con técnicas de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), mientras que el canal descendente se transmite a todas las ONU. Esta implementación básica de PON también se puede denominar TDM-PON.

Más recientemente, se han presentado varias soluciones que usan WDM (llamadas WDM-PON). Una versión simple de WDM-PON, donde se asigna un par de longitudes de onda a cada ONU, puede proporcionar una gran cantidad de ancho de banda a los usuarios finales. Sin embargo, este enfoque puede llevar a ineficiencias en el uso de la capacidad disponible porque las ONU no siempre transmiten o utilizan toda la capacidad del canal.

Es por esto por lo que es importante combinar WDM con TDM para aumentar la utilización del canal al compartir longitudes de onda entre más de una ONU.

Si bien la señal de soporte de las redes ópticas pasivas (PON, por sus siglas en inglés) generalmente alcanza el orden de 10-20 km, varios estudios también han investigado el concepto de PON de largo alcance, donde el alcance de la red se puede prolongar hasta aproximadamente 80-100 km. Se espera que este tipo de red simplifique significativamente la arquitectura de la red de acceso metro al reducir la cantidad de elementos de la red.

La evolución de redes ópticas pasivas TDM a TDM/WDM es un tema de investigación bastante reciente motivado por la necesidad de tales arquitecturas de red para soportar una mayor capacidad. Recientemente, el foro de la Red de acceso de servicio completo (FSAN) seleccionó como solución principal para la etapa 2 de PON de próxima generación (NG-PON2) una combinación de LR-PON donde las transmisiones en el canal ascendente se asignan a través de la técnica de acceso híbrido WDM/TDM. Estas redes se definen como TWDM PONs.

Dado que en las PON los usuarios comparten el mismo medio de transmisión, es necesario tener un mecanismo que gestione las transmisiones de los usuarios. En las PON, para administrar la programación de las transmisiones de los usuarios, se utiliza un algoritmo de asignación dinámica de ancho de banda (DBA). Un DBA es una técnica mediante la cual el ancho de banda de tráfico en un medio de telecomunicaciones compartido puede asignarse a pedido y de manera equitativa entre diferentes usuarios. Dentro de esta técnica, el intercambio de un enlace se adapta a las demandas de tráfico instantáneas de las ONU conectadas a la red.

En particular, un DBA programa las transmisiones de las ONU a tiempo, es decir, asigna un punto en el tiempo en el que una ONU puede comenzar su transmisión sin chocar con ninguna otra transmisión. Un DBA

aprovecha el hecho de que i) las ONU conectadas a la red no siempre están transmitiendo datos, y ii) el tráfico de las ONU ocurre principalmente en ráfagas. El DBA asigna dinámicamente la cantidad de ancho de banda para cada transmisión de la ONU según la cantidad de tráfico que una ONU necesita transmitir en ese momento en particular.

En las PON TWDM, las transmisiones de las ONU deben asignarse tanto en el tiempo como en una determinada longitud de onda para evitar colisiones. Para estos tipos de redes, con el fin de gestionar la programación de las transmisiones de los usuarios, se utilizan los algoritmos de asignación dinámica de ancho de banda y de longitud de onda (DBWA). De manera similar a un DBA, un algoritmo de Ancho de banda dinámico y Asignación de longitud de onda (DBWA) asigna dinámicamente la cantidad de ancho de banda que cada ONU puede transmitir y también la longitud de onda a través de la cual cada ONU transmitirá.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General:**

Evaluar el ancho de banda dinámico y asignación de longitud de onda con tecnología coexistente Tx-Rx utilizadas en redes convergentes fijas-móviles a través de PON's.

### **1.5.2. Objetivos específicos:**

- ✓ Describir el estado del arte de las redes de acceso ópticas activas y pasivas.
- ✓ Diseñar los modelos de simulación a partir de algoritmos de red basados en la biblioteca de simulación de eventos discretos.
- ✓ Evaluar la variación de parámetros de los escenarios de simulación para redes ópticas pasivas de largo alcance multiplexadas por división de longitud de onda y por división de tiempo (WDM/TDM).

## **1.6. Hipótesis**

Mediante la evaluación de algoritmos de asignación de ancho de banda dinámico y longitud de onda se comprobará la coexistencia del transceptor (Tx-RX) sobre redes de convergencia PON WDM/TDM

## **1.7. Metodología de investigación.**

Gran parte de la investigación en ingeniería busca identificar cómo se determinan los resultados (es decir, la falla mecánica) reduciendo las causas plausibles a un conjunto discreto de indicadores o variables. El presente trabajo de titulación se utilizará el método empírico-analítico con enfoque cuantitativo. Por ejemplo, los métodos cuantitativos son adecuados para los enfoques deductivos, en los cuales una teoría o hipótesis justifica las variables, la declaración de propósito y la dirección de las preguntas de investigación estrechamente definidas.

En general, el propósito de los estudios cuantitativos es que el investigador proyecte sus hallazgos en la población más grande a través de un proceso objetivo. Los datos recopilados, a menudo a través de resultados obtenidos en la ejecución de simulaciones o mediante encuestas administradas a una muestra o subconjunto de toda la población, lo que permiten al investigador generalizar o hacer inferencias.

## **Capítulo 2: Conceptos básicos de las redes de fibra óptica.**

### **2.1. Descripción general de las redes de transporte.**

La sociedad de la información futura y los requisitos de tener un mundo conectado junto con nuevos conceptos como redes centradas en la información (IRTF, 2019), virtualización de funciones de red (ETSI, 2019) y servicios de computación en la nube (Mell & Grance, 2011), conllevan la necesidad de actualizar la infraestructura de Internet.

El creciente número de dispositivos conectados, los cambios radicales en el comportamiento del usuario (siempre encendidos), las nuevas aplicaciones emergentes, como la televisión de ultra alta definición (TV 4K), las comunicaciones de máquina a máquina (M2M), están trayendo nuevos desafíos para el proveedores de red, como ofrecer una capacidad muy alta por usuario, así como conectividad de extremo a extremo confiable y de baja latencia para una gran cantidad de dispositivos de manera eficiente en cuanto a costos y energía.

En este trabajo el segmento de la infraestructura de Internet entre la red central/de agregación y los usuarios fijos y las estaciones base móviles se considera y se denomina red de transporte.

### **2.2. Redes de acceso óptico**

Aunque la tecnología de transmisión óptica está ampliamente implementada en las redes centrales/de agregación, todavía se considera costosa para el acceso de banda ancha de la última milla. Sin embargo, las redes de acceso óptico son la única solución viable que se implementará en el segmento de la última milla, debido a su potencial para ofrecer capacidades muy altas y un largo alcance.

Por lo tanto, este trabajo se centra en las tecnologías basadas en la transmisión óptica con el fin de encontrar la arquitectura adecuada que pueda cumplir con diversos requisitos de las futuras redes de acceso de banda ancha.

Recientemente se han realizado una gran cantidad de estudios con el objetivo de proponer un buen candidato para la red de acceso óptico de próxima generación (*Next Generation Optical Access, NGOA*) con énfasis en las redes ópticas pasivas (*Passive Optical Networks, PON*).

El artículo de (Liu, 2019), se presentan varias arquitecturas de PON's de multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing, TDM) tales como PON compatible con XGigabit (XGPON) y 10G Ethernet PON (10G-EPON) como candidatos para futuras redes de acceso. Sin embargo, el ancho de banda proporcionado por estas tecnologías no es lo suficientemente alto para las redes de NGOA.

### **2.3. Impacto de las aplicaciones punto a punto en la infraestructura de red.**

Uno de los requisitos clave de las futuras redes de acceso óptico es proporcionar un alto ancho de banda sostenible por usuario de forma escalable. Sin embargo, la mejora de la capacidad en las redes de acceso puede conducir a un gran aumento de la demanda de tráfico en las redes centrales/de agregación.

En consecuencia, en un futuro próximo el segmento central puede convertirse en el cuello de botella para la actualización del ancho de banda por usuario. Una forma de abordar este problema es mantener el tráfico local en el área de la red de acceso tanto como sea posible. Evitaría "alimentar" la red central con los datos que pertenecen a los usuarios en las mismas ubicaciones geográficas y ayudaría a mitigar el aumento de la demanda de capacidad en las redes centrales/de agregación causada por el desarrollo del segmento de acceso.

Según estudios la suma de todos los tipos de tráfico de video, incluyendo TV, descargas de video basadas en cliente-servidor y punto a punto (P2P) ha excedido el 70% del tráfico global de consumidores para 2019. Por lo tanto, se trata de eliminar el cuello de botella de la red central manteniendo el tráfico de video dentro de la red de acceso tanto como sea

posible. Esto se hace colocando las micro cajas cerca de los usuarios finales o utilizando protocolos P2P que permiten a los usuarios acceder al contenido disponible en sus proximidades.

La tecnología P2P ha demostrado su potencial como una solución eficiente para transferir archivos voluminosos de Internet, como videos. En los últimos años, ha habido un aumento en el número de aplicaciones para compartir datos que están diseñadas en base a las técnicas P2P.

Un buen ejemplo de esto puede ser Spotify, Skype, Netflix, Amazon Prime Video, entre otras, que son compañías famosas que ofrece servicios de transmisión de música y video comercializados con alrededor de 60 millones de usuarios en todo el mundo. Por ejemplo, Spotify comenzó a utilizar la aplicación P2P para complementar sus servicios basados en cliente-servidor para ahorrar tanto en los dispositivos de almacenamiento y procesamiento como en los recursos de red.

Otro ejemplo, sería la empresa Skype que resulta ser otra historia exitosa de las grandes empresas de clase mundial que emplean técnicas P2P para su aplicación. Además de las aplicaciones tradicionales para compartir archivos, también existe un creciente interés en el uso de P2P para los canales de TV por Internet. Es decir, que PPLive es un ejemplo de los canales de televisión en línea, que emplea P2P para la transmisión en vivo.

Las aplicaciones P2P son altamente escalables y eficientes para la distribución de contenido de gran volumen, pero su tráfico puede ser muy costoso para los proveedores de Internet debido a la falta de una forma estándar de mantenerlo localmente. Basado en el estudio presentado por (Liem, 2013), el contenido total de video P2P localizado superó los 20 Exabytes por mes. Por lo tanto, desde ese entonces existe un enorme potencial para ahorrar recursos de red en las redes centrales/de agregación mediante la aplicación de esquemas P2P con reconocimiento de la localidad para la transmisión de video. De esta manera, las redes de acceso de la



próxima generación se pueden implementar sin una fuerte implicación en la red central.

La idoneidad de varias arquitecturas de red de acceso óptico para acomodar el tráfico P2P puede depender de la arquitectura de red, lo que puede afectar la eficiencia de la utilización de recursos en diferentes segmentos de red. Por lo tanto, es importante estudiar el rendimiento de cada arquitectura de acceso óptico a este respecto.

Al implementar una arquitectura adecuada en el segmento de acceso junto con una estrategia eficiente de tráfico local, se puede minimizar la inversión adicional y la actualización de la capacidad de los costosos recursos de red centrales necesarios para soportar la futura expansión del tráfico. Empujar el tráfico de Internet hacia los usuarios finales puede usarse como una solución a corto plazo para reducir la necesidad de actualizar la red central. Este problema se aborda en el Capítulo 4 de esta tesis.

#### **2.4. Tecnologías de acceso de banda ancha**

En esta sección se presentan las tecnologías de banda ancha relacionadas con las redes de acceso para usuarios de clientes fijos, así como las utilizadas para las redes de acceso de radio y las utilizadas para el backhauling. Como se describió en las secciones anteriores, la comunicación por fibra óptica es la tecnología a prueba de futuro para el segmento de la última milla de las redes, que ofrece alta capacidad y largo alcance.

Existe varias opciones arquitectónicas de acceso óptico actualmente implementadas o estandarizadas, que pueden utilizarse como base para un mayor desarrollo de las redes de ONGA. En las siguientes secciones del presente capítulo se presenta brevemente tanto las arquitecturas de acceso óptico existentes como los futuros candidatos de las redes de NGOA. Las redes de backhaul móviles también se consideran parte de las redes de transporte y, por lo tanto, se estudian en esta tesis. Se sabe que varias tecnologías son adecuadas para la red de retorno móvil basada en cobre,

fibra y microondas. La figura 2.1 presenta la participación actual y esperada de cada tecnología en las redes de backhaul en todo el mundo.

