



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO

Análisis comparativo del rendimiento de protocolos de acceso múltiple en redes inalámbricas de fibra óptica (Fi-Wi) utilizando Python

AUTOR

Mendoza Sánchez, Xavier Alexander

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR

Jaramillo Chamba, Daniel Armando

Santa Elena, Ecuador

Año 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.
COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

**Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.
TUTOR**

**Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Ing. Lucrecia Llerena Guevara, Ph.D.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Abg. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por MENDOZA SÁNCHEZ, XAVIER ALEXANDER como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

Ing. Daniel Armando Jaramillo Chamba, Mgtr.

Santa Elena, 4 de abril de 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, MENDOZA SÁNCHEZ XAVIER ALEXANDER

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Análisis comparativo del rendimiento de protocolos de acceso múltiple en redes inalámbricas de fibra óptica (Fi-Wi) utilizando Python, previo a la obtención del título en 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 del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 4 de abril de 2025

EL AUTOR

Xavier Alexander Mendoza Sánchez



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Análisis comparativo del rendimiento de protocolos de acceso múltiple en redes inalámbricas de fibra óptica (Fi-Wi) utilizando Python, presentado por el estudiante, Xavier Alexander Mendoza Sánchez fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 5%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

 INFORME DE ANÁLISIS magister		
MT Xavier Mendoza Tesis Final		5% Textos sospechosos
		1% Similitudes 0% similitudes entre comillas 0% entre las fuentes mencionadas 2% Idiomas no reconocidos 1% Textos potencialmente generados por IA
Nombre del documento: MT Xavier Mendoza Tesis Final.docx ID del documento: f65a997d192e473603f7e4ce99c1bca2d5b4877c Tamaño del documento original: 2,81 MB Autores: []	Depositante: DANIEL ARMANDO JARAMILLO CHAMBA Fecha de depósito: 4/4/2025 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 4/4/2025	Número de palabras: 15,293 Número de caracteres: 97,320

TUTOR

Ing. Daniel Armando Jaramillo Chamba, Mgtr.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, MENDOZA SÁNCHEZ, XAVIER ALEXANDER

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales del proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo, además apruebo la reproducción de este proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 4 de abril de 2025

EL AUTOR

Xavier Alexander Mendoza Sánchez

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mis padres, quienes con su amor, apoyo y sabiduría han sido mi mayor inspiración a lo largo de este camino. A mi esposa, por su paciencia, comprensión y por estar siempre a mi lado, y a mi hijo, cuya alegría me dio las fuerzas para seguir adelante en los momentos más difíciles.

Un especial agradecimiento a mi tío Diego Sánchez, por su constante guía y ayuda invaluable. Su apoyo fue fundamental para superar muchos de los retos que enfrenté en esta travesía. A todos los que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de esta tesis, ¡muchas gracias!

Mendoza Sánchez, Xavier Alexander

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, por ser mi fuente de inspiración y por su apoyo incondicional, y a mi esposa, por su amor, paciencia y constante compañía a lo largo de este desafío. A mi hijo, cuya alegría me ha dado fuerzas para continuar cada día.

También dedico este logro a mi tío Diego Sánchez, cuya guía y ayuda fueron esenciales en este proceso. A todos ellos, con todo mi cariño y gratitud, este trabajo es para ustedes.

Mendoza Sánchez, Xavier Alexander

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	XVII
RESUMEN	XIX
ABSTRACT	XX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Introducción.....	5
1.2. Tecnologías de comunicaciones inalámbricas.....	6
1.2.1. Redes WiFi – IEEE 802.11	7
1.2.2. Redes WiMAX – IEEE 802.16	8
1.2.3. Redes ZigBee – IEEE 802.15.4.....	9
1.2.4. Redes LTE	11

1.3.	Generalidades sobre las comunicaciones inalámbricas ópticas.....	12
1.3.1.	Las redes FiWi: evolución y arquitectura.....	14
1.3.2.	Ventajas y desafíos de las redes Fi-Wi.....	15
1.3.3.	Restricciones y limitaciones de las comunicaciones ópticas inalámbricas	16
1.4.	Tecnologías de acceso óptico y redes inalámbricas	17
1.4.1.	Tecnologías de acceso óptico (GPON, WDM-PON) en redes Fi-Wi	18
1.4.2.	Tecnologías inalámbricas en redes FiWi.....	19
1.4.3.	Desafíos y oportunidades de integración.....	21
1.5.	Protocolos de acceso múltiple (MAPs)	22
1.5.1.	Acceso múltiple por división en el tiempo – TDMA	23
1.5.2.	Acceso múltiple por división de código – CDMA	24
1.5.3.	Acceso múltiple por división de frecuencia – FDMA.....	25
1.5.4.	Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal – OFDMA.....	27
1.5.5.	Ventajas y desventajas de los métodos de acceso	28
1.6.	Infraestructura de redes Fi-Wi.....	28
1.6.1.	Modelos de implementación y topologías	30
1.6.2.	Integración entre componentes ópticos e inalámbricos.....	31
1.7.	Evaluación del rendimiento de las redes FiWi.....	32
1.7.1.	Métricas para la evaluación de tecnologías de acceso múltiple	33
1.7.2.	Técnicas de simulación y evaluación del rendimiento en redes WiFi.....	33
	CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	35
2.1.	Contexto de la investigación.....	35
2.2.	Diseño y alcance de la investigación.....	35
2.3.	Tipo y métodos de investigación	36

2.4.	Población y muestra	36
2.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	36
2.6.	Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.	37
2.7.	Implementación de los escenarios de simulación	37
2.7.1.	Diseño de algoritmos de simulación.....	38
2.7.2.	Representación gráfica para posterior discusión comparativa	42
2.7.3.	Herramientas y librerías utilizadas en la simulación con Python.....	43
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		45
3.1.	Introducción.....	45
3.2.	Descripción general de simulación del rendimiento de redes FiWi	45
3.3.	Discusión de resultados obtenidos en la simulación de TDMA.....	46
3.3.1.	Análisis de retardo en la red Fi-Wi usando el método TDMA.....	46
3.3.2.	Análisis del rendimiento de la red FiWi usando el método TDMA	47
3.3.3.	Análisis de ocupación del BW en la red FiWi usando el método TDMA	48
3.4.	Discusión de resultados obtenidos en la simulación de CDMA.....	48
3.4.1.	Análisis de retardo en la red FiWi usando el método CDMA.....	48
3.4.2.	Análisis del Rendimiento en la red FiWi usando el método CDMA	49
3.4.3.	Análisis de uso del BW en la red Fi-Wi usando la tecnología CDMA	50
3.5.	Resultados del método FDMA	51
3.5.1.	Análisis de retardo en la red FiWi usando el método FDMA	51
3.5.2.	Análisis del Rendimiento en la red FiWi usando el método FDMA.....	51
3.5.3.	Análisis de utilización del BW en la red FiWi usando el método FDMA	52
3.6.	Discusión Comparativa de Protocolos	53

3.6.1. Comparativa del retardo entre las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA	53
3.6.2. Comparativa del rendimiento entre las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA.....	54
3.6.3. Comparativa del uso del BW entre las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA	55
3.7. Comentarios Finales	56
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Características de TDMA, CDMA y OFDMA en redes Fi-Wi.....	22
Tabla 2. 1: Configuración de los parámetros de simulación de la red Fi-Wi.	37
Tabla 3. 1: Resumen de parámetros de simulación de la red Fi-Wi.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Espectro utilizado en redes inalámbricas ópticas.....	5
Figura 1. 2: Acceso al canal mediante la función de coordinación distribuida (DCF) en Wi-Fi.....	7
Figura 1. 3: Arquitectura del estándar IEEE 802.16 - WiMAX.....	9
Figura 1. 4: Distribución de canales Zigbee y Wi-Fi.....	10
Figura 1. 5: Aplicaciones utilizadas en el estándar IEEE 802.15.4 - Zigbee.....	10
Figura 1. 6: Arquitectura de la tecnología LTE – 3 GPP.....	12
Figura 1. 7: Arquitectura de red FiWi.....	14
Figura 1. 8: Arquitectura de red FiWi con indicadores de tráfico de QoS.....	15
Figura 1. 9: Arquitectura de una red óptica pasiva (PON).....	17
Figura 1. 10: Arquitectura de una WDM-PON.....	18
Figura 1. 11: Arquitectura de una TDM-PON.....	19
Figura 1. 12: Configuración de infraestructura de la red de acceso inalámbrica de fibra (Fi-Wi).....	20
Figura 1. 13: Arquitectura TDMA y sus respectivas tecnologías PON.....	23
Figura 1. 14: Arquitectura TDMA en comunicaciones inalámbricas móviles.....	24
Figura 1. 15: Codificador de acceso múltiple por división de código óptico bipolar (Bi-OCDMA) en el simulador OptiSystem.....	25
Figura 1. 16: Topología de red de un FDMA-PON inalámbrico.....	26
Figura 1. 17: Esquema de canal ascendente para una OFDMA-PON.....	27
Figura 1. 18: Infraestructura Fi-Wi de la red óptica pasiva multiplexada por división de longitud de onda y tiempo (TWDM-PON).....	29

Figura 2. 1: Ubicación de la central de CNT EP Guayacanes en Guayaquil.....	35
Figura 2. 2: Pseudocódigo 1 – Configuración del escenario de red Fi-Wi.	39
Figura 2. 3: Pseudocódigo 2 – Configuración del protocolo TDMA en la red Fi-Wi. ...	40
Figura 2. 4: Pseudocódigo 3 – Configuración del protocolo CDMA en la red Fi-Wi. ...	41
Figura 2. 5: Pseudocódigo 4 – Configuración del protocolo FDMA en la red Fi-Wi. ...	41
Figura 2. 6: Pseudocódigo 5 – Evaluación del BW de GPON en la red Fi-Wi.	42
Figura 2. 7: Pseudocódigo 6 – Generación de gráfica comparativa de las métricas de rendimiento en la red Fi-Wi.	43
Figura 3. 1: Resultados del retardo (s) por nodo en la red FiWi usando TDMA.	47
Figura 3. 2: Resultados del rendimiento (Mbps) por nodo en la red FiWi usando TDMA.	47
Figura 3. 3: Resultados del uso del BW (%) por nodo en la red FiWi usando TDMA. .	48
Figura 3. 4: Resultados del retardo (s) por nodo en la red FiWi usando CDMA.	49
Figura 3. 5: Resultados del rendimiento (Mbps) por nodo en la red FiWi usando CDMA.	50
Figura 3. 6: Resultados del uso del BW (%) por nodo en la red FiWi usando CDMA. .	50
Figura 3. 7: Resultados del retardo (s) por nodo en la red FiWi usando FDMA.....	51
Figura 3. 8: Resultados del rendimiento (Mbps) por nodo en la red FiWi usando FDMA.	52
Figura 3. 9: Resultados del uso del BW (%) por nodo en la red FiWi usando FDMA. .	52
Figura 3. 10: Resultados comparativos del retardo en la red FiWi usando los métodos de acceso.	53
Figura 3. 11: Resultados comparativos del rendimiento de la red FiWi usando los métodos de acceso.	54
Figura 3. 12: Resultados comparativos del uso del BW de la red FiWi usando los métodos de acceso.	55

Figura 3. 13: Tráfico generado por nodo en la red Fi-Wi..... 57

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

Acrónimo	Significado en inglés	Significado en español
FiWi	<i>Fiber-Wireless</i>	Fibra-inalámbrica
PON	<i>Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva con Capacidad de Giga
WDM-PON	<i>Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva con Multiplexación por División de Longitud de Onda
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División de Tiempo
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División de Código
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División de Frecuencia
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal
BW	<i>Bandwidth</i>	Ancho de Banda
QoS	<i>Quality of Service</i>	Calidad de Servicio
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>	Terminal de Línea Óptica
ONU	<i>Optical Network Unit</i>	Unidad de Red Óptica
CO	<i>Central Office</i>	Oficina Central
ODN	<i>Optical Distribution Network</i>	Red de Distribución Óptica
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>	Red Mallada Inalámbrica
AP	<i>Access Point</i>	Punto de Acceso
VoIP	<i>Voice over IP</i>	Voz sobre IP
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>	Multiplexación por División de Tiempo

RoF	<i>Radio over Fiber</i>	Radio sobre Fibra
C-RAN	<i>Cloud Radio Access Network</i>	Red de Acceso Radioeléctrico en la Nube
C-RoFN	<i>Cloud-based Radio over Optical Fiber Network</i>	Red de Radio sobre Fibra Óptica Basada en la Nube
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>	Evolución a Largo Plazo
LTE-Advanced	<i>Long-Term Evolution Advanced</i>	Evolución a Largo Plazo Avanzada
5G	<i>Fifth Generation</i>	Quinta Generación
IoT	<i>Internet of Things</i>	Internet de las Cosas
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>	Red de Sensores Inalámbricos
MAC	<i>Medium Access Control</i>	Control de Acceso al Medio
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>	Función de Coordinación Distribuida
EDCA	<i>Enhanced Distributed Channel Access</i>	Acceso Mejorado a Canal Distribuido
SAC	<i>Spectral Amplitude Coding</i>	Codificación de Amplitud Espectral
FSO	<i>Free-Space Optical</i>	Óptica de Espacio Libre
VLC	<i>Visible Light Communications</i>	Comunicaciones por Luz Visible
LiFi	<i>Light Fidelity</i>	Fidelidad por Luz
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>	Red de Área Local Inalámbrica
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>	Proyecto de Asociación de Tercera Generación
AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>	Red de Guías de Onda en Matriz
LO	<i>Local Oscillator</i>	Oscilador Local
DS	<i>Downstream</i>	Descarga de Datos
US	<i>Upstream</i>	Subida de Datos

RESUMEN

Este proyecto de tesis analiza el rendimiento de los métodos de acceso TDMA, CDMA y FDMA en redes Fiber-Wireless (FiWi), en las es posible integrar un gran ancho de banda de fibra óptica con la movilidad de las tecnologías inalámbricas. El estudio se centró en la evaluación de estos métodos mediante simulaciones basadas en Python en escenarios supervisados, con métricas de rendimiento como el retardo, el rendimiento y del uso del ancho de banda. En el capítulo 1 se describe el marco referencial teórico de las redes de acceso óptico e inalámbrico. En el capítulo 2 se desarrolla la metodología empleada en base a pseudocódigos de los métodos de acceso TDMA, CDMA y FDMA. En el capítulo 3 se presentan las discusiones de los resultados obtenidos de los escenarios de simulación implementados. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones relacionadas con los resultados obtenidos.

Palabras claves: Redes, Acceso Óptico, Métodos de Acceso

ABSTRACT

This thesis project analyzes the performance of TDMA, CDMA and FDMA access methods in Fiber-Wireless (FiWi) networks, where it is possible to integrate high bandwidth optical fiber with the mobility of wireless technologies. The study focused on the evaluation of these methods using Python-based simulations in supervised scenarios, with performance metrics such as delay, throughput and bandwidth usage. Chapter 1 describes the theoretical framework for optical and wireless access networks. Chapter 2 develops the methodology used based on pseudocodes of TDMA, CDMA and FDMA access methods. Chapter 3 presents the discussions of the results obtained from the simulation scenarios implemented. Finally, conclusions and recommendations related to the results obtained are presented.

Keywords: Networks, Optical Access, Access Methods, Access Methods.

INTRODUCCIÓN

Según Besjedica et al., (2023) el avance tecnológico en las últimas décadas ha llevado a un aumento significativo en la demanda de acceso a Internet de alta velocidad y de calidad. Las redes inalámbricas y de fibra óptica se han convertido en pilares fundamentales para satisfacer esta creciente demanda. Mientras que para Dai et al., (2022) el rápido avance de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) hace que el paradigma de intercambio de datos evolucione, pasando del intercambio entre personas (H2M) al intercambio entre personas y máquinas (H2M), e incluso al intercambio entre máquinas (M2M). (M. Chowdhury & Maier, 2019)

De acuerdo con Lorincz et al., (2023) las redes de fibra óptica inalámbrica (FiWi) han emergido como una solución prometedora para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda en entornos de comunicaciones modernos. Integrando las capacidades de las redes de fibra óptica y las redes inalámbricas, FiWi ofrece ventajas significativas en términos de velocidad, capacidad y alcance de la red. En este sentido, se han llevado a cabo trabajos sobre la agregación de tramas energéticamente eficiente (Zhang et al., 2021), la optimización del rendimiento (Gu et al., 2020) y el diseño de protocolos de control de acceso al medio (MAC) (Mesodiakaki et al., 2021).

En el trabajo de Zhang et al., (2021) propusieron un esquema de agregación de tramas adaptativo con transferencia de carga para reducir el consumo de energía en Fi-Wi, mediante la evaluación de la calidad del canal inalámbrico, el esquema propuesto ajustaba de forma adaptativa la longitud de la trama agregada para reducir el consumo de energía causado por la frecuente preferencia del canal inalámbrico y las numerosas retransmisiones de tramas de datos resultantes de la mala calidad del canal.

En las redes FiWi, los protocolos de acceso múltiple resultan ser muy importantes para poder gestionar los recursos de la red de forma eficiente (He et al., 2020) y mejorar el rendimiento de la misma. Estos protocolos definen cómo múltiples dispositivos comparten el mismo medio de transmisión (Husnjak et al., 2018). Los protocolos comúnmente utilizados se encuentran, el: (1) acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), 2) acceso múltiple por división de código (CDMA), y acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA). Las redes FiWi se destacan por aprovechar lo mejor de

la fibra óptica y de los sistemas inalámbricos, lo que permite ofrecer conexiones rápidas en áreas con amplia cobertura. No obstante, su desempeño no depende solo de la tecnología en sí, sino también de aspectos como el número de usuarios conectados, la capacidad de la red y la calidad de la señal que se transmite.

Aunque ya existen estudios, como el de (Maier, 2014), que han explorado distintas formas de implementar redes FiWi, aún hace falta un análisis más detallado que permita comparar diferentes técnicas de modulación, métodos de acceso y otros factores clave que influyen en su rendimiento. Aunque para el presente trabajo de investigación está enfocado en la simulación de los métodos de acceso TDMA, CDMA y FDMA, para una comparación directa y objetiva que permita identificar el método más eficiente para diferentes y condiciones de red. Elegir el método de acceso adecuado es muy importante, ya que puede afectar significativamente tanto a la eficiencia de la red como a la satisfacción del cliente.

Para solventar esta deficiencia, el presente estudio pretende ofrecer un análisis comparativo de los métodos TDMA, CDMA y FDMA en redes FiWi. El objetivo es determinar qué método es el más adecuado para satisfacer los requisitos específicos de diversas aplicaciones y escenarios. Las simulaciones realizadas en Python evaluarán el rendimiento de cada método en términos de eficiencia del ancho de banda (BW) y calidad del servicio (QoS).

Planteamiento de la investigación

Los avances tecnológicos en las redes FiWi no han evitado que el rendimiento y la eficiencia de los métodos de acceso múltiple sigan enfrentándose a retos considerables. Por ejemplo, en escenarios de alta demanda, la congestión de la red se produce cuando un gran número de usuarios acceden simultáneamente al medio de transmisión. Esta congestión provoca un considerable deterioro de la calidad del servicio (QoS) que ofrece la red FiWi. Por otro lado, elegir el método de acceso más adecuado depende de varios factores, como, por ejemplo, el tipo de aplicación, el entorno de red y los requisitos de rendimiento de los abonados.

Formulación del problema de investigación

El estudio de los protocolos de acceso múltiple en las redes FiWi resulta de gran relevancia debido a su impacto significativo en la eficiencia y la QoS de los sistemas FiWi. Seleccionar el protocolo más adecuado tiene un impacto directo en la capacidad de la red para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda y proporciona a los usuarios finales una conexión fiable y de alta velocidad. Comprender mejor el comportamiento de los diferentes protocolos de acceso supone una mejora de la QoS en las redes Fi-Wi. Los operadores pueden ajustar sus configuraciones para ofrecer una experiencia de usuario más coherente y satisfactoria si identifican el protocolo que mejor funciona en determinados escenarios y condiciones de red.

La creciente demanda de servicios de Internet de alta velocidad y de dispositivos móviles requiere una investigación y un desarrollo sistemáticos. En las redes inalámbricas, por ejemplo, los métodos de acceso múltiple como TDMA, CDMA y FDMA desempeñan una función muy importante a la hora de gestionar eficientemente el tráfico de datos y mantener una alta QoS, aunque las condiciones de red sean cada vez más exigentes. Estos métodos permiten que los recursos se distribuyan eficientemente y que la red FiWi gestionen los picos de tráfico sin comprometer el rendimiento.

Python, con todos sus recursos y prestaciones de procesamiento de datos, es una herramienta de investigación muy útil. Esta herramienta permite realizar simulaciones de escenarios de red y evaluar comparativamente algoritmos de acceso en redes FiWi. Gracias a su eficacia y facilidad de uso, se ha convertido en un recurso de estudio y optimización de este tipo de sistemas híbridos.

Por último, resulta importante analizar los protocolos de acceso múltiple en redes Fi-Wi utilizando Python, para obtener mejores niveles de QoS, eficiencia de la red y capacidad de los sistemas inalámbricos para cubrir la demanda de ancho de banda de los usuarios.

Objetivo General:

Analizar comparativamente el rendimiento de los protocolos de acceso múltiple, tales como, TDMA, CDMA y FDMA en redes inalámbricas de fibra óptica (FiWi) mediante escenarios de simulación sobre el software Python, para identificar el protocolo con el mejor desempeño con base al ancho de banda (BW) y la calidad del servicio (QoS).

Objetivos Específicos:

1. Describir el marco referencial de las tecnologías de acceso TDMA, CDMA y FDMA, así como del estado del arte de las redes FiWi.
2. Diseñar algoritmos de simulación de los métodos de acceso TDMA, CDMA y FDMA sobre una red FiWi.
3. Implementar en Python los diferentes escenarios de simulación de los métodos de acceso TDMA, CDMA y FDMA en la red FiWi para la evaluación de cada uno y de manera comparativa mediante las métricas de rendimiento.

