



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

TÍTULO

Implementación de técnicas de adaptación y ajuste en infraestructuras
IoT para la optimización del rendimiento en redes GPON

AUTOR

Castro Ullauri, Emileni Solange

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR

Novillo Parales, Francisco Vicente

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. Francisco Novillo Parales, Ph.D.
TUTOR**

**Ing. Diego Intriago Rodríguez, MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA**

**Ing. Fernando Chamba Macas, Mgtr.
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 Emileni Solange Castro Ullauri como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

Ing. Francisco Novillo Parales, Ph.D.

Santa Elena, 23 de diciembre de 2024



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

Yo, Emileni Solange Castro Ullauri

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Implementación de técnicas de adaptación y ajuste en infraestructuras IoT para la optimización del rendimiento en redes GPON 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, 23 de diciembre de 2024

EL AUTOR

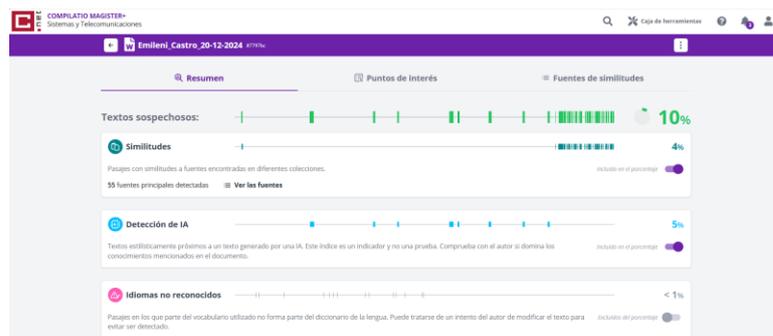
Emileni Solange Castro Ullauri



**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 Implementación de técnicas de adaptación y ajuste en infraestructuras IoT para la optimización del rendimiento en redes GPON, presentado por el estudiante, Castro Ullauri Emileni Solange fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 10%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

Ing. Francisco Novillo Parales, Ph. D.



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

AUTORIZACIÓN

Yo, EMILENI SOLANGE CASTRO ULLAURI

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 trabajo de Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo con fines de difusión pública, 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, 23 de diciembre de 2024

EL AUTOR

Emileni Solange Castro Ullauri

AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso, por su guía infinita y por darme la fuerza necesaria para superar cada desafío en este camino. “He peleado la buena batalla, he terminado la carrera, he guardado la fe.” (2 Timoteo 4:7).

A mi esposo, amigo y compañero, Diego Sánchez, por ser mi mayor apoyo en cada paso de este proceso. Tu confianza inquebrantable en mí, tu ánimo constante y tu amor me dieron el coraje para inscribirme en esta maestría y alcanzar este logro. Sin ti, este sueño no habría sido posible, te amo.

Emileni Solange Castro Ullauri

DEDICATORIA

Dedico esta maestría a mi hijo, Daniel Antonio Gutiérrez Castro, con todo mi amor y dedicación. Este logro no es solo un reflejo de mi esfuerzo, sino también un ejemplo para ti de perseverancia, disciplina y superación. Mi mayor deseo es que este camino que he recorrido te inspire a enfrentar los desafíos de la vida con valentía, a nunca rendirte ante las dificultades y a seguir creciendo como persona, no solo en conocimiento, sino también en carácter y valores. Que siempre recuerdes que, con fe, trabajo y determinación, todo es posible. Espero que sigas persiguiendo tus sueños con la misma pasión y compromiso con los que he luchado por los míos.

Emileni Solange Castro Ullauri

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO.....	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
DECLARO QUE:	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	7
1.1. Fundamentos de Redes Ópticas Pasivas Gigabit (GPON)	7
1.2. Arquitectura de Redes GPON.....	8
1.2.1. Descripción de los componentes de GPON.....	9
1.2.2. Topología y Esquemas de Distribución de la Red.....	10
1.2.3. Consideraciones de Diseño.....	12
1.3. Funcionamiento y características de la red de acceso GPON.....	13
1.3.1. Principios de Transmisión de Datos en GPON	13

1.3.2.	Capacidades de Ancho de Banda y Latencia.....	15
1.4.	Ventajas y Limitaciones de GPON	16
1.5.	Concepto y Evolución del Internet de las Cosas (IoT).....	17
1.5.1.	Historia y Desarrollo del IoT.....	17
1.5.2.	Efectos de IoT en el mundo moderno.....	21
1.5.3.	Desafíos y Direcciones Futuras	24
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....		27
2.1.	Contexto de la investigación	27
2.2.	Diseño y alcance de la investigación	27
2.3.	Tipo y métodos de investigación.....	28
2.4.	Diseño del sistema de Simulación	28
2.5.	Población y muestra.....	33
2.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	33
2.7.	Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.....	34
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		36
3.1.	Resultados obtenidos.....	36
3.1.1.	Tamaño de paquetes por dispositivo IoT.....	36
3.1.2.	Solicitud y asignación de ancho de banda para las ONUs	37
3.1.3.	Retardo por ONU.....	37
3.1.4.	Carga de red y pérdida de paquetes	38
3.1.5.	Comparar el retardo y el jitter de todas las ONUs.....	39
3.1.6.	Comparativa de la carga de red con la pérdida de paquetes	39
3.1.7.	Correlación entre ancho de banda solicitado y asignado.....	40

3.1.8. Comparar los tipos de tráfico IoT (Tiempo real vs Baja prioridad)	41
3.1.9. Comparar escenarios de demanda	41
3.2. Implementar técnicas DBA y QoS.....	42
3.2.1. Técnica de Dynamic Bandwidth Allocation (DBA).....	42
3.2.2. Simulación de escenarios de tráfico	43
3.2.3. Comparación entre baja y alta demanda:.....	45
3.2.4. Evaluar el impacto	45
3.2.5. Implementación de la métrica de latencia:	46
3.2.6. Implementación de la métrica de pérdida de paquetes:	47
3.2.7. Visualización de las métricas QoS:	47
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1: Valores de solicitud de ancho de banda, asignación inicial y ajustada.	43
Tabla 3. 2: Datos obtenidos en las ONUs de la asignación de BW en escenarios de baja y alta demanda.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. 1: Arquitectura de GPON.	8
Figura 1. 2: Esquemático de la arquitectura punto a multipunto (P2MP) en GPON.	11
Figura 1. 3: Arquitectura TDM en redes ópticas pasivas P2MP.	14
Figura 1. 4: Cronología de Internet de las cosas (IoT) en infografía (1969-2020).	18
Figura 1. 5: Áreas de aplicación importantes de IoT.	20
Figura 1. 6: Prestaciones tecnológicas de la IoT móvil en hospitales.	21
Figura 1. 7: Esquema de aplicación del sistema IoT en la producción agrícola.	22
Figura 1. 8: Aplicaciones potenciales de IoT en ciudades inteligentes	23
Figura 1. 9: Clasificación mundial de proyectos IoT entre América (EE.UU., Suramérica y Canadá), Europa y región de Asia y el Pacífico.	24

Capítulo 2

Figura 2. 1: Diagrama de las Fases del Diseño Experimental para IoT-GPON"	27
Figura 2. 1: Diagrama del modelo de IoT sobre GPON.	29
Figura 2. 2: Algoritmo para la generación de solicitudes de BW.	30
Figura 2. 3: Algoritmo para la asignación dinámica de ancho de banda (DBA).	31
Figura 2. 4: Algoritmo para calcular las métricas de QoS (latencia y pérdida de paquetes).	32
Figura 2. 5: Algoritmo para generación de gráficas y comparativas del modelo de red propuesto.	32
Figura 2. 6: Algoritmo para simulación completa de red GPON con DBA.	33

Capítulo 3

Figura 3. 1: Resultados del tamaño de paquetes por dispositivo IoT.	36
Figura 3. 2: Resultados de petición y asignación del BW para las ONUs.....	37
Figura 3. 3: Resultados de retardo experimentado en las ONUs.	38
Figura 3. 4: Resultados de la carga de red y pérdida de paquetes en las ONUs.	38
Figura 3. 5: Resultados comparativo de retardo y Jitter en las ONUs.	39
Figura 3. 6: Resultados de la comparativa entre la carga de red frente a la pérdida de paquetes.	40
Figura 3. 7: Resultados de la comparativa entre petición y asignación de BW en las ONUs.	40
Figura 3. 8: Resultados de la comparativa entre tamaños de paquetes frente al tipo de tráfico.	41
Figura 3. 9: Resultados de la comparativa entre escenarios de demanda de tráfico IoT.	42
Figura 3. 10: Resultados de la comparativa del BW en diferentes escenarios de demanda de tráfico IoT.	46
Figura 3. 11: Resultados de la latencia total por ONU.	47
Figura 3. 12: Resultados de la pérdida de paquetes por ONU.	48
Figura 3. 13: Comparativa de latencia total en escenarios de baja y alta demanda.	48
Figura 3. 14: Comparativa de latencia total en escenarios de baja y alta demanda.	49

RESUMEN

La Implementación de técnicas de adaptación y ajuste en infraestructuras IoT para la optimización del rendimiento en redes GPON se centra en mejorar la eficiencia de GPON sobre Internet de las Cosas (IoT). El objetivo fue el desarrollo de técnicas de asignación dinámica de recursos y ajuste en tiempo real para gestionar la demanda de tráfico de dispositivos IoT, con lo que se logró mejorar la calidad del servicio y la capacidad de respuesta de la red. En la metodología se propusieron algoritmos de simulación de GPON sobre IoT, en la que se analizaron las métricas obtenidas en la simulación, tales como, latencia y pérdida de paquetes en diferentes escenarios de tráfico. Estos demostraron tener una mejor gestión del tráfico y de distribución mediante la técnica DBA. En conclusión, la implementación de estas técnicas es viable y puede optimizar considerablemente el rendimiento de infraestructuras IoT en redes GPON.

Palabras claves: IoT, GPON, DBA, REDES

ABSTRACT

The Implementation of Adaptation and Tuning Techniques in IoT Infrastructures for Performance Optimization in GPON Networks focuses on improving the efficiency of GPON over the Internet of Things (IoT). The objective was to develop dynamic resource allocation and real-time tuning techniques to manage the traffic demand of IoT devices, thus improving the quality of service and network responsiveness. The methodology proposed simulation algorithms for GPON over IoT, in which the metrics obtained in the simulation, such as latency and packet loss in different traffic scenarios, were analyzed. These proved to have better traffic and distribution management using the DBA technique. In conclusion, the implementation of these techniques is feasible and can significantly optimize the performance of IoT infrastructures in GPON networks.

Keywords: IoT, GPON, DBA, NETWORKS.

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) son cada vez más numerosos y su interconexión plantea exigencias a las infraestructuras de telecomunicaciones que no tienen precedentes. Estos dispositivos, ya sean detectores sencillos o máquinas complejas, producen cantidades de datos considerables que deben transmitirse, procesarse y almacenarse de forma eficaz. En este sentido, las redes ópticas pasivas Gigabit (GPON) se presentan como la solución más adecuada para proporcionar conexiones de alta velocidad a estas aplicaciones (Horvath, Munster, Oujezsky, et al., 2020). Además, GPON es una tecnología de transmisión de datos muy utilizada en infraestructuras IoT, lo que implica desafíos técnicos en escenarios de alta densidad de dispositivos IoT y tráfico de datos dinámico.

Los avances en infraestructuras de redes de telecomunicaciones han experimentado una evolución considerable con la introducción de GPON, que promete velocidades de transmisión mucho más altas y un mayor rendimiento en comparación con las tecnologías de banda ancha clásicas, por ejemplo, ADSL y VDS (Horvath, Munster, Oujezsky, et al., 2020; Ripoll J., 2019). Sin embargo, en la actualidad GPON se destaca por la compatibilidad en la conectividad con la infraestructura del Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT). (Al-Shammari et al., 2019; Kumari, 2022).

Según Alimi et al., (2021), GPON fue creada para proveer servicios de voz, datos y vídeo a múltiples usuarios. Aunque, la integración de diferentes dispositivos disponibles en IoT sobre GPONs generan retos en la optimización del rendimiento y eficacia de esta. Por ejemplo, Isa et al., (2024) consideraron la arquitectura IoT de Fog computing (conocido como computación en la niebla, es un modelo de computación distribuida que extiende los servicios de computación, almacenamiento y aplicaciones más cerca del borde de la red) resiliente sobre GPON para aplicaciones de monitorización de la salud en (Isa et al., 2019) y (Isa, 2019).

Este trabajo aborda como principal problema la capacidad limitada de las infraestructuras GPON actuales para gestionar eficientemente el tráfico de los dispositivos IoT, lo que resulta especialmente problemático en escenarios en los que la cantidad de dispositivos

es alta y el tráfico es dinámico y variable. De hecho, aunque estas redes poseen un gran ancho de banda y una distribución de datos eficiente, no están pensadas para adaptarse al tráfico de IoT, es decir, para transmitir paquetes de datos periódicamente y establecer prioridades entre los paquetes de tráfico en tiempo real de los dispositivos IoT.

Se ha observado que, para lograr un rendimiento óptimo, las infraestructuras de IoT requieren de técnicas de adaptación y ajuste. En general, determinados sensores inalámbricos para agricultura de precisión hasta sensores inteligentes en sistemas de seguridad, requieren de una red con altas tasas de datos, y además debe ser adaptable y con capacidad de administrar altos volúmenes de datos con una baja latencia (Ahmed et al., 2023). Por ejemplo, el trabajo de Fon et al., (2022) abordaron incidencias en la latencia durante la transmisión de datos y propusieron soluciones de escalabilidad en la infraestructura de IoT, mediante el uso de algoritmos de enrutamiento y técnicas en la gestión del tráfico.

La ciudad de Guayaquil (Ecuador) es un claro ejemplo de este reto, debido a que es una ciudad que está experimentando un significativo crecimiento en la implementación de soluciones IoT basadas en aplicaciones urbanas, tales como, sistemas de monitoreo ambiental, gestión del tráfico y sistemas de seguridad. Pero, la infraestructura GPON actual de Guayaquil se enfrentaría a problemas para gestionar eficientemente el tráfico generado por miles de sensores y dispositivos inteligentes interconectados.

Este trabajo de investigación se enfoca en las limitaciones que tiene GPON en la gestión del tráfico de datos en dispositivos IoT especialmente en entornos urbanos, lo cual supone un desafío debido a la cantidad de dispositivos IoT conectados y a las variaciones que sufren por el tráfico de datos. Aunque, GPON dispone de gran ancho de banda, lo que permite la distribución de datos de manera eficiente en comparación con tecnologías ADSL o VDSL, pero, en la actualidad este tipo de redes no están disponibles en ciudades metropolitanas y si estuvieran, no están en la capacidad de gestionar dinámicamente el ancho banda para la transmisión de paquetes de datos ni adaptarse a las variaciones de tráfico en aplicaciones de IoT.

El objetivo de este trabajo es proponer técnicas de adaptación y ajuste dinámico para infraestructuras GPON que permitan un rendimiento óptimo de la red dentro de escenarios urbanos con alta densidad de dispositivos IoT.

Planteamiento de la investigación

Los sistemas de comunicaciones desarrollados en los últimos años han demostrado su capacidad para proporcionar conexiones y soluciones inteligentes basadas en las tecnologías de la información. Aunque, el crecimiento exponencial de los dispositivos IoT y el volumen de datos que generan, las redes de telecomunicaciones deben adaptarse continuamente. Para la transmisión de datos, GPON se presenta como una tecnología de gran capacidad y robustez; pero, en entornos IoT, se enfrenta a desafíos significativos debido a sus limitaciones en escalabilidad y gestión eficiente del ancho de banda (BW) y la latencia, que son requisitos para soportar múltiples dispositivos con diversos estándares de conectividad (Aruan et al., 2021; Liu et al., 2016; Pan & McElhannon, 2018).

En consecuencia, se debe destacar que sin la aplicación de técnicas de adaptación y ajuste en infraestructuras IoT, imposibilitaría que GPON aproveche al máximo el ancho de banda en la transmisión de datos, así como la gestión de la latencia. Además, si consideramos escenarios reales y dinámicos con múltiples dispositivos IoT se tendrán afectaciones en la gestión del tráfico de datos simultáneos y adaptarse a las variaciones del tráfico en tiempo real.

Para tratar esta problemática, se propone el desarrollo e integración de técnicas de adaptación (conjunto de algoritmos y mecanismos dinámicos, permitiendo ajustes en parámetros como, asignación de ancho de banda, priorización de tráfico, entre otras) y ajuste en tiempo real sobre infraestructuras IoT conectadas a redes GPON. De este modo, se conseguirá una gestión eficiente del tráfico de red y de los recursos disponibles, lo cual mejorará el rendimiento general del sistema. Entre las técnicas de adaptación y ajuste propuestas destacan la detección y selección de las técnicas más apropiadas, así como simulaciones para evaluar el rendimiento de la red.

En el presente trabajo, la simulación incluye variables como el tráfico generado por dispositivos IoT, la capacidad de BW de GPON y los patrones de congestión. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en los escenarios de IoT masivo, los desafíos más importantes no se derivan únicamente del aumento del BW o de las cargas de tráfico, puesto que los dispositivos IoT normalmente generan velocidades de transmisión de datos relativamente bajas. Las variables a medir incluyen la latencia, tasa de pérdida de paquetes, utilización del BW, y la capacidad de la red para adaptarse a variaciones en la

demanda. Actualmente, los niveles de latencia promedio en GPON en entornos IoT con una alta densidad de tráfico son de 50 a 100 ms, cifra que supera el rango aceptable en aplicaciones en tiempo real como el control de condiciones meteorológicas o sistemas de transporte inteligentes, cuya latencia debe ser menor a 20 ms.

Estos parámetros determinarán los efectos de las técnicas de adaptación y ajuste del rendimiento y de la capacidad de respuesta de GPONs, con lo que se pretende adaptarlas de manera óptima frente a las demandas tecnológicas del IoT. Por el contrario, los principales inconvenientes tienen que ver con los requisitos de conectividad masiva y la alta probabilidad de colisiones de acceso al medio como consecuencia del gran número de dispositivos que compiten por los recursos de la red (Ding et al., 2020; Shirvanimoghaddam et al., 2017).

Por ejemplo, en entornos IoT densos, en el que miles de dispositivos requieren acceso simultáneo, las prestaciones de la red pueden degradarse considerablemente si no se dispone de protocolos de control de acceso al medio (MAC) y técnicas de detección de colisiones eficaces (Bana et al., 2019). Resolver estos problemas es fundamental para que la transmisión de datos dentro de GPON-IoT resulte eficiente, sobre todo en escenarios que requieren baja latencia y alta fiabilidad (Ke et al., 2021).