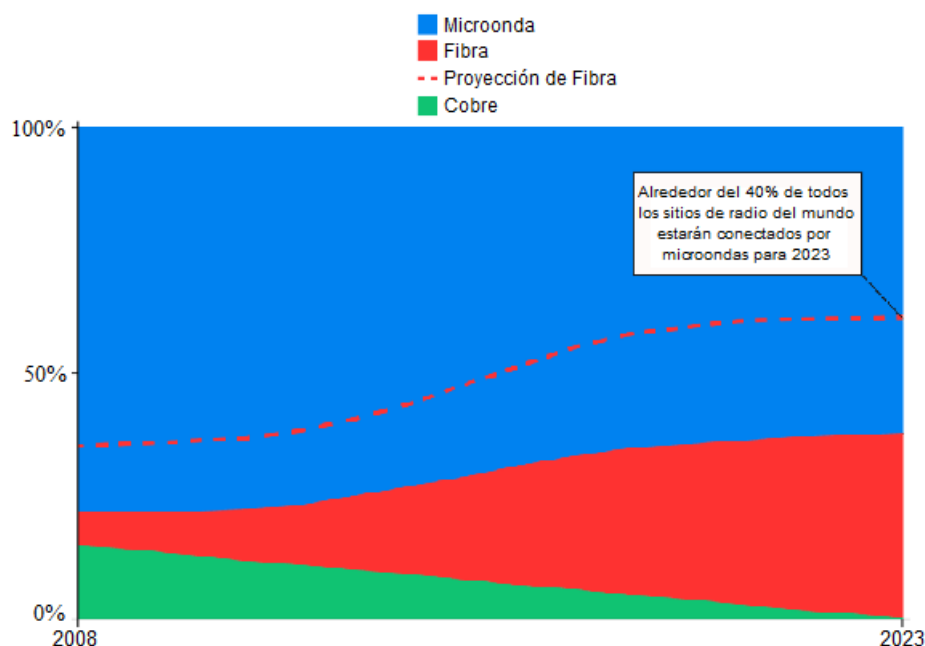


Figura 2. 1: Cambios proyectados en la tecnología de retorno.

Fuente: (Ericsson, 2018)

Las microondas representan casi el 65% de todas las implementaciones de backhaul, y se espera que mantenga la misma participación en los próximos años. La red de retorno basada en cobre asciende aproximadamente hasta un 3% entre las tres tecnologías en 2023, y será reemplazada gradualmente por una red de red de retorno basada en fibra en el futuro (65%).

Cabe mencionar que recientemente se introdujeron varias tecnologías nuevas como el espacio libre óptico (FSO) y la onda milimétrica (mm-Wave) para ser utilizadas como soluciones de retroceso de corto alcance. Estas tecnologías son principalmente adecuadas para celdas pequeñas, ya que ofrecen una capacidad de Gbps en el rango de decenas de metros con poca huella.

## 2.5. Backhaul basado en microondas.

Los enlaces de microondas son relativamente rápidos de implementar con un costo de instalación moderado en comparación con las redes de

fibra. Sin embargo, el consumo de energía y la huella de las antenas de microondas aumentan los gastos operativos para la red de retorno basada en microondas.

Típicamente, la red de backhaul basada en microondas consiste en un número de enlaces de microondas punto a punto (*Point to Point, PtP*) o punto a multipunto (*Point to Multipoint, PtMP*), con antenas en ambos lados de los enlaces. Los enlaces se pueden instalar con una topología del árbol, estrella, anillo o cualquier combinación de estas topologías.

Los datos móviles relacionados con cada estación base se envían a la antena ubicada en el lado de la celda a través de un interruptor. Luego, estos datos son recibidos por otra antena en el otro lado del enlace que está conectado a un interruptor en el primer punto de agregación de la infraestructura de retorno (es decir, en el caso de un retorno de etapas múltiples) o directamente a un conmutador en la central.

Cuando se colocan varias antenas de microondas en un solo lugar, se debe instalar un mástil de torre que se conoce como el centro de microondas. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de retorno de microondas de múltiples saltos con enlaces PtP. Aquí, los conmutadores Ethernet se añaden a los sitios con varias antenas para agregar datos provenientes de todas las antenas.

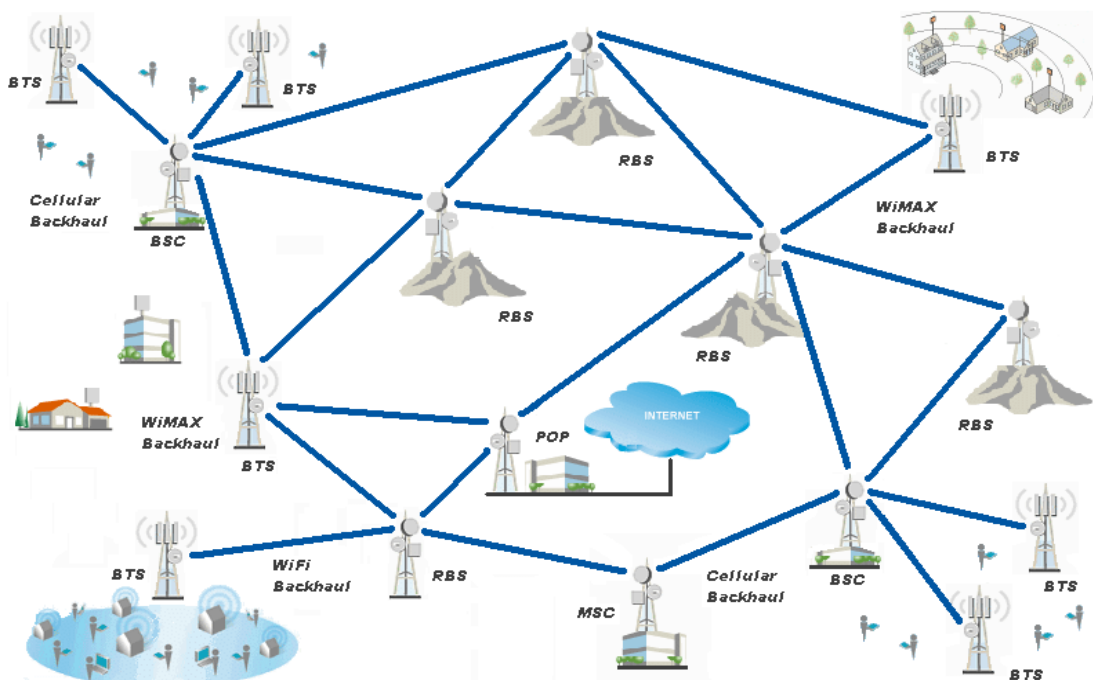


Figura 2. 2: Ejemplo de backhaul de microondas de salto múltiple con enlaces PtP  
Fuente: (Caillouet et al., 2013)

Hoy en día, los enlaces de microondas pueden ofrecer una capacidad de hasta 1 Gbps en varios kilómetros y, por lo tanto, pueden cumplir con los requisitos de capacidad de las redes de retorno.

## **2.6. Tecnologías de fibra.**

Las redes basadas en fibra ofrecen una capacidad muy alta a largas distancias. Sin embargo, es relativamente costoso y lento de implementar en las áreas donde ya no existe infraestructura de fibra. Sin embargo, la penetración generalizada de la fibra, que reemplaza principalmente a las infraestructuras existentes a base de cobre, se puede esperar en los próximos años, ya que la fibra ha sido reconocida como la tecnología a prueba de futuro para el acceso de banda ancha.

Los requisitos principales de las redes de acceso óptico de próxima generación se enumeran a continuación:

1. BW Residencial, el ancho de banda sostenible de 300 Mbps por usuario residencial,
2. BW Empresarial, velocidad máxima de datos fecha de backhaul (fijo, móvil) de hasta 10 Gbps,
3. Número de usuarios, soporta más de 256 usuarios por fibra de alimentación, y
4. Alcance pasivo, el soporte de alcance pasivo de hasta 60 km.

La figura 2.3 ofrece una visión general de las ubicaciones de los nodos de la red de acceso óptico y esta consta de tres partes principales: (Muciaccia et al., 2014)

- a. Oficina Central (*Central Office, CO*) o nodo de acceso central (*Central Access Node, CAN*) donde se encuentra el terminal de línea óptica (*Optical Line Terminal, OLT*),
- b. Uno o más nodos intermedios se denominan nodos remotos,
- c. Unidad de Red Óptica (*Optical Network Unit, ONU*) que es responsable de terminar la señal óptica en el lado del usuario.

La mayoría de las redes de acceso óptico implementadas hoy en día tienen una topología de fibra basada en árboles con OLT conectada a múltiples ONU ubicadas en las instalaciones de los usuarios finales o cerca de los usuarios (por ejemplo, en un gabinete de la calle). La OLT es responsable de terminar la señal óptica en el lado del operador. La infraestructura de red consta de fibras y nodos remotos (*Remote Nodes, RN's*) donde se ubican dispositivos de división o conmutación. La OLT está conectada a los RN's a través de fibras ópticas.

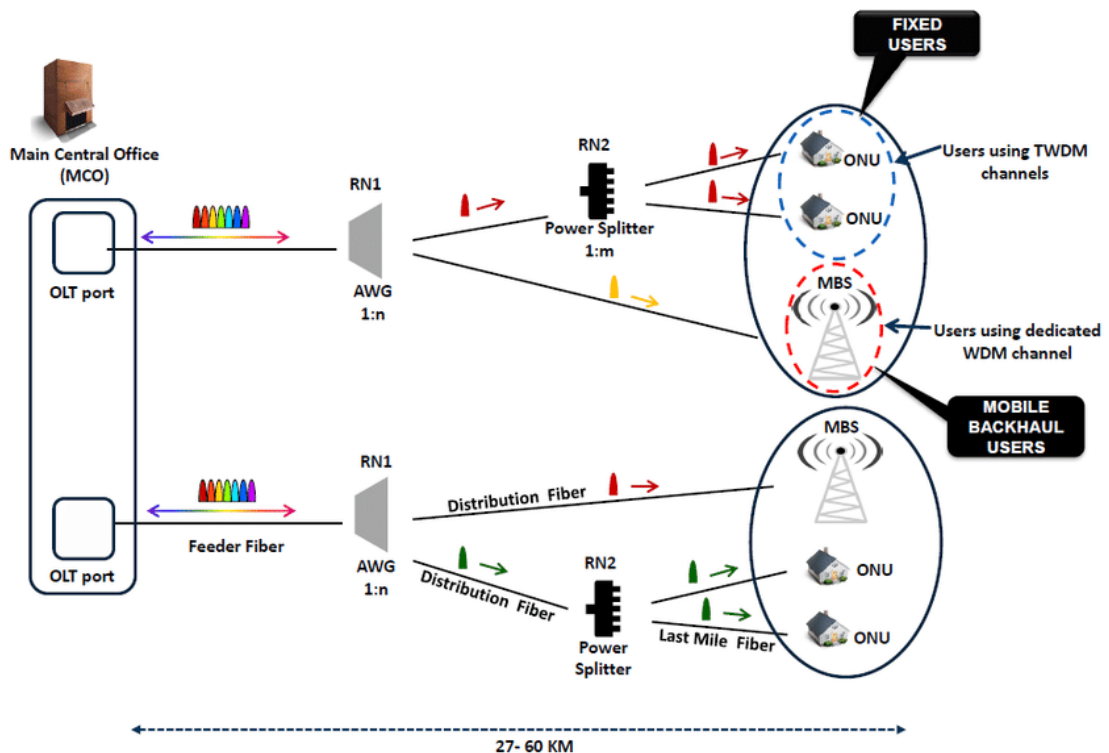


Figura 2. 3:  
Fuente: (Shahid & Machuca, 2017)

Generalmente, los enlaces de fibra entre OLT's y RN's se denotan como fibra de alimentación (*Feeder Fiber, FF*), mientras que la fibra que conecta los RN's al usuario final se denomina fibra de distribución (*Distribution Fiber, DF*), tal como se observa en la figura 2.3.

En algunos casos, la infraestructura física puede consistir en más de un punto de división entre la MCO o CO y las ONU's (ver figura 2.3) para aumentar el número de usuarios conectados a cada OLT (denominado número de usuarios). En general, en tales redes, se pueden implementar

múltiples nodos remotos. Sin embargo, algunos consideran como máximo dos puntos de división, donde la fibra entre RN1 y RN2 se llama DF y la que está entre el usuario final y RN2 está conectada a través de la fibra de la última milla (LMF), tal como se observa en la figura 2.3.

Las redes de acceso de próxima generación se expandirán hacia la red troncal en la forma en que también incluyen los segmentos de red de agregación actuales, conectando las últimas millas directamente a la red central. La eliminación/reducción de la red de agregación es posible utilizando las capacidades de largo alcance de las tecnologías de transmisión óptica que permiten la ubicación conjunta de varios CO convencionales en un lugar, es decir, el nodo de acceso central (CAN).

Este concepto también se conoce como consolidación de nodos y ofrece un gran potencial para minimizar la implementación y el costo operativo. El grado de consolidación de nodos se define como la relación entre el número de CAN y los antiguos CO's. En la figura 2.4 se muestra un ejemplo de red de acceso óptico convencional y consolidada, donde 3 CO's son reemplazados por un CAN que cubre un área de servicio mucho más grande. En este ejemplo, la relación de consolidación de nodos es 1: 3.