Planteamiento de la idea a defender

Esta investigación tiene como propósito analizar, mediante simulaciones y comparaciones realizadas en Python, cómo varía el rendimiento de los protocolos TDMA, CDMA y FDMA en redes FiWi dependiendo del entorno de aplicación. El estudio busca determinar cuál es el protocolo que se adapta mejor, considerando variables como la carga de usuarios, el consumo de ancho de banda y las exigencias de calidad de servicio en para cada uno de los escenarios de simulación propuestos.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Introducción

Con la creciente demanda de aplicaciones y servicios inalámbricos, el espectro de radiofrecuencia está congestionado y corre el riesgo de saturarse. Considerar las partes superiores del espectro electromagnético para las comunicaciones inalámbricas es una solución. Esto nos ha llevado a fijarnos en la banda óptica, que ofrece oportunidades.

La comunicación óptica inalámbrica implica el uso de ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia en las bandas ultravioleta (UV), visible e infrarroja (Figura 1.1). Para entender estas ondas, preferimos utilizar el concepto de longitud de onda en el dominio óptico en lugar del de frecuencia. Esto significa considerar las variaciones en el espacio de las ondas electromagnéticas, en lugar de sus variaciones en el tiempo para definir las.

Según la longitud de onda considerada, se pueden dividir las comunicaciones inalámbricas ópticas en tres partes principales, tal y como se muestra en la Figura 1.1.

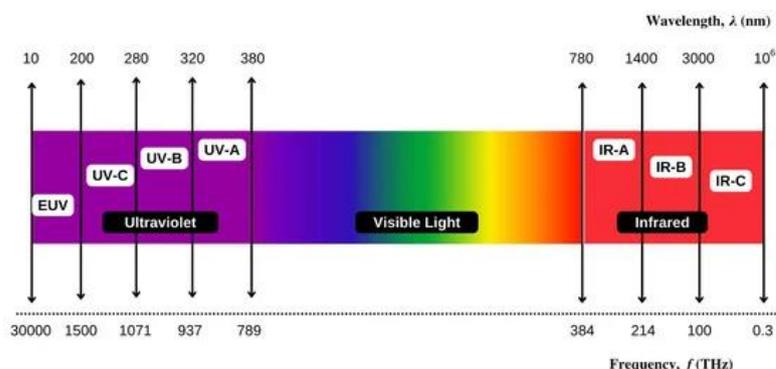


Figura 1. 1: Espectro utilizado en redes inalámbricas ópticas.

Fuente: (Geng et al., 2022)

El rango de los rayos ultravioleta (UV) está definido por las longitudes de onda inferiores a 400 nm. Las longitudes de onda visibles, del violeta al rojo, se sitúan entre 400 nm y 750 nm. El espectro infrarrojo comienza en las longitudes de onda superiores a 750 nm. En general, la radiación infrarroja está subdividida en diferentes subtramos, pero el infrarrojo cercano (0.75-3μm) se utiliza para aplicaciones de telecomunicaciones. Por encima (infrarrojo medio y lejano), hay efectos térmicos que penalizan.

En el presente capítulo, se hace una presentación del campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas resumiendo las ventajas y limitaciones de esta tecnología. Después,

considerando el contexto de la tesis, se describen en detalle los principios de funcionamiento de las comunicaciones ópticas y ópticas inalámbricas. Por último, se definen las principales características de los transmisores y receptores ópticos, así como las técnicas de modulación.

1.2. Tecnologías de comunicaciones inalámbricas

Existe una gran variedad de tecnologías inalámbricas que pueden utilizarse para las comunicaciones ópticas inalámbricas (Fiber-Wireless, Fi-Wi). Según la norma IEEE P2030, los tres atributos de calidad más importantes desde la perspectiva de las comunicaciones en el dominio del cliente y la distribución son la latencia, la fiabilidad y la calidad de servicio. La latencia de las comunicaciones desde una determinada entidad de origen a un determinado destino se expresa como el tiempo que tarda un determinado mensaje en recorrer uno o varios nodos intermedios hasta ser recibido. (López-Vilos et al., 2021)

En los últimos años, el Internet de las Cosas (IoT) ha atraído mucha atención debido a las funcionalidades proporcionadas que pueden hacer avanzar a la humanidad en términos de inteligencia, automatización, comodidad, etc. De acuerdo con Chang et al., (2015) IoT puede convertir objetos que no son identificables en objetos inteligentes identificables, reconocidos e interconectados mediante protocolos de comunicación estándar, denominados objetos inteligentes. (Amendola et al., 2014)

IoT consiste en una serie de objetos inteligentes que llevan incorporadas interfaces de comunicación por cable o inalámbricas para comunicarse e interactuar entre sí sin intervención humana. El concepto básico del IoT es que varios objetos inteligentes pueden conectarse automáticamente a una red para interactuar con los seres humanos mediante tecnologías de percepción y conexión en red.

Los objetos inteligentes del IoT tienen la capacidad de enviar información a través de Internet para proporcionar la interacción entre múltiples cosas y personas. Por ejemplo, un contador inteligente puede obtener información sobre el consumo de energía de varios dispositivos eléctricos. Después, el contador inteligente envía información de forma inalámbrica al punto de acceso y la información se transmite a los dispositivos del usuario a través de Internet.

La fiabilidad se define formalmente como la capacidad de llevar a cabo una tarea determinada en un tiempo y condiciones dados. Dependiendo de la tecnología de comunicaciones, la latencia y la fiabilidad varían. El objetivo de esta tesis no es cuantificar la elección de la tecnología de comunicaciones, que puede variar en función de factores nacionales, políticos y comerciales, sino estudiar los atributos de calidad de las comunicaciones de una tecnología seleccionada con gran potencial. En esta sección se resumen las principales tecnologías de comunicación inalámbricas consideradas en la bibliografía.

1.2.1. Redes WiFi – IEEE 802.11

WiFi es una tecnología inalámbrica probada y utilizada en todo el mundo. Para gestionar el acceso múltiple, la normativa IEEE 802.11 utiliza el protocolo de función de coordinación distribuida (Distributed Coordination Function, DCF) sin calidad de servicio (QoS) (Alnazir et al., 2021). Cada nodo WiFi que implementa la función DCF espera un periodo fijo de espacio entre tramas DCF (DCF InterFrame Space, DIFS) para escuchar el canal al inicio de cada transmisión (Goralski, 2017).

En la Figura 1.2 se representa el funcionamiento de acceso al canal mediante DCF (Mozaffariahrar et al., 2022) en redes WiFi.

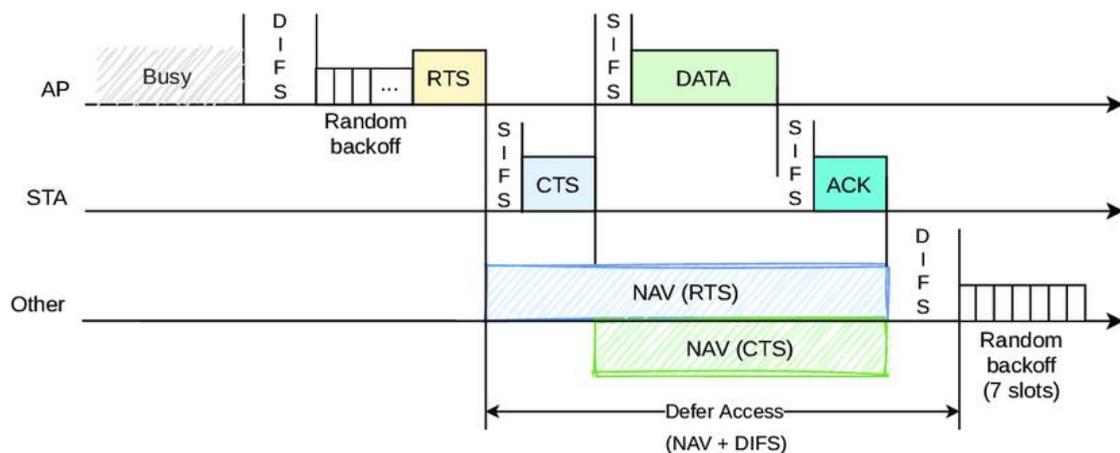


Figura 1. 2: Acceso al canal mediante la función de coordinación distribuida (DCF) en Wi-Fi.

Fuente: (Mozaffariahrar et al., 2022)

Cuando ninguna otra estación ha transmitido durante este periodo, la estación espera un periodo de backoff aleatorio (que aumenta exponencialmente con cada colisión) y, a continuación, transmite. IEEE 802.11s también permite formar redes WiFi enmalladas

multisalto. Por ejemplo, IEEE 802.11n ofrece dos técnicas de agregación de tramas de control de acceso al medio (Medium Access Control, MAC), unidad de datos de servicio MAC agregada (Aggregate MAC Service Data Unit, A-MSDU) y unidad de datos de protocolo MAC agregada (Aggregate MAC Protocol Data Unit, A-MPDU), que permiten concatenar varias tramas durante una transmisión determinada para mejorar la eficiencia (Abdelalim, 2019).

Además, el estándar de muy alta velocidad IEEE 802.11ac ofrece una velocidad de datos de 6.9 Gbps. No obstante, el estándar IEEE 802.11e también ofrece una función de acceso múltiple con QoS, conocida como acceso a canal distribuido mejorado (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA), que permite priorizar las tramas por clases.

1.2.2. Redes WiMAX – IEEE 802.16

La red de Interoperabilidad Mundial de Acceso por Microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) es una tecnología punto a multipunto de gran interés para las redes inteligentes, ya que una banda separada está dedicada a los sistemas eléctricos, y esta tecnología ofrece conectividad a larga distancia y varios mecanismos de calidad de servicio, aunque en Ecuador no fue muy aprovechada. Para transmitir, las estaciones deben competir utilizando un método de acceso múltiple en sentido de la portadora con evitación de colisiones (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) con backoff binario exponencial similar a los protocolos WiFi DCF y EDCA MAC.

La norma IEEE 802.16 ofrece un rendimiento comparable al de las ofertas tradicionales de cable, DSL o T1. Las principales ventajas de los sistemas basados en 802.16 son múltiples: suministro más rápido del servicio, incluso en zonas de difícil acceso para la infraestructura cableada; menor coste de instalación; y capacidad para superar las limitaciones físicas de la infraestructura cableada tradicional. (Akashdeep et al., 2014)

Las aplicaciones del 802.16 son el backhaul celular, la banda ancha bajo demanda, la banda ancha residencial y el servicio inalámbrico mejor conectado (véase la Figura 1.3). El servicio de voz 802.16 puede ser voz TDM o voz sobre IP (VoIP). También se incluyen funciones de privacidad y cifrado para soportar la transmisión segura y el cifrado de datos.

Los estudios indican que los patrones de asentamiento de los países en desarrollo plantean problemas de desarrollo de infraestructuras para el despliegue de servicios. Los asentamientos tienen una proximidad estrecha y dispersa y una densidad de población e ingresos más bajos, lo que afecta a la movilización de recursos y a la distribución equitativa del desarrollo de infraestructuras y la viabilidad empresarial. Además, las bajas densidades de población, los bajos ingresos rurales y la falta de contenido de las aplicaciones locales afectan a la expansión y adopción de los servicios de banda ancha, incluido el uso de Internet. (Mokeresete & Esiefarienrhe, 2022)

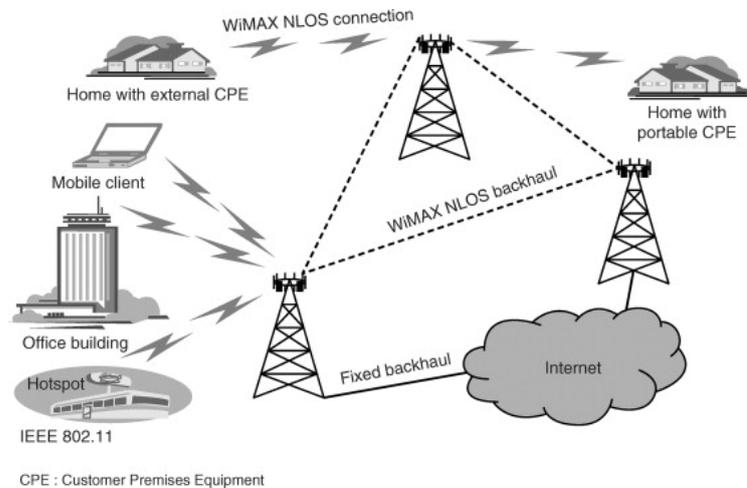


Figura 1. 3: Arquitectura del estándar IEEE 802.16 - WiMAX.
Fuente: (Garg, 2007)

Los retos incluyen la falta de capacidad institucional, el vacío creado por los altos precios cobrados por los operadores de redes móviles y la falta de acceso a la red primaria para proporcionar una red de conectividad alternativa. Los gobiernos de los países desarrollados y en desarrollo han introducido redes de fidelidad inalámbrica (puntos de acceso Wi-Fi) para paliar la falta de servicios asequibles y de acceso a Internet, y para mejorar la eficiencia de los servicios públicos.

1.2.3. Redes ZigBee – IEEE 802.15.4

ZigBee es una tecnología diseñada originalmente para el despliegue generalizado de sensores inalámbricos de baja velocidad. Como tal, es ideal para su uso en interiores. Hay que tener en cuenta que ZigBee comparte las mismas frecuencias que IEEE 802.11 (Wi-Fi) y tienen algunos canales operativos que se solapan en la banda de radio ISM de 2.4 GHz, tal como se ilustra en la figura 1.4. (Dash & Peng, 2022)

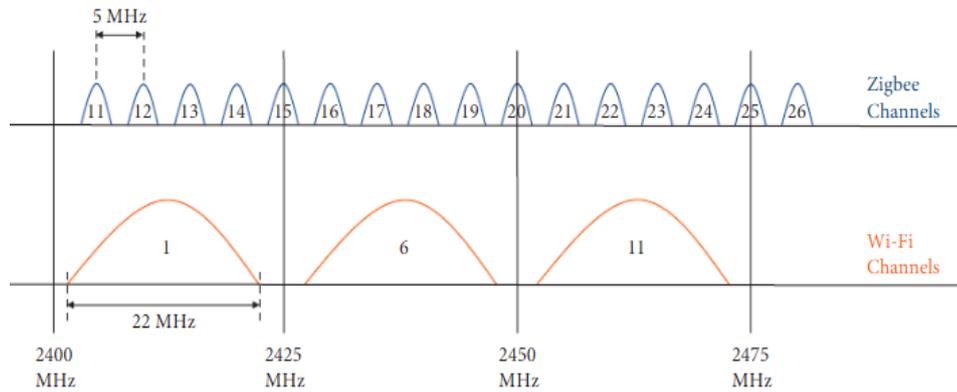


Figura 1. 4: Distribución de canales Zigbee y Wi-Fi.

Fuente: (Lorincz et al., 2023)

El estándar IEEE 802.15.4 es el más utilizado en la implementación de Redes Inalámbricas de Sensores (WSN). Las WSN son una pieza fundamental en el rápido crecimiento del Internet de las Cosas (IoT) en muchos entornos para adquirir y transmitir datos. En el contexto inteligente, el estándar IEEE 802.15.4 se está utilizando para transmitir los datos entre dispositivos inteligentes como smartphones, Smart TV, Smart Watch, dispositivos de monitorización de la salud, y más aún, tal y como se representa en la Figura 1.5. Además, es la base de otras tecnologías populares como ZigBee, 6LoWPAN y WirelessHART que también tienen como objetivo proporcionar un bajo consumo de energía de los dispositivos, una transmisión de baja velocidad y un bajo coste de implementación. (López-Vilos et al., 2021)

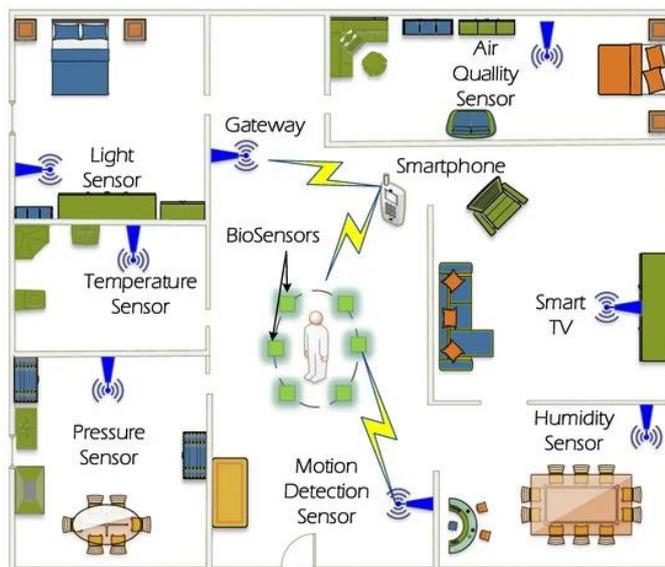


Figura 1. 5: Aplicaciones utilizadas en el estandar IEEE 802.15.4 - Zigbee.

Fuente: (López-Vilos et al., 2021)

1.2.4. Redes LTE

Las redes LTE proporcionan velocidades de transmisión de datos muy altas para las transmisiones de enlace descendente, de modo que pueden transmitir grandes cantidades de datos con optimización de paquetes a los usuarios (Kumar & Kumar, 2016). La estación base es responsable de asignar recursos a los equipos de los usuarios para la transmisión de enlace descendente LTE (Thienthong et al., 2019).

La programación del enlace descendente con una técnica ponderada en función del retardo utilizando redes celulares LTE proporciona una mejor compensación de equidad y rendimiento entre usuarios en situaciones de tráfico disímiles (Liu et al., 2015). La programación dinámica de paquetes es el elemento principal de las redes LTE, cuyo objetivo es aumentar el rendimiento y la calidad de servicio de los usuarios finales.

Como los recursos son limitados, se implementó una técnica de control basada en colas en la comunicación downstream de LTE para mejorar tanto el rendimiento como las condiciones de equidad entre los usuarios (Adesh & Renuka, 2019). Para la optimización de los recursos espectrales basados en energía se utilizó un sistema celular inteligente ecológico, que adquiere datos del canal para facilitar la transmisión de paquetes a través de la estación base (Salman et al., 2018). Esta optimización de los recursos es necesaria para mejorar la calidad del servicio (QoS) en la programación downstream.

Para mejorar el rendimiento, se empleó una técnica de predicción de paquetes en el eNode B para la optimización (Uyan & Gungor, 2019). Además, se desarrolló un método de realimentación relacionado con el canal (Uyan & Gungor, 2019) utilizando el umbral de transmisión de datos relacionado con el canal, utilizando un umbral de transmisión de paquetes adaptativo para minimizar la sobrecarga durante dicha transmisión (Feng et al., 2017). El desempeño del sistema se evaluó utilizando la programación de paquetes downstream (Kayali et al., 2017). En la Figura 1.6 se muestra la arquitectura de la red LTE del 3GPP.

En trabajos recientes se ha demostrado la viabilidad del uso de Long Term Evolution (LTE) para redes ópticas inalámbricas (Fi-Wi) en aplicaciones de distribución de automatización utilizando velocidades de datos muy bajas (1-480 bps) con requisitos de latencia del orden de 1-4 s. Otra ventaja importante de utilizar las redes LTE para los sistemas FiWi se basa en la ausencia de infraestructuras de comunicación adicional. Esto

convierte a LTE en una solución rentable y escalable. Sin embargo, un inconveniente importante es el retardo, ya que algunas aplicaciones FiWi exigen un retardo inferior a 20 ms, mientras que el retardo mínimo de programación en las redes LTE está entre 20 y 30 ms (Imam-Fulani et al., 2023), mientras que en redes LTE-Advanced la latencia está entre 10 y 20 ms (Artemenko et al., 2024), pero Pons et al., (2023) indica que en redes 5G el propósito es alcanzar una latencia inferior a 1ms.

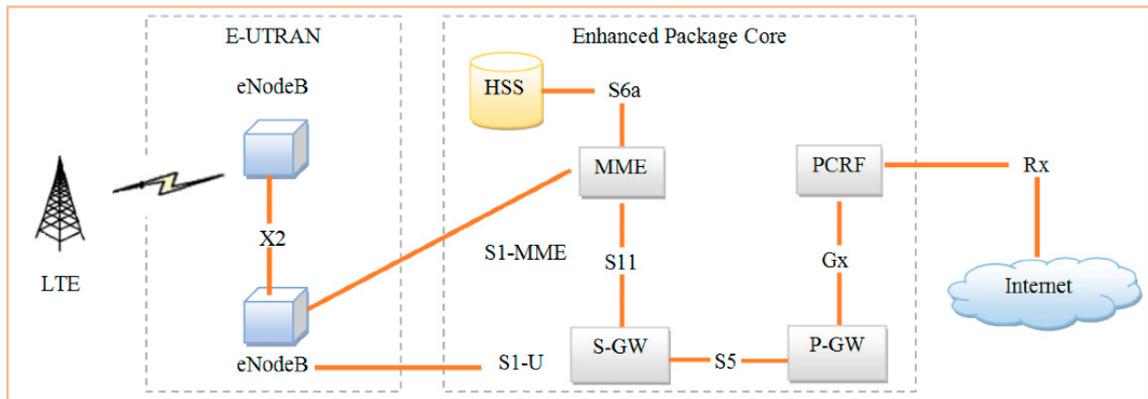


Figura 1. 6: Arquitectura de la tecnología LTE – 3 GPP.

Fuente: (Tuan et al., 2020)

1.3. Generalidades sobre las comunicaciones inalámbricas ópticas

Históricamente, las primeras comunicaciones ópticas inalámbricas se estudiaron y normalizaron en el rango del infrarrojo cercano, como por ejemplo para hacer posible la transmisión de corto alcance, generalmente punto a punto, en interiores, entre dos sistemas portátiles (laptops, smartphones, mandos a distancia, entre otros), o con una estación base (ordenador, televisión, etc.), también conocida como punto de acceso. También existen aplicaciones a mayor escala en exteriores, como transmisiones de alta velocidad entre edificios, para crear redes WMAN, o transmisiones espaciales (satélite terrestre, por ejemplo).

En los últimos años, los estudios sobre comunicaciones ópticas inalámbricas se han extendido al campo de las comunicaciones por luz visible (VLC - Visible Light Communications), especialmente desde la aparición de los LED (diodos emisores de luz) para iluminación. Debido a la alta velocidad de conmutación de los LED, es posible realizar dos funciones: iluminación y comunicación. Las aplicaciones de transmisión de información o posicionamiento a partir de lámparas ubicadas en el entorno son

numerosas, por ejemplo, en edificios (museos, centros comerciales, fábricas) y en zonas sensibles (hospitales, aviones).