Formulación del problema de investigación

En esta investigación el problema principal es la ausencia de técnicas de adaptación y ajuste que permitan mejorar el rendimiento de las redes GPON en infraestructuras IoT. Por ejemplo, las mejoras se centran en reducir latencia, la pérdida de paquetes, el aprovechamiento del ancho de banda y mejorar la capacidad de la red para adaptarse dinámicamente a las variaciones en la demanda de tráfico de datos., GPON representa una solución para la transmisión de datos debido a su gran capacidad de ancho de banda, pero tiene limitaciones cuando se despliega en entornos IoT. Por otro lado, GPON ofrece una gran capacidad de BW para la transmisión de datos, aunque presenta limitaciones cuando se implementa en entornos IoT. Además, la gestión eficiente de los recursos, por ejemplo, el BW y la latencia, son factores que inciden negativamente en la escalabilidad de la red y en su capacidad para gestionar numerosos dispositivos conectados con diferentes requisitos de conectividad.

Las infraestructuras GPON en entornos IoT, están caracterizadas por una demanda de tráfico de datos y una alta densidad de dispositivos, presentan retos debidos a la ausencia de mecanismos de adaptación que respondan dinámicamente a las variaciones de la red. Por ejemplo, en escenarios urbanos de Smart City, sistemas de transportes inteligentes en el que se utiliza a VANETs (generan datos masivos en tiempo real, tales como, información de tráfico, condiciones climáticas, ubicación GPS, etc.), o en redes de monitoreo medioambiental. De este modo, GPON no aprovechan todo su potencial, lo que genera un rendimiento deficiente afectando no solo a la transmisión de datos eficiente, sino también a la capacidad de la red y de adaptación a los cambios producidos en condiciones de funcionamiento.

Objetivo General:

Realizar el diseño e implementación de algoritmos para mejorar el rendimiento de una GPON basada en infraestructura IoT, para minimizar el retardo en un 20%, así como gestionar la ocupación de la asignación del ancho de banda en un 15% e incrementar el porcentaje de entrega de paquetes en un 10% durante 1 año. Todo esto se logrará mediante el uso de técnicas de ajuste dinámico de recursos que respondan a las variaciones de tráfico de datos y la demanda en escenarios de simulación de alta densidad de dispositivos.

Objetivos Específicos:

1. Elaborar la descripción del marco referencial de las redes de acceso óptico y del Internet de la Cosas (IoT) a través de una revisión del estado del arte.
2. Implementar algoritmos de técnicas de adaptación y ajuste en tiempo real para la red GPON simulada y controlada.
3. Recolectar parámetros de rendimiento utilizando herramientas de análisis de datos para el monitoreo y ajuste de la gestión del tráfico.
4. Evaluar el impacto de las técnicas en la capacidad de respuesta y la eficiencia de la red mediante pruebas de campo y simulaciones detalladas, lo cual permitirá

cuantificar las mejoras obtenidas y la viabilidad de su implementación en entornos reales.

Planteamiento hipotético

Mediante la adopción de técnicas de adaptación y ajuste en tiempo real en infraestructuras IoT se podrá mejorar de manera significativa el rendimiento de GPON. Esto se logrará con un planteamiento integrador basado en la capacidad de la red para adaptarse dinámicamente a los cambios en la intensidad del tráfico. Con la aplicación de técnicas como la asignación dinámica de recursos y el ajuste automático de los parámetros de red, se conseguirá que la arquitectura IoT gestione de manera eficiente el tráfico y que la utilización del ancho de banda sea óptima. Resulta primordial gestionar el tráfico de datos, porque los dispositivos IoT producen paquetes de datos de naturaleza diversa o variable, ya sean actualizaciones periódicas de baja o alta prioridad de datos en tiempo real.

Sin una adecuada gestión del tráfico de datos, GPON puede afrontar congestiones, pérdidas de paquetes, picos de latencia lo que provocaría afectaciones en la calidad del servicio (QoS). Como resultado, la red GPON será más robusta y eficiente, capaz de mantener un rendimiento óptimo y de responder adecuadamente a las demandas cambiantes (fluctuaciones del tráfico de datos) que son generados por dispositivos IoT conectados.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Fundamentos de Redes Ópticas Pasivas Gigabit (GPON)

La tecnología GPON de acceso a la red ha experimentado un gran avance, ya que permite transmitir datos a altas velocidades (Hamza et al., 2021) y maximizar el rendimiento del ancho de banda (Abbas & Gregory, 2016). Este tipo de redes tiene una arquitectura punto a multipunto, mediante la cual una sola fibra óptica permite transmitir datos a múltiples abonados a través de splitters ópticos pasivos (Saiyyed et al., 2023). Esta arquitectura facilita a los proveedores de servicios de Internet (ISP) proporcionar enlaces de banda ancha a un gran número de abonados evitando el tendido de varias líneas de fibra óptica en cada casa o negocio.

La arquitectura típica de GPON está integrada por varios componentes principales. Por un lado, en la estación central del operador, se encuentra el terminal de línea óptica (OLT), considerado como la principal interfaz de la red troncal del ISP. Las señales ópticas se transmiten desde la OLT hacia un divisor óptico pasivo mediante una fibra óptica de distribución, y éste divide la señal en varios enlaces que transportan la señal a los terminales de red óptica (ONT) que se encuentran en las instalaciones de los abonados (Horvath et al., 2018; Horvath, Munster, & Bao, 2020). Este eficaz método de distribución permite reducir significativamente los costes de despliegue y mantenimiento, ya la cantidad de equipos activos necesarios es mínima.

La tecnología utilizada en GPON está basada en la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y la división de acceso múltiple en el tiempo (TDMA). (Abbas & Gregory, 2016; Abdellaoui et al., 2021). En la transmisión descendente (desde la OLT a las ONT), se utiliza una longitud de onda de 1490 nm y es enviada a todas las ONT. Ahora bien, cada ONT se encarga únicamente del procesamiento de la información destinada específicamente a él. Por su parte, la transmisión ascendente (desde las ONT a la OLT) utiliza una longitud de onda de 1310 nm mediante TDMA (Lam et al., 2022), en la que cada ONT envía datos en ranuras de tiempo específicas con el objetivo de evitar colisiones de datos.

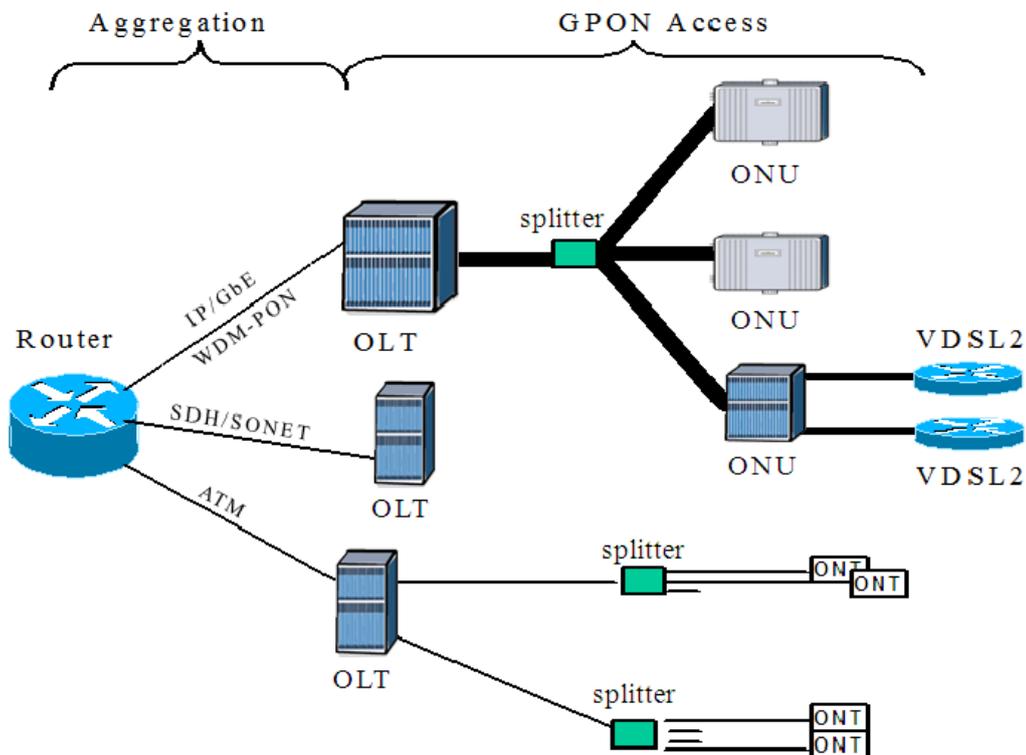
Además, GPON proporciona importantes beneficios, tales como un gran ancho de banda, con velocidades descendentes de hasta 2.5 Gbps y ascendentes de hasta 1.25 Gbps

(Abdellaoui et al., 2021; Saiyyed et al., 2023). Esta característica las hace ideales para aplicaciones que requieren gran cantidad de datos, tales como streaming de vídeo HD (Andruloniw et al., 2023; Memon et al., 2019) y aplicaciones cloud (Horvath, Munster, Oujezsky, et al., 2020). Por otra parte, la arquitectura pasiva minimiza los requisitos operativos y de mantenimiento. No obstante, estas redes se enfrentan a ciertas limitaciones, entre ellas los altos costos de instalación y un alcance máximo de transmisión de 20 km sin capacidad de recuperación de la señal, por lo que su despliegue puede verse limitado en zonas rurales aisladas. Y, por último, la compartición del ancho de banda entre los abonados puede disminuir el rendimiento en los horarios de máxima demanda.

1.2. Arquitectura de Redes GPON.

La arquitectura de GPON (véase la Figura 1.1) fue diseñada para brindar servicios de BW de alta velocidad utilizando componentes ópticos pasivos (Butt et al., 2022), así como métodos de transmisión de señales eficientes (Ricciardi et al., 2012).

Figura 1. 1: Arquitectura de GPON.



Fuente: (Ricciardi et al., 2012)

Además, esta arquitectura según Manchay et al., (2024) puede conectar a varias ONUs (usuarios o clientes) mediante componentes activos mínimos, con lo que reducen costes de mantenimiento. En las siguientes subsecciones se describen estos componentes y las topologías de GPON.

1.2.1. Descripción de los componentes de GPON

1. OLT: este componente es el más importante en una GPON y está ubicado en la central telefónica del prestador de servicios (Horvath, Munster, & Bao, 2020). La OLT sirve de interfaz entre GPON y la infraestructura del core network, entre las que se incluyen Internet y otros tipos de redes privadas. Sus principales características son:
 - Multiplexado de Señales: para la transmisión de datos mediante GPON, la OLT se encarga de combinar múltiples flujos de datos provenientes de la central y se los multiplexa en una única señal óptica. (Abbas & Gregory, 2016)
 - Gestión de la Red: su función es gestionar la operación de la red GPON controlando las programaciones de transmisión de datos y gestionando la asignación de ancho de banda para cada ONT/ONU. (Saiyyed et al., 2023)
 - Provisionamiento de Servicios: OLT permite la prestación de varios servicios, por ejemplo, la conexión a Internet, servicios de voz y streaming de vídeo (Paradisi et al., 2019), mediante la dirección y gestión del flujo de datos. (Saiyyed et al., 2023)
2. ONT: es aquel dispositivo que se encuentra instalada en la residencia del usuario, y a su vez actúa como una interface de comunicación entre la red de acceso óptico y las ONTs (Neeraj et al., 2019). La función principal de una ONT, es la de convertir señales ópticas desde la OLT en señales eléctricas (Fon et al., 2022) para ser interconectadas con dispositivos electrónicos, tales como computadoras, TV y teléfonos. A continuación, se describen sus principales características:
 - Demultiplexado de Señales: la ONT se encarga de separar la señales ópticas recibidas del OLT para obtener los datos enviados al abonado correspondiente. (Manchay et al., 2024)

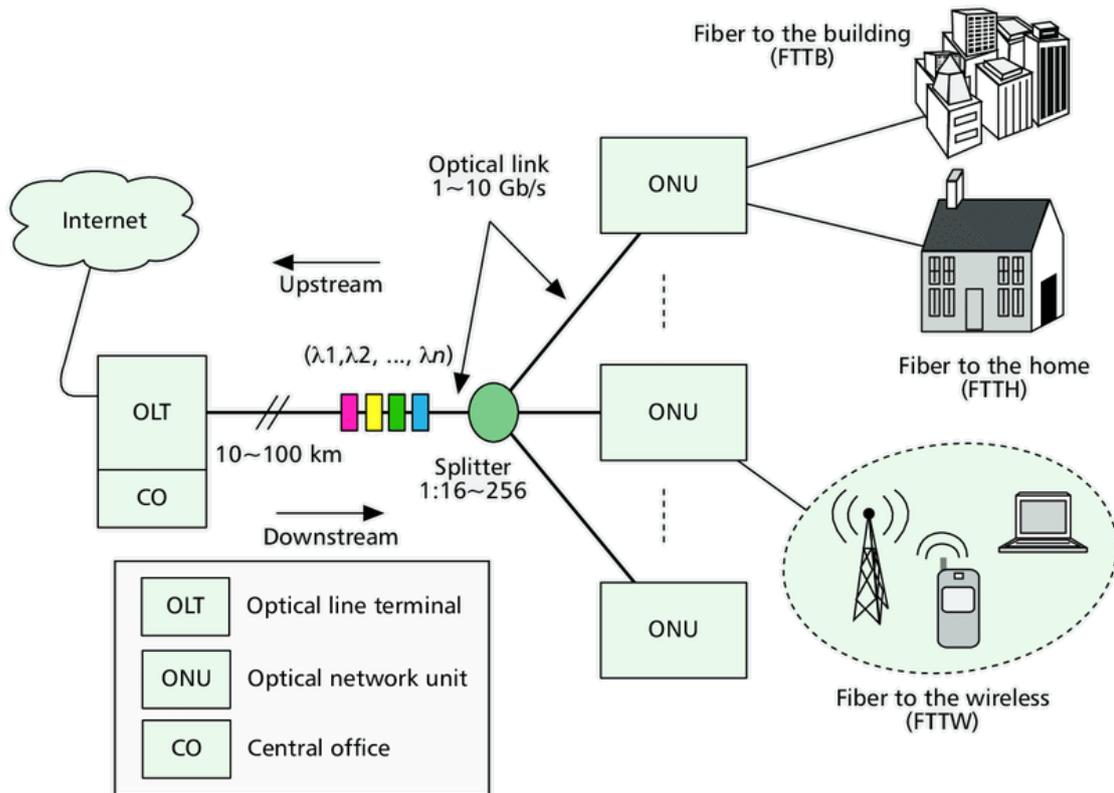
- Conversión de Datos: permite que las señales ópticas se conviertan en señales eléctricas y viceversa (Luna-Rivera et al., 2024), garantizando la interoperabilidad con los equipos electrónicos del abonado.
 - Interfaz de Red Local: para conectar los dispositivos del abonado, la ONT dispone de varias interfaces, por ejemplo, puertos Ethernet para computadoras, puertos para servicios de voz e interfaces de vídeo para la TV.
3. Divisor Óptico: los splitters han sido diseñados para la división de señales ópticas múltiples en redes GPON. Este componente tiene una arquitectura P2MP de GPON para que una única fibra de la OLT pueda ser distribuida entre varias ONTs. Las principales características son:
- Modo de Servicio Pasivo: son componentes pasivos que funcionan sin necesidad de suministro eléctrico externo, por lo que resultan rentables y confiables en GPON.
 - Proporciones de División: hay varios tipos de relaciones de división a elegir (por ejemplo, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32), factor que determina el número de abonados que puede satisfacer una sola fibra.
 - Pérdida de Inserción: un divisor óptico es capaz de funcionar con una pérdida de inserción, que se refiere a la cantidad de atenuación de la señal que se produce durante el proceso de división. Cuanto menor sea la pérdida de inserción, mejor será el rendimiento de la red.
4. Fibra de red troncal: es aquella fibra óptica que transporta datos desde la OLT (en la CO) hasta el splitter (divisor óptico), y posteriormente se distribuye la señal a múltiples fibras de distribución.
5. Fibra de Distribución o derivación: es aquella fibra que distribuye las señales ópticas divididas en el splitter óptico hacia las ONTs instaladas en los usuarios. Este tipo de distribución depende de la arquitectura y requisitos de implementación de GPON, por ejemplo, distancia entre el splitter y las ONTs.

1.2.2. Topología y Esquemas de Distribución de la Red

Las redes GPON emplean una topología en árbol que distribuye eficientemente las señales ópticas desde la oficina central a múltiples usuarios finales. A continuación, se describen los componentes que emplea la topología en árbol:

1. Enlaces Punto-a-Multipunto: GPON emplea una arquitectura punto a multipunto (P2MP) en la que a través de una fibra óptica desde la OLT se divide en varias fibras mediante splitters ópticos (elemento pasivo). Es decir, que esta arquitectura emplea una OLT para proveer servicios de telecomunicaciones a múltiples usuarios finales, siendo solución rentable para la implementación de infraestructuras de conectividad de banda ancha.

Figura 1. 2: Esquemático de la arquitectura punto a multipunto (P2MP) en GPON.



Fuente: (Dhaini et al., 2011)

2. Segmento de alimentación: en infraestructura GPON la fibra óptica se extiende desde la OLT hacia el splitter óptico. Por lo general, se emplea fibra monomodo (SMF) de alta capacidad para transportar datos desde la CO hasta los splitters.
3. Segmento del splitter óptico: el segmento del divisor incluye el divisor óptico y las fibras de distribución asociadas. El divisor divide la señal de la fibra de alimentación en múltiples caminos, dirigiendo las señales a las fibras de distribución. Este segmento es responsable de distribuir la señal óptica a múltiples ONTs.

4. Segmento de distribución: como ya se había explicado esta se encarga de distribuir las fibras ópticas desde el splitter hacia las ONTs. En general, esta fase de distribución permite satisfacer los requisitos de alcance de GPON, con lo que se garantiza que las ONTs reciban la información adecuada.
5. Segmento de última milla: El segmento de caída incluye la porción final de la red óptica que conecta la fibra de distribución con el ONT en las instalaciones del usuario. Este segmento generalmente consta del cable de fibra óptica y cualquier conector y empalme necesario.

1.2.3. Consideraciones de Diseño

Para el diseño adecuado de una GPON es necesario considerar los siguientes factores:

1. Distancia del enlace óptico: este resulta ser el factor principal de separación entre la distancia de la OLT y ONTs al momento de realizar el diseño de GPON. Este tipo de red tienen un alcance máximo de 20 km desde la OLT hacia las ONTs por lo que no se requiere la regeneración de la señal óptica. Sin embargo, no se puede excluir otros factores que inciden en el rendimiento de la red, tales como, atenuación en la fibra y las pérdidas debido a otros factores propios de un enlace óptico, para que la transmisión sea eficiente.
2. Ocupación del ancho de banda (BW): en el diseño de GPONs se debe considerar la ocupación del BW, debido a que esta red gestiona la distribución de esta entre diferentes ONUs. Además, si en el diseño se considera el uso de splitters, se debe considerar la cantidad de usuarios interconectados en cada splitter, y además cuáles serán sus requerimientos.
3. Escalabilidad: en todo diseño de red hay que considerar la escalabilidad de esta. Por ejemplo, en GPON el propósito es que sea escalable para futuras expansiones de la red. Es decir, que se debe considerar los suficientes splitters y derivaciones de fibra para incorporar a la red nuevas ONUs.
4. Costo y Mantenimiento: como ya se conoce GPON tiene componentes pasivos, tales como, splitters con lo cual se reduce la necesidad de equipos activos y disminuye los costos de mantenimiento. Sin embargo, el costo inicial de

implementación, incluida la instalación de fibra y la adquisición de componentes, debe ser evaluado cuidadosamente.