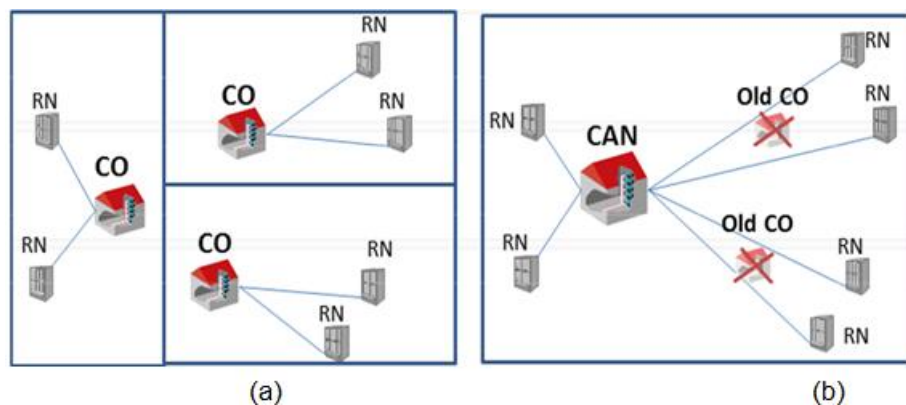


Figura 2. 4: Red de acceso óptico (a) sin consolidación de nodos, (b) con consolidación de nodos.

Fuente:

Una forma de clasificar las redes de acceso óptico se basa en los tipos de dispositivos ubicados en el campo, que pueden ser pasivos (es decir, sin necesidad de fuente de alimentación en el campo) o activos. Otra

clasificación ampliamente utilizada está relacionada con la topología física que conecta las OLT y las ONU. Dos categorías típicas se denominan PtP y PtMP. Cuando hay una conexión dedicada de fibra o longitud de onda directamente desde la OLT a la ONU, se define como PtP, mientras que el uso de una técnica de multiplexación que conduce a compartir los recursos (por ejemplo, fibra de alimentación) entre múltiples usuarios finales se clasifica como PtMP.

Fibra a la X (FTTX) es un término genérico para arquitecturas de red de acceso donde toda o parte de la infraestructura basada en cobre existente se reemplaza con tecnología de fibra. La "X" puede representar "hogar", "edificio", "bordillo" o "gabinete" en función de la ubicación que termina la señal óptica en la red de acceso.

#### **2.6.1. Red óptica activa (*Active Optical Network, AON*).**

Actualmente, los AON's utilizan Ethernet como un proveedor de servicios entre los componentes activos y los datos se conmutan en el dominio eléctrico. Por lo tanto, tanto el plano de datos como el plano de control deben procesarse electrónicamente en el nodo remoto. Actualmente, se implementan dos topologías de fibra de última milla comunes en el caso de AON. Los AON's se implementan principalmente en países europeos pequeños debido a la baja densidad de usuarios en estos lugares.

##### **2.6.1.1. Arquitectura estrella activa**

En esta arquitectura, una sola fibra se conecta desde un conmutador de agregación en la central (CO) a un conmutador Ethernet activo ubicado en la RN, lo que implica la necesidad de una fuente de alimentación en la planta exterior, tal como se muestra en la figura 2.5. Además, la señal óptica de OLT termina en el interruptor, lo que hace que el plano de datos no sea transparente. La ventaja de esta arquitectura está relacionada con el hecho de que las ONU pueden comunicarse entre sí directamente a través de un conmutador Ethernet sin volver a la OLT si no es necesario. Los AON son capaces de ofrecer altas capacidades debido a la disponibilidad de

interfaces comerciales Ethernet de 10 Gbps. También pueden ofrecer servicio a largas distancias hasta

100 km, como resultado de la regeneración de la señal durante las conversiones ópticas a eléctricas (OE).

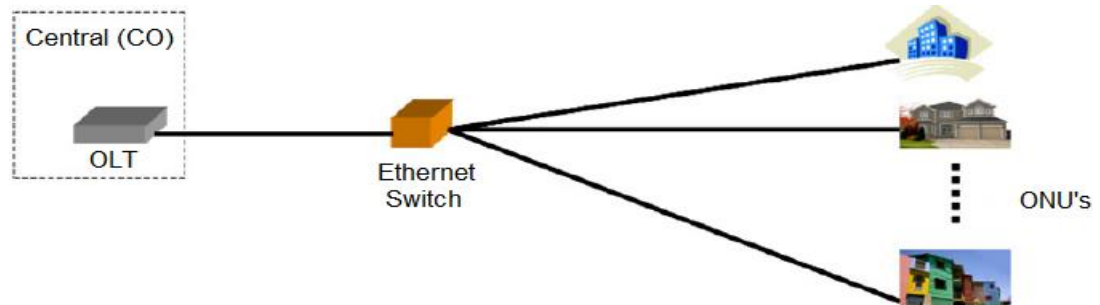


Figura 2. 5: Esquemático de la arquitectura de estrella activa.  
Fuente: (Effenberger & El-Bawab, 2009)

### 2.6.1.2. Arquitectura home run.

Home run se clasifica como red de acceso óptico activa, y utiliza Ethernet como proveedor de servicios en la red de acceso. Se despliega una fibra dedicada entre la CO y cada ONU sin ningún equipo intermedio en la planta exterior, tal como se muestra en la figura 2.6. La naturaleza punto a punto de esta arquitectura la hace menos compleja y más segura que los sistemas de medio compartido (por ejemplo, estrella activa, PON). Sin embargo, tiene el mayor costo por usuario resultante de fibras y transceptores dedicados. Además, es difícil implementar home run en áreas densas, debido a la gran cantidad de fibras requeridas. Esta arquitectura también es capaz de ofrecer hasta 10 Gbps por usuario para distancias muy largas de hasta 100 km.

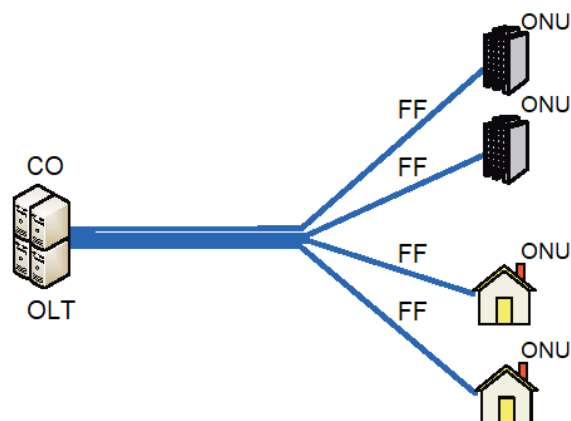


Figura 2. 6: Esquemático de la arquitectura Home Run.  
Fuente: (Su et al., 2008)



### **2.6.2. Red óptica pasiva (*Passive Optical Network, PON*).**

PON es la tecnología prometedora para las futuras redes de acceso debido a su simplicidad, transparencia, espacio reducido y bajo consumo de energía. Esta arquitectura puede ofrecer alta capacidad por usuario a un costo relativamente bajo. Las PON's tienen un RN pasivo, que conecta varias ONU's a la OLT mediante enlaces de fibra óptica y se clasifica como una arquitectura PtMP en la topología de fibra.

En el caso de los PON's, tanto los datos como los planos de control permanecen ópticamente transparentes. Como la fibra de alimentación (FF) se comparte entre varias ONU's, se necesita una cierta técnica de acceso múltiple para dividir los recursos disponibles entre los usuarios en la misma PON.

Cabe mencionar que en algunos casos se utilizan extensores de alcance en el nodo remoto para aumentar el alcance pasivo, lo que implica la necesidad de una fuente de alimentación y una conversión de señal óptica a eléctrica. En estos casos, las arquitecturas pueden considerarse semi-pasivas. Sin embargo, en este trabajo se considera la arquitectura pasiva como lo es PON, ya que el plano de datos es óptico. Las PON's se pueden dividir en varias subclases según la transmisión de extremo a extremo y las técnicas de acceso múltiple utilizadas para compartir los recursos comunes, como los FF.

### Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.

En este capítulo se desarrolla la evaluación del sistema propuesto a través de escenarios de simulación.

#### 3.1. Definición del tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo ( $T_{cycle}$ ) es el intervalo de tiempo entre solicitudes sucesivas de la misma ONU, donde cada ONU transmite exactamente una vez. Para el algoritmo de subprocesos múltiples, la definición de  $T_{cycle}$  es ligeramente diferente y es el intervalo de tiempo entre solicitudes sucesivas del mismo subproceso de la misma ONU, donde cada ONU envía una transmisión para cada subproceso. Es importante proporcionar una nueva definición de  $T_{cycle}$  para garantizar una cierta capacidad a cada ONU. De hecho, cuando se define la duración del ciclo máximo, es posible calcular el  $B_{max,i}$  que es la cantidad máxima de bytes que cada ONU puede transmitir en cada ciclo.

Con respecto al esquema de una red óptica pasiva de multiplexación por división de tiempo (*Time Division Multiplexing – Passive Optical Networks, TDM-PONs*), una definición de  $T_{cycle}$  se da en (Kuntal & Singla, 2016). En esta sección se utiliza la definición de  $T_{cycle}$  a un sistema híbrido de multiplexación por división de longitud de onda y de tiempo (*Wavelength Division Multiplexing/TDM, WDM/TDM*) y se propone una ecuación para calcular  $B_{max,i}$ . Para calcular el  $T_{cycle}$  máximo, se considera una red a alta carga, cuando todas las ONU's están transmitiendo a su capacidad máxima y no hay vacíos en el canal.

También, se considera que el número promedio de ONU's transmitiendo en longitud de onda en cada ciclo,  $T_{cycle}, N/W$ . Aquí, se define al tiempo de ciclo como el período de tiempo entre dos transmisiones posteriores de la misma ONU, donde todas las ONU's transmiten una vez, sin tener en cuenta la longitud de onda en la que están transmitiendo. De

acuerdo con esta definición, se identifica una ecuación para calcular el valor de  $B_{max,i}$ :

$$B_{max,i} = \left\lfloor \frac{\left( T_{cycle} - T * \left( \frac{N}{W} \right) * T_{guard} \right) * \phi_i * C_{\omega}}{8} \right\rfloor$$

Donde,  $\phi_i$  es un peso, que se calcula más adelante, que representa la fracción de la capacidad total de una longitud de onda requerida por ONU;  $T$  es el número de hilos, por ejemplo, si  $T = 1$  corresponde al caso de un solo hilo;  $T_{guard}$  es el tiempo de la banda de guarda entre dos transmisiones posteriores;  $C_{\omega}$  es la capacidad de cada longitud de onda; y  $(T_{cycle} - T * (N/W) * T_{guard})$  es la duración total del tiempo del ciclo donde se restan todos los  $T_{guard}$  de todas las  $N/W$  de las ONU's que se transmiten, en promedio, sobre la misma longitud de onda.

Este período de tiempo es el tiempo dedicado a la transmisión de los datos de las ONU's. Cuando esta cantidad de tiempo se multiplica por  $C_{\omega}$ , se obtiene la cantidad total de bits que se pueden transmitir en un tiempo de ciclo. Finalmente, multiplicando este valor por  $\phi_i$  se obtiene la cantidad máxima de bits que cada ONU puede transmitir de acuerdo con su velocidad de transmisión  $C_i$ .

$$\phi_i = \frac{C_i}{\sum C_k} = \frac{C_i}{C_{\omega}}$$

Para calcular el  $\phi_i$ , se debe considerar una restricción en la capacidad de las ONU's, que se muestra en la siguiente ecuación, y que establece que la suma de la capacidad requerida por las diferentes ONU's debe ser menor o igual a la capacidad total de la red,  $C_{pon}$ . El  $C_{pon}$  es básicamente la suma de la capacidad de las longitudes de onda individuales.

$$\sum C_k \leq C_{pon}$$

De ese modo, las ecuaciones anteriores garantizan que cada ONU pueda transmitir a su velocidad de transmisión requerida. En la siguiente sección, se analizan los resultados numéricos de la red propuesta.

### **3.2. Análisis de resultados obtenidos.**

#### **3.2.1. Estructura de simulación genérico.**

Para evaluar el rendimiento de los algoritmos propuestos, fue necesario implementar en un simulador de red basado en eventos discretos, modificado para simular una red óptica pasiva de largo alcance (*Long Reach-PON, LR-PON*) con tecnología WDM/TDM. Esta herramienta de simulación solo implementa las transmisiones ascendentes (upstream). Para reflejar la propiedad del tráfico real de Internet, se generó tráfico autosimilar agregando múltiples subtransmisiones, cada una de las cuales consiste en alternar períodos encendido/apagado (ON/OFF) distribuidos por Pareto, con un parámetro Hurst de 0.8.

El simulador genera tramas Ethernet con una longitud distribuida entre 64 y 1518 bytes. El tamaño del generador de cada ONU tiene una longitud de 10 Mbytes. El tiempo del ciclo de sondeo es de 2 ms, y en consecuencia el  $B_{max.i}$  calculado a través de la ecuación (véase sección 3.1), es 7687 bytes para multihilo (Multi-thread) y 15500 bytes para los otros esquemas, donde  $B_{max.i}$  es el mismo para cada ONU. El tiempo de la banda de guarda entre dos transmisiones posteriores es de  $1 \mu s$ . La topología utilizada incluye 128 ONU's que transmiten en las 8 longitudes de onda. Cada canal, consta de una sola longitud de onda, tiene una velocidad de datos de 1 Gbps, lo que da una capacidad total de 8 Gbps.