Asimismo, se está considerando el uso de VLC en sistemas de transportación inteligentes (comunicaciones entre vehículos y señalización) y en comunicaciones submarinas. Una aplicación muy investigada desde 2011 es LiFi (Light Fidelity), un término parecido a WiFi, con el que se designa la comunicación por luz visible (Visible Light Communication, VLC) de muy alta velocidad. Li-Fi tiene el potencial de sustituir a WiFi, ofreciendo conectividad a Internet a velocidades teóricas de hasta 1 Gbps.

Además, cada vez hay más interés por la comunicación ultravioleta (UVC) gracias a los avances más recientes en fuentes de luz y detectores que funcionan en el espectro de 200-280 nm. Esta gama espectral se beneficia de una interferencia mínima de la radiación solar, lo que permite el desarrollo de detectores ópticos de alto rendimiento dotados de campos de visión amplios. Esto hace posible diseñar detectores ópticos de alto rendimiento con grandes campos de visión. Por tanto, se pueden prever comunicaciones exteriores de corto alcance para WSNs y MANETs.

Finalmente, se puede indicar que las redes Fi-Wi combinan las capacidades de transmisión de datos confiables y de alta capacidad de la fibra óptica con la flexibilidad y ubicuidad de las tecnologías inalámbricas, ofreciendo una solución perfecta para las demandas de servicios de telecomunicaciones avanzadas. Este tipo de red tiene un enfoque de red híbrida que aprovecha las tecnologías de red óptica pasiva (Passive Optical Network, PON).

Por ejemplo, se tiene a PON de alta capacidad o Gigabit (Gigabit PON, GPON) y PON con multiplexación de división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing PON, WDM-PON), junto con tecnologías inalámbricas como Wi-Fi y 5G, proporcionando una infraestructura de red convergente que satisface las necesidades de las aplicaciones que hacen un uso intensivo del ancho de banda, como el caso del Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT), la transmisión de vídeo de alta definición y la realidad virtual (Lorincz et al., 2023). El segmento inalámbrico en las redes Fi-Wi extiende la conectividad a áreas remotas y desafiantes, donde la instalación de infraestructura de fibra es compleja o costosa (Elmagzoub et al., 2020).

1.3.1. Las redes FiWi: evolución y arquitectura

Las redes FiWi fueron creadas para dar cobertura a la demanda de acceso a internet de banda ancha, y que han superado enormemente a las redes tradicionales (cableadas e inalámbricas) (Maier & Ghazisaidi, 2010). Este tipo de red se distribuye de la siguiente manera: el core de fibra óptica sale desde la terminal de línea óptica (Optical Line Terminal, OLT) ubicado en la oficina central (Central Office, CO) hacia la red de distribución de fibra, que incluyen splitters y unidades de red óptica (Optical Network Unit, ONU). Aunque, el acceso inalámbrico se comporta como la conectividad de última milla, para el acceso de los abonados. La Figura 1.7 muestra la arquitectura de la red FiWi, que se basa en dos etapas, (1) el acceso óptico, y (3) el acceso inalámbrico (Lorincz et al., 2023).

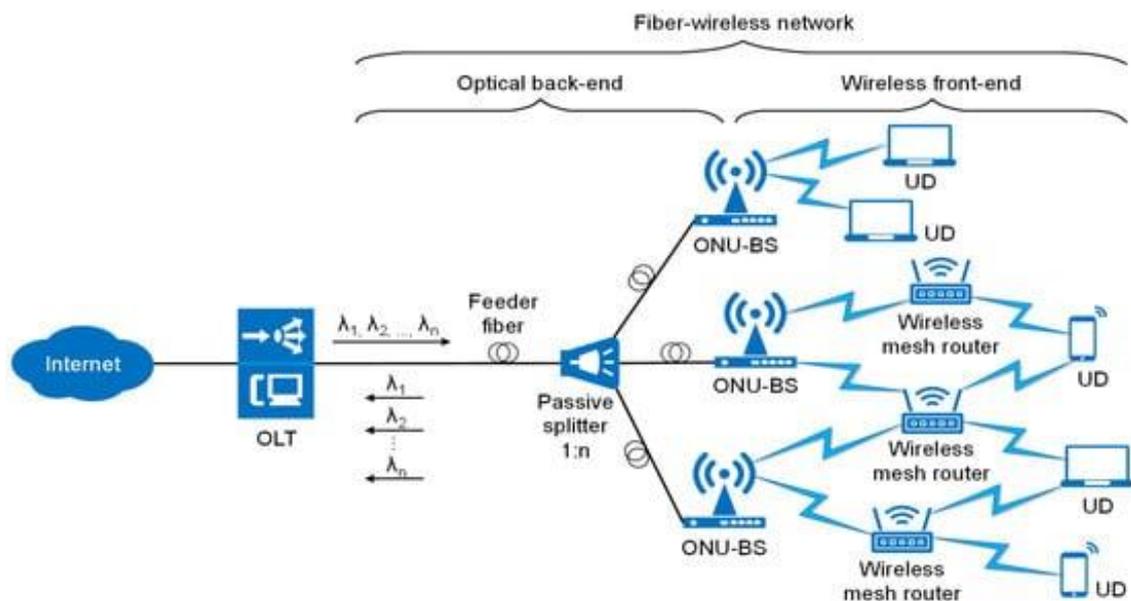


Figura 1. 7: Arquitectura de red FiWi.

Fuente: (Lorincz et al., 2023)

La arquitectura FiWi está diseñada para gestionar diferentes opciones de tráfico, por ejemplo, voz, vídeo y datos, utilizando técnicas avanzadas de agregación que optimizan el rendimiento y minimizan los retardos (M. Chowdhury & Maier, 2019). Mientras que el backhaul óptico garantiza altas velocidades de datos, el acceso inalámbrico permite la movilidad. Todo esto resulta muy ventajoso tanto en zonas urbanas densamente pobladas como en áreas rurales donde la instalación de fibra es compleja.

En la Figura 1.8 se muestra la arquitectura de una red Fi-Wi propuesta por Mohammadani et al., (2020) con indicadores de tráfico de calidad de servicio (Quality of Service, QoS)

para asegurar que tanto los segmentos ópticos como inalámbricos de la red Fi-Wi brinden el rendimiento necesario para una variedad de servicios, con un manejo diferenciado según la prioridad del tráfico.

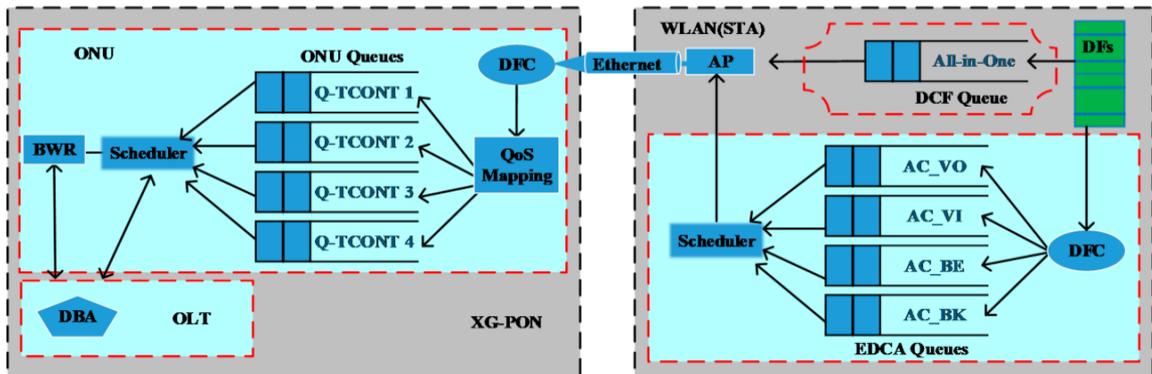


Figura 1. 8: Arquitectura de red FiWi con indicadores de tráfico de QoS.

Fuente: (Mohammadani et al., 2020)

1.3.2. Ventajas y desafíos de las redes Fi-Wi

En comparación con las comunicaciones por radiofrecuencia (RF), las comunicaciones Fi-Wi tiene ventajas que se describen a continuación.

1. Alta capacidad: el ancho de banda (BW) que ofrece la red FiWi es mucho mayor que el ofrecido por RF. En otras palabras, el BW se extiende a varios centenares de GHz y sin restricciones (sin licencia), mientras que el espectro de las comunicaciones por RF es limitado. La fibra óptica está diseñada para la transmisión de datos a velocidades muy altas (Gbps a Tbps), lo que permite satisfacer la creciente demanda de aplicaciones en servicios avanzados de telecomunicaciones (Elmagzoub et al., 2020).
2. Adaptabilidad y movilidad: al ser inalámbrica, las redes FiWi se caracterizan por proporcionar conectividad de alta velocidad en zonas en las que el despliegue de fibra es inaccesible, Además, son dinámicos ya que permiten la movilidad de los usuarios, lo que las convierte en una solución ideal y adaptativa en función de la zona y de los requisitos de la red FiWi (Lorincz et al., 2023).
3. Escalabilidad: este tipo de redes son aptas para ser escalables, es decir, que pueden desplegarse fácilmente en una misma red, por ejemplo, del tipo WLAN/WiFi/FiWi. Esto permite agregar más puntos de acceso (AP) inalámbricos, así como también, añadir enlaces de fibra óptica. Esta escalabilidad

le permite una mejor adaptabilidad en entornos en las que la cantidad de usuarios y la carga de tráfico varían considerablemente.

4. Seguridad: el segmento inalámbrico funciona en interiores, aunque la limitación sería que su alcance depende de los obstáculos físicos, como las paredes. Esta característica reduce la posibilidad de que la señal se propague más allá del área deseada, lo que contribuye a mejorar la seguridad. Además, como estas redes operan en entornos de baja frecuencia, su despliegue resulta más sencillo en determinadas áreas.

Por último, las comunicaciones inalámbricas ópticas presentan los siguientes desafíos:

1. Interferencias: el uso del espectro inalámbrico puede verse afectado por la interferencia y la pérdida de señal, lo que repercute tanto en el rendimiento de la red como en la calidad del servicio que reciben los usuarios (QoS) (Lorincz et al., 2023).
2. Costos de implementación: la implementación de la infraestructura de una red de acceso óptico implica una inversión significativamente alta, sobre todo por el uso de equipos especializados y del personal técnico calificado (Elmagzoub et al., 2020).
3. Gestión y seguridad complejas: la gestión y operación de una red FiWi presenta ciertos retos que no están presentes en redes exclusivamente ópticas pasivas o inalámbricas, especialmente para garantizar que la transmisión de datos sea más segura en el segmento inalámbrico de la red FiWi.

1.3.3. Restricciones y limitaciones de las comunicaciones ópticas inalámbricas

Para estudiar el potencial de esta tecnología, es importante tener en cuenta las desventajas que también puede presentar. Para empezar, como ya se ha mencionado, las ondas ópticas están confinadas en el interior. Por tanto, esta característica también puede considerarse una desventaja frente a las comunicaciones por radiofrecuencia en términos de cobertura. Es más, mientras que en el dominio RF los efectos de enmascaramiento provocan variaciones en la potencia recibida, que pueden ser mucho más problemáticos en el dominio óptico. Los rayos ópticos no atraviesan la materia, por lo que es posible que un efecto de enmascaramiento provoque una interrupción del enlace emisor-receptor.

Por último, otro inconveniente se refiere al impacto de la óptica inalámbrica sobre la salud. Los riesgos, en particular el efecto de las radiaciones infrarrojas sobre la retina o de las radiaciones UV sobre la piel, son perfectamente conocidos, al contrario que en el caso de las radiofrecuencias. Por tanto, existen normas y restricciones sobre la potencia media de transmisión según se trate de UV, VLC o infrarrojos. Esto también supone una desventaja en términos de cobertura. También hay varias fuentes de ruido: ruido óptico (luz solar, lámparas incandescentes o fluorescentes) y ruido térmico en el receptor.

1.4. Tecnologías de acceso óptico y redes inalámbricas

En esta sección se describen las redes de fibra óptica y su integración con redes inalámbricas. Las redes de fibra óptica, especialmente las redes ópticas pasivas (PON) como las GPONs y las WDM-PONs, desempeñan un papel fundamental en la arquitectura de red Fi-Wi. En la Figura 1.9 se muestra la arquitectura típica de una red óptica pasiva (PON) usando topología en árbol.

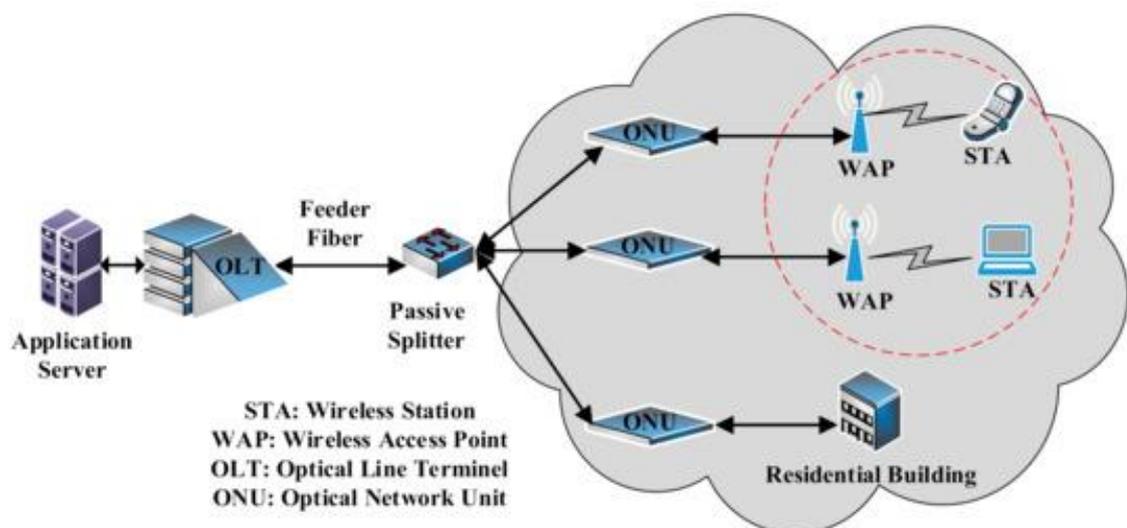


Figura 1. 9: Arquitectura de una red óptica pasiva (PON).
Fuente: (Mohammadani et al., 2020)

Mediante el uso de técnicas de multiplexación, como la multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing, TDM), WDM e híbridas TWDM, las PONs distribuyen eficazmente las señales ópticas a varios abonados ya sean residenciales o corporativos, optimizando así el uso del ancho de banda. Es decir, que tener este tipo de red híbrida (red de acceso por fibra óptica y red inalámbrica) reúne las fortalezas de ambos dominios. La Figura 1.10 ilustra la arquitectura de una WDM-PON.

El backhaul de fibra óptica ofrece transmisión de datos fiable y de alta velocidad, mientras que el acceso inalámbrico proporciona flexibilidad y movilidad (Ghazisaidi & Maier, 2011). Esta integración a menudo se realiza mediante el uso de técnicas de radio sobre fibra (Radio over Fiber, RoF), donde las señales de radio se transmiten a través de fibra óptica a estaciones base (Base Station, BS). RoF ofrece la extensión sin interrupciones de las redes ópticas a dominios inalámbricos, lo que permite el acceso de alta velocidad tanto en áreas urbanas densas como en regiones remotas (Elmagzoub et al., 2020).

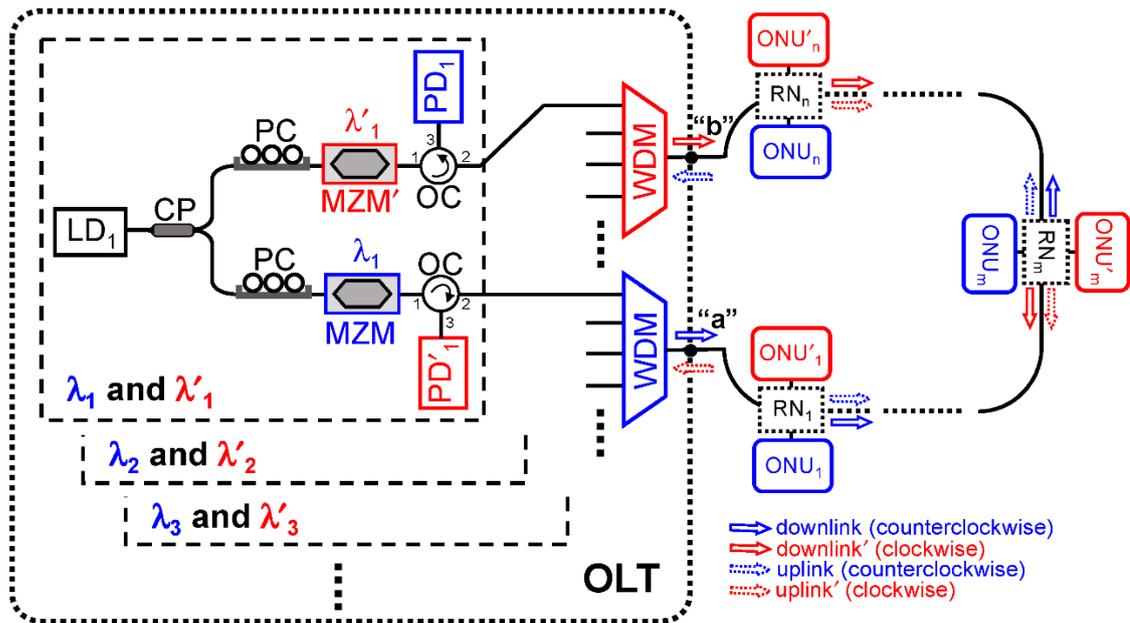


Figura 1. 10: Arquitectura de una WDM-PON.

Fuente: (Mohammadani et al., 2020)

1.4.1. Tecnologías de acceso óptico (GPON, WDM-PON) en redes Fi-Wi

GPON y WDM-PON son infraestructuras de acceso óptico utilizadas en redes ópticas inalámbricas (Fi-Wi). Aunque, según Koonen, (2006) la tecnología TDM (como se muestra en la arquitectura de la Figura 1.11) se utiliza para una distribución de datos más eficiente entre diversas ONUs debido a que ambas infraestructuras proporcionan anchos de banda compartidos con tasas de transmisión de datos de hasta 2.5 Gbps. Además, dichas tecnologías son compatibles con los servicios de telecomunicaciones, tales como, transmisión de video HD, voz sobre IP (VoIP), Internet de banda ancha a altas velocidades, entre otros, lo que los convierte en componentes de las redes Fi-Wi.

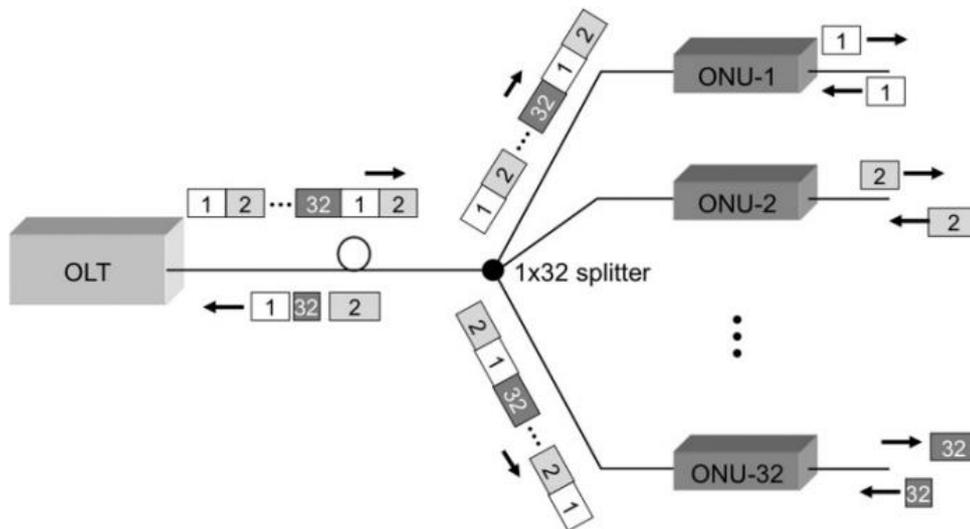


Figura 1. 11: Arquitectura de una TDM-PON.
Fuente: (Kitayama, 2014)

Por eso, WDM-PON seguirá siendo una solución prometedora para satisfacer la necesidad de más ancho de banda en el futuro. También promete más seguridad y menos pérdidas de energía. Las señales de los distintos usuarios se codifican en canales de longitud de onda separados y, a continuación, el multiplexor (de-) las encamina a distintas ONU. La división de la longitud de onda se realiza en el multiplexor de longitud de onda pasivo, por ejemplo, AWG en el nodo remoto. El AWG ofrece una pérdida de inserción reducida (3-5 dB) que ayuda a mejorar el balance de potencia y a aumentar la distancia de transmisión (Maier, 2014; Mohammadani et al., 2020).

Enlace PtP (véase a Figura 1.9), en el que se reserva un canal de longitud de onda dedicado entre la OLT y cada ONU, lo que permite a cada ONU funcionar a la velocidad binaria completa de su propio canal de longitud de onda. La integración de GPON y WDM-PON con tecnologías inalámbricas como Wi-Fi y 5G en redes Fi-Wi crea una infraestructura capaz de responder a la creciente demanda de conectividad de alta velocidad, confiable y ubicua.

1.4.2. Tecnologías inalámbricas en redes FiWi

La red FiWi es una red híbridas debido a la combinación de dispositivos inalámbricos y ópticos. Esta combinación nos permite aprovechar lo mejor de ambas tecnologías. Es posible ofrecer conectividades más adaptables y eficientes. La Figura 1.12. muestra la configuración de infraestructura de la red FiWi.