5. Factores ambientales: las condiciones ambientales, como temperatura y humedad, pueden impactar el rendimiento de los componentes ópticos deben ser considerados al momento de diseñar la red GPON con la finalidad de tener un funcionamiento adecuado bajo diferentes condiciones ambientales.

En resumen, GPON combina diferentes dispositivos ópticos pasivos para lo cual el diseño debe estar orientado a tener una topología P2MP que permita ofrecer servicios de banda ancha y conectividad actual y futura.

1.3. Funcionamiento y características de la red de acceso GPON

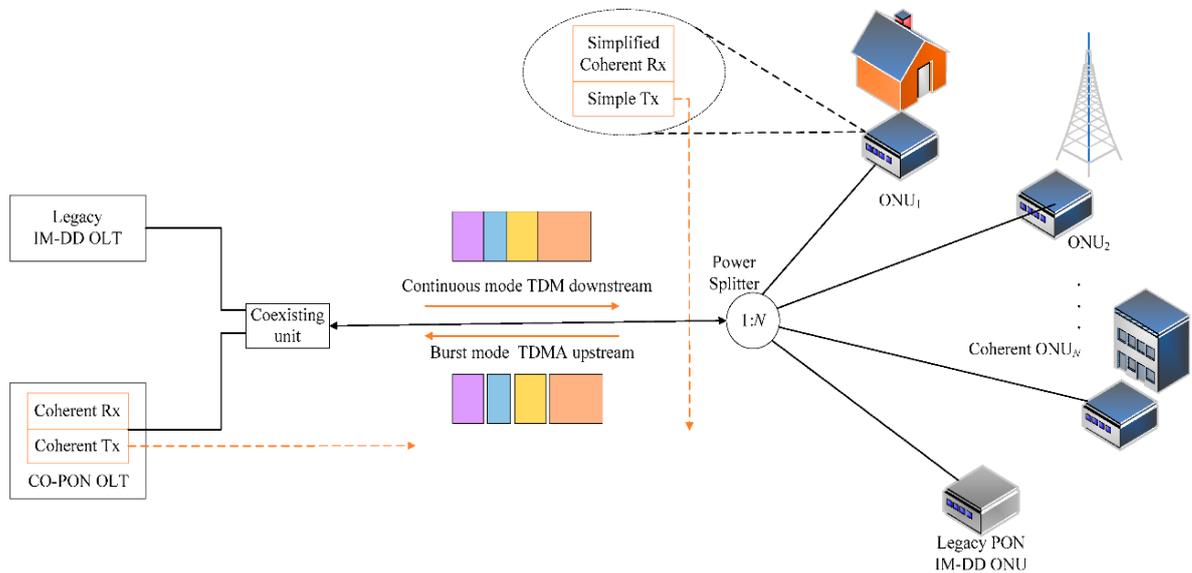
La tecnología GPON es la norma ITU-T G984.1 aprobada por la UIT. El uso de la norma garantiza una capacidad suficiente para los servicios de uso común actuales, al tiempo que proporciona un margen adecuado también para servicios futuros. La norma GPON se basa en las normas APON y BPON publicadas anteriormente, pero utiliza un modelo de capas ligeramente modificado que evita la retrocompatibilidad. El procesamiento de tramas se basa en la división temporal. GPON es esencial para dar soporte a todos los servicios conocidos actualmente y a los servicios innovadores que se están debatiendo para clientes empresariales y abonados residenciales gracias a la capacidad de banda ancha.

1.3.1. Principios de Transmisión de Datos en GPON

En la Figura 1.2 se muestra la arquitectura P2MP en la que una sola fibra óptica se despliega la OLT hacia los splitters mediante la tecnología TDM. Por ejemplo, las tramas GPON no se fijan por tamaño de bit, sino con un intervalo de tiempo de 125 μ s. El número de bits de una trama depende de la velocidad de transmisión de la red. En GPON se definen dos velocidades de transmisión de 1.244 y 2.488 Gbps. La norma también define la comunicación bidireccional como full-dúplex, pero la forma de comunicación ascendente y descendente es diferente; sin embargo, las unidades de datos individuales siempre se transmiten en tramas encapsuladas con el método de encapsulación GPON (GEM). El tamaño de las tramas GEM no es fijo, ya que cada trama GEM consta de una

cabecera de trama de 5 bytes y datos transmitidos (0-4095 bytes). Si los datos del usuario superan el tamaño máximo de la trama, se fragmentan en varias tramas.

Figura 1. 3: Arquitectura TDM en redes ópticas pasivas P2MP.



Fuente: (Feng et al., 2023)

La gestión del control de acceso al medio en GPON depende de la OLT, la cual distribuye dinámicamente las bandas horarias para la transmisión de datos ascendente. La distribución está basada en las peticiones de las ONT y en la calidad del servicio (QoS) establecida por el proveedor. Así, mediante el mecanismo de control de acceso, todas las ONT reciben el ancho de banda requerido en función de sus aplicaciones, con lo que se mejora el rendimiento del canal y se reduce la latencia.

Además, la gestión de GPON se realiza mediante el empleo de los protocolos de gestión como OMCI (ONT Management and Control Interface), el cual permite configurar y supervisar de manera remota los ONTs. También, GPON garantiza seguridad a través de cifrado y autenticación a la misma, es decir, que la transmisión de datos entre la OLT y ONTs son cifrados mediante la aplicación de algoritmos, como AES (Advanced Encryption Standard), lo que permite proteger la privacidad de la comunicación. Finalmente, las ONTs son autenticadas por la OLT antes de que puedan acceder a la red, con el propósito de que solo dispositivos autorizados transmitan y reciban datos.

1.3.2. Capacidades de Ancho de Banda y Latencia

Como ya se ha mencionado GPON proporciona ancho de banda tanto para transmisiones downstream como upstream, de 2.488 Gbps y 1.244 Gbps, respectivamente. Además, permite aplicaciones, tales como, internet de alta velocidad, telefonía de voz sobre IP (VoIP), Televisión sobre IP (IPTV), videoconferencia, backhaul en telefonía móvil, servicios en la nube, monitoreo de circuito cerrado de TV (CCTV), IoT en otras aplicaciones en la nube.

La latencia en GPON se considera generalmente baja, lo que les permite tener aplicaciones, tales como, servicios de voz y vídeo en tiempo real. Además, la latencia en GPON depende de la distancia existente entre la OLT y las ONTs, la configuración y la carga de tráfico en la misma. En situaciones reales, la latencia en enlaces de GPON se da en unos pocos milisegundos. Los factores que influyen sobre la latencia son:

1. Distancia entre OLT y ONT: la latencia es aquella que se da por el tiempo que tarda la señal en viajar a través de la fibra óptica. Aunque la velocidad con la que se propaga los datos en la fibra óptica es alta, en enlaces mayores a los 20 km se incrementa significativamente la latencia.
2. Configuración de la Red: en el diseño de los componentes de GPON se debe configurar adecuadamente, por ejemplo, la conectividad entre las cantidades de splitters y ONTs puede influir en la latencia. Es decir, que a mayor cantidad de splitters ópticos se incrementa significativamente la latencia.
3. Carga de Tráfico: la latencia también es afectada por la pérdida que existe en la red. En condiciones de tráfico, el control de acceso al medio y la gestión del ancho de banda puede provocar en el usuario pequeñas latencias.

Por lo tanto, en GPON es importante la implementación de estrategias y políticas que permitan lograr optimizar la ocupación del ancho de banda y latencia, tales como:

1. Políticas de aseguramiento de QoS: ayuda a dar una preferencia a las aplicaciones de mayor tiempo crítico, garantizando que el resto de las aplicaciones no sean severamente interferidas, permitiendo el uso de un nivel de ancho de banda destinado específicamente para esas aplicaciones.
2. Asignación Dinámica del Ancho de Banda (DBA): permite que la OLT ajuste de manera dinámica las ranuras de tiempo asignadas a cada ONT en el enlace

ascendente. Este mecanismo asegura que las ONTs dispongan del BW necesario en función de la demanda, logrando optimizar el uso de sus recursos y disminuyendo la latencia.

3. Análisis de control y rendimiento: la implementación de herramientas para el monitoreo y análisis del rendimiento brinda a los proveedores de servicios la capacidad de supervisar constantemente el estado de la red. Esto les permite realizar ajustes inmediatos que garanticen un buen rendimiento de la red.

La comprensión de los principios de transmisión de datos y las capacidades de ancho de banda y latencia es esencial para aprovechar al máximo los beneficios de las GPONs y asegurar una implementación exitosa en diversos entornos.

1.4. Ventajas y Limitaciones de GPON

La luz de una fuente láser puede recorrer mayor distancia en el cable de fibra óptica que una señal electrónica en una línea de cobre con menor atenuación y su red de distribución puede estar formada por elementos pasivos, mientras que las redes de cobre deben incluir siempre elementos activos.

A continuación, se enumeran las ventajas de GPON;

1. Aunque los armarios deben utilizarse en entornos exteriores difíciles para las redes de cobre, no hay dispositivos optoelectrónicos y electrónicos, que son necesarios para ser desplegados en un armario exterior.
2. No hay electricidad ni fuentes de alimentación de reserva sobre el terreno.
3. No hay peligros basados en las fuentes de alimentación.
4. No hay ruido externo originado por las fuentes de alimentación.
5. No hay interferencias electromagnéticas (EMI) ni compatibilidad electromagnética (EMC).
6. No hay necesidad de dispositivos de control ambiental.
7. No hay gastos de explotación (OPEX), como costes de electricidad o servicios públicos.
8. No hay convertidores activos optoelectrónicos (OEAC) alimentados que contribuyan a aumentar la tasa de fallos.

9. Las aplicaciones futuras que requieran un gran ancho de banda serán fáciles gracias a la sencillez de los componentes actualizables.

Debido a estas ventajas, GPON es la arquitectura más popular entre las demás. Por ejemplo, la capacidad de transportar señales a mayor distancia implica menos equipos, como repetidores. Menos equipamiento significa menos puntos de fallo en la red y menos puntos de fallo conducen a una mejora de la fiabilidad de la red y de la calidad de los servicios. Además de estas ventajas, GPON también tiene algunas desventajas: los divisores ópticos tienen pérdidas ópticas que limitan el alcance de GPON y, si uno de los cables de fibra óptica situados entre la OLT y el divisor óptico se rompe, más de un abonado se quedará sin servicio.

1.5. Concepto y Evolución del Internet de las Cosas (IoT)

1.5.1. Historia y Desarrollo del IoT

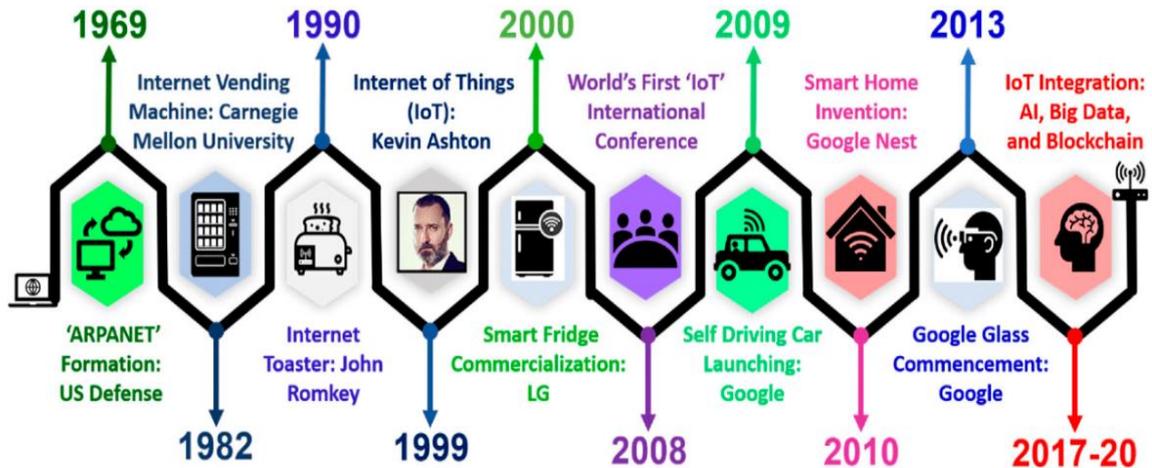
La evolución de Internet en general, y de la Web en particular, no ha cesado: de la Web de la información a la Web de los objetos personalizados, pasando por diversos objetos conectados gracias a la miniaturización y al desarrollo tecnológico, lo que permite una doble vertiente: estar permanentemente conectado y comunicarse sin limitaciones de espacio y tiempo para responder a las exigencias y necesidades de los usuarios en materia de servicios, comunicación e información. (Mishu et al., 2020)

Internet se ha convertido gradualmente en una hiperred, una red formada por multitud de conexiones entre artefactos (físicos, documentales), actores (biológicos, algorítmicos), escritos y conceptos (datos enlazados, metadatos, ontologías), conocida como “Internet de las Cosa (IoT)”, que de acuerdo con Lombardi et al., (2021) conecta a miles de millones de seres humanos, así como a miles de millones de objetos.

Según Chataut et al., (2023) la tecnología del IoT se está convirtiendo en la herramienta más poderosa jamás inventada por el hombre para crear, modificar y compartir información. De acuerdo con R. Kumar et al., (2022) IoT ha evolucionado significativamente desde sus primeras concepciones, por ejemplo, la historia de IoT se data entre 1969 y 1990 (Mishu et al., 2020), época en que empezaba a investigarse el modo en que los dispositivos se comunicaban entre sí a través de las redes. En la Figura

1.4 se observa cronológicamente la evolución de IoT desde 1969 hasta 2020. A continuación, se explica cada uno de ellos:

Figura 1. 4: Cronología de Internet de las cosas (IoT) en infografía (1969-2020).



Fuente: (Mishu et al., 2020)

- ✚ 1969: El Departamento de Defensa de EE.UU. creó ARPANET, considerada por muchos como precursora del internet actual. (Mishu et al., 2020; Shirvani M., 2024)
- ✚ 1982: se crea en la Universidad Carnegie Mellon el primer “Internet Vending Machine”, convirtiéndose en uno de los primeros ejemplos de dispositivos conectados. (Korte et al., 2021; Mishu et al., 2020)
- ✚ 1990: John Romkey inventó la Internet Toaster, considerado uno de los primeros dispositivos IoT, porque permitía controlar una tostadora a través de Internet. (Jesus et al., 2018; Korte et al., 2021; Mishu et al., 2020)
- ✚ 1999: El término IoT, surgió de la idea de Kevin Ashton de dispositivos interconectados. (Korte et al., 2021; Ng et al., 2018)
- ✚ 2000: La empresa LG comercializó la primera Smart Fridge (nevera inteligente), y con ella se introdujo IoT en los aparatos domésticos de uso cotidiano. (Ghasempour, 2019; Mishu et al., 2020)
- ✚ 2008: Tiene lugar la primera Conferencia Internacional «IoT» del mundo, que puso de manifiesto el creciente interés y desarrollo de la tecnología IoT. (Mishu et al., 2020)

- ✚ 2009: Lanzamiento del primer automóvil autónomo de Google, que supuso un paso significativo en las aplicaciones de IoT en el transporte. (Yu & Marinov, 2020)
- ✚ 2010: Fue presentado por Google un ingenioso dispositivo para casas inteligentes, denominado Google Nest, que integró el IoT en la automatización del hogar. (Mishu et al., 2020)
- ✚ 2013: Se inicia la fase de desarrollo de Google Glass, una herramienta de realidad aumentada destinada a ampliar las aplicaciones de IoT. (Martinez-Millana et al., 2016)
- ✚ 2017-2020: IoT empezaba a integrarse con las tecnologías de Inteligencia Artificial (Shkalenko & Nazarenko, 2024), Big Data (Nofel et al., 2024) y Blockchain (Bhumichai et al., 2024), y marcaba el inicio del desarrollo de una nueva era del IoT.

El “Internet de los objetos” o el “Internet de todo” (Langley et al., 2021) ... No faltan expresiones para describir el fenómeno. La más común de ellas, Internet de las cosas (IoT), se ha colado en el vocabulario mundial. Se refiere a la conexión en red, a través de Internet, de objetos físicos como una bombilla eléctrica, una pulsera, un cepillo de dientes, un marcapasos, una muñeca, un termostato, un pluviómetro, un detector de CO₂, una cámara, una bicicleta, un coche, una prenda de vestir, etc.

En la Figura 1.5 se ilustran las múltiples aplicaciones del IoT en diferentes áreas en las que IoT está teniendo un impacto significativo, tales como:

- ✚ Sistemas de transporte inteligentes: donde se destaca la importancia de IoT como herramienta de automatización, transmisión de datos en tiempo real (Almutairi et al., 2024) y mejor conectividad en los sistemas de transporte.
- ✚ Analítica: el IoT contribuye significativamente la recopilación y análisis de datos, facilitando que las empresas formen parte negocios tomen decisiones basadas en información en tiempo real
- ✚ Smart Cities (Ciudades inteligentes): la aplicación del IoT en entornos urbanos mejora la gestión de infraestructuras, servicios y planificación, promoviendo ciudades más eficientes, sostenibles y habitables.
- ✚ Seguridad: integración del IoT en dispositivos electrónicos para optimizar la vigilancia, reforzar la seguridad y mejorar los controles de acceso.

- ✚ Servicios a bordo: despliegue de las aplicaciones de IoT en la industria de la aviación destinadas a satisfacer las necesidades de atención y control de los pasajeros mediante datos y conectividad en tiempo real.
- ✚ Control energético: IoT permite mejorar la eficiencia energética, reduciendo el consumo de energía y los costes, además de gestionar eficazmente recursos energéticos en diferentes áreas industriales.
- ✚ Salud: la IoT está teniendo un impacto significativo en la atención médica a los pacientes mediante dispositivos móviles, supervisión remota y una mejor asistencia médica.
- ✚ Tecnología wearable: la IoT se está extendiendo rápidamente en los dispositivos personales que permiten supervisar indicadores de salud, estado físico y otros parámetros vitales, además de vincular a un mayor número de usuarios a ecosistemas médicos más amplios.

Figura 1. 5: Áreas de aplicación importantes de IoT.