A medida que se simula el escenario de largo alcance (*Long Reach, LR*), las distancias desde la OLT a las ONU's se distribuyen uniformemente entre 80 km y 100 km. La carga ofrecida a la red por las ONU's varía durante la simulación de 0.05 a 1. En la carga 1, la velocidad de bits de cada ONU es 62.5 Mbps. Para el algoritmo de subprocesos múltiples, se utiliza  $T = 2$ , mientras que para el tiempo de finalización más temprano (*Earliest-Finish Time, EFT*) parcial con relleno de vacío (*Void Filling, VF*) multihilo (*MH*) se

utiliza  $P = 2$  que es considerado un valor razonable en el que se divide una transmisión para llenar también vacíos muy pequeños y evitar así una proliferación de mensajes de control.

### 3.2.2. Estructura de simulación que varía los parámetros de red.

En esta sección, se presentan diferentes escenarios de simulación, obteniendo parámetros de red variables, en los que se evalúan los algoritmos propuestos. Se considera que todas las ONU's transmiten a través de todas las longitudes de onda disponibles y luego se considera que  $W_i = W$ , donde  $W$  es el conjunto de longitudes de onda de la red. También, se define  $N$  para que sea el número total de ONU's del LR WDM/TDM-PON y  $N/W$  es el número promedio de ONU's por longitud de onda. Se considera a  $C_i$  como la capacidad por ONU.

Se consideraron dos escenarios de red diferentes donde los parámetros  $W$ ,  $N$  y  $N = W$  han sido variados como se muestra en los escenarios de los casos 1 y 2, tal como se muestra en la tabla 3.1. Para el escenario 3 (ver tabla 3.1) se resumen los parámetros utilizados para simular un escenario en el que diferentes conjuntos de ONU's transmiten a una velocidad diferente.

Tabla 3. 1: Configuración de parámetros para los escenarios de simulación.

	<b>Escenario-1</b>	<b>Escenario-2</b>	<b>Escenario-3</b>
<b><math>C_\omega</math> (Gbps)</b>	1	10	1
<b>Distribución de tecnologías de transmisión</b>	N1=1/3	N1=1/3	N1=2/3
	N2=1/3	N2=1/3	N2=1/6
	N3=1/3	N3=1/3	N3=1/6
<b>Distribución de distancias OLT – ONU's</b>	a) 1-20 km	a) 1-20 km	a) 1-20 km
	b) 80-100 km	b) 80-100 km	b) 80-100 km
	c) 500 m-100 km	c) 500 m-100 km	c) 500 m-100 km

Elaborado por: Autor.

### 3.2.3. Análisis de resultados obtenidos de la simulación genérica.

Primero se compara los resultados con el algoritmo de EFT puro para ver la mejora debido a la implementación del multihilo (MT) y al esquema de asignación propuesto. Luego se compara los resultados dados por EFT-VF, Multihilo sobre LR WDM/TDM-PON y EFT-Parcial VF MT. En la figura 3.1 se muestra el retardo promedio del paquete con relación a la carga ofrecida. Se puede observar que EFT-Parcial-VF MT y Multihilo (MT) introducen una mejora significativa con respecto al retardo del paquete, en comparación con EFT. Por el contrario, la ganancia de la solución EFT-VF con respecto al algoritmo EFT es limitada (menos del 5%). Se puede notar el mismo resultado también en la figura 3.2, donde se observa el porcentaje de reducción de retardo promedio con respecto a EFT.

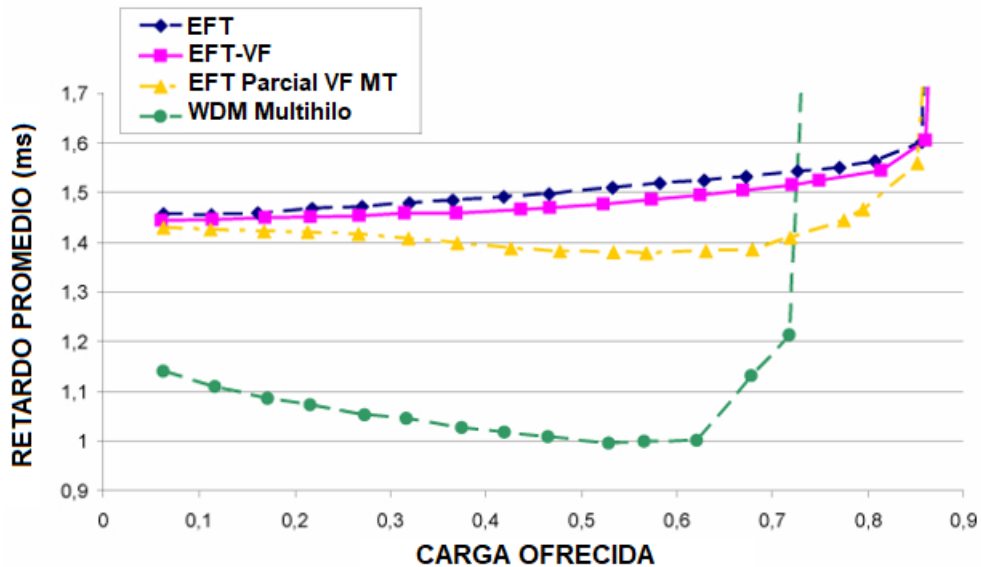


Figura 3. 1: Comparación promedio de retardo de paquetes.

Elaborado por: Autor

Además de esta ganancia limitada, se observa que la complejidad computacional del EFT-VF es  $O(N(N + W))$  mientras que la complejidad del EFT es  $O(N * W)$ . Dado que el valor de  $W \ll N$  se debe considerar que la complejidad de EFT-VF es  $O(N^2)$  y que la complejidad de EFT es  $O(N)$ , entonces el primero es exponencial en  $N$  mientras que el segundo es lineal en  $N$ , y la diferencia no es relevante si  $N$  es limitado.

Con respecto al multihilo (MT) sobre redes ópticas pasivas de largo alcance con multiplexación por división de longitud de onda/de tiempo (LR

WDM/TDM-PON), esta mejora es significativamente relevante para cargas bajas, mientras que para cargas medias comienza a disminuir. Desafortunadamente, para cargas altas, el retardo promedio proporcionado por este esquema se vuelve muy alto. Este comportamiento se debe al efecto de coordinación de hilos que no permite explotar eficientemente múltiples longitudes de onda.

Hay que tener en cuenta que, para cargas bajas/medias, el retardo promedio en las dos soluciones basadas en multihilo (MT) tiende a ser menor para aumentar el tráfico. Este comportamiento es contrario a la intuición, pero puede explicarse razonablemente considerando la transmisión de mensajes de control. De hecho, con cargas bajas, la longitud (en bytes) de las transmisiones de las ONU's tiende a ser corta, por lo que los mensajes de control se envían muy a menudo, lo que afecta negativamente el rendimiento del algoritmo.

Por el contrario, cuando la carga aumenta y la longitud de los paquetes de datos aumenta, la cantidad de mensajes de control es menor y se pierde menos tiempo en la fase de control, lo que nos permite aprovechar más los procesos de sondeo múltiples y simultáneos.

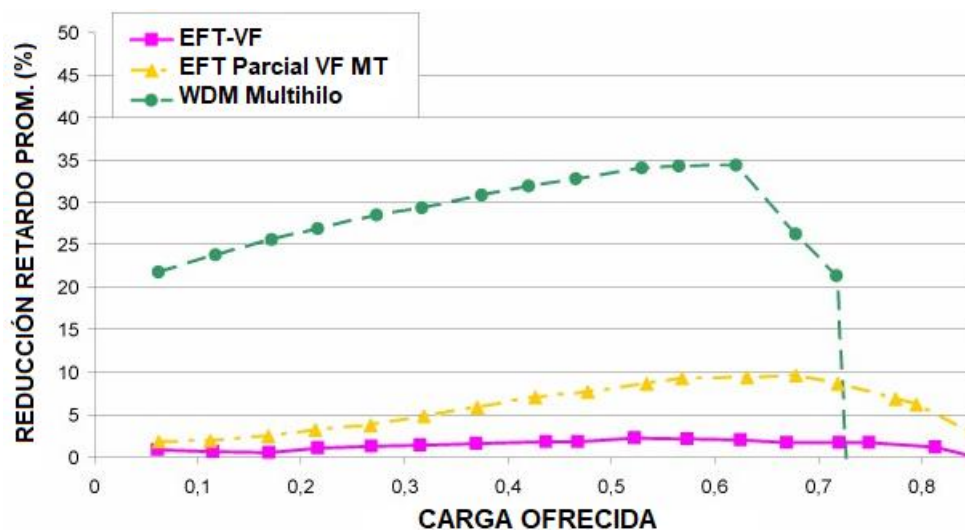


Figura 3. 2: Reducción del retardo promedio en comparación con el esquema EFT. Elaborado por: Autor

EFT-VF muestra un retardo promedio de paquetes ligeramente menor con respecto al esquema EFT. Dicha diferencia depende estrictamente de

las características de la red de acceso donde se aplica esta asignación. De hecho, las distancias desde las ONU a la OLT son muy diversas. Por el contrario, se probó el esquema EFT-VF en una red óptica pasiva de largo alcance con multiplexación por división de longitud de onda/tiempo (LR WDM/TDM-PON) donde todas las ONU's están a una distancia muy grande de la OLT. La solución que ofrece el mejor rendimiento es el EFT-Parcial-VF MT.

A bajas cargas, este esquema proporciona resultados similares a los proporcionados por EFT-VF. Esto sucede porque, en estas cargas, las longitudes de datos solicitadas por las ONU's son pequeñas si se comparan con la longitud de los vacíos y, por esta razón, es posible llenar los vacíos en el canal sin transmisiones de cortes. Cuando aumenta la carga, EFT-Parcial-VF hace un mejor uso de los vacíos formados en el canal, ya que se permite cortar transmisiones en más porciones.

De esta manera, se pueden llenar también vacíos más pequeños. Además, si una ONU requiere enviar una gran cantidad de datos, puede cambiar a la operación de multihilo (MT) logrando un mejor rendimiento. En contraste, cuando la carga de una ONU en la operación multihilo (MT) disminuye, la ONU ingresará nuevamente en la operación de hilo único (ST). A través de esta estrategia, es posible evitar la degradación del rendimiento, observada en su lugar cuando se aplica multihilo (MT) sobre redes ópticas pasivas de largo alcance WDM/TDM debido a la presencia constante de mensajes de control para mantener los diferentes hilos para cada ONU.

Esta característica es muy importante para evitar mensajes de control innecesarios, especialmente dada la naturaleza a ráfagas autosimilares del tráfico de Internet. Finalmente, se puede observar que EFT-Parcial-VF MT proporciona una mayor ganancia en el retardo promedio con respecto a EFT-VF, mientras que estos dos esquemas tienen una complejidad computacional de  $O(N^2)$ . También en este caso se considera que los valores de P y W son insignificantes con respecto a N.



### 3.2.4. Evaluación de rendimiento que varía los parámetros de red.

En esta sección se evalúa el rendimiento de diferentes escenarios de simulación, definidos en la tabla 3.1, donde diferentes parámetros de red han sido modificados sus variables. Tenga en cuenta que se mostrará el rendimiento solo para EFT-Parcial-VF MT propuesto, pero las mismas consideraciones se aplican también para los otros algoritmos evaluados en este trabajo. Además, todas las consideraciones que se hacen en esta sección son válidas cuando el  $C_i$  se mantiene constante para cada escenario. En el primer escenario, se varió el número de ONU's  $N$  y se estable fijamente el número de longitudes de onda  $W$ . De acuerdo con estos parámetros, el valor de  $N/W$  cambia. En este escenario de simulación, se nota que el rendimiento dado por cada algoritmo es el mismo para cada valor de  $N$ , para cargas bajas y medias. La figura 3.3 muestra que, cuanto más aumenta el valor de  $N$ , por lo tanto, aumenta  $N/W$ , más el retardo promedio del paquete supone valores muy altos a un valor bajo de carga de tráfico.

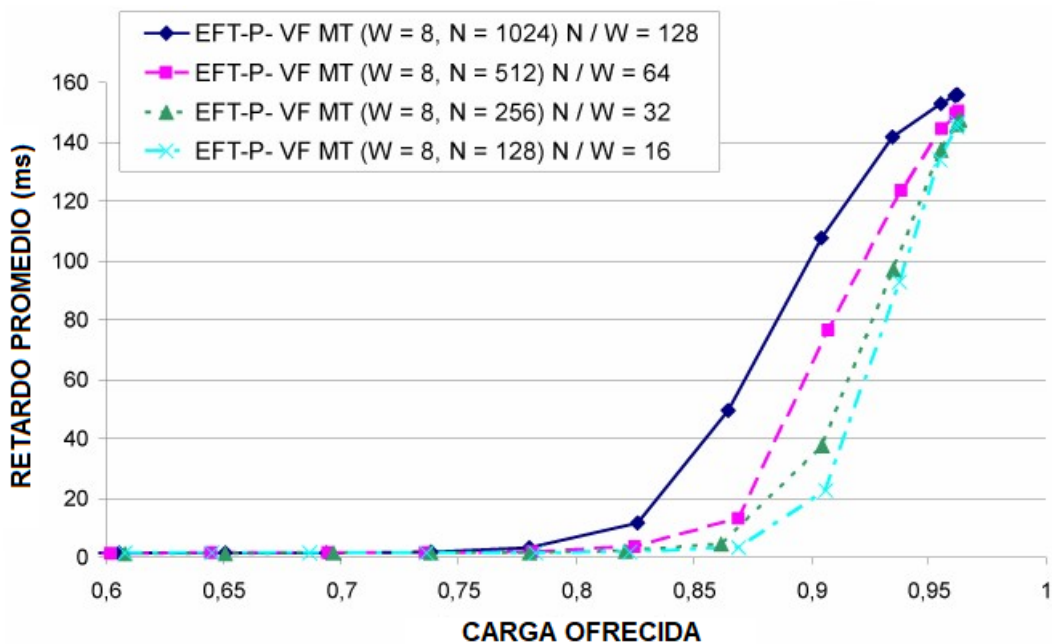


Figura 3. 3: Comparación promedio de retardo de paquetes de EFT-Parcial-VF MT que varía el valor de  $N$ .