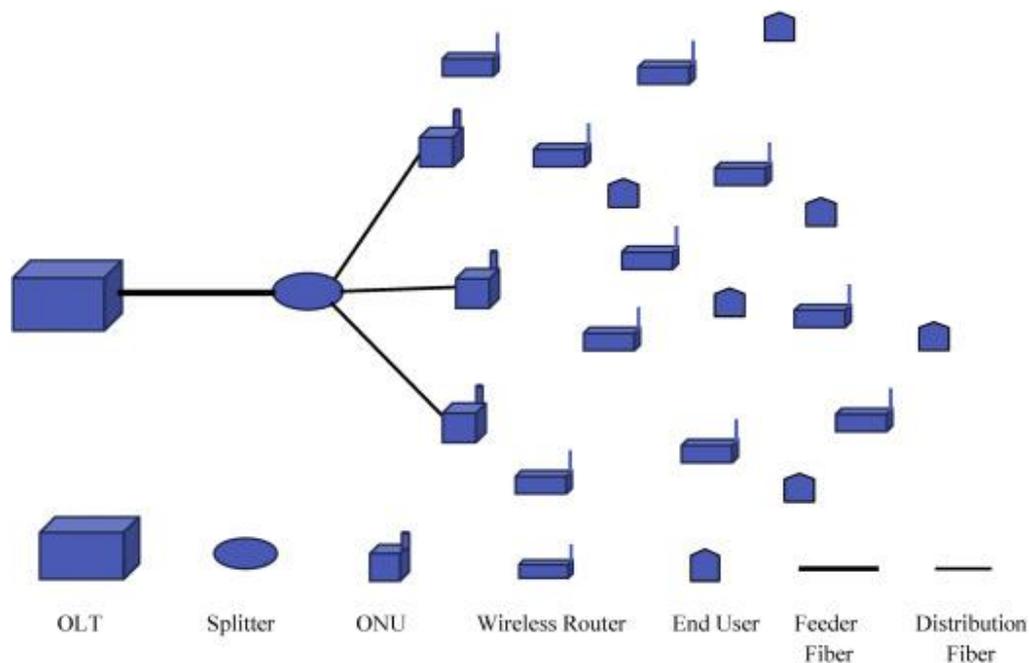


Figura 1. 12: Configuración de infraestructura de la red de acceso inalámbrica de fibra (Fi-Wi).
Fuente: (Bhatt et al., 2019)

El problema de la ubicación de las unidades de red óptica (ONU) en la red FiWi desempeña un papel vital, ya que permite una utilización eficiente de los recursos de la red y mejora el rendimiento en términos de rentabilidad y rendimiento. En este artículo, consideramos el problema de la colocación de ONUs (M. Z. Chowdhury et al., 2020).

Las redes ópticas pasivas (PON) y las redes de acceso inalámbrico se han convertido en las principales tecnologías actuales de acceso de banda ancha. La PON es una red punto a multipunto. En PON, la oficina central (CO) soporta diferentes segmentos PON. Un terminal de línea óptica (OLT) forma la cabecera de la PON, que se encuentra en la CO. El OLT controla varios ONU. Los ONU constituyen la interfaz entre la red inalámbrica del extremo frontal y la red óptica del extremo posterior. Mayor asignación de ancho de banda a las aplicaciones de datos en comparación con la red digital. (M. Chowdhury & Maier, 2019; Natkaniec & Bieryt, 2023).

Con el rápido desarrollo de Internet de las cosas e Internet móvil, ya sea la cuarta (4G-LTE) o quinta generación de redes móviles (5G) se ha revelado como una tecnología prometedora que contribuye enormemente a la vida de todos los ámbitos de la humanidad (Wang et al., 2022). De acuerdo con (Pons et al., 2023) se ha convertido en una solución para dar soporte a las aplicaciones que requieren un gran ancho de banda y a los servicios ubicuos. Para impulsar aún más las tecnologías 5G, se están combinando redes ópticas e

inalámbricas, y dando lugar a la reciente red de acceso radioeléctrico en la nube (Cloud Radio Access Network, C-RAN). (He & Wang, 2020).

La red de radio sobre fibra óptica basada en la nube (Cloud based Radio over Optical Fiber Network, C-RoFN) se ha investigado ampliamente para mejorar la utilización de los recursos y la calidad de los servicios. Esta red se está desarrollando para dar cabida a las demandas futuras y está dirigida a lograr resultados de investigación prometedores en las áreas de comunicación y redes. Los logros antes mencionados no serían posibles sin incorporar algunos aspectos fundamentales de la investigación de la red de acceso FiWi. En este sentido, la red de acceso FiWi se ha explorado ampliamente; los parámetros de red como la colocación de ONUs, enrutamiento, tolerancia a fallos, QoS, retardo y ganancia de rendimiento, etc. se han estudiado e investigado utilizando una amplia gama de algoritmos.

1.4.3. Desafíos y oportunidades de integración

Las redes FiWi implican el despliegue de tecnologías RoF y R&F. Las redes R&F son idóneas para construir redes FiWi basadas en WLAN de amplia cobertura sin imponer límites estrictos al tamaño del backhaul óptico, a diferencia de las redes RoF, que limitan la longitud de las fibras desplegadas a un par de kilómetros. Al prestar simultáneamente servicios por cable e inalámbricos a través de la misma infraestructura, las redes FiWi pueden consolidar redes de acceso ópticas e inalámbricas que suelen funcionar de forma independiente, lo que puede suponer un importante ahorro de costes. (Dai et al., 2022)

La investigación sobre redes FiWi se ocupa de la OWI de las tecnologías emergentes de acceso de banda ancha óptico e inalámbrico, como la red de malla inalámbrica (WMN). FiWi es un enfoque holístico que reúne bajo un mismo paraguas el desarrollo de los problemas de PHY, enlace de datos y encaminamiento (selección de ruta). Más concretamente, en la capa PHY, la investigación FiWi indaga en nuevos métodos de generación de RF óptica que exploten las no linealidades de la fibra y diversas técnicas de modulación. También incluye el estudio de distintos esquemas de remodelación para el diseño de RAU incoloras (es decir, independientes de la longitud de onda).

Aunque se han logrado avances significativos en la capa PHY de FiWi y, en particular, en los sistemas de transmisión RoF, la investigación en redes FiWi sobre cuestiones

relacionadas con la capa 2 ha comenzado muy recientemente. Entre otras, la investigación sobre la capa 2 de FiWi incluye la optimización conjunta de mecanismos MAC de mejora del rendimiento utilizados por separado en los segmentos de red inalámbrica y óptica (por ejemplo, agregación de tramas inalámbricas y ensamblaje de ráfagas ópticas, protocolos híbridos de control de acceso y algoritmos integrados de selección de rutas, así como técnicas avanzadas de resiliencia).

1.5. Protocolos de acceso múltiple (MAPs)

Los protocolos de acceso múltiple (Multiple Access Protocols, MAPs) son técnicas que se basan en compartir entre diferentes usuarios el ancho de banda disponible de un canal de comunicación de manera eficiente. No obstante, en redes Fi-Wi, los MAPs son determinantes para controlar la transmisión simultánea de datos a través de los segmentos óptico e inalámbrico. Estos protocolos se pueden clasificar a grandes rasgos en tres categorías principales (que se describen en las secciones 1.5.1. a 1.5.3.):

1. Acceso múltiple por división en el tiempo (Time Division Multiple Access, TDMA),
2. Acceso múltiple por división de código (Code Division Multiple Access, CDMA) y
3. Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA).

En la Tabla 1.1 se muestran las características técnicas de las tecnologías TDMA, CDMA y OFDMA.

Tabla 1. 1: Características de TDMA, CDMA y OFDMA en redes Fi-Wi.

Característica	TDMA	CDMA	OFDMA
Ancho de banda (MHz)	10 - 100	1.25 - 20	1.4 - 100
Eficiencia espectral (bps/Hz)	1 - 2	2 - 5	3 - 15
Tasa de transmisión máxima (Gbps)	0.1	2	10
Número de usuarios soportados	16 - 64	64 - 256	256 - 1024
Latencia típica (ms)	10 - 50	5 - 20	< 10
Consumo de energía (W)	0.5 - 2	1 - 3	2 - 5
Interferencia interusuario	Baja	Media	Muy baja

Fuente: (Vedovello, 2024)

1.5.1. Acceso múltiple por división en el tiempo – TDMA

Este protocolo asigna franjas horarias específicas a cada usuario, lo que permite el acceso secuencial al medio compartido. En el contexto de las redes Fi-Wi, TDMA se usa comúnmente en PON, donde la transmisión de datos se produce en intervalos de tiempo fijos (véase la Figura 1.13), lo que garantiza una colisión mínima y un uso eficiente del ancho de banda (Ghazisaidi et al., 2011). En la actualidad, existen varias arquitecturas alternativas para la realización de redes de acceso basadas en TDMA-PON que están normalizadas y se utilizan para la realización de redes de acceso óptico. La Figura 1.13 muestra la arquitectura TDMA-PON, con sus topologías BPON, GPON y EPON.

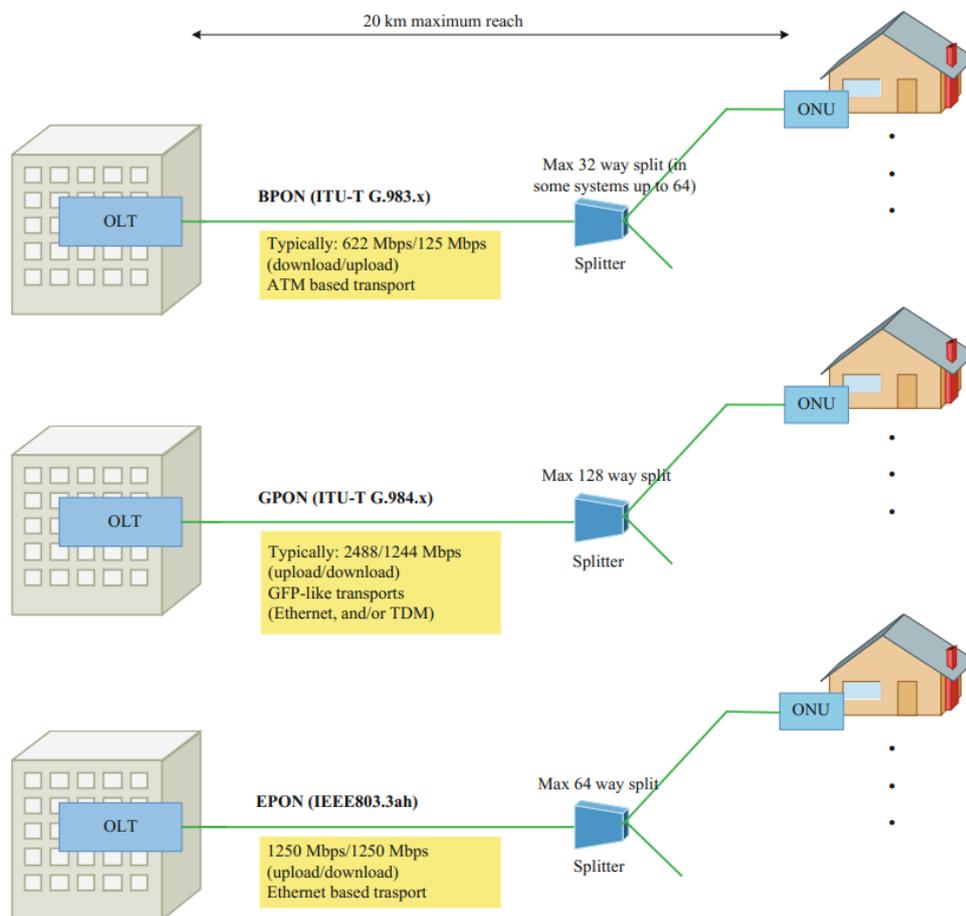


Figura 1. 13: Arquitectura TDMA y sus respectivas tecnologías PON.

Fuente: (Radivojević & Matavulj, 2017)

TDMA es ampliamente utilizado en comunicaciones inalámbricas fijas como Wi-Fi y móviles como GSM. Por ejemplo, en el enlace aéreo, la tecnología TDMA se basa en una estructura de trama de 40 ms, dividida a partes iguales en seis intervalos de tiempo, de 6,667 ms cada uno. Cada una de las seis franjas horarias contiene 324 intervalos de bits

brutos, correspondientes a 162 símbolos (1 símbolo = 2 bits de información). La figura 1.14 muestra la estructura de tramas de la tecnología TDMA de enlace directo (base a móvil). Se puede observar que en la ranura 3, las franjas horarias se emparejan como 1-4, 2-5 y 3-6, y cada par de franjas horarias disjuntas se asigna a un móvil. Esta disposición permite a tres móviles acceder al mismo canal de 30 kHz de uno en uno (Faruque, 2019). Este protocolo minimiza las interferencias y garantiza un acceso justo al canal, lo que lo hace adecuado para entornos con cargas de tráfico variables.

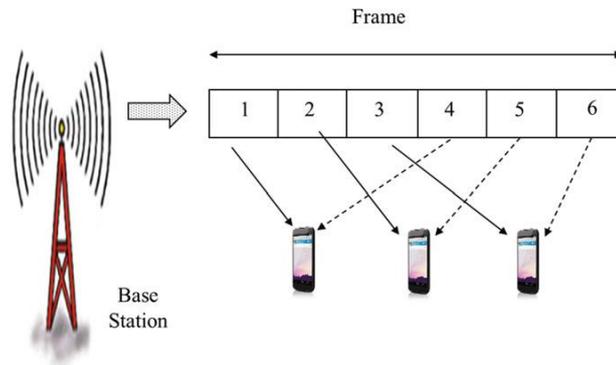


Figura 1. 14: Arquitectura TDMA en comunicaciones inalámbricas móviles.
Fuente: (Faruque, 2019)

1.5.2. Acceso múltiple por división de código – CDMA

CDMA permite que varios usuarios transmitan simultáneamente a través de la misma banda de frecuencia asignando un código único a cada transmisión. Esta técnica fue utilizada en la investigación de Wijanto & Huang, (2021). Ellos proponen una técnica de acceso múltiple por división de código óptico bipolar (Bipolar Optical CDMA, Bi-OCDMA) basada en la codificación de amplitud espectral (Spectral Amplitude Coding, SAC) utilizando un modulador de fase para realizar la codificación de polarización a través de un canal óptico de espacio libre (Free-Space Optical, FSO), tal como se ilustra en la Figura 1.15.

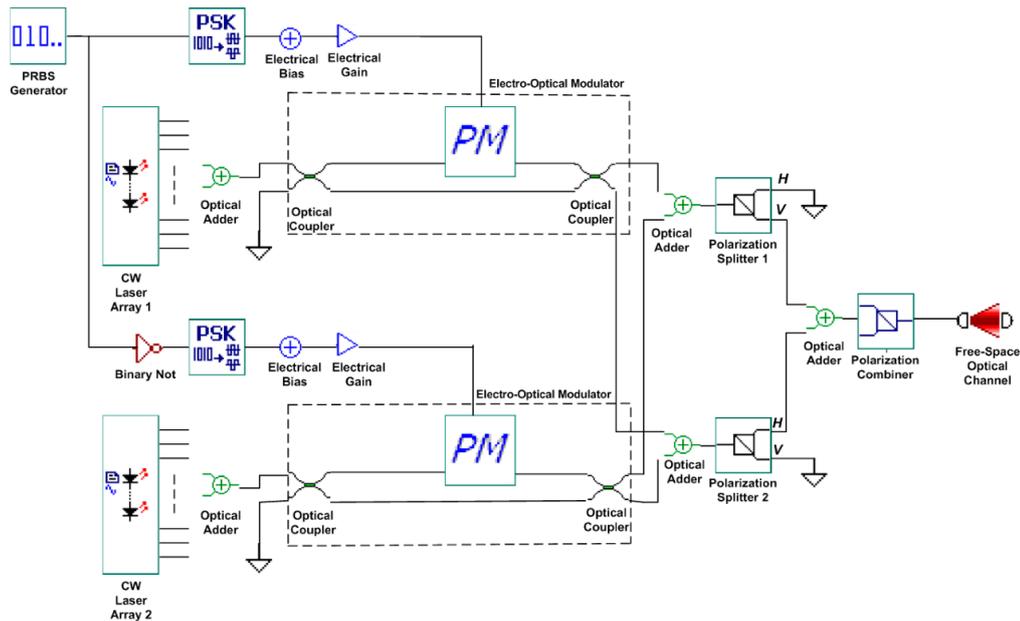


Figura 1. 15: Codificador de acceso múltiple por división de código óptico bipolar (Bi-OCDMA) en el simulador OptiSystem.

Fuente: (Wijanto & Huang, 2021)

Para optimizar el rendimiento de los sistemas ópticos asíncronos de acceso múltiple por división de código (CDMA), se requiere el análisis de esquemas de modulación codificada. Como las principales causas de los impactos negativos en los sistemas CDMA ópticos son el ruido de batido (BN) y la interferencia de acceso múltiple (MAI), aliviar estos impactos nocivos puede aumentar con éxito el rendimiento del sistema en consecuencia. Debido a estos impactos adversos, los sistemas CDMA ópticos se encontrarán con un efecto de suelo de error; el aumento de la potencia óptica no puede superar este problema.

CDMA, también está disponible en segmentos inalámbricos, especialmente en las redes FiWi ya que tienen la capacidad de gestionar múltiples accesos en forma eficiente, incluso en situaciones con alta interferencia. CDMA fue muy utilizado en redes móviles 3G y algunos aspectos de la tecnología 4G, debido a realiza transmisiones múltiples mediante la distribución de códigos a cada usuario, que permite la modulación de la señal de datos.

1.5.3. Acceso múltiple por división de frecuencia – FDMA

La decisión de utilizar tecnología analógica o digital es fundamental para cualquier enlace de transmisión por radio. Está claro que la tecnología de transmisión digital se utiliza

siempre que es posible, pero en lo que respecta a la transmisión por radio, las ondas portadoras son siempre de naturaleza analógica. En los últimos tiempos, en la mayoría de los casos se superpone una señal digital a la portadora analógica.

El esquema FDMA es una técnica basada en el método de multiplexación por división de frecuencia (FDM). Esta técnica puede considerarse la forma más antigua y sencilla de multiplexación, muy utilizada en muchos campos técnicos, como la telefonía y radiodifusión comercial y televisiva. La técnica FDMA puede aplicarse tanto a sistemas digitales como analógicos, aunque FDMA se utiliza mucho en los sistemas de comunicación analógicos. La técnica FDMA ofrece eficiencia espectral, ya que la velocidad de transmisión se aproxima bastante a la velocidad máxima que necesita el usuario.

En consecuencia, FDMA puede considerarse adecuada para usuarios que no tienen problemas graves de tráfico en la transmisión, y la mayor parte del trabajo de los usuarios es predecible. La topología de red propuesta por Schindler et al., (2013) (véase Figura 1.16) utiliza múltiples subportadoras eléctricas para permitir la técnica FDMA con componentes electrónicos de baja velocidad en las ONUs.

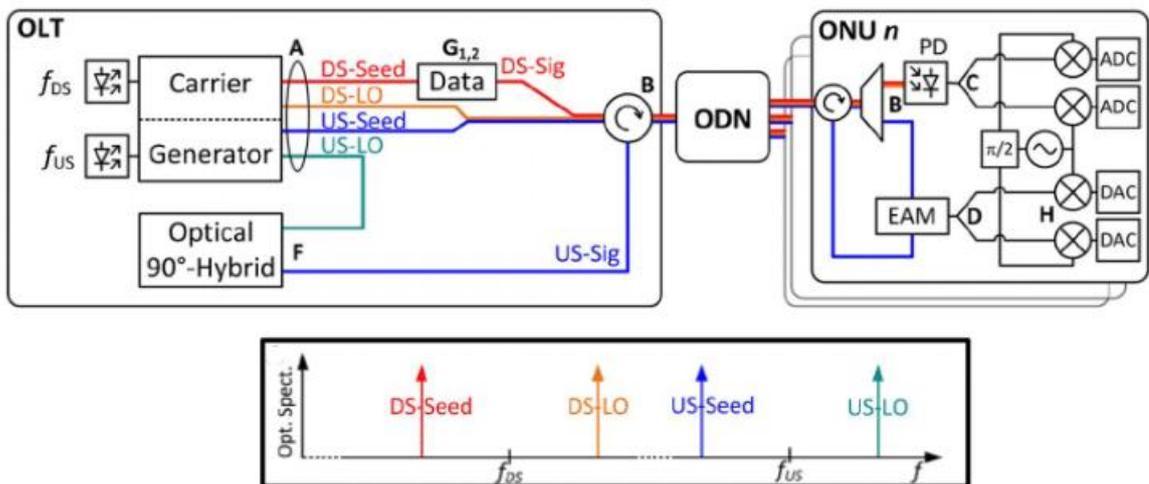


Figura 1. 16: Topología de red de un FDMA-PON inalámbrico.
Fuente: (Schindler et al., 2013)

La ventaja de esta topología de red es que tanto la portadora óptica en la OLT como el oscilador local (Local Oscillator, LO) para la recepción en la ONU proceden del mismo láser OLT que funciona a la frecuencia central f_{DS} (véase Figura 1.16). Del mismo modo, la portadora óptica para la ONU (también denominada “Seed” o «semilla») y el LO en la

OLT se toman del mismo láser OLT que opera a la frecuencia central f_{US} . Un modulador genera dos líneas a partir de cada láser: una línea derivada de cada láser sirve como LO (DS-LO, US-LO) y la otra como portadora óptica (DS-Seed, US-Seed) para la transmisión de datos, tal como se ilustra en la Figura 1.16.

1.5.4. Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal – OFDMA

Como muestra la Figura 1.17, OFDMA-PON sigue la misma arquitectura de PON convencional y utiliza bandas eléctricas diferentes para DS y US. Tanto en el tráfico DS como en el US, la arquitectura OFDM-PON divide el ancho de banda OFDM total en N sub-bandas, cada una de las cuales contiene un número de subportadoras (SC) asignadas a un usuario (Rajab et al., 2020). Es conveniente introducir en primer lugar el concepto de OFDM para entender mejor cómo funciona y cuáles son sus principales ventajas y retos cuando se utiliza en PONs.