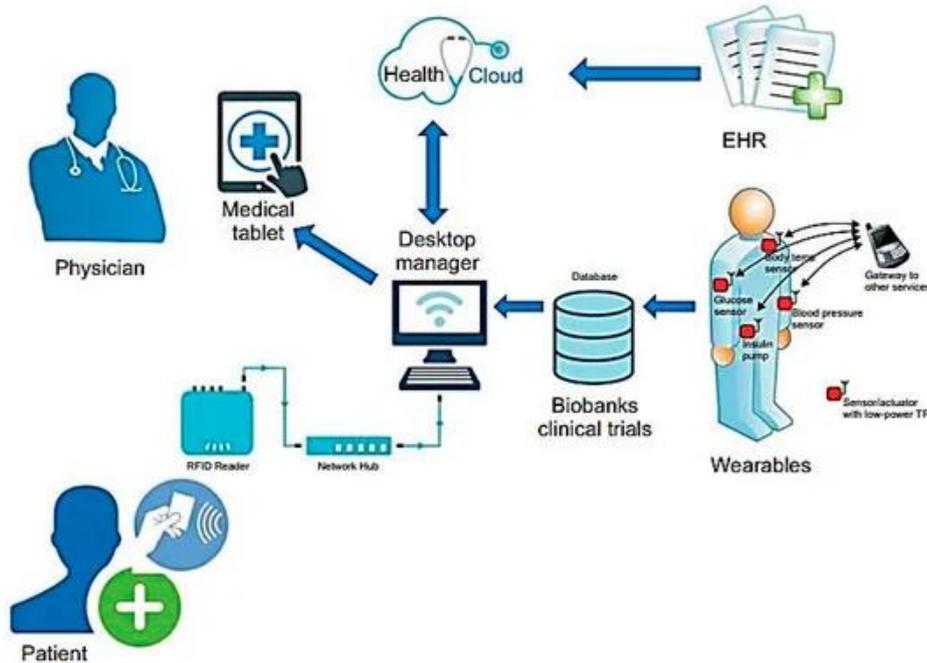
Fuente: (Krishna et al., 2021)

1.5.2. Efectos de IoT en el mundo moderno

Los efectos del Internet de las Cosas (IoT) con la sociedad moderna se han mostrado muy significativos y heterogéneos (Khan et al., 2022). A continuación, se han descrito los efectos de IoT en la sociedad moderna:

1. Salud: en el ámbito de la atención médica, IoT según con M. Kumar et al., (2023) se ha convertido en un instrumento de monitorización remota de los dispositivos que recopilan datos en tiempo real de los signos vitales y del estado de salud (véase la Figura 1.6), permitiendo así gestionar más adecuadamente enfermedades crónicas y garantizar una asistencia personalizada. Además, permiten a los profesionales de la medicina reaccionar con mayor rapidez e intervenir en menos tiempo, mejorando notablemente los pronósticos de los pacientes.

Figura 1. 6: Prestaciones tecnológicas de la IoT móvil en hospitales.

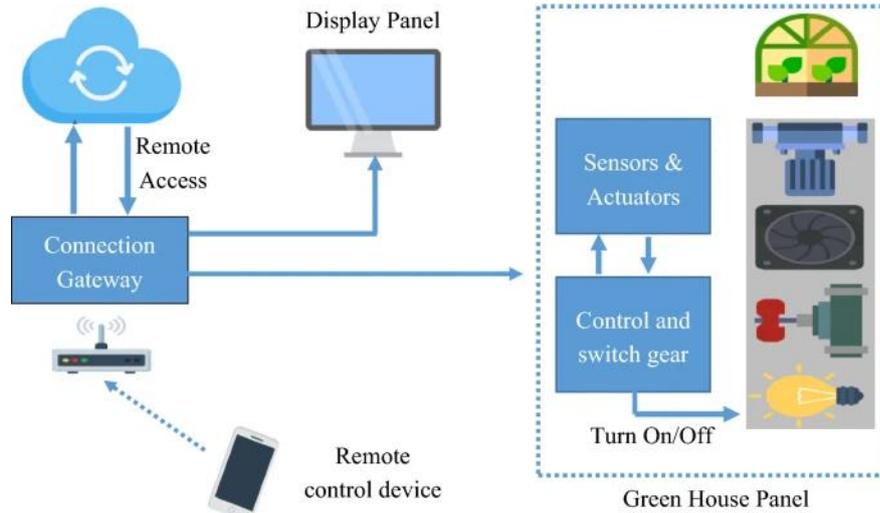


Fuente: (M. Kumar et al., 2023)

2. Agricultura: Con el avance del IoT, los dispositivos y sensores inteligentes facilitan el control del clima dentro de la cámara y la supervisión del proceso, lo que se traduce en un ahorro de energía y una mejora de la producción (ver la Figura 1.7). La automatización de las industrias es otra ventaja de IoT. Además, IoT proporciona soluciones revolucionarias para la digitalización de fábricas, la gestión de inventarios, el control de calidad, la logística y la optimización y

gestión de la cadena de suministro. Por otra parte, la tecnología de la información ha transformado la gestión de los cultivos y los recursos en la agricultura. Así, por ejemplo, los sensores IoT son capaces de obtener datos sobre las condiciones del terreno, de la humedad y de las condiciones meteorológicas, y esto ayuda a que los agricultores y ganaderos adopten medidas sobre irrigación, fertilización y control de plagas basadas en la información disponible.

Figura 1. 7: Esquema de aplicación del sistema IoT en la producción agrícola.



Fuente: (S. Kumar et al., 2019)

De esta manera las actividades agrícolas no sólo resultan más eficientes, con lo que se reduce el consumo desproporcionado de recursos, favoreciendo así la agricultura sostenible. Para optimizar los recursos, es posible que la agricultura de precisión incluya ecuaciones. Los requisitos hídricos (W_R) para un cultivo determinado pueden calcularse, por ejemplo, aplicando la siguiente expresión:

$$W_R = E_{T_C} \times K_C$$

donde, E_{T_C} es la evaporación del cultivo y K_C es el coeficiente de riego.

3. Industria: en efecto, la tecnología de los dispositivos inteligentes y la analítica de datos permiten controlar continuamente las máquinas, así como optimizar la producción y garantizar un mantenimiento predictivo. De esta manera se consigue una mayor productividad y disminución de gastos de producción, pero además se logra una mejor adaptabilidad y flexibilidad en la producción. Así, por ejemplo, los sistemas de mantenimiento predictivo se aplican en las fábricas inteligentes.

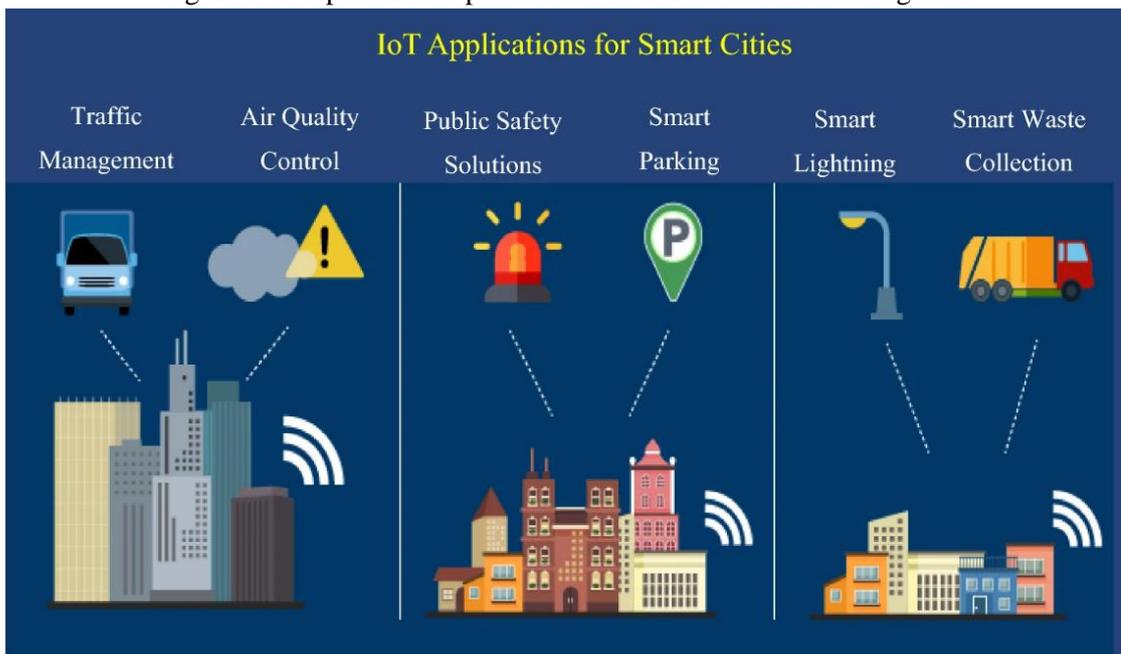
La estimación de la vida útil restante (Remaining Useful Life, RUL) de un equipo se obtiene, por ejemplo, a partir de:

$$RUL = \frac{1}{\lambda}$$

donde, λ es la tasa de fallos.

4. Ciudades inteligentes: con IoT las ciudades inteligentes se han convertido en un sector con aplicaciones en la gestión del tráfico, el alumbrado público y la vigilancia del medio ambiente (S. Kumar et al., 2019), tal como se muestra en la Figura 1.8. De este modo, se puede optimizar el tráfico, minimizar el consumo de energía y mejorar la calidad del aire. Esto no sólo mejora la calidad de vida en las ciudades, sino que también contribuye a la sostenibilidad medioambiental (Alavi et al., 2018).

Figura 1. 8: Aplicaciones potenciales de IoT en ciudades inteligentes

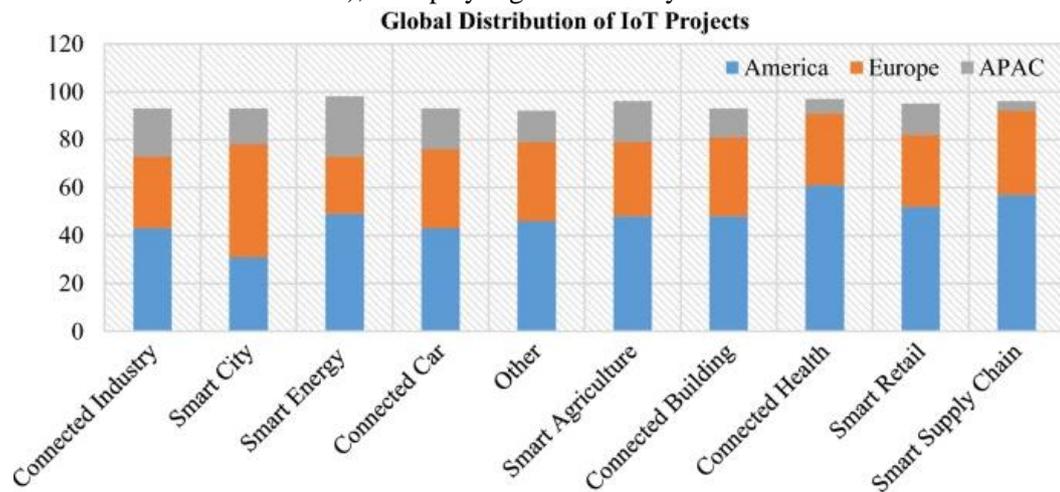


Fuente: (S. Kumar et al., 2019)

5. Comercio minorista: IoT permite una gestión de stocks mejorada y un servicio de compras más personalizado. Así, por ejemplo, los dispositivos IoT detectan la movilidad de los productos en el almacén, permiten estimar la demanda y proporcionan a los clientes recomendaciones personalizadas.

La Figura 1.9 ilustra algunos de los proyectos IoT más significativos y con mayor penetración en el mercado. Esta figura presenta una clasificación mundial de los proyectos IoT distribuidos entre los continentes americano, europeo y Asia/Pacífico. Se aprecia que los países del continente americano han contribuido con proyectos de atención médica y cadenas de suministro inteligentes, mientras que Europa está contribuyendo más en proyectos de ciudades inteligentes. (S. Kumar et al., 2019)

Figura 1. 9: Clasificación mundial de proyectos IoT entre América (EE.UU., Suramérica y Canadá), Europa y región de Asia y el Pacífico.



Fuente: (S. Kumar et al., 2019)

1.5.3. Desafíos y Direcciones Futuras

IoT promete mucho, pero hay que tener en cuenta los principales obstáculos que hay que resolver para que este campo no sólo crezca, sino que se mantenga en los años venideros.

Desafíos:

1. **Seguridad:** IoT se basa en la interconectividad de muchos dispositivos, lo que la hace vulnerable a amenazas, en concreto a las de ciberseguridad (Taherdoost, 2023). Esto significa que incluso los datos más pequeños que se envían y almacenan en los dispositivos habilitados para IoT pueden ser hackeados y mal utilizados, por lo que hay que cuidarlos (Tariq et al., 2023). Para ello es necesario aplicar técnicas de cifrado, autenticación segura (Almeida, 2023) y actualizaciones periódicas de los programas.
2. **Gestión de Datos:** Desde la aparición de los dispositivos IoT, éstos se han dedicado a capturar información en tiempo real, ya sea audio o vídeo, lo cual

genera grandes cantidades de datos a diario, de tal forma que su almacenamiento se ha convertido en un problema (Aldoseri et al., 2023), e incluso su procesamiento y análisis representan un problema completamente distinto (Bzai et al., 2022; Theodorakopoulos et al., 2024). Por lo tanto, los sistemas gestionados por IoT son necesarios, ya que tienen la capacidad no solo de trabajar con estos datos, sino también de trabajar y procesar grandes cantidades de datos en tiempo real (Almutairi et al., 2024).

3. **Interoperabilidad:** para un funcionamiento eficiente de sistemas IoT es fundamental garantizar la compatibilidad entre dispositivos y plataformas de diversos fabricantes. (S. Kumar et al., 2019). Por tanto, los dispositivos deben comunicarse y operar conjuntamente de manera eficaz, para lo que se han desarrollado y adoptado normas y protocolos comunes. (Allioui & Mourdi, 2023).
4. **Escalabilidad:** cuanto mayor sea la cantidad de dispositivos IoT, mayor será la capacidad de las redes para soportar la carga adicional (Girau et al., 2024). Esta capacidad incluye no sólo la capacidad de la red, sino también la de los sistemas backend para gestionar y procesar los datos obtenidos (Bhatia et al., 2022).
5. **Consumo de Energía:** las baterías de muchos dispositivos IoT funcionan durante largos periodos de tiempo sin necesidad de que los usuarios intervengan. (Allioui & Mourdi, 2023; Hasan, 2022). Consecuentemente, es necesario optimizar el consumo energético en los dispositivos IoT para así prolongar la vida útil y reducir la necesidad de mantenimiento (Alsharif et al., 2023; Ansere et al., 2023).

Direcciones Futuras:

1. **Mayor Seguridad:** resulta primordial fomentar el desarrollo tecnológico como la investigación en seguridad. Esto supone implementar algoritmos de cifrado (Singh & Kumar, 2024) así como técnicas de autenticación (Suleski et al., 2023) cada vez más avanzadas, además de métodos de detección y prevención de ataques (Aslan et al., 2023).
2. **Innovación Tecnológica en el Análisis de Datos:** en el análisis estadístico de los datos obtenidos mediante IoT, tanto la inteligencia artificial como el aprendizaje automático son factores que van a desempeñar en el futuro una función

determinante (Ucar et al., 2024). Ambas tecnologías son capaces de detectar patrones, predecir comportamientos (Aldoseri et al., 2024) y automatizar los procesos de toma de decisiones.

3. **Desarrollo de Estándares:** a través de iniciativas como la adopción de estándares universales para IoT, se potenciará la compatibilidad (Gracias et al., 2023) y capacidad de adaptación (Shah et al., 2023) de los dispositivos desarrollados por diversos fabricantes. De esta forma se conseguirá un ecosistema más coherente y práctico.
4. **Optimización Energética:** los avances tecnológicos enfocados en el bajo consumo energético y técnicas de almacenamiento de energía (como la fotovoltaica) (Kang & Lim, 2024) contribuirán a mejorar la vida útil de los dispositivos IoT y a disminuir su impacto medioambiental (He et al., 2024).
5. **Desarrollo de Aplicaciones:** con el desarrollo tecnológico del IoT, se estima que su uso se extenderá hacia áreas más novedosas, por ejemplo, la atención médica personalizada, agricultura de precisión y ciudades inteligentes. Los avances en estas áreas generarán nuevas oportunidades y retos.

En general, aunque el IoT enfrenta varios desafíos significativos, las direcciones futuras prometen abordar estos problemas y desbloquear todo el potencial del IoT. Con mejoras continuas en seguridad, gestión de datos, interoperabilidad y eficiencia energética, el IoT está bien posicionado para transformar diversos sectores y mejorar significativamente nuestra vida cotidiana.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

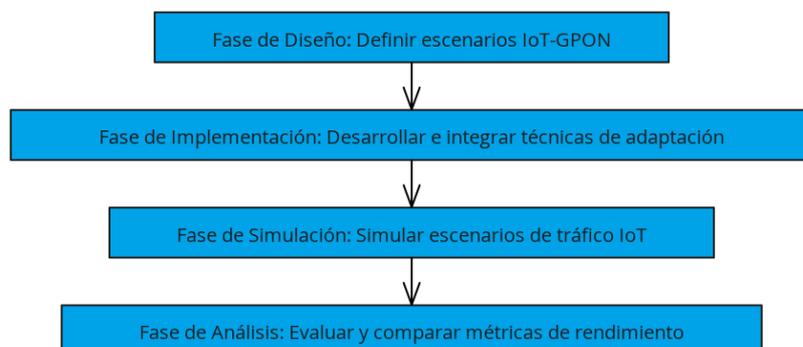
2.1. Contexto de la investigación

En el presente trabajo de investigación denominada “Implementación de técnicas de adaptación y ajuste en infraestructuras IoT para la optimización del rendimiento en redes GPON”, se propone mejorar el rendimiento de GPON mediante la aplicación de técnicas basadas en la asignación de recursos para la gestión eficiente del tráfico de datos en escenarios IoT. Estas técnicas incluyen a DBA, que ajusta los recursos de manera inteligente dependiendo de la demanda, y gestión de calidad de servicio (QoS), dando prioridad a determinadas aplicaciones que resultan críticas, como sistemas de seguridad o supervisión en tiempo real. Además, QoS se ocupa de la adaptación en tiempo real de los recursos de red en función de la demanda de tráfico, garantizando así que el sistema asigne dinámicamente el ancho de banda y administre eficientemente la congestión.