Elaborado por: Autor

En el segundo escenario de simulación, se varía el número de longitudes de onda  $W$  y se fija el número de ONU's ( $N$ ). La figura 3.4 muestra que, también en este segundo escenario, el rendimiento es el

mismo en todas las configuraciones para cargas bajas y medias. Para cargas altas, cuando el número de longitudes de onda  $W$  disminuye, en consecuencia,  $N/W$  aumenta, el retardo asume valores muy altos con cargas de tráfico más bajas. Habiendo notado que el rendimiento depende del valor de  $N/W$ , también se probó en un escenario donde se varían tanto  $N$  como  $W$  para tener siempre el mismo valor para  $N/W$ .

Entonces se concluye, que, la variación de rendimiento resaltada en el primer y segundo escenario no depende de los valores de  $N$  y  $W$  sino de la relación  $N/W$ . De hecho, se observa que cuando el valor de  $N/W$  permanece igual, el algoritmo tiene el mismo retardo promedio para todas las cargas, incluso si los valores de  $N$  y  $W$  varían.

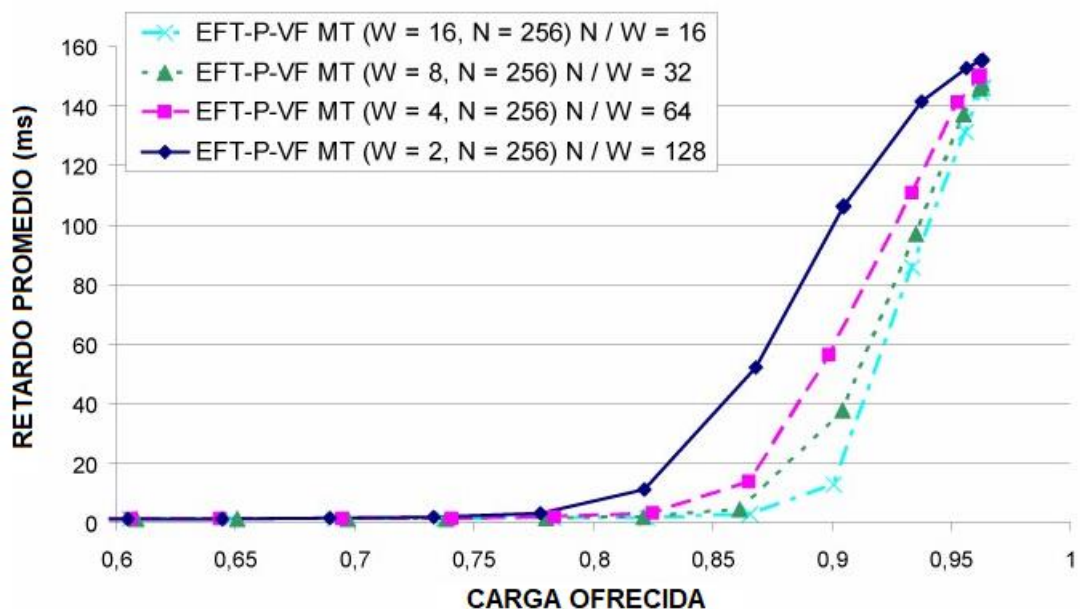


Figura 3. 4: Comparación de retardo promedio de paquetes promedio del algoritmo EFT-Parcial-VF MT que varía el valor de  $W$ .

Elaborado por: Autor

En el tercer escenario de simulación se comparan el caso en que un conjunto diferente de ONU's transmite a una velocidad diferente, llamada caso desequilibrado, con la situación en la que todas las ONU's transmiten a la misma velocidad, el caso equilibrado. En la figura 3.5 se muestran los resultados de esta comparación. En el caso desequilibrado, se observa que, si un conjunto de ONU's está transmitiendo a una velocidad alta, el rendimiento de las ONU's que transmiten a una velocidad más baja no se ve afectado en gran medida. Esto significa que es capaz de gestionar un

escenario desequilibrado que proporciona un retardo promedio razonable para cada conjunto de ONU's.

La degradación del rendimiento notada cuando el valor de  $N/W$  aumenta se debe a la  $T_{guard}$ . Se puede observar en la sección 3.1 que la ecuación de  $B_{max,i}$ , dado un cierto ciclo, cuando aumenta el número de  $N/W$ , el impacto del tiempo de la banda de guarda en esa ecuación aumenta, siendo multiplicado por  $N/W$ . Por lo tanto, el porcentaje de tiempo de la banda de guarda con respecto al tiempo de transmisión de datos aumenta cuando  $N/W$  aumenta. Una solución para evitar la degradación del rendimiento que sigue al aumento del valor de  $N/W$  es definir un  $T_{cycle}$  más largo para redes con un  $N/W$  más alto.

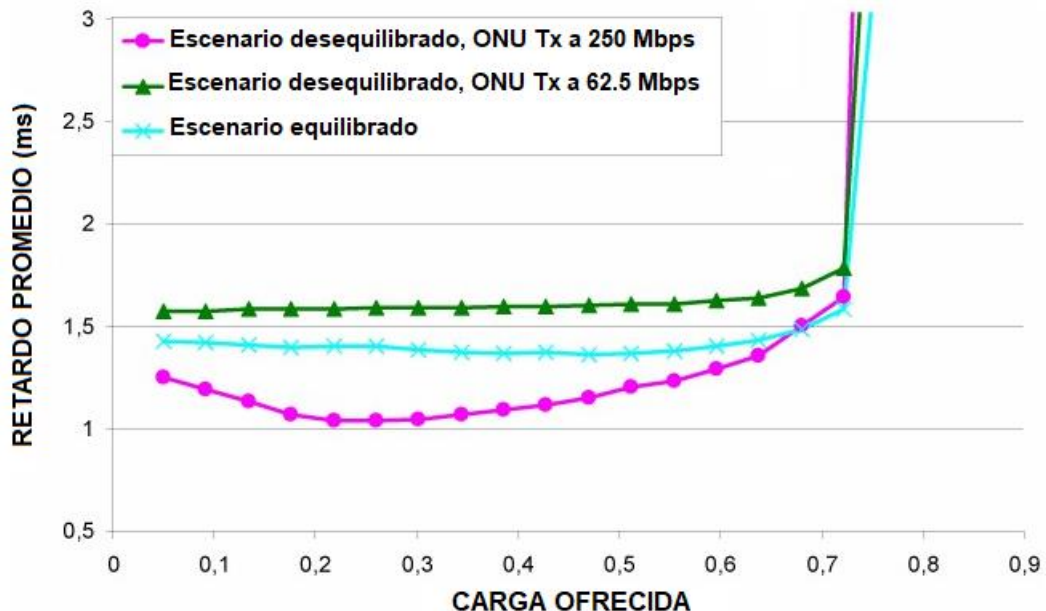


Figura 3. 5: Retardo promedio de paquetes para escenario desequilibrado y equilibrado.

Elaborado por: Autor

De esta manera, el porcentaje de tiempo de la banda de guarda permanece constante. De hecho, como la longitud de  $T_{guard}$  depende de las limitaciones tecnológicas que definen un valor mínimo de este parámetro, no es posible establecer un  $T_{guard}$  más bajo cuando  $N/W$  aumenta. Hay un límite en la duración del  $T_{cycle}$ . Cuanto más se alarga el ciclo, más se retrasan las transmisiones de las ONU's. Entonces aumenta el tiempo promedio del ciclo.

Por lo tanto, se concluye que existe una compensación entre tener un tiempo de ciclo pequeño, que permite alcanzar un pequeño retardo promedio de paquetes, y tener un tiempo de ciclo largo, que permite tener una pequeña sobrecarga debido al tiempo de banda de protección por ciclo. Se necesitan más estudios para identificar el equilibrio correcto.

### 3.3. Evaluación de ganancia de multiplexación

En esta sección, se evaluará el rendimiento de EFT en escenarios de red con un número diferente de longitudes de onda. Los parámetros de red utilizados para esta evaluación se presentan en la tabla 3.2. En la figura 3.6 se muestra el retardo promedio de EFT en configuraciones de red con diferentes números de longitudes de onda. También, se puede ver que al incrementar el número de longitudes de onda es posible disminuir el retardo promedio de la red. Además, también se puede notar que la ganancia introducida al duplicar el número de longitudes de onda disminuye cuando aumenta el número de longitudes de onda. En otras palabras, la ganancia proporcionada por un escenario de red con  $W=2$  con respecto a un escenario con  $W=1$  es mucho mayor que la ganancia lograda por un escenario con  $W=4$  con respecto a un caso con  $W=2$ .

Tabla 3. 2: Configuración de parámetros de diferentes escenarios de red para la evaluación del algoritmo EFT.

W	N	Capacidad por ONU (Mbps)	Capacidad por $\lambda$ (Gbps)
1	128	7.8125	1
2		15.625	
4		31.25	
8		62.5	

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.9 también se puede ver que la congestión (es decir, cuando el retardo promedio medido tiende a asumir valores muy altos) en los diferentes escenarios de red ocurre en diferentes cargas. Esto se debe al

tiempo por ciclo de sondeo que no se puede utilizar para transmitir datos debido a la presencia de tiempos de banda de guarda que deben asignarse entre transmisiones consecutivas de diferentes ONU's. De hecho, al aumentar el número de longitudes de onda, disminuye el número promedio de ONU's por ciclo que transmiten en una sola longitud de onda. En consecuencia, la cantidad promedio de tiempo de banda de guarda por ciclo, sobre cada longitud de onda, disminuye.

Con base en estas observaciones, se puede concluir que mientras una red óptica pasiva de largo alcance WDM/TDM es posible mejorar el rendimiento de la red al aumentar el número de longitudes de onda, sin embargo, no es muy conveniente agregar un alto número de longitudes de onda ya que la mejora del rendimiento se satura pronto. Tener en cuenta que esta declaración se aplica si el ancho de banda asignado a cada ONU ( $B_i$ ) está dimensionado para saturar la capacidad total de la red.

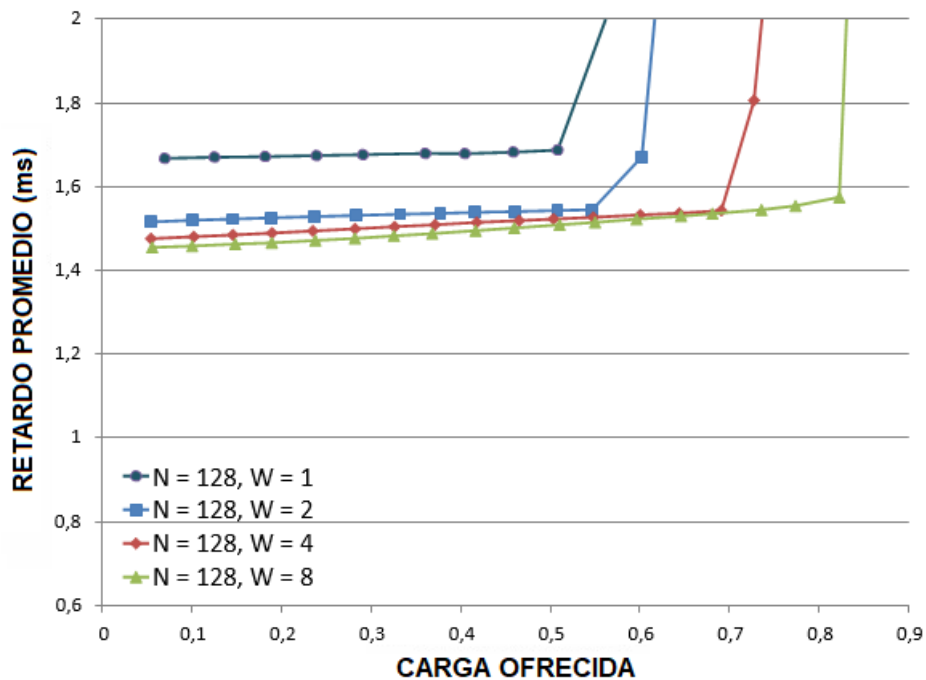


Figura 3. 6: Promedio de retardo de paquetes del algoritmo EFT en escenarios de red con diferentes longitudes de onda.