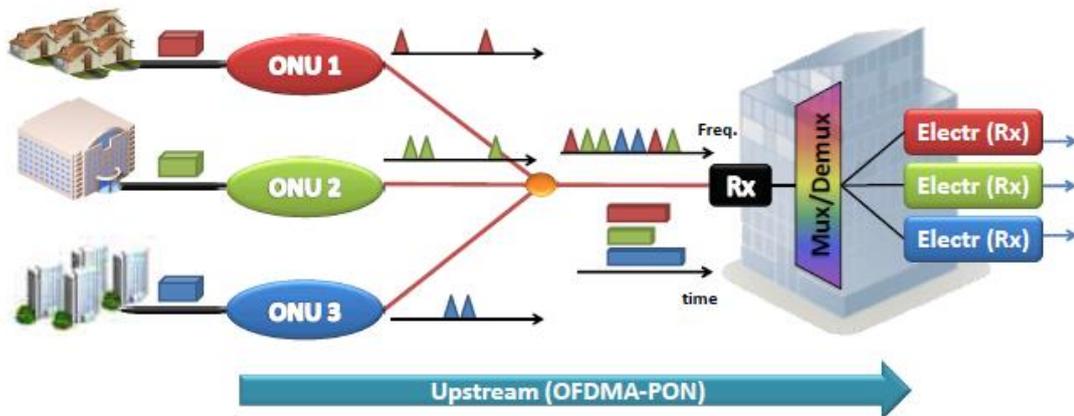


Figura 1. 17: Esquema de canal ascendente para una OFDMA-PON.
Fuente: (Wijanto & Huang, 2021)

Básicamente, OFDM es un protocolo SCMA que garantiza una distancia de frecuencia específica entre los SC igual a la inversa de la duración de un símbolo para cumplir la condición de ortogonalidad. El principio fundamental sigue siendo descomponer el flujo de datos de alta velocidad en N flujos de menor velocidad y, a continuación, transmitirlos simultáneamente a través de una serie de SC. La secuencia de datos completa de una trama OFDM es, por tanto, la suma de muchas frecuencias que contienen parte de la información. En primer lugar, los datos se mapean en símbolos y luego se convierten de serie a paralelo. De este modo, el símbolo se alarga para que la interferencia entre

símbolos (ISI) afecte como máximo a un símbolo y las distorsiones lineales del canal puedan compensarse con una simple ecualización de un solo paso.

Las principales ventajas de OFDMA como tecnología adecuada para su uso en redes de acceso óptico radican, en primer lugar, en su capacidad para admitir la modulación multinivel de forma dinámica, es independiente del protocolo y también presenta una eficaz compensación de la dispersión que permite lograr un acceso espectralmente eficiente, de alta velocidad y de largo alcance a través de una planta de fibra PON heredada. Además, los SC OFDMA pueden utilizarse como recursos BW finamente granulares para tráfico multiusuario altamente dinámico. Por otra parte, una ventaja adicional es que las implementaciones OFDMA se basan en gran medida en DSP y, por tanto, pueden realizarse en silicio para lograr implementaciones reconfigurables rentables basadas en el volumen. Además, OFDM se ha utilizado ampliamente en comunicaciones inalámbricas y estándares de banda ancha móvil, facilitando la convergencia actual con las comunicaciones ópticas.

1.5.5. Ventajas y desventajas de los métodos de acceso

TDMA: es un sistema muy reconocido por su sencillez de implementación y asignación eficiente del BW. Además, cuando las ranuras de tiempo no son utilizadas de manera eficiente, entonces, los canales ascendentes no se aprovechan al máximo (Koonen, 2006).

CDMA: es un sistema de alta capacidad y robusto frente a las interferencias, que lo hace idóneo para aplicaciones complejas. Sin embargo, debido a su complejidad y sincronización necesita una transmisión de datos de calidad, especialmente en el segmento óptico de las redes Fi-Wi.

OFDMA: es un sistema que se caracteriza por su alta eficiencia espectral, por su asignación de ancho de banda y por su latencia reducida. Con todo, es necesario un procesamiento complejo de la señal y presenta una mayor susceptibilidad a las interferencias en zonas inalámbricas densamente pobladas (Elmagzoub et al., 2020).

1.6. Infraestructura de redes Fi-Wi

Las redes FiWi están construidas sobre una base de fibra óptica que actúa como una backbone del sistema, combinada con una sección inalámbrica que se ubica cerca del

usuario final. Este tipo de diseño permite que los datos se transporten de forma eficiente y sin necesidad de grandes inversiones, lo cual es beneficioso tanto en viviendas como en oficinas o empresas que requieren buena conectividad (Lorincz et al., 2023).

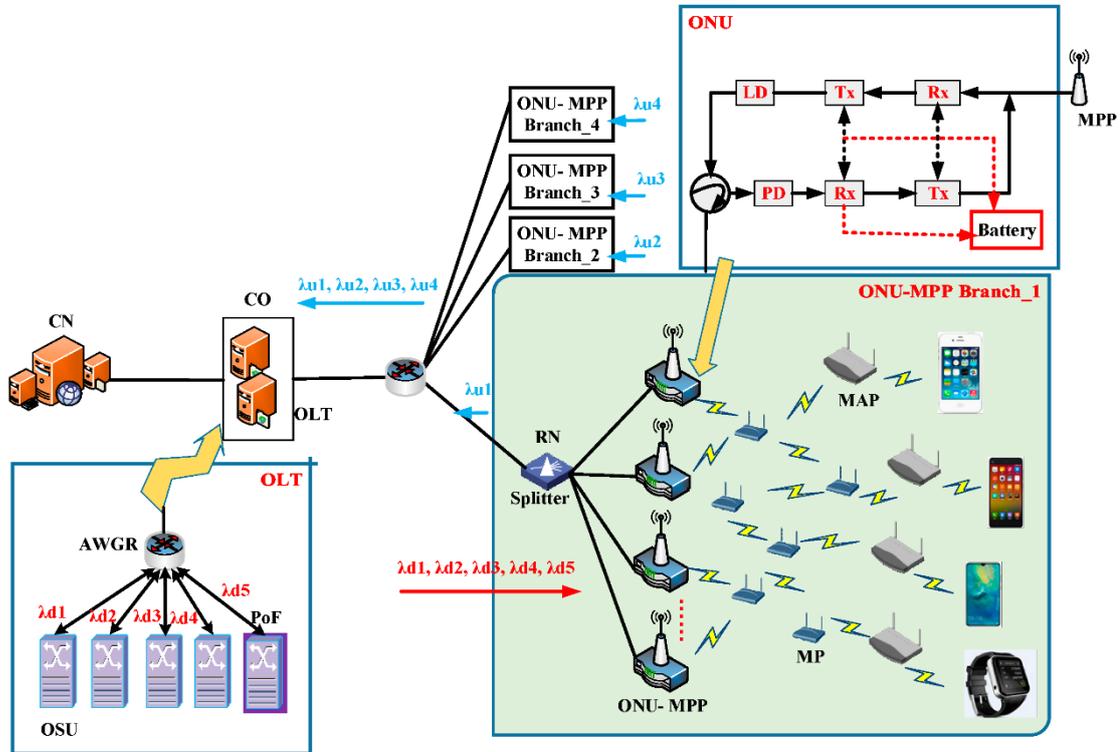


Figura 1. 18: Infraestructura Fi-Wi de la red óptica pasiva multiplexada por división de longitud de onda y tiempo (TWDM-PON)

Fuente: (He & Wang, 2020)

La estructura de una red FiWi es relativamente sencilla y se divide en tres partes principales:

1. **Oficina central (CO):** funciona como el nodo principal del sistema. En esta parte se ubican elementos clave del segmento óptico, como el terminal de línea óptica (OLT) que es común en redes ópticas pasivas (PON). Además de actuar como punto de inicio, la CO también se encarga de tareas como el procesamiento de señales, la gestión del tráfico y el control general de la red. (Koonen, 2006).
2. **Red de distribución óptica (ODN):** actúa como backbone para la transmisión de datos, utilizando cables de fibra óptica para conectar el CO con varias ONUs. En las PONs, por ejemplo, la ODN emplea la multiplexación híbrida TWDM para asignar ancho de banda a las ONUs (ver Figura 1.10), para gestionar

eficientemente múltiples canales de datos y garantizando la conectividad de alta velocidad. (Maier y Ghazisaidi, 2020).

- 3. Red de mallada inalámbrica (WMN):** el segmento inalámbrico conecta a los usuarios finales a la red mediante tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, LTE o 5G. Este segmento proporciona la conectividad de última milla en la arquitectura Fi-Wi, utilizando puntos de acceso inalámbricos enmallados (Mesh Access Point, MAP) vinculados a las ONUs para ampliar el alcance de la red a usuarios en diversas ubicaciones, incluidas áreas urbanas remotas y densamente pobladas

La integración de estos componentes permite que la red Fi-Wi admita una amplia gama de servicios, desde Internet de alta velocidad y aplicaciones multimedia hasta servicios basados en IoT.

1.6.1. Modelos de implementación y topologías

Para optimizar el rendimiento de una red Fi-Wi según las necesidades específicas, se utiliza diferentes modelos y topologías. Entre las topologías más utilizadas se incluyen:

- 1. Topología de árbol:** ampliamente adoptada en redes FiWi basadas en redes ópticas pasivas (PON). La oficina central (CO) es el punto de origen y las fibras ópticas se derivan mediante splitters para establecer conexiones con las ONUs, las cuales, a su vez se comunican con los puntos de acceso inalámbricos. Este tipo de topología permite distribuir el ancho de banda correctamente, pero presenta problemas de redundancia y tolerancia a fallos.
- 2. Topología de anillo:** en este tipo de configuración, las fibras ópticas forman un anillo que permite interconectar las ONUs con los puntos de acceso inalámbricos. Además, esta topología aumenta la fiabilidad de la red, ya que permite mantener la conectividad, aunque un segmento no funcione correctamente. Por tanto, resulta ideal para aplicaciones críticas, su despliegue es más complejo y costoso.
- 3. Topología de malla:** el sistema mallado proporciona una interconectividad total entre las ONU y los puntos de acceso inalámbricos, lo que permite el enrutamiento dinámico de los datos. Aunque esta estrategia incrementa el rendimiento de la red y la capacidad de distribución de la carga, requiere de algoritmos de control de red avanzados y conlleva unos costes de implementación más altos.

1.6.2. Integración entre componentes ópticos e inalámbricos

Un aspecto fundamental en el diseño de redes FiWi es la manera en que se conectan las partes ópticas con las secciones inalámbricas. Para lograrlo, se utilizan tecnologías como Radio over Fiber (RoF) o la transmisión de señales en banda base sobre fibra (BBoF).

1. **Radio-over-Fiber (RoF):** es conocida por su capacidad de transportar grandes volúmenes de información de forma eficiente, con pocas pérdidas y a un coste accesible. Además, su resistencia a las interferencias la convierte en una opción confiable en diversos escenarios. Además, su diseño tolera bien las interferencias, lo que la convierte en una opción práctica para solucionar los problemas típicos de las comunicaciones por radiofrecuencia. Estas características hacen que sea una opción viable para cubrir las necesidades de conectividad actuales. Se trata de un enlace óptico analógico para transmitir información, desde la central a una estación base, a través de una red de fibra óptica mediante la transmisión de una señal de RF modulada. Para transmitir y distribuir señales de radiofrecuencia (RF) desde una ubicación central, donde se encuentran las estaciones base, a las unidades de antena remotas (RAU) se utilizan enlaces de fibra óptica altamente lineales. Las RAU sólo necesitan contener un dispositivo de conversión optoelectrónica y amplificadores, por lo que la construcción y el mantenimiento de las RAU son extremadamente sencillos (Elmagzoub et al., 2020).
2. **Banda base sobre fibra (BBoF):** el esquema de banda base sobre fibra tiene varias ventajas obvias, como transceptores ópticos digitales maduros de baja velocidad y un efecto de dispersión cromática de la fibra reducido. Sin embargo, en este esquema, una unidad de antena remota (RAU) tiene que transformar los datos de banda base en señales de RF antes de alimentarlas a la antena (Rajab et al., 2020). Es decir, se requiere un diseño completo del transceptor de RF para la RAU. Dado que las altas velocidades y de frecuencias repercuten directamente en la complejidad de la RF, el esquema de banda base sobre fibra complica el diseño de la RAU. Afortunadamente, en los últimos años se ha estudiado intensamente la tecnología de seis puertos.

En general, el diseño arquitectónico de las redes FiWi es flexible, lo que permite la integración de diferentes topologías, múltiples protocolos de acceso y técnicas de

interconexión. Esta adaptabilidad garantiza que las redes FiWi puedan satisfacer de manera eficiente las demandas de los servicios de comunicación modernos, incluida la banda ancha de alta velocidad, las aplicaciones de baja latencia y la conectividad generalizada.

1.7. Evaluación del rendimiento de las redes FiWi

Para optimizar la eficiencia en una red FiWi y cumplir los requisitos de los sistemas de comunicación avanzados, es necesario evaluar su rendimiento. Para evaluar el rendimiento de estas redes se utilizan algunas métricas, tales como:

1. **Ancho de banda y tasa de datos:** Cuando una red FiWi cuenta con una buena capacidad de ancho de banda en su segmento óptico principal, es posible alcanzar mayores velocidades en la parte inalámbrica. Esto repercute directamente en la experiencia del usuario, ya que mejora la calidad del servicio (Lorincz et al., 2023).
2. **Retardo:** es el tiempo que tarda la información en llegar de un punto a otro, puede variar según diversos factores. Entre ellos se encuentran la eficiencia del procesamiento óptico, la distancia física entre los nodos y los posibles retrasos provocados por el tipo de acceso múltiple utilizado en la parte inalámbrica (Elmagzoub et al., 2020).
3. **Pérdida de paquetes:** cuando los paquetes de datos no llegan a su destino deseado se producen pérdidas de paquetes, generalmente como consecuencia de la congestión de la red, interferencias o restricciones de hardware. Para lograr una alta QoS en redes FiWi es necesario reducir la pérdida de paquetes, especialmente en aplicaciones que dependen del retardo, como VoIP y videoconferencias (Begusic et al., 2023).
4. **Calidad de servicio (QoS):** se trata de un parámetro universal que incluye parámetros como la latencia, la oscilación y el rendimiento, que influyen de manera conjunta en la experiencia general del usuario. Para que la QoS sea coherente en una red FiWi se necesita una asignación de BW adecuada, así como de los métodos de acceso adaptativos y una interconectividad eficiente entre los accesos ópticos e inalámbricos (Maier y Ghazisaidi, 2010).

- 5. Eficiencia energética:** El consumo de energía es una métrica de rendimiento cada vez más importante, especialmente en redes Fi-Wi donde se utilizan componentes ópticos y puntos de acceso inalámbricos que consumen mucha energía. Las estrategias para mejorar la eficiencia energética incluyen la asignación dinámica de ancho de banda, los mecanismos de modo de espera y el uso de protocolos de comunicación ecológicos (Begusic et al., 2023).

1.7.1. Métricas para la evaluación de tecnologías de acceso múltiple

- 1. Rendimiento:** es aquella tasa de transmisión de datos con éxito a través de la red FiWi. En estas redes, el rendimiento de los métodos de acceso, como, TDMA y OFDMA tiene un impacto significativo en el rendimiento total. Además, la distribución dinámica de subportadoras en el método OFDMA permite mejorar el rendimiento en zonas con alta densidad de usuarios, sobre todo en segmentos inalámbricos (Rajab et al., 2020).
- 2. Indicador de distribución de la red:** Con esta métrica evaluamos la distribución de los recursos de la red entre los usuarios de manera equilibrada. Para que todos los usuarios se repartan equitativamente el ancho de banda y minimizar así la congestión de la red y evitar la degradación del servicio, es necesario evaluar el rendimiento de los protocolos de acceso en las redes FiWi (Park y Jeong, 2020).

1.7.2. Técnicas de simulación y evaluación del rendimiento en redes WiFi

Para analizar el comportamiento de las redes FiWi y buscar la manera de poder optimizarlas, es necesario la implementación de escenarios de simulación sobre la plataforma de programación Python. A continuación, se describen brevemente las librerías más relevantes que se utilizarán:

- 1. SimPy:** es una librería que permite simular eventos en una red, como la transmisión y recepción de datos, para observar cómo se comporta el sistema en distintos escenarios.
- 2. NetworkX:** se usa para crear y analizar redes de datos. Sirve, por ejemplo, para modelar estructuras de red FiWi y evaluar aspectos como el retardo (Lorincz et al., 2023).

- 3. SciPy:** se emplea cuando es necesario hacer cálculos matemáticos o estadísticos, lo cual facilita analizar métricas como interferencia y latencia.

Con estas herramientas se logran realizar diferentes análisis y estudios de diferentes escenarios de simulación que dependen del modelado de red que se proponga, tales como, impacto de los tipos de topologías de redes, protocolos de acceso, técnicas de interconexión, y del rendimiento en redes híbridas.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la investigación

El presente estudio investigativo se realiza dentro de empresa de telecomunicaciones CNT EP, ubicada en Guayacones. CNT EP dispone de un entorno ideal para realizar la investigación, debido a que posee recursos e infraestructura GPON que va a permitir la creación y evaluación de los escenarios de simulación de la red Fi-Wi a través de los protocolos de acceso TDMA, CDMA y FDMA utilizando el software Visual Studio Code basada en Python. Este software de programación nos permite generar scripts en Python para la recopilación de datos y posterior análisis y/o discusión de los resultados obtenidos sobre el rendimiento de los protocolos ya mencionados, específicamente en el uso del ancho de banda y la calidad del servicio. En la Figura 2.1 se muestra las instalaciones y ubicación de CNT EP de Guayacones en la Ciudad de Guayaquil.



Figura 2. 1: Ubicación de la central de CNT EP Guayacones en Guayaquil

Fuente: Elaboración propia

2.2. Diseño y alcance de la investigación

El presente trabajo investigativo tiene un enfoque cuantitativo-experimental, debido a que se implementan algoritmos y posteriormente los scripts en Python que permiten generar los escenarios de simulación en Python para medir y evaluar el rendimiento de los protocolos de acceso múltiple en la red Fi-Wi. El alcance metodológico del presente

trabajo es descriptivo y explicativo. Es descriptivo porque se analizan los diferentes protocolos (TDMA, CDMA y FDMA) bajo diferentes escenarios. Por lo tanto, este estudio pretende identificar cuál protocolo es el más adecuado en términos de rendimiento (ancho de banda y calidad de servicio).

2.3. Tipo y métodos de investigación

Así como en el diseño de investigación, el presente trabajo emplea un enfoque cuantitativo en el tipo de investigación, ya que se basa en datos de medición o métricas del rendimiento de los protocolos de acceso múltiple sobre el software de simulación Python. Los métodos investigativos que se emplearon son:

1. Método inductivo, la observación de los datos obtenidos mediante simulación permite deducciones generales.
2. Método deductivo, prueba de hipótesis sobre el rendimiento de los protocolos en condiciones reales, y
3. Métodos hipotético-deductivo, formular y probar hipótesis utilizando simulaciones experimentales controladas.

2.4. Población y muestra

El presente estudio se emplean escenarios de simulación en una red Fi-Wi con variación de parámetros y que son modelados en Python. No se ha seleccionado una muestra específica, debido a que el enfoque de la investigación es la exploración de diferentes configuraciones de la red mencionada. En estos escenarios se incluyen a los protocolos de acceso al medio, tales como, TDMA, CDMA y FDMA bajo condiciones de red reales.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para recopilar los resultados de los protocolos se emplean métodos cuantitativos. Entre los instrumentos y técnicas empleadas se incluyen:

1. Pseudocódigos de simulación: implementación de scripts en Python en la que modelan los pseudocódigos o diagramas de máquinas de estado algorítmica (Algorithmic State Mache, ASM) de TDMA, CDMA y FDMA.

2. Parámetros de rendimiento: para comparar los protocolos se han utilizado métricas como el rendimiento, latencia y ocupación del ancho de banda.
3. Visualización gráfica: Se emplean librerías como Matplotlib para la generación de gráficas destinadas a una comparativa de los resultados.

2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.

Para comprobar que los datos obtenidos en las simulaciones fueran consistentes, se aplicaron métodos de comparación con información previa. Se revisó si los resultados coincidían con lo registrado en estudios similares, y se repitieron varios escenarios bajo las mismas condiciones para ver si se mantenían. Este proceso ayudó a evaluar qué tan precisos eran los métodos aplicados en los análisis.

2.7. Implementación de los escenarios de simulación

La metodología de simulación se basa en escenarios de red Fi-Wi realistas, que permitan la evaluación de varios protocolos de acceso dependiendo de las condiciones de la red. En la Tabla 2.1 se resumen las configuraciones adoptadas en las simulaciones y los parámetros de red (número de nodos, carga de tráfico, asignación de ancho de banda y especificaciones de protocolo).

Tabla 2. 1: Configuración de los parámetros de simulación de la red Fi-Wi.

Parámetro	Valores/Rango
Número de Nodos	10
Carga de Tráfico	$\lambda = 5, 10, 20$ paquetes/s
Ancho de Banda (Wireless)	100 Mbps
Ancho de Banda (GPON)	2.5 Gbps (Downstream, DS) 1.25 Gbps (Ustream, US)
Tipos de Protocolos	TDMA, CDMA, FDMA
Latencia (GPON)	1-5 ms
Tiempo de Simulación	10 s
Métricas de Rendimiento	Throughput, Latencia, Utilización del Ancho de Banda
Asignación de Slots (TDMA)	Slots iguales para todos los nodos

Asignación de Códigos (CDMA)	Códigos ortogonales para todos los nodos
Asignación de Sub-bandas (FDMA)	División equitativa del ancho de banda total
Alcance máximo (GPON)	20 km

Fuente: Elaboración propia

El modelo de simulación incluye 10 nodos, con cargas de tráfico diferentes de $\lambda = 5, 10$ y 20 paquetes por segundo. En el caso del segmento inalámbrico, la capacidad es de 100 Mbps, en tanto que el backbone GPON brinda un ancho de banda asimétrico de 2.5 Gbps y 1.25 Gbps para el tráfico descendente y ascendente, respectivamente. Se evalúa el rendimiento mediante latencia, capacidad de transmisión y ocupación del ancho de banda utilizando las técnicas de acceso múltiple TDMA, CDMA y FDMA.

En las comparativas, TDMA distribuye las ranuras de forma homogénea en los nodos, CDMA emplea códigos ortogonales y FDMA aplica la división uniforme del ancho de banda. En el caso de GPON, el retardo oscila entre 1 y 5 ms, lo que corresponde al retardo típico en redes de acceso óptico. El tiempo de simulación es de 10 s, con lo cual se obtiene el comportamiento del tráfico a través de la infraestructura Fi-Wi.