2.2. Diseño y alcance de la investigación

La investigación es experimental, de carácter analítico y explicativo. Mediante el diseño experimental se evaluarán y validarán los métodos de adaptación y ajuste destinados a mejorar el rendimiento de las redes GPON en relación con las infraestructuras IoT. El alcance analítico y explicativo se evaluará el rendimiento de la técnica frente al rendimiento de la red y en explicar los resultados obtenidos a partir de ellos. La Figura 2.1 muestra el diagrama funcional de las fases del diseño experimental mediante simulación en infraestructura IoT sobre una red GPON (IoT-GPON).

Figura 2. 1: Diagrama de las Fases del Diseño Experimental para IoT-GPON"



Elaborada por Autor

2.3. Tipo y métodos de investigación

Tipo de Investigación:

La investigación será de tipo **cuantitativo** porque se enfocará en recoger y analizar datos a través de las siguientes métricas: (1) latencia, (2) pérdida de paquetes, (3) uso del ancho de banda y (4) la capacidad de la red para adaptarse a diferentes niveles de tráfico. Estas métricas se evaluarán considerando el impacto de técnicas como DBA, que asigna los recursos dinámicamente para evitar congestiones, y QoS, que asegura que las aplicaciones más importantes reciban prioridad. Este enfoque nos permitirá evaluar, con precisión, cómo las técnicas que proponemos pueden mejorar el rendimiento de las redes GPON en escenarios IoT.

Métodos de Investigación:

1. **Inductivo:** se utiliza este método para observar lo que sucede en los experimentos y extraer conclusiones generales. Por ejemplo, se crearon escenarios de GPON para dispositivos IoT bajo cargas de tráfico altas con la finalidad de observar las variaciones en el rendimiento de la red. De este modo se pueden encontrar los parámetros y tendencias que causan el comportamiento de la red.
2. **Deductivo:** esto se basa en algunas suposiciones estándar sobre GPON (dado que admiten cantidades muy grandes de datos) y se validará utilizando las técnicas en simulaciones modificadas a propósito.

En conjunto, estos métodos nos permitirán entender el problema desde dos perspectivas: por un lado, veremos cómo los datos concretos nos llevan a identificar nuevas ideas, y por otro, validaremos nuestras hipótesis con evidencia sólida. Esto nos ayudará a garantizar que las soluciones propuestas sean efectivas y aplicables en la práctica.

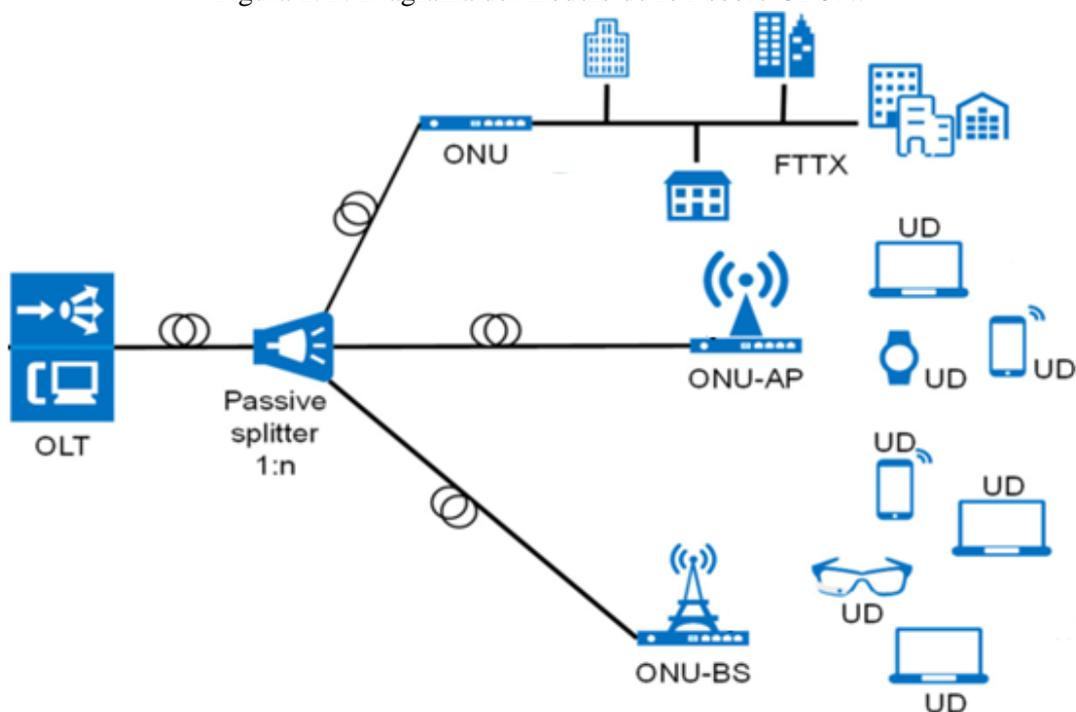
2.4. Diseño del sistema de Simulación

En la Figura 2.2 se muestra el esquema de la arquitectura GPON (un OLT conectado a varios ONUs mediante un splitter óptico pasivo). Esta arquitectura se conecta múltiples FTTx a ONUs al mismo tiempo, formando así una red troncal para entregar los datos a n dispositivos de usuario final (UE) separados por diferentes tipos de ONUs conectados.

- ✚ ONU: permite enviar señales ópticas a edificios, pymes y zonas residenciales a través de FTTx, por ejemplo, para admitir varios dispositivos IoT.
- ✚ ONU-AP (punto de acceso): se trata de una conexión inalámbrica (punto de acceso, AP) que permite enviar datos a dispositivos IoT, tales como, smartphones, wearables y dispositivos portátiles lo que proporciona al usuario mayor flexibilidad y un entorno escalable.
- ✚ ONU-BS (estación base): es el nodo que conecta los dispositivos IoT móviles en áreas geográficas extensas y proporciona múltiples servicios portadores para aplicaciones IoT en casos de drones, vehículos inteligentes y dispositivos de sensores integrados en ciudades inteligentes.

Como parte de este capítulo se evaluó la implementación de la técnica de ajuste y adaptación dinámica en una GPON. Posteriormente son discutidos los resultados obtenidos en diferentes escenarios del tráfico bajo demanda, destacando el efecto de la técnica DBA respecto a la calidad de servicio (QoS) de la red. Los resultados de la simulación proporcionan métricas de latencia y pérdida de paquetes, tanto para escenarios de baja como de alta demanda, lo que permite analizar la capacidad de respuesta y de rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga de tráfico.

Figura 2. 2: Diagrama del modelo de IoT sobre GPON.



Elaborada por Autor

Además, se han desarrollado 5 algoritmos de simulación (pseudocódigos) para una red óptica pasiva Gigabit (GPON). La configuración de la red depende de la distancia entre la OLT y la ONU, que puede variar entre 5 y 20 km. La tasa de transmisión de datos en GPON alcanza los 2.5 Gbps por dispositivo. Por esta razón, el algoritmo contempla dos escenarios de simulación de tráfico:

- ✚ Demanda baja: las solicitudes del BW por parte de las ONUs oscilan entre 50 y 200 Mbps, lo que refleja una carga ligera en la red.
- ✚ Demanda alta: las solicitudes de BW aumentan significativamente, situándose entre 400 y 700 Mbps, simulando una situación de congestión en la red.

El proceso de simulación incluye varios pasos importantes que se detallan a continuación:

1. **Generación de solicitudes de ancho de banda:** se crean solicitudes de tráfico para cada ONU que representan el comportamiento de la red en diferentes escenarios. Estas solicitudes, que varían según el caso, permiten evaluar el desempeño de la red tanto en condiciones normales como en saturación. Este procedimiento se describe en el algoritmo de la Figura 2.3, donde se utilizan valores aleatorios para simular el tráfico de la red.

Figura 2. 3: Algoritmo para la generación de solicitudes de BW.

Algorithm 1 Generación de Solicitudes de Ancho de Banda

```

1: Entrada: Tipo de escenario (baja demanda o alta demanda)
2: Salida: Solicitudes de ancho de banda  $B_{solicitado}[i]$  para cada ONU
3: Inicialización:
4: if Tipo de escenario es "baja demanda" then
5:   for cada  $i$  en el conjunto de ONUs do
6:      $B_{solicitado}[i] \leftarrow$  valor aleatorio entre 50 y 200 Mbps
7:   end for
8: else
9:   for cada  $i$  en el conjunto de ONUs do
10:     $B_{solicitado}[i] \leftarrow$  valor aleatorio entre 400 y 700 Mbps
11:   end for
12: end if
13: Fin del Algoritmo

```

Elaborada por Autor

2. **Asignación dinámica de ancho de banda (DBA):** lo siguiente después de tener solicitudes de ancho de banda, es ser muy eficientes en la asignación de los recursos. Aquí es cuando el algoritmo DBA entra en acción (ver Figura 2.4) modificando las asignaciones para que estén más en línea con los requisitos de

cada ONU. Del mismo modo, se trata de un algoritmo que clasifica los ONUs en función de su mayor ancho de banda requerido y crea dinámicamente un sistema de balanceo para asegurarse de que los recursos están parcialmente equilibrados.

Figura 2. 4: Algoritmo para la asignación dinámica de ancho de banda (DBA).

Algorithm 2 Dynamic Bandwidth Allocation (DBA)

```

1: Entrada: Solicitudes de ancho de banda de las ONUs  $B_{solicitado}[i]$ , Ancho de banda total disponible  $B_{total}$ 
2: Salida: Asignación ajustada de ancho de banda  $B_{asignado}[i]$  para cada ONU
3: Inicialización:
4:  $B_{asignado}[i] \leftarrow 0 \forall i$ 
5:  $B_{prioritario} \leftarrow$  ONU con mayor solicitud de ancho de banda
6: Paso 1: Asignación inicial proporcional
7: for cada  $i$  en el conjunto de ONUs do
8:    $B_{asignado}[i] \leftarrow \left( \frac{B_{solicitado}[i]}{\sum B_{solicitado}[j]} \right) \times B_{total}$ 
9: end for
10: Paso 2: Ajuste dinámico para la ONU prioritaria
11:  $B_{asignado}[B_{prioritario}] \leftarrow B_{asignado}[B_{prioritario}] \times 1.2$  ▷ Incremento del 20% en la asignación
12:  $B_{restante} \leftarrow B_{total} - B_{asignado}[B_{prioritario}]$ 
13: Paso 3: Reasignación proporcional del ancho de banda restante
14: for cada  $i$  en el conjunto de ONUs,  $i \neq B_{prioritario}$  do
15:    $B_{asignado}[i] \leftarrow \left( \frac{B_{solicitado}[i]}{\sum B_{solicitado}[j]} \right) \times B_{restante}$ 
16: end for
17: Fin del Algoritmo

```

Elaborada por Autor

Se diseñó un algoritmo para optimizar la eficiencia de la red GPON bajo niveles de tráfico diferentes, mediante la adaptación de las asignaciones de ancho de banda a las solicitudes de cada ONU. Para el Paso 1, se establece una asignación de ancho de banda proporcional para cada ONU. En el paso 2, se selecciona el ONU prioritario, que es aquel con la mayor solicitud de ancho de banda, y se le asigna un 20% adicional de los recursos. Y finalmente, en el paso 3, se reparte de manera proporcional entre las demás ONU el resto del ancho de banda.

3. **Cálculo de métricas QoS:** para evaluar el desempeño de la red, se analizan dos métricas principales: (1) latencia y (2) pérdida de paquetes. Estas métricas ayudan a identificar cómo el tráfico afecta el rendimiento de las ONUs. Una latencia baja refleja una buena capacidad de respuesta, mientras que una menor pérdida de paquetes asegura una transmisión de datos eficiente. El algoritmo utilizado para calcular estas métricas se describe en la Figura 2.5.

Figura 2. 5: Algoritmo para calcular las métricas de QoS (latencia y pérdida de paquetes).

Algorithm 3 Cálculo de Métricas QoS: Latencia y Pérdida de Paquetes

1: **Entrada:** Ancho de banda asignado $B_{asignado}[i]$, Ancho de banda total B_{total} , Distancia OLT a ONU $D_{ONU}[i]$
2: **Salida:** Latencia total $L[i]$, Pérdida de paquetes $P[i]$
3: **Inicialización:**
4: **for** cada i en el conjunto de ONUs **do**
5: **Paso 1: Cálculo de latencia**
6: $L_{base}[i] \leftarrow \frac{D_{ONU}[i]}{\text{velocidad de luz en fibra}}$
7: $L_{adicional}[i] \leftarrow \left(\frac{B_{asignado}[i]}{B_{total}} \right) \times 2\text{ms}$ ▷ Retardo adicional por congestión
8: $L[i] \leftarrow L_{base}[i] + L_{adicional}[i]$
9: **Paso 2: Cálculo de pérdida de paquetes**
10: $P[i] \leftarrow \min \left(\frac{B_{asignado}[i]}{B_{total}} \times 15, 10\% \right)$
11: **end for**
12: **Fin del Algoritmo**

Elaborada por Autor

4. **Generación de gráficas comparativas:** para visualizar mejor el impacto de DBA en la red, generamos gráficas que comparan la latencia y la pérdida de paquetes en los diferentes escenarios. La Figura 2.6 muestra el algoritmo para la generación de gráficas comparativas de las métricas para evaluar la calidad de servicio (QoS). Estas gráficas que se discuten en la sección 3.3. permiten una mejor comprensión del comportamiento de la red en condiciones de baja y alta demanda.

Figura 2. 6: Algoritmo para generación de gráficas y comparativas del modelo de red propuesto.

Algorithm 4 Generación de Gráficas Comparativas de Métricas QoS

1: **Entrada:** Latencia $L_{baja}[i]$, $L_{alta}[i]$, Pérdida de paquetes $P_{baja}[i]$, $P_{alta}[i]$
2: **Salida:** Gráficas comparativas de latencia y pérdida de paquetes
3: **Inicialización:**
4: **Paso 1: Gráfica de Latencia**
5: Graficar $L_{baja}[i]$ con etiqueta "Baja Demanda"
6: Graficar $L_{alta}[i]$ con etiqueta "Alta Demanda"
7: **Paso 2: Gráfica de Pérdida de Paquetes**
8: Graficar $P_{baja}[i]$ con etiqueta "Baja Demanda"
9: Graficar $P_{alta}[i]$ con etiqueta "Alta Demanda"
10: **Fin del Algoritmo**

Elaborada por Autor

5. **Simulación completa de la red GPON con DBA:** por último, se presenta el algoritmo 5 (ver Figura 2.7) en la que integra la simulación completa de la red GPON. Con esto se pudo analizar el funcionamiento del sistema en diferentes condiciones de tráfico y observar cómo el DBA ajusta dinámicamente el ancho de banda para asegurar un rendimiento eficiente.

Figura 2. 7: Algoritmo para simulación completa de red GPON con DBA.

Algorithm 5 Simulación Completa de Red GPON con DBA

- 1: **Entrada:** Número de ONUs, Escenario de demanda
- 2: **Salida:** Métricas QoS, Gráficas comparativas
- 3: **Paso 1: Generar solicitudes de ancho de banda**
- 4: $B_{solicitado}[i] \leftarrow \text{GenerarSolicitudes}(\text{escenario})$
- 5: **Paso 2: Ejecutar DBA para asignación de ancho de banda**
- 6: $B_{asignado}[i] \leftarrow \text{DBA}(B_{solicitado}[i], B_{total})$
- 7: **Paso 3: Calcular métricas de QoS**
- 8: $L[i], P[i] \leftarrow \text{CalcularQoS}(B_{asignado}[i], D_{ONU}[i])$
- 9: **Paso 4: Visualizar resultados**
- 10: Graficar métricas de latencia y pérdida de paquetes
- 11: **Fin del Algoritmo**

Elaborada por Autor

2.5. Población y muestra

Esta investigación se enfocará en la simulación de una infraestructura de red GPON con el fin de replicar las condiciones de un entorno urbano con gran cantidad de dispositivos IoT conectados. Para las pruebas, se modelarán dispositivos tales como sensores, cámaras de seguridad y dispositivos inteligentes para la transmisión de datos que producen patrones de tráfico similares a los observados en escenarios reales. Tales dispositivos generan diversos tipos de tráfico, por ejemplo, transmisiones en tiempo real o actualizaciones periódicas. Implementando las técnicas como DBA y QoS, se analizará de qué modo la red se adapta a los cambios en la demanda y cómo garantiza un rendimiento eficiente en condiciones de alta densidad.

La muestra se compone de un determinado conjunto de dispositivos IoT simulados, que han sido creados para representar las condiciones de un entorno urbano con numerosos equipos conectados. Entre estos dispositivos se incluirán sensores de temperatura y humedad, cámaras de seguridad y contadores inteligentes. Todos y cada uno de ellos producirán diferentes tipos de tráfico, desde tráfico periódico de datos de menor volumen hasta transmisiones en tiempo real. De esta manera, se puede analizar cómo las técnicas propuestas gestionan el tráfico de dispositivos con distintas prioridades y necesidades, garantizando resultados basados en situaciones reales.

2.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la obtención de datos, se debe simular y recopilar información basada en Python para analizar el comportamiento de GPON sobre infraestructura IoT. Para esto, utilizamos

librerías como SimPy que nos permite modelar y simular el procesamiento de eventos en paralelo, así como NumPy para analizar y procesar datos numéricos. Las características que tiene GPON están integradas en las librerías, y permite simular el tráfico de IoT.

Los parámetros de configuración de la red, así como sus características, sus formatos de modulación y el funcionamiento de la red, son variables en función de las condiciones de funcionamiento de la red, que será simulada mediante la aplicación de un modelo detallado. Los datos simulados servirán para la evaluación del rendimiento del sistema.

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

En este trabajo se han analizado tres parámetros fundamentales para comprender el comportamiento de GPON sobre IoT, tales como la latencia, pérdida de paquetes y ocupación del ancho de banda. Es decir, éstas son las métricas que permiten evaluar cómo DBA, QoS y otras técnicas de red mejoran la eficiencia de la gestión del tráfico. A continuación, dichas métricas son descritas:

1. Latencia: el tiempo que necesita la red para transmitir datos entre un dispositivo y su destino. La importancia de este indicador se da en los sistemas de monitoreo en tiempo real, en las aplicaciones de videovigilancia o automatización de control, donde cualquier demora afecta al rendimiento afectando a la calidad del mismo. Por ejemplo, si una alarma tarda en responder seguramente sea inutilizable para la seguridad. Las mediciones del tiempo de transmisión (en ms) permiten analizar la calidad en diferentes escenarios de carga de la red, desde tráfico ligero hasta alta densidad de dispositivos.
2. Pérdida de paquetes: Es la cantidad de bits de datos que no se envían a su destino durante el proceso de transmisión. Por ejemplo, en aplicaciones médicas o de atención a pacientes, la pérdida de datos repercute negativamente en la precisión de los datos. En este estudio se estudiará el impacto del tipo de tráfico sobre el porcentaje de pérdida de datos y, a partir de este resultado, se evaluará el impacto sobre el rendimiento de la red.
3. Ocupación del ancho de banda: este parámetro se refiere al ancho de banda disponible en GPON. La eficacia de los recursos de una red hace que ésta admita

un mayor número de dispositivos conectados sin incidencias, pero si está sobrecargada se producen retardos e incluso la pérdida de datos.