Elaborado por: Autor

### **3.4. Soluciones de redes ópticas pasivas de largo alcance WDM/TDM para la convergencia móvil fija de la red de retorno.**

Con base en los resultados de la sección 3.3, se discuten algunas pautas para la implementación de un sistema de acceso óptico que puede servir eficientemente a diferentes tipos de tráfico, como en el caso de una arquitectura de convergencia móvil fija (FMC), mediante el uso de una red óptica pasiva de largo alcance WDM/TDM. Se han evaluado y analizado el rendimiento de diferentes algoritmos de asignación de ancho de banda y longitud de onda, a saber, tiempo de finalización más temprano (EFT) y multiplexación por división de longitud de onda multihilo (WDM-MT), en escenarios con diferentes números de longitudes de onda. Al hacerlo, se observó cómo varía el rendimiento de la red en términos del retardo promedio si se utiliza una red óptica pasiva de largo alcance TDM o se explota una PON WDM/TDM híbrida con diferentes números de longitudes de onda.

En este estudio no se incluyó el análisis de una red óptica pasiva WDM pura por dos razones principales: i) en las PON's WDM cada ONU transmite en una longitud de onda separada y se le proporciona un gran ancho de banda. Debido a la naturaleza en ráfagas del tráfico, cada ONU no siempre transmite, y la capacidad de longitud de onda no se explota de manera eficiente. Por lo tanto, instalar una red de acceso WDM pura puede ser muy ineficiente. ii) el objetivo es evaluar la ganancia proporcionada por la multiplexación estadística que no puede considerarse en una red óptica pasiva PON.

Para proporcionar este tipo de análisis, fue utilizada el ancho de banda dinámico y asignación de longitud de onda (DBWA), que no se utilizan en redes ópticas pasivas WDM ya que no existe riesgo de colisión entre la transmisión de diferentes ONU's. Los resultados proporcionados muestran que con respecto a una red óptica pasiva TDM pura (con una sola longitud de onda) si se adopta una red óptica pasiva híbrida WDM/TDM se puede mejorar el rendimiento del tráfico, en términos de retardo promedio de paquetes. Además, se nota que la ganancia obtenida al introducir más

longitudes de onda disminuye cuando aumenta el número de longitudes de onda.

En base a esta observación, se puede concluir que el uso de una red óptica pasiva híbrida (WDM/TDM) puede mejorar significativamente el rendimiento de la red incluso sin dedicar una longitud de onda completa a cada ONU. Con base en la figura 3.6, se afirma que no es necesario agregar una gran cantidad de longitudes de onda para mejorar el rendimiento de la red. Este resultado puede conducir a algunas observaciones preliminares interesantes. En primer lugar, si se obtiene un retardo promedio limitado que permita que las ONU's transmitan a través de un número limitado de longitudes de onda, se diseña la red de acceso dividiendo todo el espectro de longitud de onda en subgrupos para crear un conjunto de PON virtuales. Cada PON virtual podría dedicarse a servir a diferentes conjuntos de la ONU dividiéndolos, por ejemplo, en función de los tipos de servicio.

Este resultado puede conducir a algunas observaciones preliminares interesantes. En primer lugar, si se obtiene un retardo promedio limitado que permita que las ONU's transmitan a través de un número limitado de longitudes de onda, se puede diseñar la red de acceso dividiendo todo el espectro de longitud de onda en subgrupos para crear un conjunto de PON virtuales. Cada PON virtual podría dedicarse a servir a diferentes conjuntos de ONU's dividiéndolos, por ejemplo, en función de los tipos de servicio.

### **3.5. Asignación dinámica de ancho de banda compatibles con tecnología de transceptores.**

En esta sección, se describe las principales funcionalidades de la asignación dinámica de ancho de banda (DBWA) que resuelven el problema de asignar las transmisiones originadas por transceptores con diferentes tecnologías. Todos los DBWA se basan en el protocolo de control multipunto (MPCP). Se supone que el tamaño de la concesión ya se ha resuelto durante una fase de preprocesamiento en la que se calcula la cantidad máxima de datos que puede transmitir cada ONU en cada tiempo de ciclo para garantizar cierto ancho de banda a cada ONU.

Sin pérdida de generalidad, se consideran tres familias diferentes de transceptores: i) Láseres sintonizados fijos únicos que no pueden sintonizar; ii) Matriz de láseres sintonizados fijos que pueden sintonizar inmediatamente su láser a otra longitud de onda ( $TT = 0s$ ); iii) Láseres sintonizables que se caracterizan por un tiempo de sintonización dado ( $TT > 0s$ ).

Por ejemplo, N1 es el conjunto de ONU's que utilizan láseres sintonizables para transmitir y, por lo tanto, pueden sintonizar cualquier longitud de onda en la red con un  $TT > 0$ . N2 es el conjunto de ONU's que utiliza una matriz de láseres, que pueden transmitir sobre cada longitud de onda en la red con un  $TT = 0$ . Finalmente, N3 son las ONU's que utilizan un solo láser sintonizado fijo, por lo que solo pueden transmitir sobre su longitud de onda nominal. Se utilizaron los mismos algoritmos de la sección 3.3, que son EFT y EFT-VF.

### 3.5.1. Propuesta de DBWA con reconocimiento de transceptores.

Primero se modifica los algoritmos anteriores para tener en cuenta el retardo del láser. En particular, para las ONU's en N1, los algoritmos modificados calculan el intervalo entre el instante en que se recibe el mensaje de puerta en la ONU y el tiempo de inicio de la transmisión en la misma ONU. Durante este intervalo, la ONU puede volver a sintonizar su láser, si es necesario. Si este intervalo es más corto que el láser  $TT$ , el algoritmo agrega un retardo adicional ( $\delta$ ). En particular, se agrega si  $t_{rx} < TT$  donde  $t$  es el tiempo de inicio calculado ya sea con EFT o EFT-VF, y el valor asignado a es  $\delta = TT - (t - t_{rx})$ .

Por lo tanto, en este caso, EFT agrega lo calculado al tiempo de inicio calculado, y el algoritmo EFT-VF se suma a la hora de inicio compilada. Para las ONU's en N2, las versiones originales de EFT y EFT-VF se aplican directamente. Las ONU en N3 transmiten en el primer tiempo de inicio disponible (considerando también los vacíos cuando se aplica EFT-VF) sobre una longitud de onda preasignada fija (y, dado que  $TT = 0$ , no es necesario agregar retardos relacionados con  $TT$ ). Estos nuevos algoritmos



se denominan aquí EFT+TT y EFT-VF TT, donde TT indica que estos DBWA toman en cuenta el retardo TT, cuando sea necesario.

En la figura 3.7 se muestra el procedimiento de asignación para una ONU en N1, donde la primera longitud de onda disponible para asignar una transmisión es W3, luego cada ONU necesita reajustar su láser. En este caso, el algoritmo calcula el intervalo entre el instante en que se recibe el mensaje en la ONU ( $t_{rx}$ ) y el tiempo de inicio de la transmisión ( $t_{EFT}$ ), y luego agrega un retardo para dar tiempo al láser de cada ONU para volver a sintonizar. Por lo tanto, el tiempo de inicio de la transmisión se retrasará ( $t_{EFT} + \delta$ ).

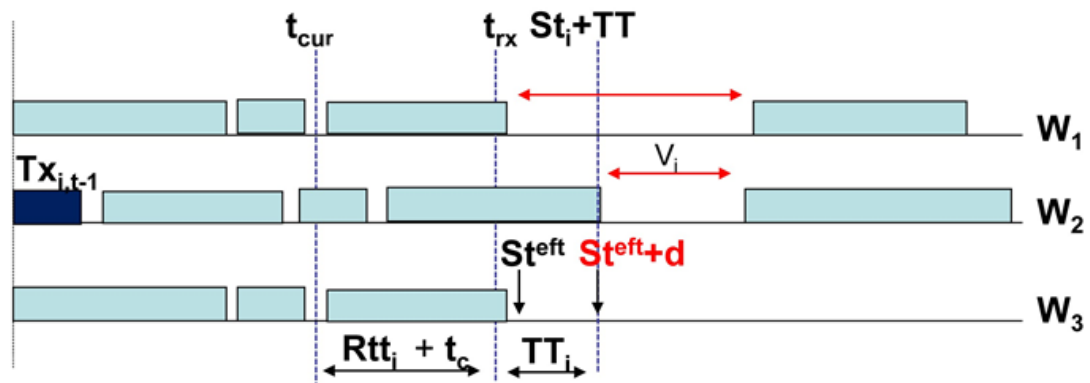


Figura 3. 7: Ejemplo de la asignación de transmisión de una ONU en N1 donde ocurre un retorno y es necesario agregar un retardo para volver a sintonizar el láser.  
Elaborado por: Autor

### 3.5.2. Matriz de láseres sintonizados fijos con capacidad de ajuste limitada.

También se evalúa el rendimiento de algunos de los DBWA, es decir, EFT + TT y EFT-VF + TT. Cuando los conjuntos de láseres sintonizados fijos pueden transmitir en un número limitado de longitudes de onda. De hecho, en toda la evaluación anterior se supuso que la matriz de láseres sintonizables puede sintonizarse con cada longitud de onda de la red, es decir, la cantidad de láseres en una matriz es igual a la cantidad de longitudes de onda. Sin embargo, se sabe que, para tener un dispositivo barato, la cantidad de láseres sintonizados fijos en la matriz debe ser limitada. En este caso, el algoritmo asigna las transmisiones de las ONU's.

### 3.6. Resultados y discusión

En esta sección, se compara el rendimiento en términos de retardo promedio de las asignaciones dinámicas de ancho de banda (DBWA). En particular, en la sección 3.6.2. se presentan los resultados obtenidos de los escenarios de simulación EFT y EFT-VF con tecnología de transceptores. En la sección 3.6.3 se presentan los resultados obtenidos de la comparativa entre las asignaciones dinámicas de ancho de banda (DBWA) compatibles con tecnología de transceptores (TT) propuestos y su versión simple. En la sección 3.6.4 se evalúa el rendimiento de matrices de láseres sintonizadores, es decir, cuando los conjuntos de láseres sintonizados fijos pueden transmitir en un número limitado de longitudes de onda.

#### 3.6.1. Antecedentes de la evaluación de escenarios de simulación.

Los algoritmos analizados fueron evaluados y comparados mediante simulación. Para este propósito, fue necesaria la implementación de asignaciones dinámicas de ancho de banda (DBWA) en un simulador de red basado en eventos discretos, y que fue modificado para modelar una red óptica pasiva con multiplexación por división de longitud de onda/tiempo (WDM/TDM), ya sea corto alcance como de largo alcance. Cabe recordar, que la plataforma de simulación solo implementa transmisiones ascendentes, similar a lo realizado en la sección 3.2. Se utiliza el parámetro Hurst de 0.8. El simulador genera tramas Ethernet con una longitud distribuida entre 64 y 1518 bytes.

El tamaño del generador de cada ONU se establece en 10 Mbytes. El tiempo máximo del ciclo de sondeo es de 2 ms, y en consecuencia  $B_{max,i}$  se calcula con la ecuación dada en la sección 3.1. Es decir, que se asume el mismo  $B_{max,i}$  para cada ONU. El tiempo de la banda de guarda entre dos transmisiones posteriores es de  $1 \mu s$ . El valor TT para las ONU's en N1 es  $100 \mu s$ . La topología de árbol utilizada incluye 24 longitudes de onda (W) y 192 ONU's divididas en tres grupos, dependiendo de su tecnología de transmisión.

Tabla 3. 3: Configuración de parámetros de escenarios de red para DBWA.

	<b>Escenario-1</b>	<b>Escenario-2</b>	<b>Escenario-3</b>
$C_w$ (Gbps)	1	10	1
<b>Distribución de tecnologías de transmisión</b>	N1=1/3	N1=1/3	N1=2/3
	N2=1/3	N2=1/3	N2=1/6
	N3=1/3	N3=1/3	N3=1/6
<b>Distribución de distancias OLT – ONU's</b>	a) 1-20 km	a) 1-20 km	a) 1-20 km
	b) 80-100 km	b) 80-100 km	b) 80-100 km
	c) 500 m-100 km	c) 500 m-100 km	c) 500 m-100 km

Elaborado por: Autor.

Se probaron en tres escenarios la asignación dinámica de ancho de banda (DBWA) en los que se modificó la capacidad de las longitudes de onda y la distribución de la tecnología de transmisión (es decir, el número de ONU's que utilizan una tecnología de transmisión particular en cada grupo). Luego, para cada escenario se varía la distribución de distancia OLT-ONU. Los parámetros de los 9 escenarios se muestran en la tabla 3.3, donde  $C_w$  se refiere a la capacidad de las longitudes de onda. Hay que considerar que la red está diseñada adecuadamente para soportar mayores pérdidas debido a las altas relaciones de división y largas longitudes de fibra.

### **3.6.2. Evaluación de asignaciones dinámicas de ancho de banda básicos contra los compatibles con TT.**

En esta sección, se comparan los algoritmos EFT+TT, EFT-VF+TT, EFT+TT básico y EFT-VF+TT básico en el escenario 1, donde operan tres tecnologías de transmisión diferentes en la red óptica pasiva (PON), y la distribución de distancias OLT-ONU es entre 500 m y 100 km. Se debe considerar que, tanto EFT+TT y EFT-VF+TT están diseñados para administrar varios valores diferentes de TT de los transceptores, en estas simulaciones se prueba a las DBWA's con dos valores diferentes de TT. Es decir, los valores utilizados son  $TT = 0$  y  $TT = 100 \mu s$ .