2.7.1. Diseño de algoritmos de simulación

En esta sección se describen los algoritmos (pseudocódigos) que se utilizan como base en las simulaciones del rendimiento de las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA sobre redes Fi-Wi. Para la implementación de estos algoritmos es necesario disponer de Python, utilizando los pseudocódigos y diagramas de máquinas de estado (ASM) estructurados.

En la Figura 2.2 se muestra el algoritmo 1 que permite la configuración de la red Fi-Wi. Este se encarga de configurar la red previa a la simulación de las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA. Es decir, que el algoritmo 1, inicializa los parámetros de red, dividiendo el tiempo de simulación en ranuras, para después gestionar el tráfico y obtener métricas de rendimiento y latencia para cada nodo.

Algorithm 1: Configuración del Escenario de Red Fi-Wi

```
1 Número de nodos  $N$ , Ancho de banda  $BW$ , Tasa de llegada  $\lambda$ , Tiempo total  $T$   
   Lista de nodos con tráfico y latencia, slots asignados Data: Lista vacía de  
   nodos, slots de tiempo  
2 Inicializar la lista vacía de nodos;  
3 Dividir  $T$  en  $N$  intervalos iguales y asignar a slots;  
4 for cada nodo  $i$  desde 1 hasta  $N$  do  
5   | Generar tasa de llegada de paquetes para el nodo  $i$  usando Poisson( $\lambda$ );  
6   | Calcular datos transmitidos en Mbps asignando  $(BW/N)$ ;  
7   | Calcular latencia promedio del nodo  $i$  en función de su slot asignado;  
8   | Agregar métricas de tráfico y latencia a la lista de nodos;  
9 return Lista de nodos, slots asignados
```

Figura 2. 2: Pseudocódigo 1 – Configuración del escenario de red Fi-Wi.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las expresiones matemáticas consideradas en la simulación:

1. División del ancho de banda por nodo BW_i

$$BW_i = \frac{BW}{N}$$

2. Tasa de llegada de paquetes λ mediante el modelo de Distribución de Poisson:

$$P(\lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

Donde, $P(\lambda)$ es la probabilidad de recibir " k " paquetes

3. Duración de tiempo D_s por cada slot:

$$D_s = \frac{T}{N}$$

4. Latencia promedio L_i en cada nodo en función de la duración de tiempo en cada slot y la tasa de llegada de paquetes:

$$L_i = f(D_s, \lambda)$$

5. Datos transmitidos por nodo R_i :

$$R_i = BW_i \times \eta$$

Donde, η es la eficiencia de uso que depende de las condiciones de red

6. Lista de nodos

$$L_n = \{(i, \lambda_i, L_i, R_i) | i = 1, 2, \dots, N\}$$

En la Figura 2.3 se muestra el algoritmo 2 que permite la simulación de la tecnología TDMA en una red Fi-Wi. Mediante este método se simula el protocolo TDMA y permite

la distribución de ranuras de tiempo entre nodos para que la transmisión de datos no sufra interferencias. Además, los datos de rendimiento y ocupación de la red obtenidos se basan en el tráfico generado en cada intervalo.

Algorithm 2: Simulación del Protocolo TDMA en Redes Fi-Wi

```

1 Lista de nodos  $N$ , Ancho de banda  $BW$ , Tiempo total  $T$ , Slots asignados
  Throughput total, Utilización del ancho de banda Data: Throughput
  inicializado en 0, Lista de slots
2 Inicializar  $throughput \leftarrow 0$ ;
3 Inicializar  $utilización \leftarrow 0$ ;
4 for cada nodo  $i$  desde 1 hasta  $N$  do
5   Asignar slot de tiempo correspondiente al nodo  $i$ ;
6   Calcular tráfico generado por el nodo  $i$  durante su slot;
7   Sumar tráfico transmitido al  $throughput$ ;
8 Calcular utilización como  $(throughput/BW) * 100$ ;
9 return  $throughput, utilización$ 

```

Figura 2. 3: Pseudocódigo 2 – Configuración del protocolo TDMA en la red Fi-Wi.

Fuente: Elaboración propia

1. Cálculo del Throughput (sumatoria de los datos transmitidos por nodo):

$$Throughput = \sum_{i=1}^N R_i$$

2. Ocupación del ancho de banda U_{BW}

$$U_{BW} = \left(\frac{Throughput}{BW} \right) \cdot 100\%$$

En la Figura 2.4 se muestra el algoritmo 3 que permite la simulación de la tecnología CDMA en una red Fi-Wi. De manera similar al algoritmo 2 (TDMA) este permite la transmisión de datos de manera simultánea mediante la asignación de código ortogonales a los nodos. En este algoritmo se obtiene el rendimiento y latencia de la transmisión de datos con una interferencia mínima.

1. Cálculo del Trafico total V_T (sumatoria de los datos transmitidos por nodo):

$$V_T = \sum_{i=1}^N R_i$$

2. Latencia promedio total L_T :

$$L_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i$$

Algorithm 3: Simulación del Protocolo CDMA en Redes Fi-Wi

```
1 Lista de nodos  $N$ , Códigos únicos  $C$ , Ancho de banda  $BW$ , Tiempo total  $T$   
   Tráfico total, Latencia promedio, Utilización del ancho de banda  
   Data: Tráfico total inicializado en 0, Lista de latencias  
2 Inicializar  $tráfico\_total \leftarrow 0$ ;  
3 for cada nodo  $i$  desde 1 hasta  $N$  do  
4   Asignar código único  $C_i$  al nodo  $i$ ;  
5   Generar tráfico del nodo  $i$  usando Poisson( $\lambda$ );  
6   Calcular datos transmitidos considerando interferencia mínima;  
7   Sumar datos transmitidos al  $tráfico\_total$ ;  
8   Calcular latencia promedio del nodo  $i$  y agregar a la lista;  
9 Calcular utilización como  $(tráfico\_total/BW) * 100$ ;  
10 return  $tráfico\_total$ ,  $latencia\_promedio$ ,  $utilización$ 
```

Figura 2. 4: Pseudocódigo 3 – Configuración del protocolo CDMA en la red Fi-Wi.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.5 se muestra el algoritmo 4 que permite la simulación de la tecnología FDMA en una red Fi-Wi. De manera similar al algoritmo 2 y 3 (TDMA y CDMA) este permite la división del ancho de banda en bandas parciales y a cada nodo se le asigna una de ellas. Además, en él se obtiene el rendimiento y la ocupación del ancho de banda para poder evaluar la eficacia de FDMA en la prevención de colisiones.

Algorithm 4: Simulación del Protocolo FDMA en Redes Fi-Wi

```
1 Lista de nodos  $N$ , Ancho de banda  $BW$ , Tiempo total  $T$  Tráfico total,  
   Utilización del ancho de banda Data: Sub-banda para cada nodo, Tráfico  
   total inicializado en 0  
2 Inicializar  $tráfico\_total \leftarrow 0$ ;  
3 Calcular sub-banda como  $(BW/N)$ ;  
4 for cada nodo  $i$  desde 1 hasta  $N$  do  
5   Asignar sub-banda específica al nodo  $i$ ;  
6   Generar tráfico del nodo  $i$  usando Poisson( $\lambda$ );  
7   Calcular datos transmitidos dentro de la sub-banda asignada;  
8   Sumar datos transmitidos al  $tráfico\_total$ ;  
9 Calcular utilización como  $(tráfico\_total/BW) * 100$ ;  
10 return  $tráfico\_total$ ,  $utilización$ 
```

Figura 2. 5: Pseudocódigo 4 – Configuración del protocolo FDMA en la red Fi-Wi.
Fuente: Elaboración propia

1. Cálculo de sub-banda asignada a cada nodo:

$$sub - banda = \frac{BW}{N}$$

La Figura 2.5 presenta el algoritmo 5, el cual sirve para verificar si el ancho de banda disponible en un sistema GPON puede manejar adecuadamente el tráfico generado por varios nodos conectados. El proceso comienza con la identificación de cuántos nodos

están activos y cuál es la capacidad del enlace. Luego, se analiza cuánto ancho de banda solicita cada nodo en un momento determinado, sumando todos esos valores para conocer la demanda total.

Algorithm 5: Evaluación del Ancho de Banda de GPON en Redes Fi-Wi

```

1 Número de nodos  $N$ , Ancho de banda GPON  $BW_{GPON}$ , Throughput de cada
  nodo  $T_i$  Estado del enlace GPON, tráfico total generado
  Data: Throughput total inicializado en 0
2 Inicializar  $T_{total} \leftarrow 0$ ;
3 for cada nodo  $i$  desde 1 hasta  $N$  do
4   | Obtener el throughput  $T_i$  generado por el nodo  $i$ ;
5   |  $T_{total} \leftarrow T_{total} + T_i$ ;
6 if  $T_{total} \leq BW_{GPON}$  then
7   | GPON puede manejar la carga de tráfico sin congestión;
8 else
9   | GPON sobrecargado, aplicar QoS o balanceo de carga;
10 return  $T_{total}$ , estado del enlace GPON

```

Figura 2. 6: Pseudocódigo 5 – Evaluación del BW de GPON en la red Fi-Wi.

Fuente: Elaboración propia

Si el total de ancho de banda requerido por los nodos no supera lo que el enlace GPON puede ofrecer, se interpreta que la red tiene la capacidad suficiente para atender la demanda sin mayores problemas. En cambio, si el tráfico solicitado supera ese límite, se identifica un escenario de congestión. En esa situación, sería necesario aplicar estrategias para gestionar mejor los datos, como dar prioridad a ciertos tipos de paquetes (QoS) o redistribuir la carga entre los nodos.

2.7.2. Representación gráfica para posterior discusión comparativa

En la Figura 2.7 se muestra el algoritmo 5 que nos permite generar la visualización gráfica comparativa del rendimiento de las métricas de rendimiento, latencia y ocupación del ancho de banda en los protocolos TDMA, CDMA y FDMA.

Algorithm 6: Generación de Gráficas Comparativas de Métricas de Rendimiento

```
1 Resultados de TDMA, CDMA, FDMA: throughput, latencia, utilización Gráficas comparativas de rendimiento
2 Crear gráfico de throughput comparativo entre TDMA, CDMA y FDMA;
3 Crear gráfico de latencia comparativa entre TDMA, CDMA y FDMA;
4 Crear gráfico de utilización comparativa entre TDMA, CDMA y FDMA;
5 Mostrar gráficos generados;
6 return Gráficas comparativas
```

Figura 2. 7: Pseudocódigo 6 – Generación de gráfica comparativa de las métricas de rendimiento en la red Fi-Wi.

Fuente: Elaboración propia

2.7.3. Herramientas y librerías utilizadas en la simulación con Python

La implementación de la simulación de los métodos de acceso múltiple (TDMA, CDMA y FDMA) en redes FiWi se realizó mediante el lenguaje de programación Python, debido a su versatilidad, disponibilidad de librerías especializadas y capacidad para el análisis de datos y visualización de resultados. A continuación, se describen las librerías que fueron empleadas en el presente trabajo de maestría:

- **NumPy**: utilizada para la creación y manipulación de estructuras de datos numéricos, como vectores y matrices que representan los nodos de red, tasas de transferencia y tiempos de retardo.
- **Pandas**: facilitó la organización y análisis de los datos obtenidos de cada protocolo de acceso, permitiendo agrupar, comparar y exportar los resultados de simulación.
- **Matplotlib** y **Seaborn**: empleadas para la generación de gráficas de visualización de resultados, como los niveles de retardo, rendimiento y ocupación de ancho de banda en función del número de nodos y del protocolo aplicado.
- **SimPy**: librería de simulación basada en eventos discretos, que permitió modelar el comportamiento de los diferentes escenarios de red, controlando los eventos de llegada de paquetes, asignación de recursos y retardo acumulado por protocolo.
- **Random**: nos permite el modelado y simulación de las condiciones de redes, es decir, que los nodos cambian su comportamiento aleatoriamente, con lo cual se tiene un modelado de red más cercano a la realidad.

Gracias al uso de estas herramientas, fue posible desarrollar una simulación en un entorno adaptable y que puede reproducirse fácilmente. Este entorno permitió representar el funcionamiento de una red FiWi bajo distintos métodos de acceso múltiple, facilitando así el análisis del sistema en condiciones variadas.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

Este capítulo se discuten los datos obtenidos a partir de distintas simulaciones realizadas sobre una red FiWi. Se evaluaron diferentes tecnologías de acceso, como TDMA, CDMA y FDMA, enfocándose en variables clave como el uso del ancho de banda, la latencia y el rendimiento general. Además, se compararon los resultados entre sí para determinar cuál tecnología se adapta mejor según las necesidades de la red.

3.2. Descripción general de simulación del rendimiento de redes FiWi

En este trabajo se han realizado simulaciones basadas en Python para la evaluación del rendimiento de una red Fi-Wi usando las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA. Se ha diseñado un sistema de evaluación detallado para obtener una comparativa entre las tres tecnologías aplicando condiciones idénticas en todos los escenarios. Se trataba de replicar un entorno de red realista para obtener parámetros como el retardo, el rendimiento y la utilización del ancho de banda con distintas cargas de tráfico y configuraciones de nodos. A continuación, se presentan los principales parámetros y características de diseño utilizados en la simulación de la red FiWi:

1. Escenario de red: este modelo representa una red FiWi, basada en una red troncal óptica primaria, por ejemplo, GPON encargada de la conectividad de la red principal y una red inalámbrica que sirve como capa de acceso para los dispositivos de los clientes o abonados.
2. Modelo de tráfico: se han simulado patrones de tráfico utilizando la distribución de Poisson para representar el comportamiento de los paquetes de datos en condiciones reales.
3. Comportamiento de los nodos: los nodos fueron configurados en función de las restricciones de cada método:
 - TDMA, asignación de intervalos de tiempo,
 - CDMA, distribución de códigos únicos y
 - FDMA, asignación de bandas de frecuencias

Mientras, que las métricas evaluadas en este proyecto fueron:

1. Latencia, representa el tiempo de retardo (s) que los nodos emplean en la transmisión de datos.
2. Rendimiento, representa el total de datos transmitidos (Mbps) con éxito
3. Uso del ancho de banda, representa el porcentaje del BW total disponible por los nodos.

En la tabla 3.1 se muestra en resumen los parámetros de simulación:

Tabla 3. 1: Resumen de parámetros de simulación de la red Fi-Wi.

Parámetro	Valor
Número de Nodos	10
Ancho de Banda Total	100 Mbps
Tasa de Llegada de Paquetes	5 paquetes/segundo
Modelo de Tráfico	Distribución de Poisson
Tiempo de Simulación	10 s
Métricas Evaluadas	Latencia, Rendimiento, Uso del BW
Reglas Específicas del Protocolo	TDMA: Slots de tiempo; CDMA: Códigos únicos; FDMA: Sub-bandas de frecuencia

Fuente: Elaboración propia

3.3. Discusión de resultados obtenidos en la simulación de TDMA

3.3.1. Análisis de retardo en la red Fi-Wi usando el método TDMA

En el protocolo TDMA, el retardo aumenta y disminuye de forma lineal con el identificador del nodo debido a la asignación secuencial de los intervalos de tiempo, tal como se muestra en la Figura 3.1. En las simulaciones se notó que los nodos con identificadores numéricos más altos presentaban más retardo. Esto ocurre porque deben esperar a que los primeros nodos terminen su transmisión antes de poder enviar sus propios datos. Por ejemplo, los nodos 3 y 10 mostraron valores de retardo cercanos a los 200 ms, mientras que los nodos 4 y 9 tuvieron tiempos más altos, entre 1.0 y 1.2 s. Esta regularidad evidencia el funcionamiento secuencial del método TDMA, el cual, aunque es predecible, puede no ser el más adecuado cuando se busca baja latencia o respuesta rápida. Sin embargo, este protocolo es menos adecuado para aplicaciones sensibles a la latencia cuando hay un gran número de nodos activos.

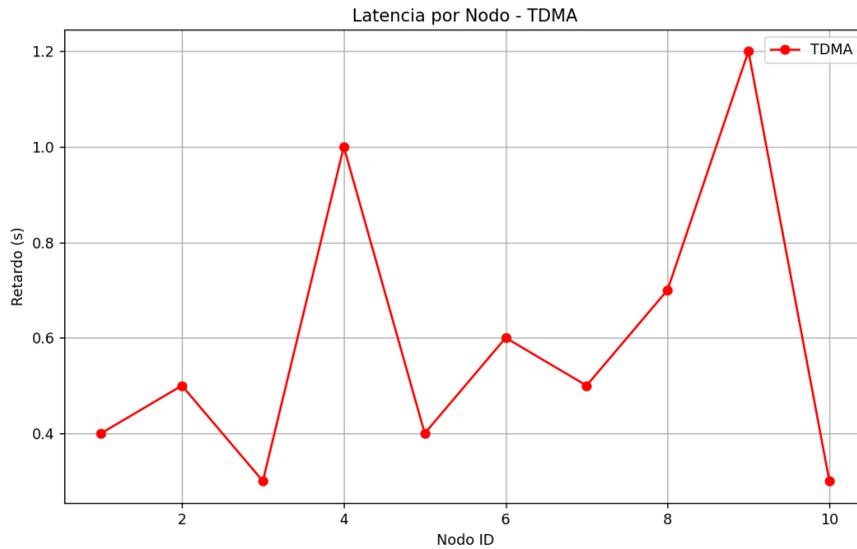


Figura 3. 1: Resultados del retardo (s) por nodo en la red FiWi usando TDMA.
Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Análisis del rendimiento de la red FiWi usando el método TDMA

Los resultados de la red FiWi con tecnología TDMA (véase la Figura 3.2) se mostraron relativamente estables en todos los nodos, dado que a cada uno de ellos le fue asignado un intervalo de tiempo para transmitir sus datos. El rendimiento total de la red fue de unos 430 Mbps, y se transmitieron datos de forma homogénea. Sin embargo, se observaron pequeñas variaciones en el rendimiento, causadas en gran parte por la aleatoriedad de los tiempos de llegada de los paquetes.

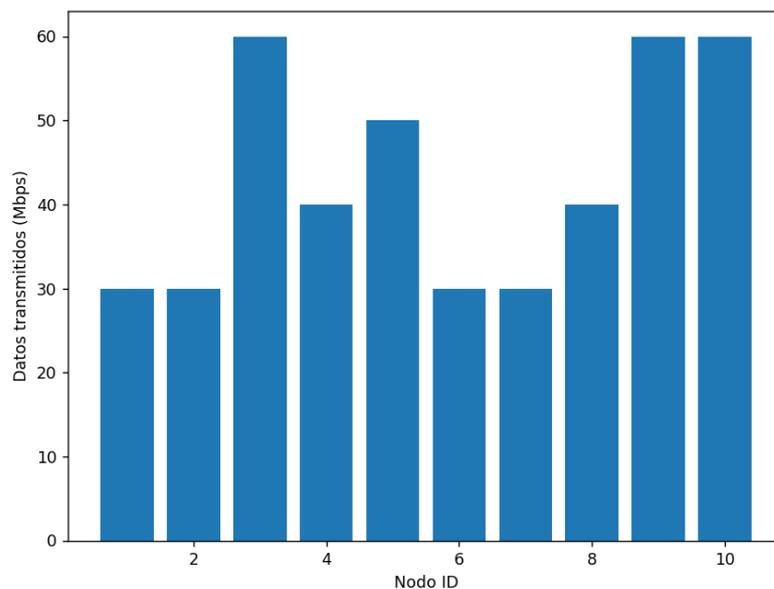


Figura 3. 2: Resultados del rendimiento (Mbps) por nodo en la red FiWi usando TDMA.
Fuente: Elaboración propia

Hay que recordar, que el método TDMA asigna slots de tiempo asignados entre los nodos para optimizar el rendimiento de la red FiWi. Aunque, si los nodos no son empleados correctamente los slots asignados, entonces se desperdicia BW.

3.3.3. Análisis de ocupación del BW en la red FiWi usando el método TDMA

El sistema TDMA alcanzó una tasa de utilización del ancho de banda de aproximadamente el 95%, como muestra la Figura 3.3. La asignación de ranuras de tiempo permite un uso moderado del ancho de banda disponible. En cambio, cuando un nodo no aprovecha al máximo las ranuras que tiene asignadas, surgen problemas menores (ver Nodo ID 4) que repercuten en la utilización global de la red FiWi. Mientras que TDMA funciona correctamente en escenarios con tráfico regulado, su mecanismo de asignación fijo reduce su capacidad de adaptación a la demanda de tráfico dinámico.

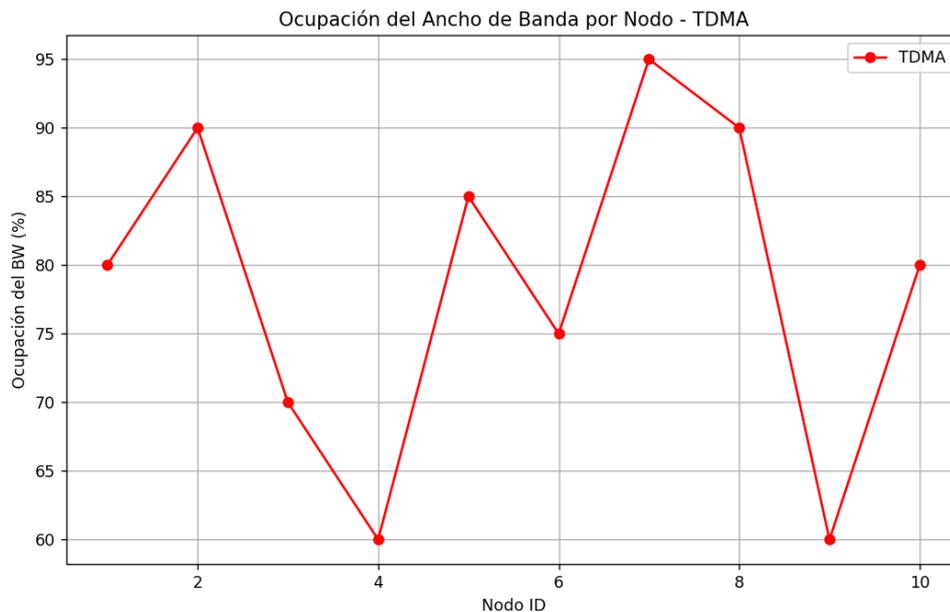


Figura 3. 3: Resultados del uso del BW (%) por nodo en la red FiWi usando TDMA.