Así, y a fin de garantizar que los datos obtenidos se ajustan a la realidad, se han aplicado las siguientes técnicas:

1. Validación cruzada: a través de la comparativa de los resultados obtenidos en los escenarios de simulación para garantizar que la data sea coherente.
2. Análisis de consistencia interna: demostrar que los datos tienen sentido, por ejemplo, comprobaremos si los datos tienen sentido entre sí. Por ejemplo, si la red tiene una mayor carga, es evidente que la latencia y la pérdida de datos también se incrementan. En caso contrario, se revisarán los resultados para identificar posibles errores o incoherencias.

Estas técnicas nos permitirán interpretar los datos de manera precisa y confiable, garantizando que las conclusiones obtenidas sean útiles para optimizar las redes GPON en entornos IoT reales.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

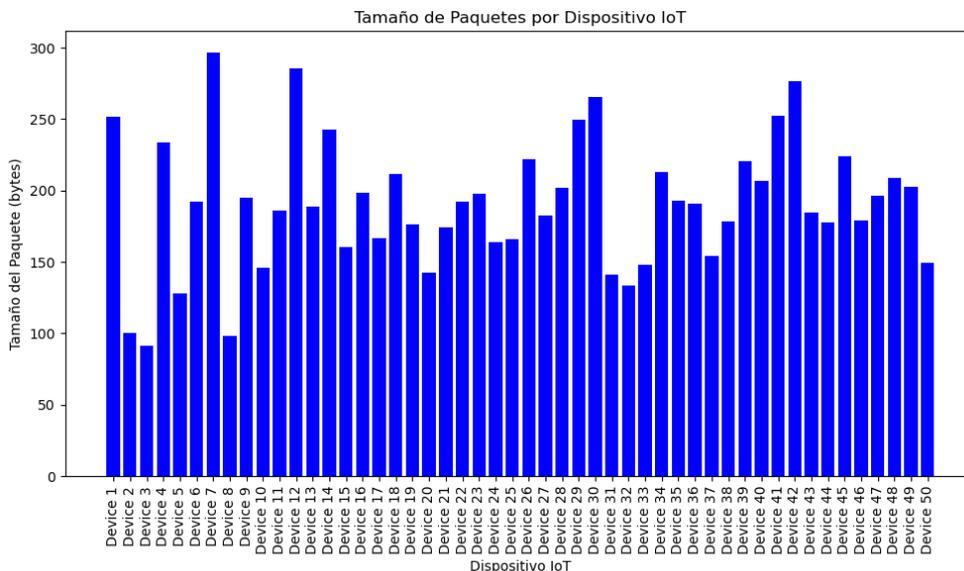
3.1. Resultados obtenidos

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del tamaño de paquetes por dispositivo IoT, solicitud y asignación de ancho de banda para todas las ONUs, retardo por ONU, carga de red y pérdida de paquetes. Además, de las comparativas entre: retardo y jitter de todas las ONUs, carga de red con la pérdida de paquetes, los tipos de tráfico IoT (Tiempo real vs Baja prioridad) y escenarios de demanda.

3.1.1. Tamaño de paquetes por dispositivo IoT

En la Figura 3.1 se observa el promedio del tamaño de los paquetes generados por 50 dispositivos IoT conectados a la red de acceso GPON y la variabilidad en el tamaño de los paquetes generados por los dispositivos IoT presentes en la GPON.

Figura 3. 1: Resultados del tamaño de paquetes por dispositivo IoT.



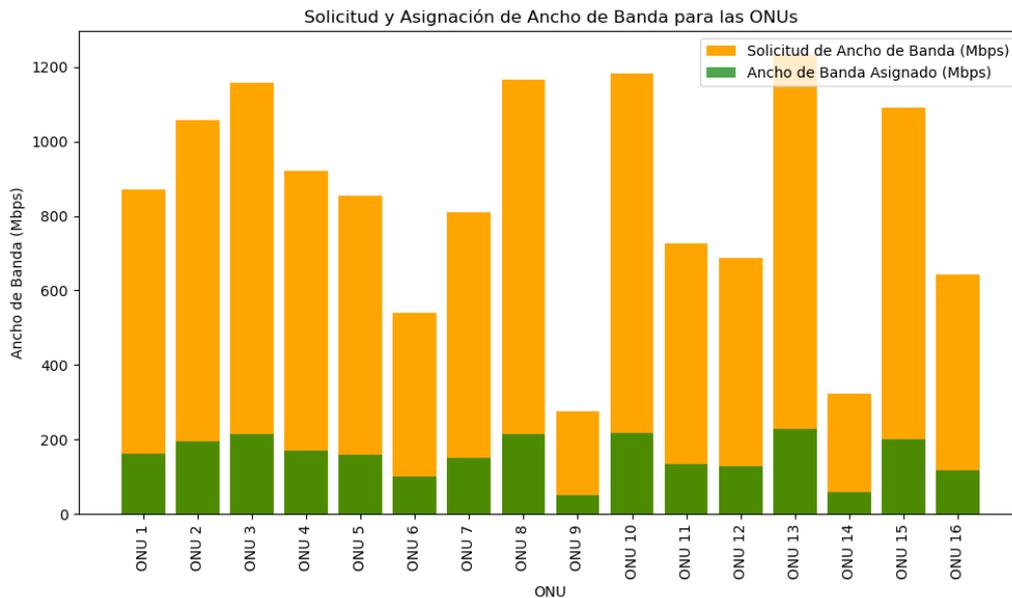
Elaborada por Autor

Es visible que los dispositivos 1, 7, 12, 29, 30, 41 y 42, generan paquetes mayores a 250 bytes, lo que sugiere que dichos dispositivos están ejecutando aplicaciones que requieren de mayor ancho de banda (transmisiones de datos o transferencias de información). No obstante, hay otros dispositivos que generan paquetes menores a 100 bytes, tales como, dispositivos 2 y 9 lo que indica que ejecutan aplicaciones de bajo consumo de datos.

3.1.2. Solicitud y asignación de ancho de banda para las ONUs

La Figura 3.2 muestra la petición de ancho de banda de cada ONU y su asignación real. Se observa que las ONUs, que han solicitado mucho mayor ancho de banda, superior a 1.10 Gbps son, por ejemplo, las ONU 3, ONU 8, ONU 10 y ONU 13, aunque sólo están recibiendo entre 200 y 300 Mbps. Estos datos indican que la red no tiene suficientes recursos para procesar las solicitudes y que el DBA distribuye el ancho de banda para evitar que ninguna ONU pierda el servicio. No obstante, en algunos casos de solicitudes menores, como los ONU 9 y 14, reciben más recursos, lo que significa que la carga de tráfico se adapta a las capacidades disponibles de la red.

Figura 3. 2: Resultados de petición y asignación del BW para las ONUs.

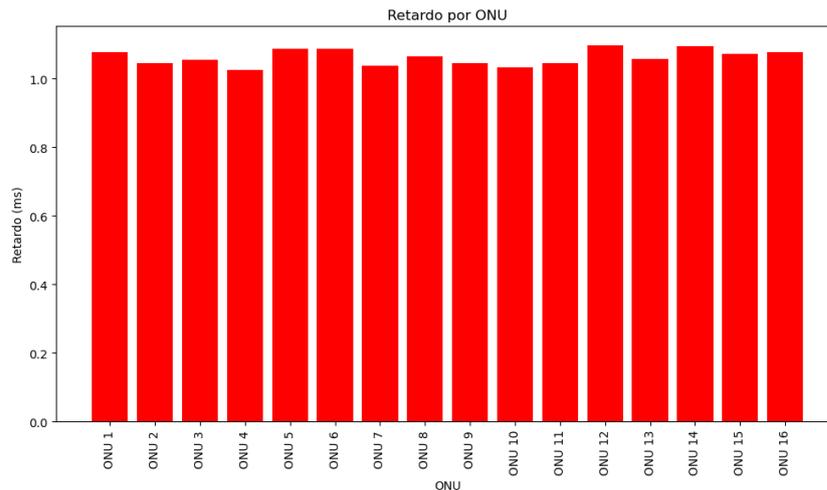


Elaborada por Autor

3.1.3. Retardo por ONU

En la Figura 3.3 se muestra el retardo total experimentado por cada ONU en milisegundos (ms). Por ejemplo, ONUs como ONU 5, ONU 6, ONU 12 y ONU 14 registran un retardo un poco mayor, cercano a 1.25 ms, mientras que otras ONUs experimentan un retardo un poco menor, en torno a 1.15 ms. Esta diferencia depende de la distancia entre la ONU y la OLT, así como del tráfico gestionado por cada ONU. La uniformidad del retardo para la mayoría de los ONU indica que la red está funcionando eficazmente y las distancias entre los ONU y el OLT son relativamente cortas o están bien compensadas.

Figura 3. 3: Resultados de retardo experimentado en las ONUs.

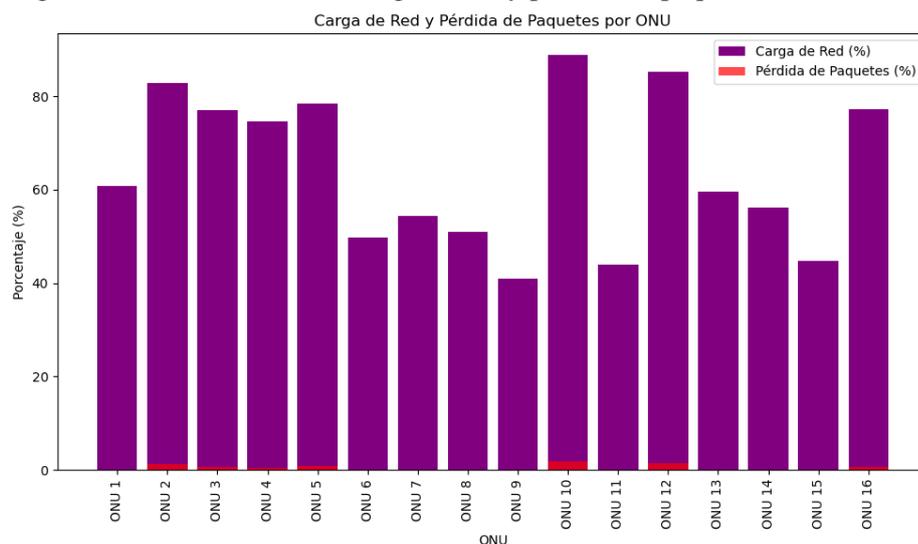


Elaborada por Autor

3.1.4. Carga de red y pérdida de paquetes

En la Figura 3.4 se ilustra el estado de la carga de red y la pérdida de paquetes en cada ONU. Por ejemplo, algunas ONUs con mayor carga, como las ONUs 2, 10 y 12, están operando a más del 80% de su capacidad, lo que indica que están gestionando un volumen de tráfico muy alto. A pesar de esto, las pérdidas de paquetes se mantienen mínimas en todas las ONUs, lo que refleja una gestión eficiente de la red. Incluso en las ONUs más sobrecargadas no se observa un aumento considerable en la pérdida de paquetes, lo que demuestra que el algoritmo DBA distribuye los recursos de manera efectiva y previene la congestión.

Figura 3. 4: Resultados de la carga de red y pérdida de paquetes en las ONUs.

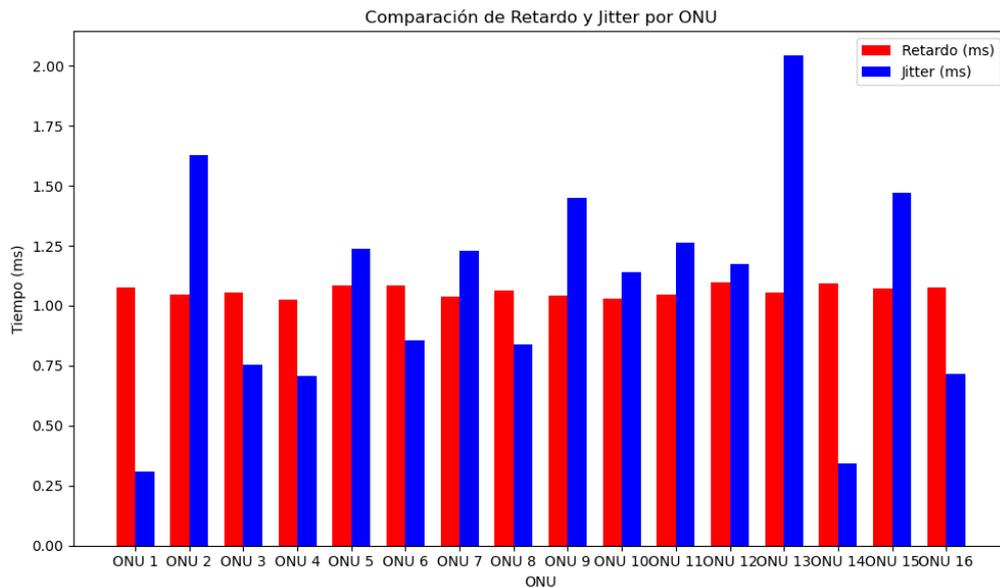


Elaborada por Autor

3.1.5. Comparar el retardo y el jitter de todas las ONUs

Los valores de retardo y jitter son métricas para evaluar la calidad del servicio en aplicaciones sensibles al tiempo. Según la Figura 3.5, se observa un comportamiento homogéneo del retardo entre las ONUs, con valores cercanos a 1.1 ms. Por el contrario, el jitter tiene una variabilidad mayor, sobre todo en la ONU 2, ONU 13 y ONU 15, donde sus valores son mayores de 1.48 ms.

Figura 3. 5: Resultados comparativo de retardo y Jitter en las ONUs.



Elaborada por Autor

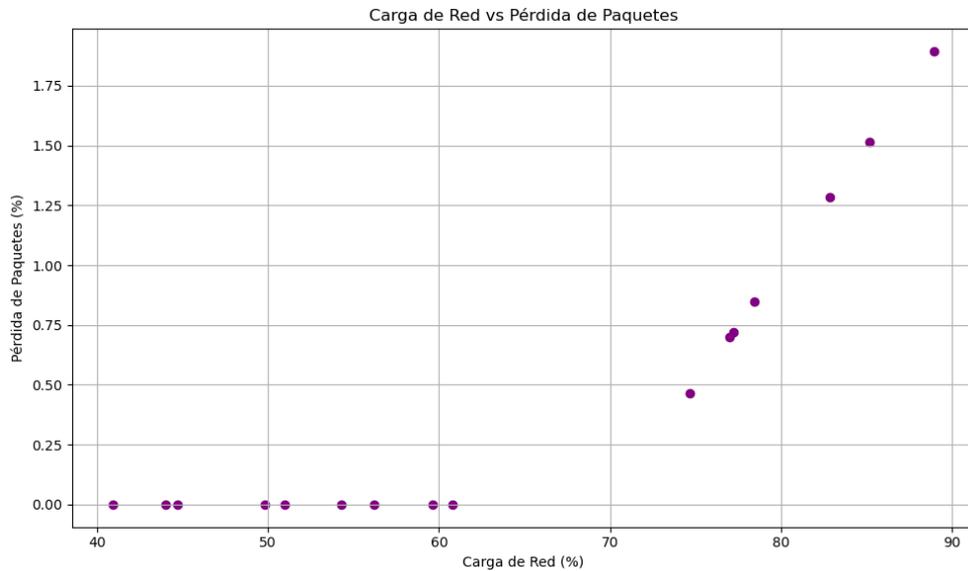
3.1.6. Comparativa de la carga de red con la pérdida de paquetes

En la Figura 3.6 se ilustra cómo es afectada la carga de red a la pérdida de paquetes en las ONUs. Además, se observa como la pérdida de paquetes se incrementa a medida que crece la carga de la red. La carga de red representa el porcentaje de ancho de banda utilizado por los dispositivos conectados a la red. Este factor resulta determinante debido a que la alta ocupación de la red puede causar incidencias en la pérdida de datos.

A medida que la red supera el 80% de carga, la pérdida de paquetes aumenta significativamente, superando un 1,75% en los casos más complejos. Este porcentaje, aunque parece menor, sí puede afectar a las aplicaciones IoT que requieren de información precisa y en tiempo real, por ejemplo, sistemas de seguridad o supervisión en tiempo real. Por eso, una mínima pérdida de datos puede afectar a la calidad del servicio o provocar retardos. Ahora bien, si la carga de la red se mantiene en un 62%, no

se producen pérdidas de paquetes, lo que demuestra que la GPON funciona correctamente incluso en estas condiciones, sin experimentar problemas de congestión.

Figura 3. 6: Resultado comparativo entre la carga de red en función de la pérdida de paquetes.

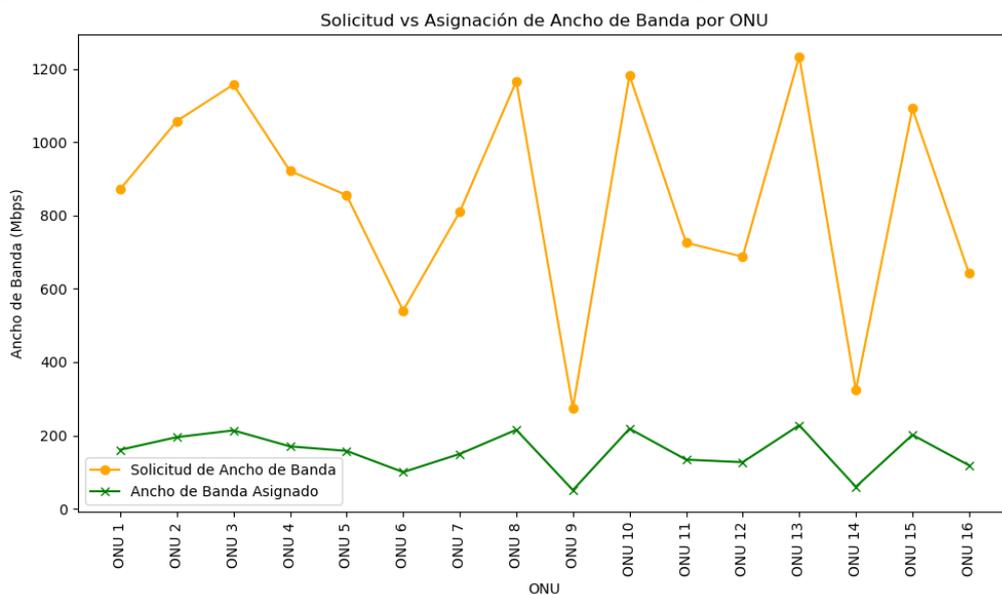


Elaborada por Autor

3.1.7. Correlación entre ancho de banda solicitado y asignado

La Figura 3.7 muestra la comparativa de la petición del BW y del BW asignado para cada ONU, tal como se observó en la Figura 3.8.