En la figura 3.8 se muestra la comparativa del retardo promedio de paquetes de todas las ONU's en la red óptica pasiva (PON) frente a la carga ofrecida entre EFT+TT, EFT-VF+TT, EFT+TT básico y EFT-VF+TT básico, cuando el TT del láser sintonizable es igual a  $100 \mu s$ . Se puede afirmar que, con la configuración dada, la coexistencia de diferentes tecnologías de transmisión sobre la misma red óptica pasiva WDM/TDM es posible ya que todas las asignaciones dinámicas de ancho de banda (DBWA) evaluadas aún pueden proporcionar un retardo promedio bajo (menos de 1.5 ms), a excepción de una carga muy alta (entre 80 y 90%), tal como se muestra en la figura 3.8.

También, se observa en la figura 3.8 EFT+TT básico tiene un retardo promedio más alto con respecto a EFT+TT, y EFT-VF+TT básico que tiene un retardo promedio más alto en comparación que EFT-VF+TT. Esto se debe al hecho de que en EFT+TT básico se agrega un retardo a todas las ONU's que tienen que volver a sintonizar, mientras que en EFT+TT el retardo de reajuste se agrega solo a las ONU's que realmente tienen un  $TT > 0$ .

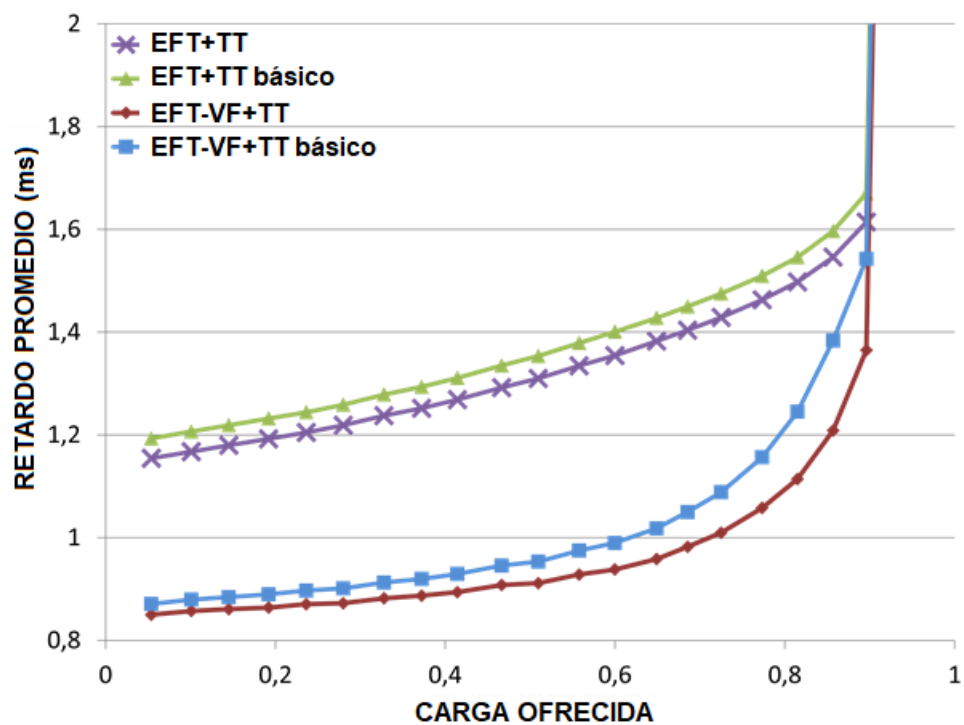


Figura 3. 8: Comparación promedio de retardo para el escenario 1 donde la distribución de distancia ONU-OLT está entre 500 m y 100 km.

Elaborado por: Autor

También se puede ver que la función básica tiene un mayor impacto en el caso de EFT-VF+TT que en el caso de EFT+TT. Dado que el EFT-VF+TT tiene un mejor uso de los vacíos en comparación con EFT-VF+TT básico, la brecha entre el retardo promedio de EFT-VF+TT y EFT-VF+TT básico es mayor en comparación con la brecha entre EFT+TT y EFT+TT básico.

A continuación, se comparan las ganancias relativas de EFT-VF+TT y EFT-VF+TT básico con respecto a EFT+TT. En las figuras 3.9 y 3.10 se muestra la reducción del retardo promedio de EFT-VF+TT y EFT-VF+TT básico con respecto a EFT+TT en diferentes escenarios en las que se modificaron: i) las distancias OLT-ONU (véase la figura 3.9), ii) el porcentaje de transceptores sintonizables dentro de la red (ver la figura 3.9 versus figura 3.10). Particularmente, en la figura 3.9 se muestra los resultados obtenidos en el escenario 1 y en la figura 3.10 muestra los datos obtenidos en el escenario 3.

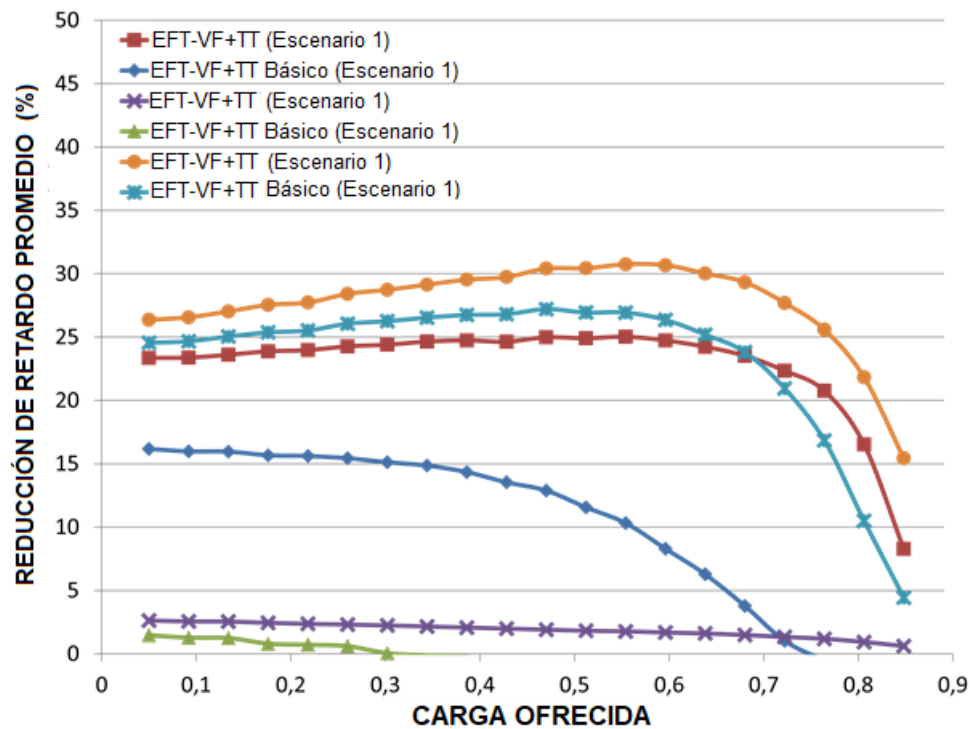


Figura 3. 9: Reducción de retardo promedio para los parámetros del escenario 1 de la tabla 3.3.

Elaborado por: Autor

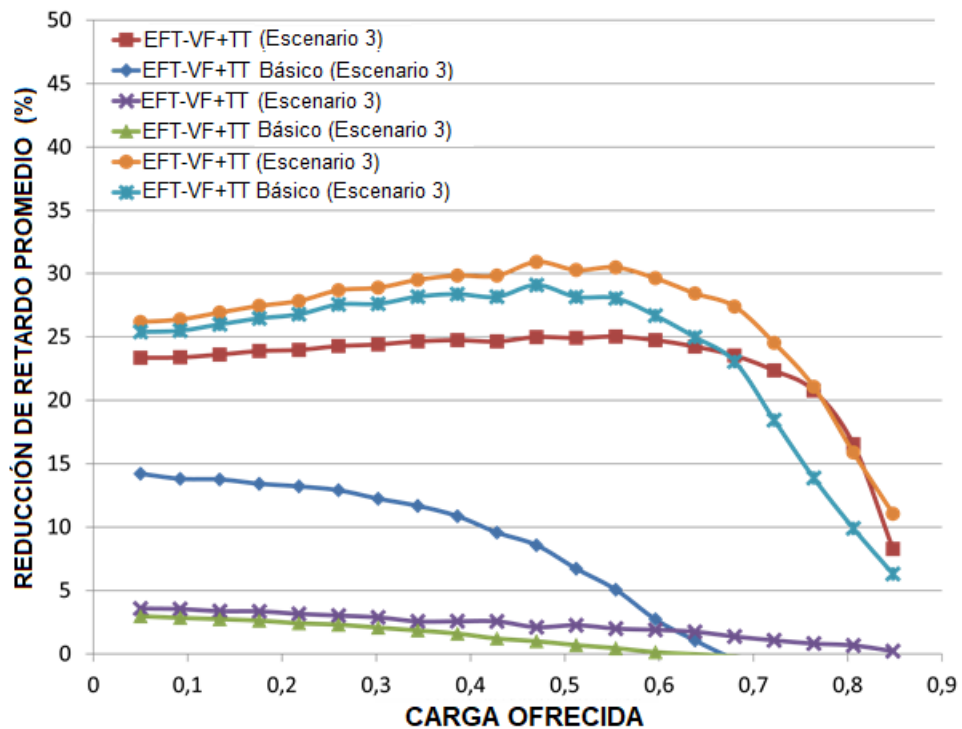


Figura 3. 10: Reducción de retardo promedio para los parámetros del escenario 3 de la tabla 3.3.

Elaborado por: Autor

Se puede notar que EFT-VF+TT siempre reduce el retardo promedio en comparación con EFT-VF+TT básico, en todos los escenarios investigados. Además, cuando aumenta la carga, aumenta la diferencia entre EFT-VF+TT básico y EFT-VF+TT, ya que disminuye la reducción de retardo promedio de EFT-VF+TT básico. Esto se debe al hecho de que, a altas cargas, el número de vacíos en la red disminuye y el comportamiento de EFT-VF+TT básico se acerca al comportamiento de EFT+TT.

Esto es cierto para todos los escenarios, pero es mucho más evidente en los casos de corto alcance (es decir, distancias OLT-ONU entre 1-20 km), tal como se muestra en las Figs. 3.3 y 3.4 donde la distancia entre las curvas de EFT-VF + TT (1-20 km) y Simple EFT-VF + TT (1-20 km) es mucho mayor que en todos los demás casos.

Analizando la variación de las distancias entre OLT y ONU, las curvas de EFT-VF+TT (distancia entre 80 y 100 km) y EFT-VF+TT básico (distancia entre 80 y 100 km) que se muestran en las figuras 3.9 y 3.10 se refieren a un

escenario de largo alcance y muestran que la reducción del retardo promedio de EFT-VF+TT básico y EFT-VF+TT con respecto a EFT+TT es muy limitada (menos del 5%). Esto se debe al hecho de que, en un escenario de largo alcance, donde hay una baja distribución de las distancias entre OLT y ONU (es decir, entre 80 y 100 km), el número de vacíos disminuye y luego el rendimiento de EFT+TT y EFT-VF+TT (tanto versiones básicas como no básicas) están muy cerca.

Al comparar los casos de corto alcance con los casos de largo alcance (es decir, distancias entre la OLT y ONU entre 80 a 100 km y 500 m a 100 km) mostrados por las figuras 3.9 y 3.10 se puede observar que la diferencia en la reducción del retardo promedio entre EFT-VF+TT básica y EFT-VF+TT es mayor en los casos de corto alcance. Por lo tanto, se afirma que en escenarios de corto alcance es más importante tener una asignación dinámica de ancho de banda (DBWA) que sea capaz de gestionar el TT de manera inteligente.

Analizando la variación del porcentaje de transceptores, se compara las figuras 3.9 y 3.10 y se puede notar que en el caso en que el porcentaje de transceptores sintonizables aumenta (como en el escenario 3), la diferencia entre el rendimiento de EFT-VF+TT básico y EFT-VF+TT aumenta ligeramente con respecto al escenario 1. Es decir, las tecnologías de transmisión están distribuidas uniformemente.

En el escenario 3, la reducción de retardo promedio de EFT-VF+TT básico es menor que en el escenario 1. Esto sucede porque en el escenario 1 (ver figura 3.9), en EFT-VF+TT básico, 2/3 de las transmisiones no son retardadas (es decir, de las ONU's en N2 y N3) mientras que en el escenario 3 (ver figura 3.10) solo 1/3 de las transmisiones no son retardadas (es decir, de las ONU's en N2 y N3).

Con relación a la variación de la capacidad de longitud de onda., también fueron evaluadas las diferencias en términos de reducción del retardo promedio entre EFT-VF + TT básico y EFT-VF + TT cuando las

longitudes de onda tienen capacidades diferentes. El gráfico para el escenario 2 no se informa aquí ya que se nota que una capacidad diferente no afecta significativamente el rendimiento de los DBWA evaluados. En el caso de que la capacidad sea de 10 Gbps, la reducción de retardo promedio de EFT-VF+TT básico y EFT-VF+TT es ligeramente mayor (alrededor del 5% más) que en el caso de que la capacidad de cada longitud de onda sea 1 Gbps.