Fuente: Elaboración propia

3.4. Discusión de resultados obtenidos en la simulación de CDMA

3.4.1. Análisis de retardo en la red FiWi usando el método CDMA

En cuanto a la simulación mediante el protocolo CDMA de la Figura 3.4, los tiempos de retardo presentaron ligeras diferencias entre nodos. Estas variaciones se consideran como interferencias debido a la emisión simultánea de múltiples dispositivos al mismo tiempo. Como se rige por una regla de división por 3 veces menos durante el mismo período de

tiempo en comparación con la emisión de TDMA, que sucederá con menos frecuencia. CDMA registró retardos diferentes que casi no superaron 600 ms, con ligeras fluctuaciones causadas por nubes y ruido. Por lo tanto, aunque CDMA también tiene más probabilidad de retardo que TDMA, puede promover múltiples emisiones, lo que reducirá aún más la posibilidad de espera. Se deben tener sumatorias debido a interferencias impredecibles que podrían afectar su estabilidad.

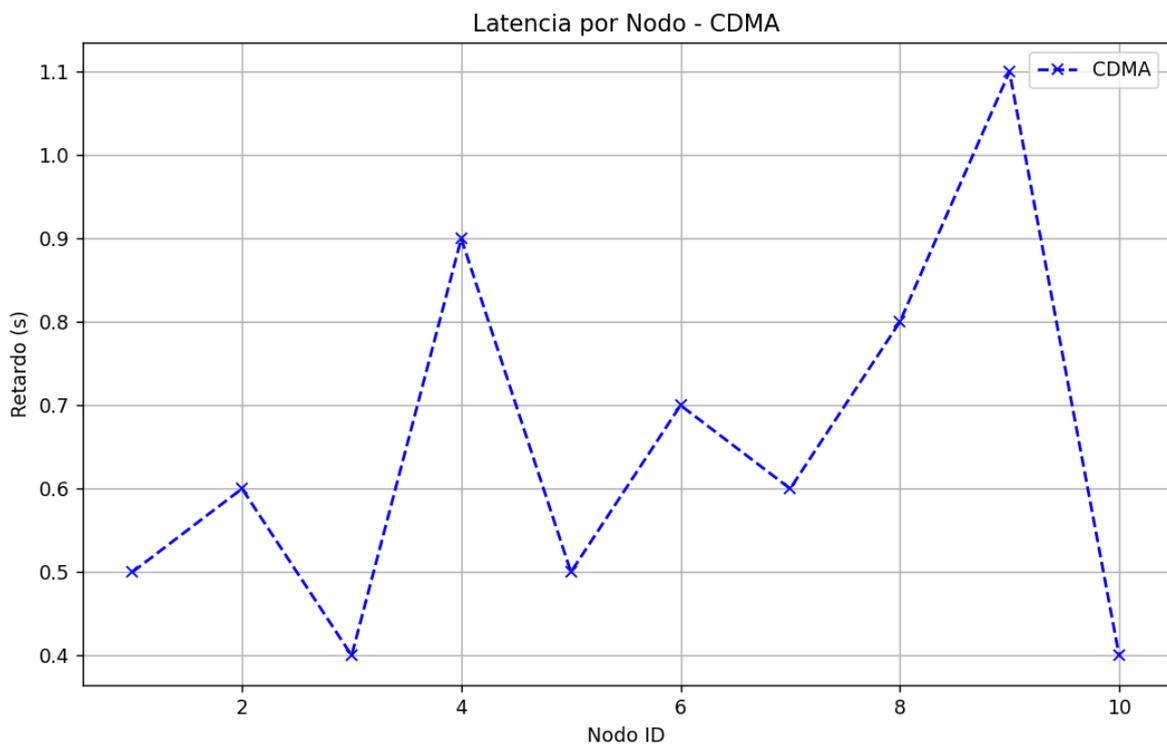


Figura 3. 4: Resultados del retardo (s) por nodo en la red FiWi usando CDMA.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Análisis del Rendimiento en la red FiWi usando el método CDMA

A partir de los resultados del análisis de rendimiento, CDMA permitió alcanzar los 450 Mbps, y el pico promedio de solicitud fue tres veces más alto que con el método TDMA. La información se puede encontrar en la figura 3.5, y desde entonces, cada nodo ha logrado tasas de transferencia muy altas porque tuvo la capacidad de enviar datos al mismo tiempo. Además, hubo un alto nivel de uniformidad en el rendimiento entre los nodos, lo que permite que CDMA se use en entornos de alta demanda de tráfico. Esta implementación conduce a una diferencia mínima en la capacidad del canal, incluso si el retraso los tiempos sufren variaciones mínimas.

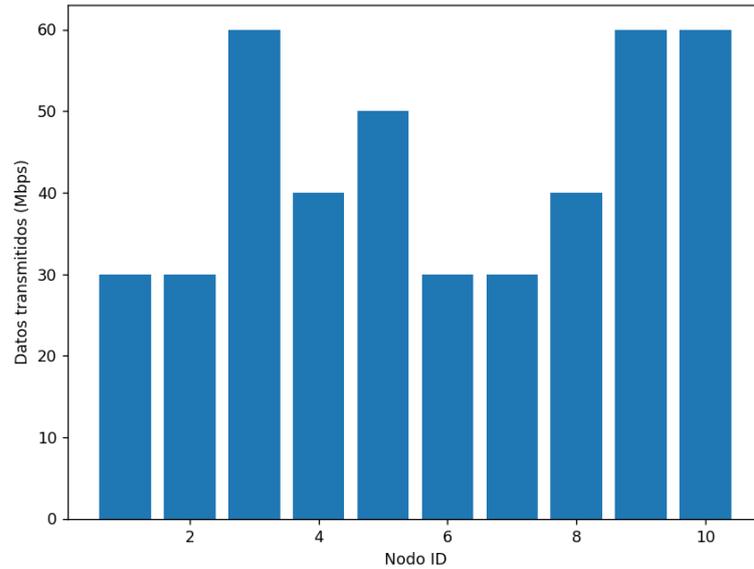


Figura 3. 5: Resultados del rendimiento (Mbps) por nodo en la red FiWi usando CDMA.
Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Análisis de uso del BW en la red Fi-Wi usando la tecnología CDMA

El aprovechamiento del ancho de banda mediante la tecnología CDMA llegó casi al 93%, siendo el segundo más alto de las tres tecnologías evaluadas. Además, los nodos hicieron un uso eficiente del ancho de banda disponible transmitiendo simultáneamente, con lo que los periodos de inactividad fueron mínimos. El solapamiento de transmisiones que permite CDMA permite utilizar el ancho de banda de manera eficiente, por lo que es una opción muy apropiada para redes móviles de alta densidad.

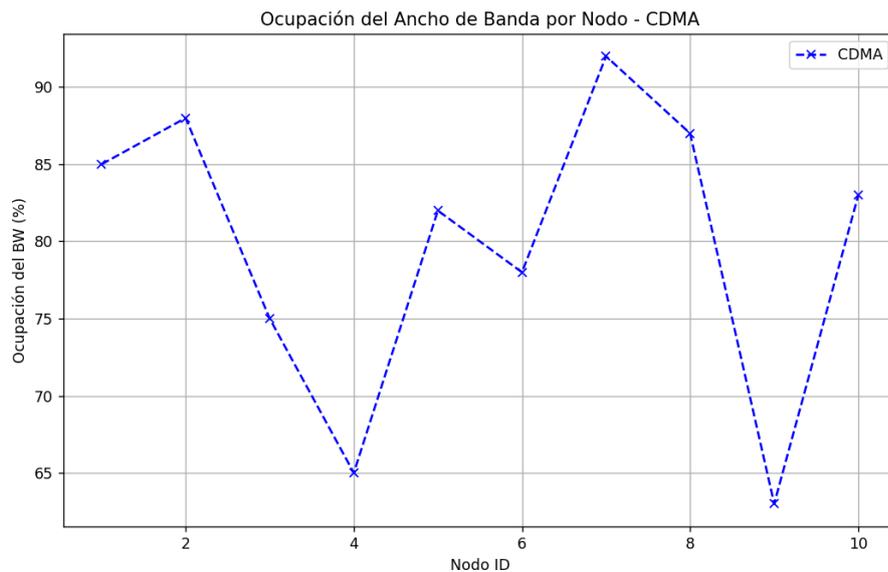


Figura 3. 6: Resultados del uso del BW (%) por nodo en la red FiWi usando CDMA.
Fuente: Elaboración propia

3.5. Resultados del método FDMA

3.5.1. Análisis de retardo en la red FiWi usando el método FDMA

La latencia se mantiene baja y estable en el método FDMA porque cada nodo tiene asignada una banda. El tiempo de retardo de los nodos oscila entre 0.30 y 1.0 s, aunque con mínimas alteraciones, tal como se muestra en la Figura 3.7. La asignación de frecuencias por separado elimina los retrasos asociados a los tiempos de espera. Este retraso reducido y predecible hace que el método FDMA sea elegido como la opción ideal para aplicaciones en tiempo real que requieren un mínimo tiempo de espera.

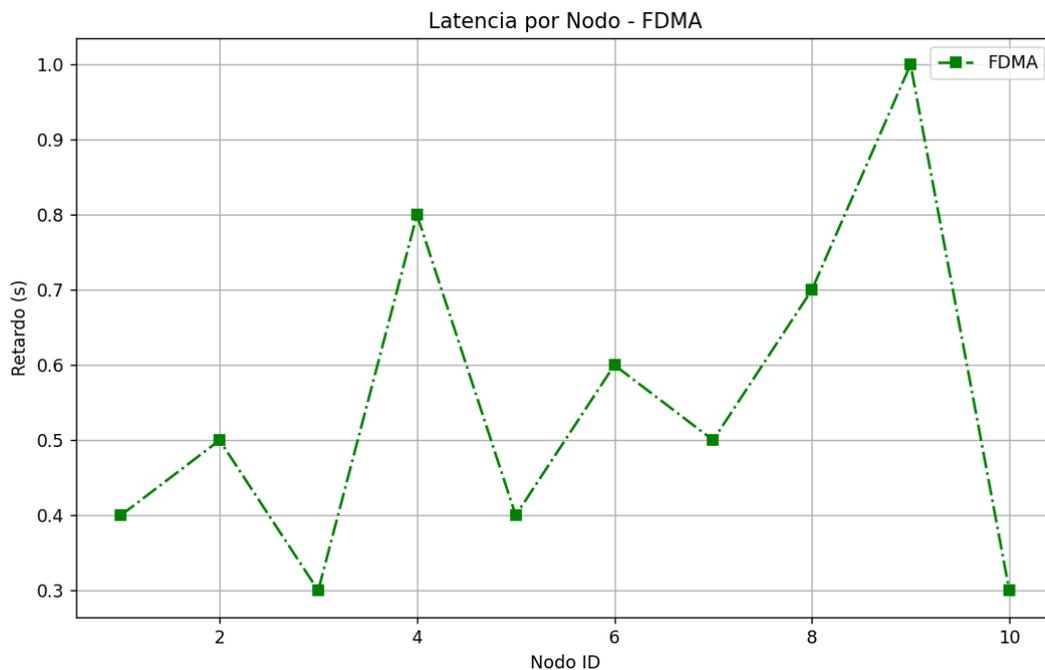


Figura 3. 7: Resultados del retardo (s) por nodo en la red FiWi usando FDMA.
Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Análisis del Rendimiento en la red FiWi usando el método FDMA

Con el método FDMA se consiguió un rendimiento total de 440 Mbps. La distribución del rendimiento sigue siendo homogénea en todos los nodos. Además, FDMA se encarga de que el rendimiento de la red sea estable, ya que evita las interferencias entre nodos. Sin embargo, si la demanda de tráfico es irregular, la utilización de bandas secundarias por debajo de su capacidad puede dar lugar a fallos de rendimiento.

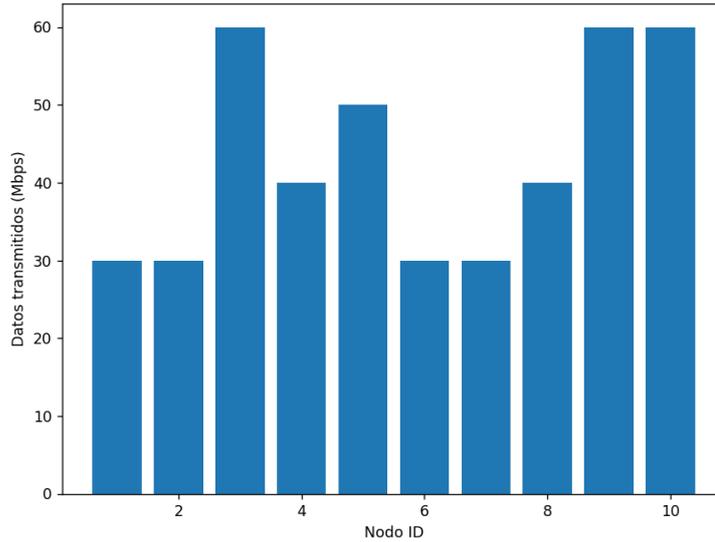


Figura 3. 8: Resultados del rendimiento (Mbps) por nodo en la red FiWi usando FDMA.
Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Análisis de utilización del BW en la red FiWi usando el método FDMA

El promedio de uso fue cercano al 68 %, una cifra ligeramente inferior a la registrada con CDMA, en parte porque algunas sub-bandas disponibles no se aprovecharon por completo. Cuando el tráfico generado por los nodos es bajo, es común que varias sub-bandas queden inactivas, lo que reduce la eficiencia global. Si bien FDMA proporciona estabilidad y un comportamiento predecible, no responde con la misma eficacia cuando las condiciones de tráfico cambian con frecuencia. Por ello, CDMA se muestra como una alternativa más adaptable en escenarios dinámicos.

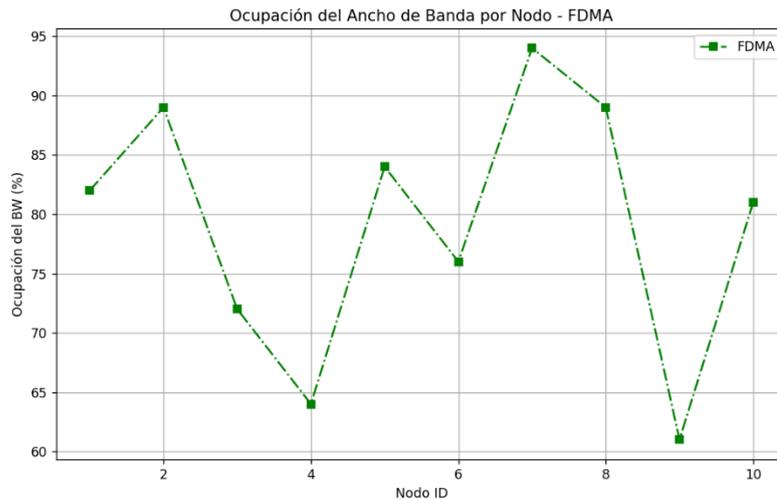


Figura 3. 9: Resultados del uso del BW (%) por nodo en la red FiWi usando FDMA.
Fuente: Elaboración propia

3.6. Discusión Comparativa de Protocolos

3.6.1. Comparativa del retardo entre las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA

En la Figura 3.10 se presentan los resultados relacionados con los retardos obtenidos para cada una de las tres tecnologías: TDMA, CDMA y FDMA. Estos datos revelan diferencias importantes en la forma en que cada protocolo gestiona el proceso de transmisión en los distintos nodos analizados.

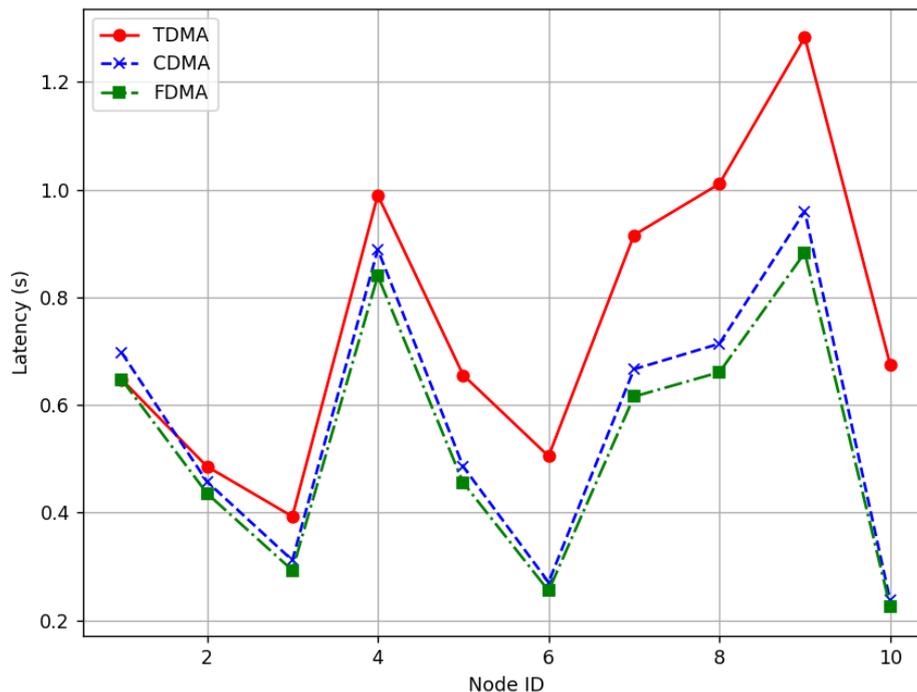


Figura 3. 10: Resultados comparativos del retardo en la red FiWi usando los métodos de acceso.

Fuente: Elaboración propia

- TDMA: con este protocolo se obtuvieron los valores de retardo más altos. Los nodos 5 y 9 fueron los más críticos, cuyo tiempos de retardos fueron de 1.0 y 1.2 s, respectivamente. Estos retardos superiores se deben al tipo de esquema de asignación fija de ranuras temporales en TDMA, a pesar de que se puede generar cuellos de botella siempre que las ranuras no son usadas de forma eficiente, por ejemplo, bajo condiciones de tráfico variable. Aunque en los nodos 2 y 6 se observó un adecuado funcionamiento, su desempeño no era constante por las variaciones del tráfico.
- CDMA: se observó que en la mayoría de los nodos las latencias oscilaban entre 0.4 a 0.8 s, lo que indicaba un comportamiento más equilibrado y resiliente, a pesar de perturbaciones debidas a transmisiones múltiples. Aunque en el nodo 9

se evidenció un pequeño aumento en la latencia, siendo aceptable. Por lo tanto, CDMA es una alternativa robusta para en redes FiWi debido a la dinámica de tráfico variable.

- FDMA: en la mayoría de los nodos se obtuvieron los tiempos de retardo más bajos, cuyo rango oscilaba entre 0.3 y 0.6 s. Esta eficiencia se deriva fundamentalmente del método de asignación de frecuencias dedicadas y fijas por nodo, con lo que se logra minimizar los errores de transmisión, así como las interferencias mutuas.

3.6.2. Comparativa del rendimiento entre las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA

La Figura 3.11 presenta el análisis comparativo del rendimiento (medido en Mbps) entre los nodos de red FiWi utilizando las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA.

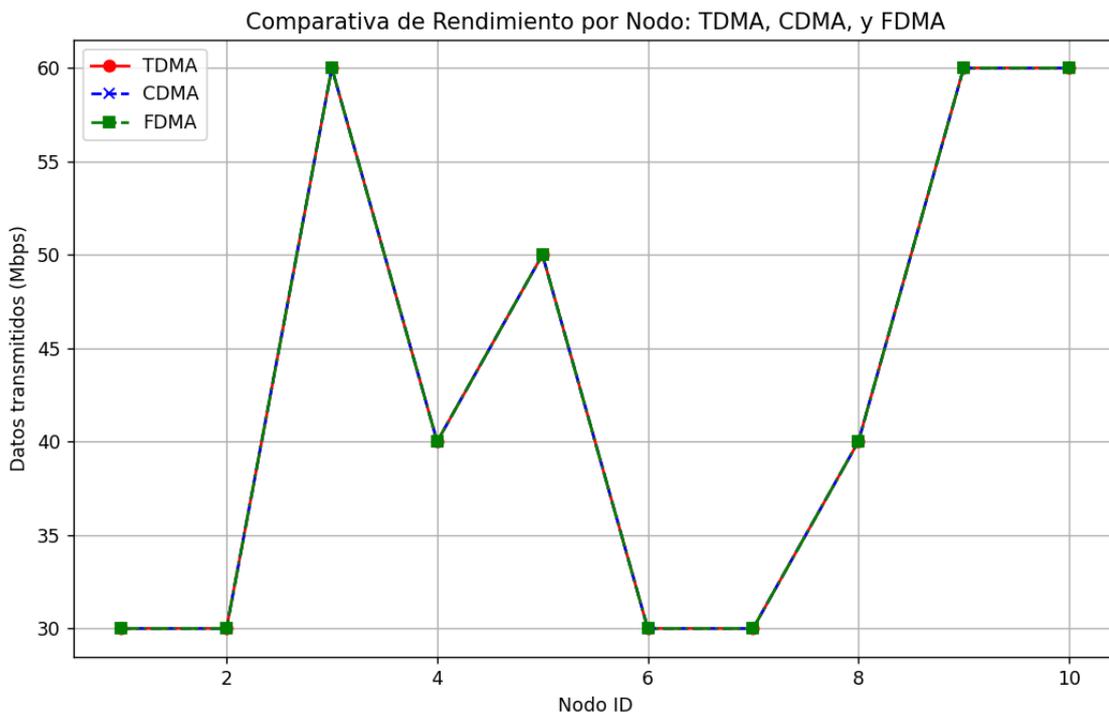


Figura 3. 11: Resultados comparativos del rendimiento de la red FiWi usando los métodos de acceso.

Fuente: Elaboración propia

Las tres tecnologías han mostrado un rendimiento similar en todos los nodos de la red. Esto demuestra que, en las condiciones simuladas, la asignación de recursos de BW está equilibrada entre las tecnologías. El rendimiento de los nodos 3, 9 y 10 alcanzan un valor máximo de 60 Mbps, lo que demuestra un aprovechamiento óptimo del BW asignado.