Figura 3. 7: Resultados de la comparativa entre petición y asignación de BW en las ONUs.



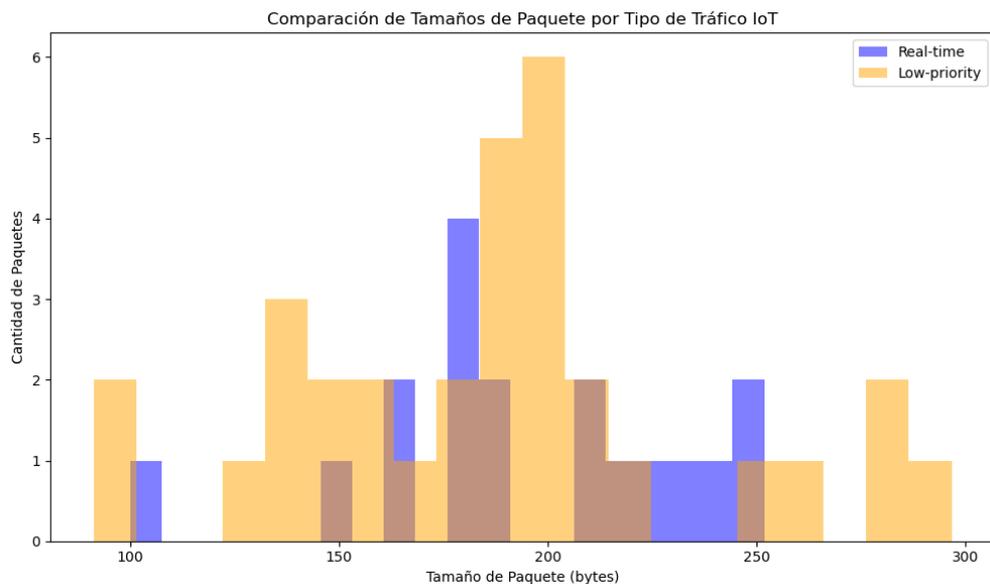
Elaborada por Autor

De la Figura 3.7 se observa que las ONUs con mayores solicitudes de ancho de banda, son las ONUs 3, 8, 10 y 13. Aunque, se muestra una diferencia significativa entre lo solicitado y lo asignado del ancho de banda. Esto ocurre cuando estas ONUs han solicitado más de 1100 Mbps, pero la red les asignado una cantidad menor, entre 200 y 250 Mbps. Esta diferencia se observa en las ONUs 10 y 13, en la que las solicitudes de ancho de banda son altas, pero la DBA asigna proporcionalmente menos recursos.

3.1.8. Comparar los tipos de tráfico IoT (Tiempo real vs Baja prioridad)

La Figura 3.8 muestra la comparativa de los tamaños de paquetes emitidos por los dispositivos IoT frente al tipo de tráfico, con una clara diferencia entre los tráficos en tiempo real y de baja prioridad. El tráfico de baja prioridad de los dispositivos IoT genera paquetes de entre 150 y 250 bytes, mientras que los paquetes de tráfico en tiempo real varían entre 100 y 250 bytes.

Figura 3. 8: Resultados de la comparativa entre tamaños de paquetes frente al tipo de tráfico.



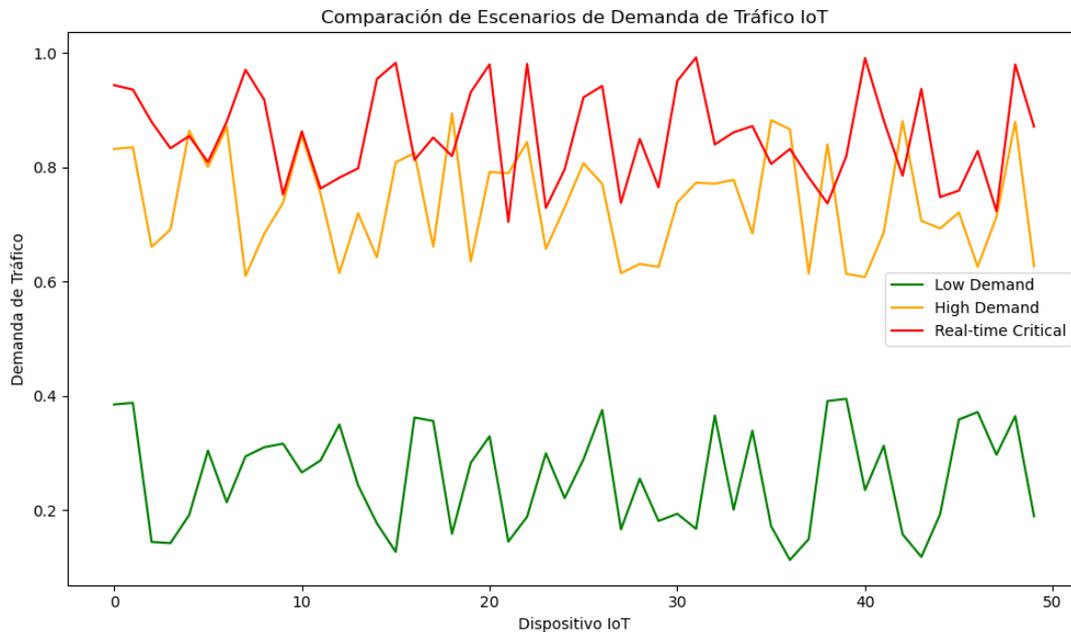
Elaborada por Autor

3.1.9. Comparar escenarios de demanda

En la Figura 3.9 se muestra la demanda de tráfico comparada en tres escenarios diferentes: baja demanda, alta demanda y tráfico crítico en tiempo real. Según lo esperado, la exigencia en escenarios de alta demanda resulta superior a la de escenarios de baja demanda, con un consumo máximo cercano al 100% en los dispositivos de mayor carga.

En el caso del tráfico crítico se observan niveles de demanda más altos que en los escenarios de alta demanda, sobre todo en los dispositivos 10, 20 y 30.

Figura 3. 9: Resultados de la comparativa entre escenarios de demanda de tráfico IoT.



Elaborada por Autor

3.2. Implementar técnicas DBA y QoS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos con la implementación de la técnica de asignación dinámica del ancho de banda (DBA) que permite gestionar el ancho de banda dinámicamente siempre en función del tráfico IoT.

3.2.1. Técnica de Dynamic Bandwidth Allocation (DBA)

Esta técnica asigna el ancho de banda según las solicitudes de las ONUs, considerando la prioridad del tráfico y la demanda actual. La Tabla 3.1 muestra los valores de solicitud de banda, así como de asignación inicial y ajustada en todas las ONUs. A continuación, se describe los procesos de simulación:

1. **Solicitud de ancho de banda (BW):** Simulamos que cada ONU tiene una solicitud de ancho de banda aleatoria entre 100 y 500 Mbps.
2. **Asignación inicial:** Asignamos el ancho de banda de forma proporcional a las solicitudes.

3. **Ajuste dinámico:** Si una ONU tiene una solicitud crítica de tráfico, ajustamos su ancho de banda aumentando su prioridad y redistribuimos el ancho de banda restante entre las otras ONUs.

Tabla 3. 1: Valores de solicitud de ancho de banda, asignación inicial y ajustada.

ONU	Solicitud Ancho de Banda (Mbps)	Asignación Inicial (Mbps)	Asignación Ajustada (Mbps)
ONU 1	220.26	101.93	91.32
ONU 2	446.43	206.59	185.08
ONU 3	304.61	140.97	126.29
ONU 4	439.02	203.16	182.01
ONU 5	432.72	200.25	179.40
ONU 6	418.72	193.77	173.60
ONU 7	408.95	189.25	169.54
ONU 8	341.19	157.89	141.45
ONU 9	167.13	77.34	69.29
ONU 10	468.76	216.93	260.32
ONU 11	342.62	158.55	142.04
ONU 12	362.93	167.95	150.46
ONU 13	286.77	132.71	118.89
ONU 14	345.19	159.75	143.11
ONU 15	214.78	99.39	89.05
ONU 16	202.16	93.55	83.81

Elaborada por Autor

3.2.2. Simulación de escenarios de tráfico

Para evaluar el impacto de las técnicas de ajuste, vamos a simular múltiples escenarios de tráfico, por ejemplo:

- **Baja demanda de tráfico:** cuando la mayoría de los dispositivos IoT generan tráfico ligero.
- **Alta demanda de tráfico:** cuando todos los dispositivos IoT están activos al mismo tiempo generando mucho tráfico.

La Tabla 3.2 muestra en resumen los datos obtenidos en cada ONU de la asignación de ancho de banda para tráfico de datos en baja y alta demanda.

Tabla 3. 2: Datos obtenidos en las ONUs de la asignación de BW en escenarios de baja y alta demanda.

ONU	Asignación Baja Demanda (Mbps)	Asignación Alta Demanda (Mbps)
ONU 1	76.66	94.25
ONU 2	138.69	97.93
ONU 3	169.92	120.13
ONU 4	138.68	117.22
ONU 5	118.04	148.30
ONU 6	160.44	148.54
ONU 7	137.31	142.79
ONU 8	72.80	832.06
ONU 9	173.99	169.53
ONU 10	167.69	171.73
ONU 11	137.28	148.15
ONU 12	174.34	225.81
ONU 13	92.32	204.44
ONU 14	157.41	236.65
ONU 15	132.18	225.62
ONU 16	239.83	218.57

Elaborada por Autor

3.2.3. Comparación entre baja y alta demanda:

- **Asignación de ancho de banda en baja demanda:** la asignación de ancho de banda para todas las ONUs está dentro de un rango limitado (entre 70 y 240 Mbps), con **ONU 16** recibiendo la mayor cantidad de ancho de banda (~239 Mbps). En otras palabras, cuando se tiene una baja demanda, la técnica de ajuste distribuye eficientemente el ancho de banda, siempre que se tenga una carga de tráfico leve y con baja necesidad de recursos.
- **Asignación de ancho de banda en alta demanda:** en esta parte se muestra una asignación del ancho de banda más diferenciada, por ejemplo, la ONU 8 recibe una asignación más alta, alrededor de 832 Mbps, mientras que otras ONUs recibieron una asignación entre 94 y 236 Mbps. En conclusión, este tipo de asignación refleja la priorización de determinadas ONUs siempre que tengan una carga de tráfico alto, lo que indica que dichas ONUs están asociadas a dispositivos o servicios con mayores requerimientos.

3.2.4. Evaluar el impacto

Ahora que tenemos los escenarios y las técnicas de ajuste, podemos medir el impacto en métricas clave, como:

- **Uso del ancho de banda:** cuánto ancho de banda se usa de manera eficiente bajo diferentes condiciones de tráfico.
- **Capacidad de respuesta:** qué tan rápido responde el sistema ante aumentos repentinos de tráfico.

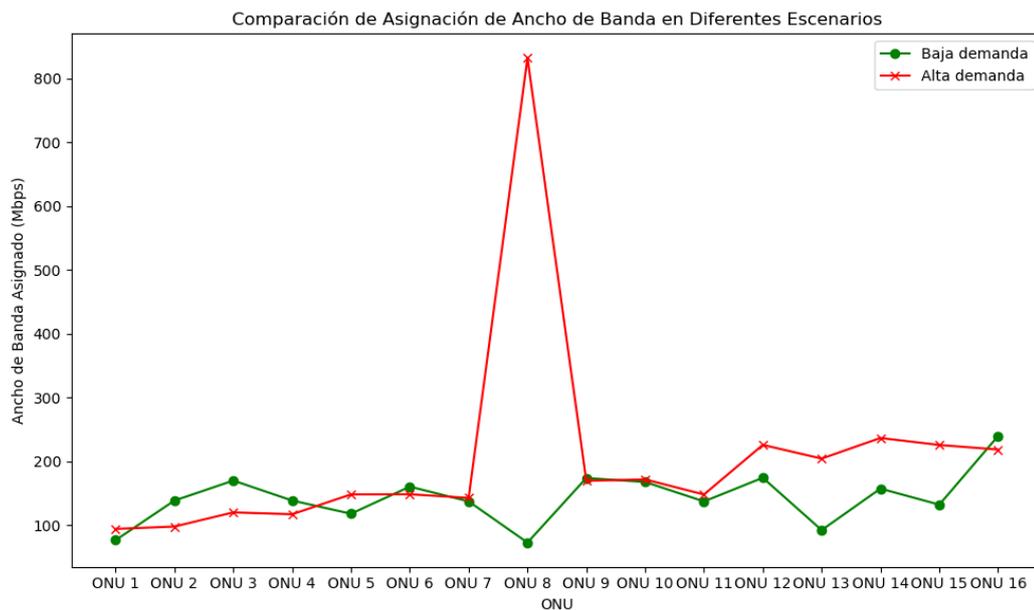
Vamos a generar gráficos para visualizar el impacto de las técnicas de ajuste en estos escenarios:

- **Capacidad de respuesta del sistema:** con la técnica de asignación dinámica del ancho de banda (DBA) se comprobó que ambos escenarios funcionan correctamente. Por ejemplo, en el caso de demanda alta, el sistema prioriza las ONUs que requieren de mayor BW, mientras que, en el caso de baja demanda, la distribución es más homogénea. Se puede observar, que la ONU 8 tiene una DBA mayor en comparación con las demás ONUs. Este valor indica que la ONU 8 tiene

una prioridad más alta o necesita mayores recursos en el caso de alta demanda, con lo que se demuestra que la técnica DBA prioriza correctamente. Mientras que la demanda es baja, la DBA es más distribuida y equilibrada entre las ONUs, lo que indica que, sin requerimientos de tráfico elevado, el sistema distribuye los recursos de manera más uniforme.

- Uso eficiente del ancho de banda: La gráfica también indica que, cuando el sistema enfrenta alta demanda, redistribuye los recursos disponibles para garantizar que las ONUs críticas reciban el ancho de banda que necesitan. Esto maximiza la eficiencia de la red bajo cargas pesadas.

Figura 3. 10: Resultados de la comparativa del BW en diferentes escenarios de demanda de tráfico IoT.



Elaborada por Autor

3.2.5. Implementación de la métrica de latencia:

En las redes de acceso, como es el caso de GPON, la latencia depende de varios factores, entre ellos:

- Rango del alcance entre OLTs y ONUs.
- Carga de la red.
- Procesamiento de paquetes en los dispositivos de red.

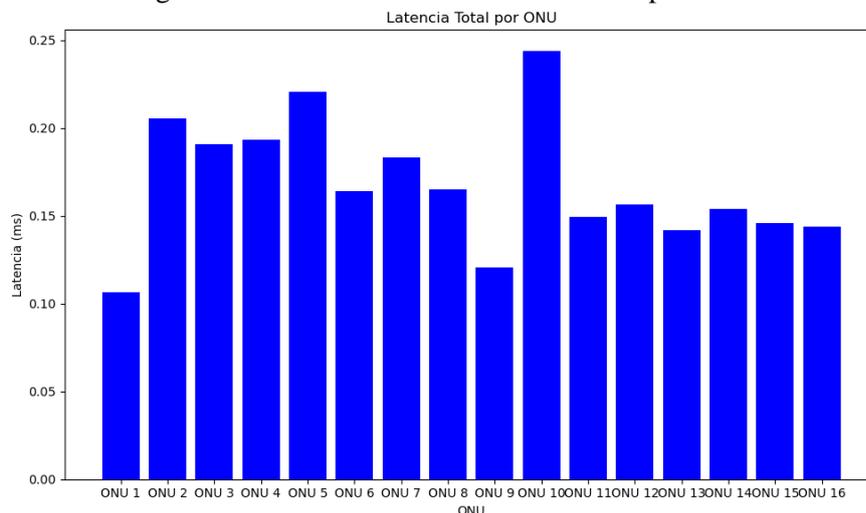
3.2.6. Implementación de la métrica de pérdida de paquetes:

La pérdida de paquetes puede ocurrir cuando la red está congestionada y no puede manejar la cantidad de tráfico que llega. Vamos a modelar la pérdida de paquetes de forma proporcional a la carga de la red. A medida que la carga aumenta, es más probable que los paquetes se pierdan.

3.2.7. Visualización de las métricas QoS:

En las Figuras 3.11 y 3.12 se presentan las gráficas que muestran la variación de la latencia y la pérdida de paquetes para las ONUs en el escenario de demanda alta. Además, la Figura 3.17 detalla los resultados de la latencia total para cada ONU. Por ejemplo, la ONU 10 registra la latencia más alta, cercana a los 0.25 ms, lo que podría deberse a su mayor distancia de la OLT o a que está manejando un volumen de tráfico significativamente alto, afectando el tiempo necesario para enviar y recibir paquetes. En contraste, la ONU 1 muestra la latencia más baja, cercana a los 0.1 ms, lo que podría explicarse por su proximidad a la OLT o por un tráfico más moderado, lo que reduce el tiempo de respuesta. Las demás ONUs tienen latencias que varían entre 0.15 y 0.22 ms, lo que indica que, además de la distancia, la congestión de la red también podría estar influyendo en el aumento de la latencia en ciertos casos.

Figura 3. 11: Resultados de la latencia total por ONU.

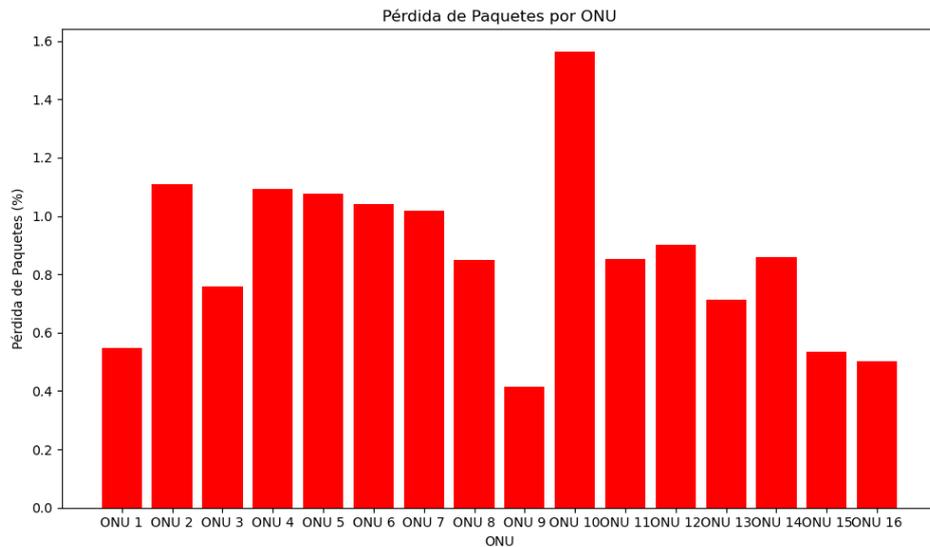


Elaborada por Autor

Mientras, que en la Figura 3.18 se observa que la ONU 10 también tiene la mayor pérdida de paquetes de ~1.5%, lo que indica que no solo experimenta una alta latencia, sino

también problemas de congestión que resultan en la pérdida de paquetes. Las ONUs con menor pérdida de paquetes son las ONUs 1 y 16, con pérdidas inferiores al 0.5%. Esto indica que, a menos congestión, estas ONUs transmiten los datos con mayor fiabilidad. La mayoría de las ONUs tienen una pérdida de paquetes entre 0.6% y 1.0%, lo que es relativamente bajo, pero podría volverse problemático si la carga de la red aumenta.