### **3.6.3. Evaluación del retardo promedio: matriz de láseres sintonizados fijos con capacidad de ajuste limitada**

En esta sección, se evalúa el rendimiento de algunas asignaciones dinámicas de ancho de banda (DBWA) previamente estudiados, cuando las matrices de láseres sintonizados fijos pueden transmitir sobre un número limitado de longitudes de onda. El escenario de simulación utilizado para esta evaluación es el escenario 1c definido en la tabla 3.3. En este escenario, cada ONU en N2 puede transmitir a través de un conjunto limitado de longitudes de onda contiguas.

Estos conjuntos de longitudes de onda se asignan de forma circular a las ONU en N2, esto significa que estas ONU no transmiten en el mismo número limitado de longitudes de onda. Por ejemplo, si en una red se tiene 3 ONU's con matrices de láseres sintonizados fijos y 4 longitudes de onda, y cada ONU solo puede transmitir más de 3 longitudes de onda. Los conjuntos de longitudes de onda se asignan de la siguiente manera: ONU1 puede transmitir sobre las longitudes de onda 1, 2 y 3. ONU2 puede transmitir sobre las longitudes de onda 2, 3 y 4. ONU3 puede transmitir sobre las longitudes de onda 3, 4 y 1.

En este escenario, todas las ONUs en N2 están equipadas con las mismas matrices de láseres sintonizados fijos. En particular, se probaron tres escenarios en los que la matriz de láseres sintonizados fijos está compuesta por 4, 8 o 12 láseres. Al comparar estos tres casos con el caso en el que el número de láseres en las matrices de láseres sintonizados fijos es el mismo que el número de longitudes de onda disponibles en la red (es



decir, 24 longitudes de onda), en consecuencia, este caso como sintonización total.

La figura 3.11 muestra el retraso promedio de paquetes de EFT+TT cuando las ONU's en N2 tienen una capacidad de sintonización limitada diferente (es decir, pueden usar solo 4, 8 o 12 longitudes de onda ya que la matriz de láseres sintonizados fijos está compuesta solo por 4, 8 o 12 láseres), en comparación con el caso en que las ONU's en N2 tienen una capacidad de sintonización completa (es decir, pueden sintonizar a cada longitud de onda de la red ya que estas ONU's están equipadas con grandes conjuntos de láseres).

Se puede notar que el retardo promedio de EFT+TT en el caso de sintonización completa y donde las matrices de láseres pueden usar solo un número limitado de longitudes de onda tiene una variación muy pequeña, que es casi insignificante. Disminuir el número de longitudes de onda disponibles para cada conjunto de láseres sintonizados fijos aumenta ligeramente el retardo promedio, si se compara con el caso en que los conjuntos de láseres pueden usar todas las longitudes de onda en las redes. Sin embargo, esta diferencia en términos de retardo promedio de paquetes es muy limitada, es decir, menos de  $2 \mu s$ .

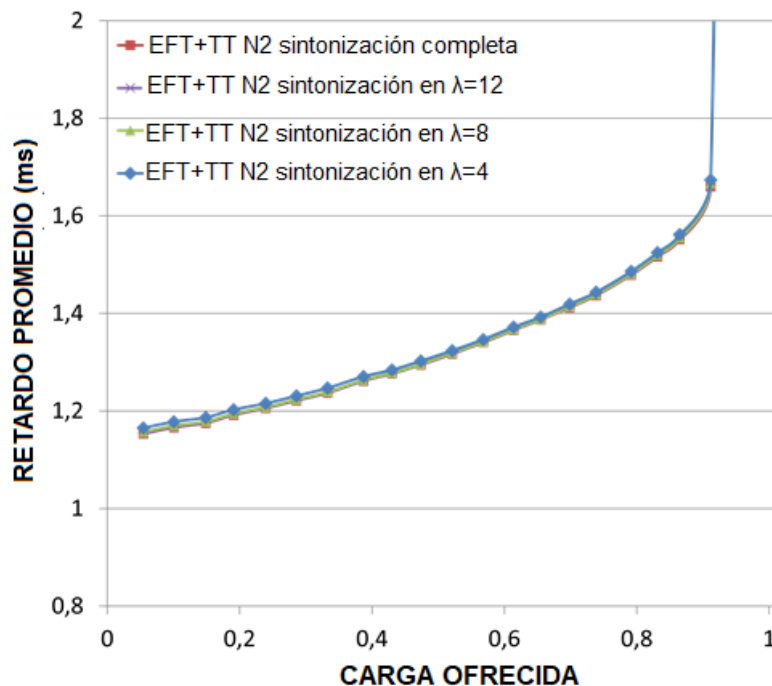


Figura 3. 11: Retardo promedio para EFT+TT.  
Elaborado por: Autor

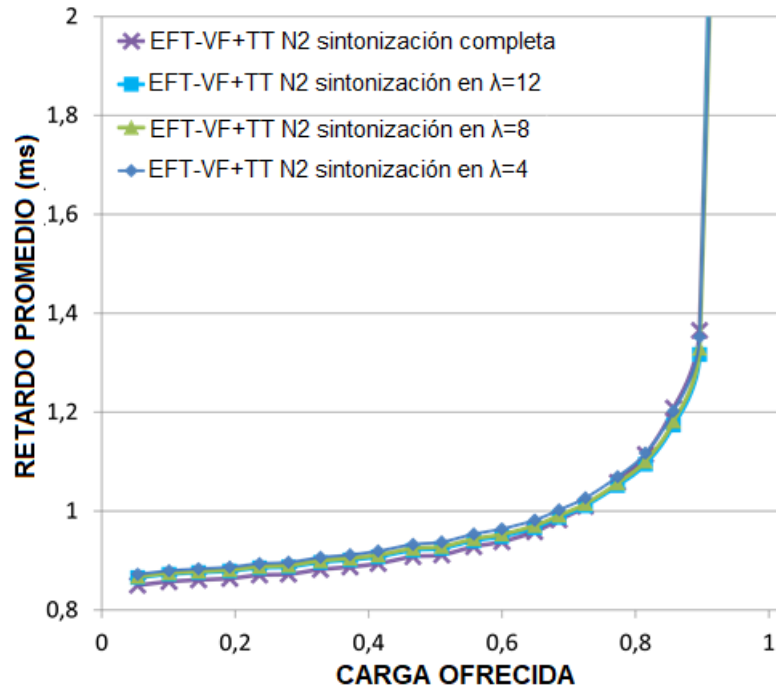


Figura 3. 12: Retardo promedio para EFT-VF+TT.  
Elaborado por: Autor

La figura 3.12 muestra el retardo promedio de paquetes del algoritmo EFT-VF+TT cuando las ONU's en N2 tienen una capacidad de sintonización limitada diferente, en comparación con el caso en que las ONU's en N2 tienen una capacidad de sintonización completa. Se aplican consideraciones similares para EFT+TT en el caso de EFT-VF+TT. Con EFT-VF+TT, la diferencia en términos de retardo promedio es un poco mayor que en el caso EFT+TT, pero sin embargo es muy limitado.

## Conclusiones

1. La revisión teórica y bibliográfica de los fundamentos de las redes de transporte y de acceso óptico, tecnologías de fibra óptica y de ancho de banda fueron relevantes para el desarrollo del presente documento.
2. El diseño de los escenarios de simulación de redes ópticas pasivas fue correctamente implementado en un simulador de red basados en eventos discretos.
3. Se demostró que las redes ópticas pasivas de largo alcance multiplexadas por división de longitud de onda/tiempo (WDM/TDM) podrían convertirse en una solución atractiva para implementar un sistema FMC, que, por definición, debe servir a diferentes servicios con diferentes requisitos de rendimiento (por ejemplo, retardo promedio, retardo máximo). La segunda razón está relacionada con el costo de la red. El costo de un transceptor sintonizable también depende del ancho de su rango de sintonización (es decir, el número de longitudes de onda que un transceptor debe poder sintonizar): cuanto mayor sea el rango de sintonización, mayor será el costo de un dispositivo.
4. Se pudo lograr un rendimiento de red satisfactorio con un rango de sintonización razonablemente estrecho de los láseres, entonces se podría poder instalar múltiples redes ópticas pasivas de largo alcance multiplexadas WDM/TDM con una pequeña cantidad de longitudes de onda (también llamadas PON virtuales), que pueden tener una capacidad limitada.

## **Recomendaciones**

1. Investigar de métodos eficientes para administrar la capacidad de proporcionar a los usuarios finales una buena calidad de experiencia (QoE), con bajo retardo, altas tasas de bits, y conectividad sin problemas a la red.
2. Proponer aplicaciones para tráfico proporcionado por IoT a la red bajo diversos requisitos en términos de QoS (por ejemplo, diferentes tipos de retardo).

## Bibliografia

- Caillouet, C., Coudert, D., & Kodjo, A. (2013). Robust optimization in multi-operators microwave backhaul networks. *Global Information Infrastructure Symposium - GIIS 2013*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GIIS.2013.6684375>
- Effenberger, F., & El-Bawab, T. S. (2009). Passive Optical Networks (PONs): Past, present, and future. *Optical Switching and Networking*, 6(3), 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2009.02.001>
- Ericsson. (2018). *Ericsson Microwave Outlook Report—2018. Industry leaders and more.* Ericsson.Com. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/microwave-outlook/reports/2018>
- ETSI. (2019). *Network Functions Virtualization: An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action* [Normativas ETSI].
- IRTF. (2019). *IRTF Information-Centric Networking Research Group (ICNRG)*. <https://irtf.org/icnrg>
- Kuntal, R., & Singla, R. (2016). Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for MultiOLT and Multi-Wavelength PON-Based HetNets. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 5(5), 1512–1520.
- Liem, A. T. (2013). P2P locality awareness architecture in Ethernet Passive Optical Networks. *2013 International Conference on QiR*, 111–115. <https://doi.org/10.1109/QiR.2013.6632547>
- Liu, X. (2019). Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era. *IScience*, 22, 489–506. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.11.026>

- Mell, P. M., & Grance, T. (2011). *SP 800-145. The NIST Definition of Cloud Computing* [Technical Report]. National Institute of Standards & Technology.
- Muciaccia, T., Gargano, F., & Passaro, V. (2014). Passive Optical Access Networks: State of the Art and Future Evolution. *Photonics*, 1(4), 323–346. <https://doi.org/10.3390/photonics1040323>
- Shahid, A., & Machuca, C. M. (2017). Dimensioning and Assessment of Protected Converged Optical Access Networks. *IEEE Communications Magazine*, 55(8), 179–187. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1601204>
- Su, Y., Tian, Y., Wong, E., Nadarajah, N., & Chan, C. C. K. (2008). All-optical virtual private network in passive optical networks. *Laser & Photonics Review*, 2(6), 460–479. <https://doi.org/10.1002/lpor.200810021>



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



**SENESCYT**  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Freire Castellanos, Jorge Santiago** con C.C: # 0926802687 autor del trabajo de titulación: Evaluación de redes ópticas pasivas mediante asignación de ancho de banda y longitud de onda con tecnología coexistente Tx-Rx en redes convergentes, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 24 de agosto del 2020

f. 

Nombre: **Freire Castellanos, Jorge Santiago**

C.C: 0926802687

<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>		
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Evaluación de redes ópticas pasivas mediante asignación de ancho de banda y longitud de onda con tecnología coexistente Tx-Rx en redes convergentes	
<b>AUTOR(ES)</b>	Freire Castellanos, Jorge Santiago	
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando	
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado	
<b>PROGRAMA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones	
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones	
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	Guayaquil, 24 de agosto del 2020	<b>No. DE PÁGINAS:</b> 62
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Teoría de las Comunicaciones, Transmisiones Ópticas.	
<b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>	Redes, Acceso, Transporte, Ancho de Banda (BW), Multiplexación, Tiempo.	
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b> El presente trabajo de titulación de examen complejo consistió en realizar el diseño y evaluación de escenarios de simulación de redes ópticas pasivas (PON) multiplexadas por longitud de onda y división de tiempo (WDM/TDM) ya sean de corto y largo alcance utilizando la asignación dinámica de ancho de banda (DBWA). En el capítulo 1, se describe las generalidades del proyecto, entre las más destacadas, la definición del problema a investigar, el objetivo general y los objetivos específicos. En el capítulo 2, se describe los fundamentos teóricos para redes de transporte, redes de acceso ópticos tanto activas (AON) como las pasivas (PON), impacto de las aplicaciones punto a punto (PtP) y tecnologías de banda ancha. En el capítulo 3, se diseñan los escenarios de simulación para redes ópticas pasivas para diferentes distancias entre la OLT y ONU, y finalmente, se evaluaron los resultados obtenidos en la simulación de cada uno de los escenarios.		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 0982874505	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:jorge2_santi_fc@hotmail.com">jorge2_santi_fc@hotmail.com</a>
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Manuel Romero Paz	
	<b>Teléfono:</b> 0994606932	
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec">manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec</a>	
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>		
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>		
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>		
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>		