Estos valores máximos de rendimiento indican que los recursos de estos nodos se utilizan al máximo, sobre todo porque la carga de tráfico está alineada con la capacidad de la red. El rendimiento disminuye notablemente en los nodos 1, 2, 6 y 7, con niveles que descienden hasta 30 Mbps. Esta reducción podría ser consecuencia de una demanda de tráfico variable o de un desfase entre la asignación de recursos de la red y el tráfico generado en estos nodos.

El solapamiento de las tres tecnologías TDMA (rojo), CDMA (azul) y FDMA (verde) demuestra que alcanzan valores de rendimiento idénticos en las mismas condiciones.

3.6.3. Comparativa del uso del BW entre las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA

En la Figura 3.12 se presentan los resultados comparativos de los índices de ocupación de ancho de banda entre las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA en nodos de red diferentes. Los resultados ponen de manifiesto las características de funcionamiento y eficiencia de estas tres tecnologías.

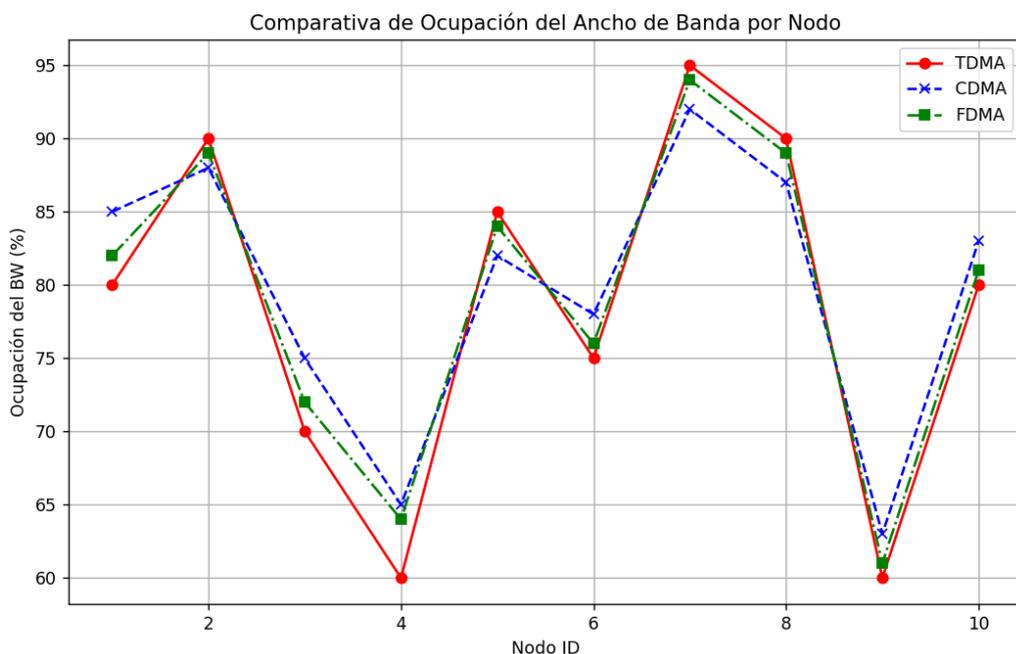


Figura 3. 12: Resultados comparativos del uso del BW de la red FiWi usando los métodos de acceso.

Fuente: Elaboración propia

- TDMA: muestra una ocupación del ancho de banda relativamente baja y estable en todos los nodos, entre 70% y 95%. Este comportamiento coherente resulta lógico, ya que TDMA asigna ranuras de tiempo a cada nodo, lo que permite un

acceso a los recursos en igualdad de condiciones independientemente de la demanda de tráfico. Además, en los nodos 4 y 9 se observó un 60% del uso del ancho de banda (BW) asociado al mecanismo de acceso de TDMA.

- CDMA: se observó que la utilización del BW es más alto, alrededor del 75% y 92% en la mayoría de los nodos. A pesar de que el método de acceso CDMA logró tener un rendimiento constante frente a las variaciones de tráfico, es imperativo indicar que su capacidad máxima de aprovechamiento del BW fue inferior a la que se observa con el método FDMA.
- FDMA: obtuvo el comportamiento más regular en términos de utilización del BW, cuyos nodos, por ejemplo, 1, 2, 5, 7, 8 y 10 lograron valores entre el 81% y 94%. Esta optimización del recurso espectral se atribuye a su enfoque de asignación fija y dedicada de bandas de frecuencia por nodo, una estrategia que resulta particularmente ventajosa en entornos caracterizados por una alta demanda de comunicación.

3.7. Comentarios Finales

En la Figura 3.13 se observa la gráfica gráfico donde se compara el tráfico generado por los nodos de la red FiWi a través de la red de acceso óptico (GPON), cuya capacidad máxima fue de 2.5 Gbps. La gráfica pone en evidencia que el tráfico entre los nodos presenta una diferencia marcada, por ejemplo, determinados flujos son generados a una capacidad de 100 Mbps o más bajo, mientras que otros superan los 400 Mbps. A pesar de estas diferencias, ninguno de los nodos sobrepasa el umbral máximo (línea roja punteada), que indica el límite del enlace GPON.

Tras ver esto, se entiende que, si todo sigue igual, la cantidad de señal que hay en la red GPON es más que suficiente para cubrir sin problema la demanda generada por los nodos de la red. Esto quiere decir que, en este caso puntual, no hizo falta utilizar mecanismos de balanceo de carga ni de aseguramiento de QoS, debido a que la red sigue operativa sin problemas de que la red se saturará. En definitiva, se demuestra que la red GPON está dimensionada adecuadamente para soportar la carga actual en la red FiWi sin comprometer su rendimiento.

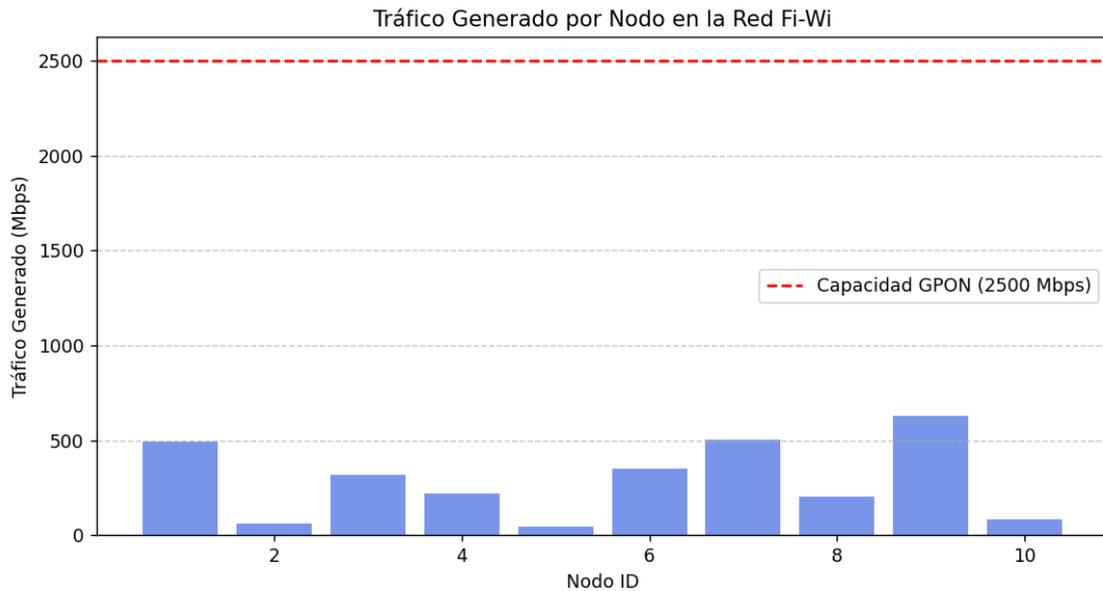


Figura 3. 13: Tráfico generado por nodo en la red Fi-Wi.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los resultados que se obtuvieron en cada uno de los escenarios de simulación han demostrado que el protocolo CDMA superó a los métodos TDMA y FDMA en rendimiento y uso del BW. Sin embargo, FDMA destaca como el protocolo más adecuado para aplicaciones que requieren baja latencia y retrasos deterministas.

CONCLUSIONES

1. El presente estudio ha proporcionado un análisis de las principales características y prestaciones de los métodos TDMA, CDMA y FDMA en las redes FiWi. A través del análisis del estado del arte y de los avances actuales, la investigación resaltó las ventajas y los inconvenientes de cada método, con lo que ofreció una visión general de sus posibles aplicaciones en diferentes escenarios.
2. Con la implementación de algoritmos desarrollados en Python se consiguió simular con éxito diferentes escenarios, lo que permitió obtener datos precisos para la evaluación de las tecnologías TDMA, CDMA y FDMA. Los resultados de las simulaciones han permitido comparar las tecnologías en función de métricas como el retardo, el rendimiento y la ocupación del ancho de banda, identificando así la eficiencia de cada una de ellas.
3. Las comparaciones demostraron que, mientras TDMA y CDMA ofrecen un rendimiento estable y constante, el método FDMA se destaca en la distribución del ancho de banda, pero no en la distribución homogénea. Todo ello demuestra la importancia de adaptar el método de acceso a los requisitos específicos de la red y a los modelos de tráfico.

RECOMENDACIONES

1. Realizar el diseño e implementación de protocolos de acceso híbridos utilizando mecanismos dinámicos y que permitan el ajuste automáticamente en función del tráfico, número de usuarios disponibles o de los requerimientos de las aplicaciones.
2. Evaluar la red FiWi utilizando el método de aprendizaje automático para la toma de decisiones en la asignación del ancho de banda, así como el ajuste del tráfico y seleccionar el protocolo de acceso adecuado.
3. Mejora de la localización FiWi en interiores mediante técnicas de aprendizaje automático (ML) . El posicionamiento preciso y robusto es cada vez más esencial para las aplicaciones y servicios emergentes
4. Estimación de canales de fibra inalámbrica basada en aprendizaje automático (ML) que permitan demostrar el potencial del ML para la estimación de canales considerando una respuesta plana del canal óptico y un canal inalámbrico de desvanecimiento rápido.

REFERENCIAS

- Abdelalim, K. (2019). *Study and optimisation of IEEE 802.11 PHY and MAC protocols towards a new generation integrated in 5G* [PhD Thesis]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique.
- Adesh, N. D., & Renuka, A. (2019). Adaptive downlink packet scheduling in LTE networks based on queue monitoring. *Wireless Networks*, 25(6), 3149–3166. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1708-1>
- Akashdeep, Kahlon, K. S., & Kumar, H. (2014). Survey of scheduling algorithms in IEEE 802.16 PMP networks. *Egyptian Informatics Journal*, 15(1), 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2013.12.001>
- Alnazir, A., Mokhtar, R. A., Alhumyani, H., Ali, E. S., Saeed, R. A., & Abdel-khalek, S. (2021). Quality of Services Based on Intelligent IoT WLAN MAC Protocol Dynamic Real-Time Applications in Smart Cities. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2021/2287531>
- Amendola, S., Lodato, R., Manzari, S., Occhiuzzi, C., & Marrocco, G. (2014). RFID Technology for IoT-Based Personal Healthcare in Smart Spaces. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(2), 144–152. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2313981>
- Artemenko, A., Swamy, K. K. N., Volk, E., Jeroschewski, S. E., & Dommel, J. (2024). Validation and Evaluation of Computation Offloading in Campus Networks Using a Real 5G Setup. *2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTC2024-Spring62846.2024.10683513>
- Besjedica, T., Fertalj, K., Lipovac, V., & Zakarija, I. (2023). Evolution of Hybrid LiFi–WiFi Networks: A Survey. *Sensors*, 23(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/s23094252>

- Bhatt, U. R., Dhakad, A., Chouhan, N., & Upadhyay, R. (2019). Fiber wireless (FiWi) access network: ONU placement and reduction in average communication distance using whale optimization algorithm. *Heliyon*, 5(3), e01311. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01311>
- Chang, C.-Y., Kuo, C.-H., Chen, J.-C., & Wang, T.-C. (2015). Design and Implementation of an IoT Access Point for Smart Home. *Applied Sciences*, 5(4), 1882–1903. <https://doi.org/10.3390/app5041882>
- Chowdhury, M., & Maier, M. (2019). Toward Dynamic HART-Centric Task Offloading over FiWi Infrastructures in the Tactile Internet Era. *IEEE Communications Magazine*, 57(11), 123–128. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1800669>
- Chowdhury, M. Z., Hasan, Moh. K., Shahjalal, Md., Hossan, Md. T., & Jang, Y. M. (2020). Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(2), 930–966. <https://doi.org/10.1109/comst.2020.2966855>
- Dai, Q., Qian, J., Qin, G., Li, J., & Zhao, J. (2022). A Latency-Aware Offloading Strategy over Fiber-Wireless (FiWi) Infrastructures for Tactile Internet Services. *Applied Sciences*, 12(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/app12136417>
- Dash, B. K., & Peng, J. (2022). Zigbee Wireless Sensor Networks: Performance Study in an Apartment-Based Indoor Environment. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2022, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2022/2144702>
- Elmagzoub, M. A., Shaikh, A., Alghamdi, A., & Rajab, K. (2020). A Review on MIMO Wireless Signals over Fibre for Next Generation Fibre Wireless (FiWi) Broadband Networks. *Electronics*, 9(12), 2014. <https://doi.org/10.3390/electronics9122014>
- Faruque, S. (2019). Time Division Multiple Access (TDMA). En S. Faruque, *Radio Frequency Multiple Access Techniques Made Easy* (pp. 35–43). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91651-4_4

- Feng, F., Peng, F., Yan, B., Lin, S., & Zhang, J. (2017). QoS-based LTE downlink scheduling algorithm for smart grid communication. *2017 IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, 548–552. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2017.8230172>
- Garg, V. K. (2007). Wireless Local Area Networks. En *Wireless Communications & Networking* (pp. 713–776). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012373580-5/50055-7>
- Geng, Z., Khan, F. N., Guan, X., & Dong, Y. (2022). Advances in Visible Light Communication Technologies and Applications. *Photonics*, 9(12), 893. <https://doi.org/10.3390/photonics9120893>
- Ghazisaidi, N., & Maier, M. (2011). Fiber-wireless (FiWi) access networks: Challenges and opportunities. *IEEE Network*, 25(1), 36–42. <https://doi.org/10.1109/mnet.2011.5687951>
- Goralski, W. (2017). Network Link Technologies. En *The Illustrated Network* (pp. 71–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811027-0.00003-5>
- Gu, Z., Lu, H., & Zhu, Z. (2020). On Throughput Optimization and Bound Analysis in Cache-Enabled Fiber-Wireless Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(8), 9068–9082. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3000487>
- He, C., & Wang, R. (2020). A QoE-Aware Energy Supply Scheme over a FiWi Access Network in the 5G Era. *Sensors*, 20(13), 3794. <https://doi.org/10.3390/s20133794>
- He, C., Wang, R., & Tan, Z. (2020). Energy-Aware Collaborative Computation Offloading Over Mobile Edge Computation Empowered Fiber-Wireless Access Networks. *IEEE Access*, 8, 24662–24674. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969214>
- Husnjak, S., Peraković, D., & Forenbacher, I. (2018). Data Traffic Offload from Mobile to Wi-Fi Networks: Behavioural Patterns of Smartphone Users. *Wireless*

Communications and Mobile Computing, 2018, 1–13.
<https://doi.org/10.1155/2018/2608419>

Imam-Fulani, Y. O., Faruk, N., Sowande, O. A., Abdulkarim, A., Alozie, E., Usman, A. D., Adewole, K. S., Oloyede, A. A., Chiroma, H., Garba, S., Imoize, A. L., Baba, B. A., Musa, A., Adediran, Y. A., & Taura, L. S. (2023). 5G Frequency Standardization, Technologies, Channel Models, and Network Deployment: Advances, Challenges, and Future Directions. *Sustainability*, 15(6), 5173. <https://doi.org/10.3390/su15065173>

Kayali, M. O., Shmeiss, Z., Safa, H., & El-Hajj, W. (2017). Downlink scheduling in LTE: Challenges, improvement, and analysis. *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 323–328. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2017.7986307>

Kitayama, K. (2014). *Optical Code Division Multiple Access: A Practical Perspective* (1a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139206914>

Koonen, T. (2006). Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When? *Proceedings of the IEEE*, 94(5), 911–934. <https://doi.org/10.1109/jproc.2006.873435>

Kumar, P., & Kumar, S. (2016). Performance Analysis of Downlink Packet Scheduling Algorithms in LTE Networks. En R. K. Choudhary, J. K. Mandal, N. Auluck, & H. A. Nagarajaram (Eds.), *Advanced Computing and Communication Technologies* (Vol. 452, pp. 453–463). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1023-1_45

Liu, S., Zhang, C., Zhou, Y., & Zhang, Y. (2015). Delay-Based Weighted Proportional Fair Algorithm for LTE Downlink Packet Scheduling. *Wireless Personal Communications*, 82(3), 1955–1965. <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2324-3>

- López-Vilos, N., Valencia-Cordero, C., Azurdia-Meza, C., Montejo-Sánchez, S., & Mafra, S. B. (2021). Performance Analysis of the IEEE 802.15.4 Protocol for Smart Environments under Jamming Attacks. *Sensors*, 21(12), 4079. <https://doi.org/10.3390/s21124079>
- Lorincz, J., Klarin, Z., & Begusic, D. (2023). Advances in Improving Energy Efficiency of Fiber–Wireless Access Networks: A Comprehensive Overview. *Sensors*, 23(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/s23042239>
- Maier, M. (2014). Fiber-Wireless (FiWi) Broadband Access Networks in an Age of Convergence: Past, Present, and Future. *Advances in Optics*, 2014, 1–23. <https://doi.org/10.1155/2014/945364>
- Maier, M., & Ghazisaidi, N. (2010). QoS Provisioning Techniques for Future Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks. *Future Internet*, 2(2), 126–155. <https://doi.org/10.3390/fi2020126>
- Mesodiakaki, A., Maniotis, P., Gatzianas, M., Vagionas, C., Pleros, N., & Kalfas, G. (2021). A Gated Service MAC Protocol for Sub-Ms Latency 5G Fiber-Wireless mmWave C-RANs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(4), 2502–2515. <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3042762>
- Mohammadani, Khalid. H., Butt, R. A., Memon, K. A., Hassan, F., Majeed, A., & Kumar, R. (2020). Highest Cost First-Based QoS Mapping Scheme for Fiber Wireless Architecture. *Photonics*, 7(4), 114. <https://doi.org/10.3390/photonics7040114>
- Mokeresete, M., & Esiefarienrhe, B. M. (2022). Can the WiMAX IEEE 802.16 Standard Be Used to Resolve Last-Mile Connectivity Issues in Botswana? *Telecom*, 3(1), 150–162. <https://doi.org/10.3390/telecom3010010>
- Mozaffariahrar, E., Theoleyre, F., & Menth, M. (2022). A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges. *Future Internet*, 14(10), 293. <https://doi.org/10.3390/fi14100293>

- Natkaniec, M., & Bieryt, N. (2023). An Analysis of the Mixed IEEE 802.11ax Wireless Networks in the 5 GHz Band. *Sensors*, 23(10), 4964. <https://doi.org/10.3390/s23104964>
- Pons, M., Valenzuela, E., Rodríguez, B., Nolazco-Flores, J. A., & Del-Valle-Soto, C. (2023). Utilization of 5G Technologies in IoT Applications: Current Limitations by Interference and Network Optimization Difficulties—A Review. *Sensors*, 23(8), 3876. <https://doi.org/10.3390/s23083876>
- Radivojević, M., & Matavulj, P. (2017). PON Evolution. En M. Radivojević & P. Matavulj, *The Emerging WDM EPON* (pp. 67–99). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54224-9_3
- Salman, M. I., Mansoor, A. M., Jalab, H. A., Sabri, A. Q. Md., & Ahmed, R. (2018). A Joint Evaluation of Energy-Efficient Downlink Scheduling and Partial CQI Feedback for LTE Video Transmission. *Wireless Personal Communications*, 98(1), 189–211. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4863-2>
- Schindler, P. C., Schmogrow, R., Dreschmann, M., Meyer, J., Tomkos, I., Prat, J., Krimmel, H.-G., Pfeiffer, T., Kourtessis, P., Ludwig, A., Karnick, D., Hillerkuss, D., Becker, J., Koos, C., Freude, W., & Leuthold, J. (2013). Colorless FDMA-PON With Flexible Bandwidth Allocation and Colorless, Low-Speed ONUs [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 5(10), A204. <https://doi.org/10.1364/JOCN.5.00A204>
- Thienthong, P., Teerasuttakorn, N., Nuanyai, K., & Chantaraskul, S. (2019). Comparative Study of Scheduling Algorithms and Almost Blank Subframe for LTE HetNets. *2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/iEECON45304.2019.8938835>
- Tuan, L. M., Son, L. H., Long, H. V., Priya, L. R., Soundar, K. R., Robinson, Y. H., & Kumar, R. (2020). ITFDS: Channel-Aware Integrated Time and Frequency-Based Downlink LTE Scheduling in MANET. *Sensors*, 20(12), 3394. <https://doi.org/10.3390/s20123394>

- Uyan, O. G., & Gungor, V. C. (2019). QoS-aware LTE-A downlink scheduling algorithm: A case study on edge users. *International Journal of Communication Systems*, 32(15), e4066. <https://doi.org/10.1002/dac.4066>
- Vedovello, L. (2024). *Looking into the Future of Wireless Communications: An Overview of the Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) Technology*. <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/75590>
- Wang, S., Chen, B., Liang, R., Liu, L., Chen, H., Gao, M., Wu, J., Ju, W., & Ho, P.-H. (2022). Energy-efficient workload allocation in edge-cloud fiber-wireless networks. *Optics Express*, 30(24), 44186. <https://doi.org/10.1364/oe.472978>
- Wijanto, E., & Huang, C.-M. (2021). Design of Bipolar Optical Code-Division Multiple-Access Techniques Using Phase Modulator for Polarization Coding in Wireless Optical Communication. *Applied Sciences*, 11(13), 5955. <https://doi.org/10.3390/app11135955>
- Zhang, H., Hu, Y., Wang, R., Li, Z., Zhang, P., & Xu, R. (2021). Energy-Efficient Frame Aggregation Scheme in IoT Over Fiber-Wireless Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(13), 10779–10791. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3051098>