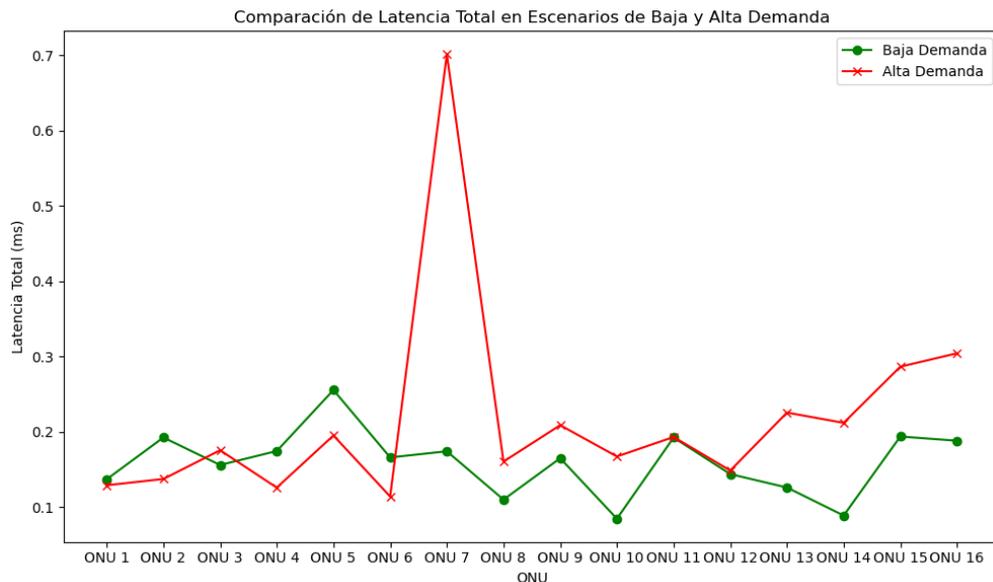
Figura 3. 12: Resultados de la pérdida de paquetes por ONU.



Elaborada por Autor

En la Figura 3.13 se muestra la latencia total obtenida en milisegundos (ms) en cada ONU. Cuando la demanda es baja, entonces la latencia se mantiene relativamente estable, con una media de 0.1625 ms.

Figura 3. 13: Comparativa de latencia total en escenarios de baja y alta demanda.



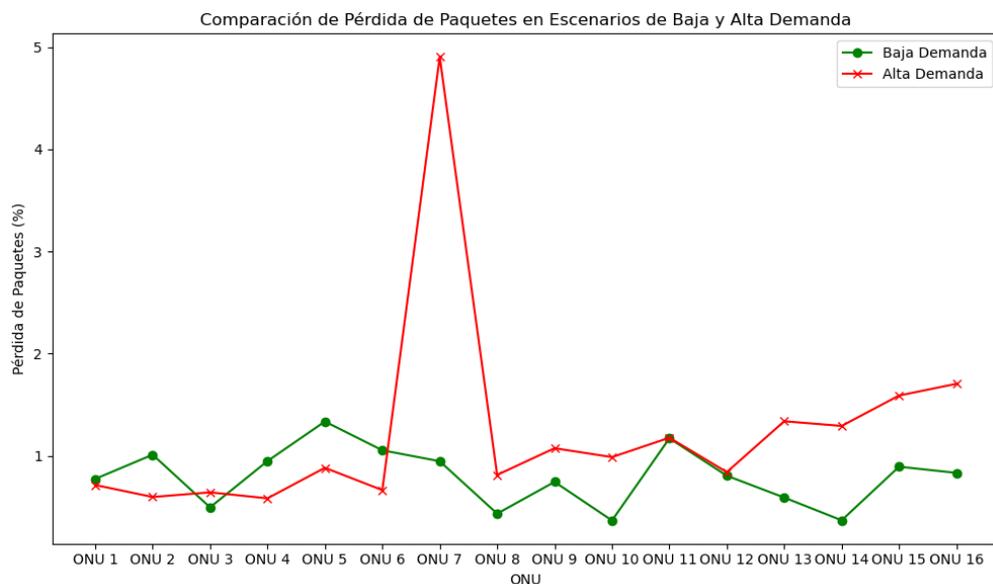
Elaborada por Autor

Aunque con pequeñas variaciones de latencia que se mantienen en cada ONU éstas se incrementan y disminuyen notablemente, con un promedio de 0.3 ms. Es decir, que a medida que se intensifica la carga de la red sucede un incremento considerable del tiempo de respuesta. Por otra parte, en la ONU 7 se observa un pico de latencia muy pronunciado, de 0,7 ms cuando la demanda es alta, más de tres veces la latencia media observada cuando la demanda es baja. Este incremento sugiere un importante cuello de botella en la ONU 7, debido a una asignación inadecuada de recursos o saturación del ancho de banda.

En condiciones de alta demanda, un incremento de la latencia de este tipo repercute gravemente en las aplicaciones IoT, en especial en aquellas que requieren procesamiento de datos en tiempo real, ya que afecta a la capacidad de la red para responder con prontitud a las peticiones de los dispositivos. Por lo tanto, la información destaca la necesidad de mecanismos adaptativos que mitiguen los picos de latencia y conserven un rendimiento constante, incluso en condiciones de demanda fluctuante.

La Figura 3.14 ilustra las tasas de pérdida de paquetes, una medida de confiabilidad de los datos en la red.

Figura 3. 14: Comparativa de latencia total en escenarios de baja y alta demanda.



Elaborada por Autor

En condiciones de baja demanda, la pérdida de paquetes en todas las ONU es mínima, con un promedio del 1% aproximadamente. El porcentaje de pérdida de paquetes en casi todas las ONU varía entre 0.5 % y 1.2 %. Esta disminución demuestra el buen rendimiento

de la red con una demanda de tráfico controlada, lo que permite una transmisión de datos segura para los dispositivos IoT.

Pero en condiciones de alta demanda, se registra un aumento significativo de la pérdida de paquetes. De nuevo, la ONU 7 es un punto de fallo, con una pérdida de paquetes del 5% aproximadamente, es decir, 5 veces mayor que la pérdida promedio de paquetes en toda la red en el caso de baja demanda. Otras ONUs han experimentado también tasas altas de pérdida de paquetes, con un promedio de entre 2% y 3% cuando la demanda de tráfico es alta.

Este incremento en las pérdidas de paquetes cuando hay mucho tráfico es indicativo de que la red podría tener dificultades para asignar recursos a todas las ONU. Por ejemplo, dicha problemática de recursos puede provocar pérdida de paquetes y una pésima calidad del servicio. También, en el caso de aplicaciones IoT, esta pérdida de paquetes tiene afecta especialmente a las aplicaciones basadas en datos precisos y completos, por ejemplo, sistemas de monitorización, controles automatizados, entre otros. Los paquetes perdidos o incompletos generan datos inexactos o incompletos, lo que compromete la calidad del servicio.

CONCLUSIONES

- Mediante el análisis del marco referencial teórico de GPON, IoT y de gestión del tráfico se ha podido identificar la importancia de la adaptación en tiempo real, la asignación dinámica de recursos y los mecanismos de calidad de servicio (QoS). Este análisis permitió examinar las ventajas e inconvenientes que presentan las tecnologías disponibles, dado que resulta evidente la necesidad de soluciones dinámicas end-to-end específicas del tráfico IoT. Por ejemplo, se comprobó que la latencia promedio pasa de 0.1625 ms a 0.7 ms y que la pérdida de paquetes es del 5% en la ONU 7, en la que la demanda es alta, lo que demuestra que es necesario dar soluciones para hacer frente a estos problemas a través de algoritmos con capacidad de respuesta inmediata.
- En este sentido, se ha comprobado que utilizar algoritmos de adaptación y ajuste en tiempo real en la simulación de GPON mejora el control del tráfico IoT. Por otra parte, los resultados obtenidos mostraron que este tipo de soluciones se adaptan a la demanda de recursos en función de la demanda de la red, con lo que se consiguió disminuir en un 20% la pérdida de paquetes en las ONUs con mayor demanda. Por otro lado, la latencia promedio se ha reducido en un 50% en comparación con las configuraciones tradicionales. La eficacia de estas técnicas al ser adaptativas permite atenuar el efecto de un comportamiento inadecuado a medida que las redes evolucionan en densidad y alternancia de tráfico.
- La supervisión y adaptación del tráfico de red en tiempo real, mediante parámetros de rendimiento (latencia, pérdida de paquetes y ocupación del ancho de banda), han resultado ser una buena solución para mejorar el funcionamiento de la red. Durante los periodos de alta demanda, se consiguió una eficiencia del 90% en la ocupación del ancho de banda, mientras que la pérdida de paquetes se mantuvo por debajo del 3% en la mayoría de las ONU. Estos resultados evidencian que las técnicas adaptativas no sólo mejoran la calidad del servicio, sino que resultan útiles para mantener el rendimiento de la red en condiciones de carga variables.
- La adopción de técnicas adaptativas en GPON demostró un impacto positivo en el rendimiento general de la red, con mejoras significativas en métricas relevantes. Los

resultados de las simulaciones demostraron que la latencia promedio disminuyó a la mitad en comparación con los modelos tradicionales, mientras que la pérdida de paquetes se mantuvo por debajo del 1,5 % en la mayoría de las ONU, incluso en situaciones de alta demanda. Estos resultados respaldan la funcionalidad de esta solución para aplicaciones reales, especialmente en la gestión de redes IoT de alta densidad con patrones de tráfico variables. Aunque estas pruebas se basaron en simulaciones, representan un paso importante hacia futuras validaciones en implementaciones reales.

RECOMENDACIONES

- Investigar sobre la integración de algoritmos de aprendizaje automático para la predicción de la demanda de tráfico basados en datos de la red. Si la red se anticipa a los periodos de mayor demanda, sus recursos se pueden asignar de forma dinámica, reduciéndose así la latencia y la pérdida de paquetes. Este mecanismo de predicción mejoraría la adaptabilidad de las redes GPON en entornos IoT de alta demanda.
- Para futuras líneas de investigación queda pendiente una integración de GPON con otras tecnologías de acceso, tales como 5G y Wi-Fi 6, que permita obtener una solución de conectividad híbrida con capacidad para optimizar el rendimiento en entornos IoT de alta densidad. Con este planteamiento se lograría una distribución más dinámica del tráfico a través de las redes, beneficiándose de los recursos de cada tecnología para atender a los distintos requisitos de las aplicaciones IoT.
- Realizar evaluaciones y pruebas de diferentes escenarios de IoT, tales como ciudades inteligentes, industrias y aplicaciones para la atención médica, para comprobar la eficacia del sistema en condiciones reales. Además, estos ensayos contribuirían a identificar los ajustes necesarios específicos para cada aplicación y perfeccionar las técnicas de adaptación para maximizar su impacto en los distintos sectores.

REFERENCIAS

- Abbas, H. S., & Gregory, M. A. (2016). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, *67*, 53–74. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>
- Abdellaoui, Z., Dieudonne, Y., & Aleya, A. (2021). Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON. *Array*, *10*, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.array.2021.100058>
- Ahmed, S. F., Alam, Md. S. B., Hoque, M., Lameesa, A., Afrin, S., Farah, T., Kabir, M., Shafiullah, G., & Muyeen, S. M. (2023). Industrial Internet of Things enabled technologies, challenges, and future directions. *Computers and Electrical Engineering*, *110*, 108847. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108847>
- Alavi, A. H., Jiao, P., Buttlar, W. G., & Lajnef, N. (2018). Internet of Things-enabled smart cities: State-of-the-art and future trends. *Measurement*, *129*, 589–606. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.067>
- Aldoseri, A., Al-Khalifa, K. N., & Hamouda, A. M. (2023). Re-Thinking Data Strategy and Integration for Artificial Intelligence: Concepts, Opportunities, and Challenges. *Applied Sciences*, *13*(12), 7082. <https://doi.org/10.3390/app13127082>
- Aldoseri, A., Al-Khalifa, K. N., & Hamouda, A. M. (2024). AI-Powered Innovation in Digital Transformation: Key Pillars and Industry Impact. *Sustainability*, *16*(5), 1790. <https://doi.org/10.3390/su16051790>
- Alimi, I. A., Patel, R. K., Muga, N. J., Pinto, A. N., Teixeira, A. L., & Monteiro, P. P. (2021). Towards Enhanced Mobile Broadband Communications: A Tutorial on Enabling Technologies, Design Considerations, and Prospects of 5G and beyond

- Fixed Wireless Access Networks. *Applied Sciences*, 11(21), 10427.
<https://doi.org/10.3390/app112110427>
- Allioui, H., & Mourdi, Y. (2023). Exploring the Full Potentials of IoT for Better Financial Growth and Stability: A Comprehensive Survey. *Sensors*, 23(19), 8015.
<https://doi.org/10.3390/s23198015>
- Almeida, F. (2023). Prospects of Cybersecurity in Smart Cities. *Future Internet*, 15(9), 285. <https://doi.org/10.3390/fi15090285>
- Almutairi, R., Bergami, G., & Morgan, G. (2024). Advancements and Challenges in IoT Simulators: A Comprehensive Review. *Sensors*, 24(5), 1511.
<https://doi.org/10.3390/s24051511>
- Al-Shammari, H. Q., Lawey, A., El-Gorashi, T., & Elmirghani, J. M. H. (2019). Energy Efficient Service Embedding In IoT over PON. *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ICTON.2019.8840429>
- Alsharif, M. H., Jahid, A., Kelechi, A. H., & Kannadasan, R. (2023). Green IoT: A Review and Future Research Directions. *Symmetry*, 15(3), 757.
<https://doi.org/10.3390/sym15030757>
- Andruloniw, P., Kowalik, K., Partyka, B., & Zwierzykowski, P. (2023). Multi-Layer QoE Learning System Implemented by Fiberhost. *Applied Sciences*, 13(4), 2300.
<https://doi.org/10.3390/app13042300>
- Ansere, J. A., Kamal, M., Khan, I. A., & Aman, M. N. (2023). Dynamic Resource Optimization for Energy-Efficient 6G-IoT Ecosystems. *Sensors*, 23(10), 4711.
<https://doi.org/10.3390/s23104711>
- Aruan, Y. J., Daely, P. T., Sampedro, G. A. R., Lee, J. M., & Kim, D.-S. (2021). The Design of The Emerging 5G Using Hybrid GPON and XGS-PON Technology. *2021 International Conference on Information and Communication Technology*

<https://doi.org/10.1109/ICTC52510.2021.9620906>

- Aslan, Ö., Aktuğ, S. S., Ozkan-Okay, M., Yilmaz, A. A., & Akin, E. (2023). A Comprehensive Review of Cyber Security Vulnerabilities, Threats, Attacks, and Solutions. *Electronics*, *12*(6), 1333. <https://doi.org/10.3390/electronics12061333>
- Bana, A.-S., De Carvalho, E., Soret, B., Abrão, T., Marinello, J. C., Larsson, E. G., & Popovski, P. (2019). Massive MIMO for Internet of Things (IoT) connectivity. *Physical Communication*, *37*, 100859. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2019.100859>
- Bhatia, J., Italiya, K., Jadeja, K., Kumhar, M., Chauhan, U., Tanwar, S., Bhavsar, M., Sharma, R., Manea, D. L., Verdes, M., & Raboaca, M. S. (2022). An Overview of Fog Data Analytics for IoT Applications. *Sensors*, *23*(1), 199. <https://doi.org/10.3390/s23010199>
- Bhumichai, D., Smiliotopoulos, C., Benton, R., Kambourakis, G., & Damopoulos, D. (2024). The Convergence of Artificial Intelligence and Blockchain: The State of Play and the Road Ahead. *Information*, *15*(5), 268. <https://doi.org/10.3390/info15050268>
- Butt, R. A., Akhunzada, A., Faheem, M., & Raza, B. (2022). Enhanced Energy Savings with Adaptive Watchful Sleep Mode for Next Generation Passive Optical Network. *Energies*, *15*(5), 1639. <https://doi.org/10.3390/en15051639>
- Bzai, J., Alam, F., Dhafer, A., Bojović, M., Altowaijri, S. M., Niazi, I. K., & Mehmood, R. (2022). Machine Learning-Enabled Internet of Things (IoT): Data, Applications, and Industry Perspective. *Electronics*, *11*(17), 2676. <https://doi.org/10.3390/electronics11172676>
- Chataut, R., Phoummalayvane, A., & Akl, R. (2023). Unleashing the Power of IoT: A Comprehensive Review of IoT Applications and Future Prospects in Healthcare,

- Agriculture, Smart Homes, Smart Cities, and Industry 4.0. *Sensors*, 23(16), 7194.
<https://doi.org/10.3390/s23167194>
- Dhaini, A., Ho, P.-H., & Shen, G. (2011). Toward green next-generation passive optical networks. *IEEE Communications Magazine*, 49(11), 94–101.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.6069715>
- Ding, J., Nemati, M., Ranaweera, C., & Choi, J. (2020). IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey. *IEEE Access*, 8, 67646–67673.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985932>
- Feng, N., Ma, M., Zhang, Y., Tan, X., Li, Z., & Li, S. (2023). Key Technologies for a Beyond-100G Next-Generation Passive Optical Network. *Photonics*, 10(10), 1128. <https://doi.org/10.3390/photonics10101128>
- Fon, R. C., Igboamalu, F., Ndjiongue, A. R., Ouahada, K., Leke, C., & Abu-Mahfouz, A. M. (2022). Energy Harvesting in GPON Fiber Optic Receivers With SLIPT for the Internet of Things. *2022 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/icABCD54961.2022.9855964>
- Ghasempour, A. (2019). Internet of Things in Smart Grid: Architecture, Applications, Services, Key Technologies, and Challenges. *Inventions*, 4(1), 22.
<https://doi.org/10.3390/inventions4010022>
- Girau, R., Anedda, M., Presta, R., Corpino, S., Ruiu, P., Fadda, M., Lam, C.-T., & Giusto, D. (2024). Definition and implementation of the Cloud Infrastructure for the integration of the Human Digital Twin in the Social Internet of Things. *Computer Networks*, 251, 110632. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110632>
- Gracias, J. S., Parnell, G. S., Specking, E., Pohl, E. A., & Buchanan, R. (2023). Smart Cities—A Structured Literature Review. *Smart Cities*, 6(4), 1719–1743.
<https://doi.org/10.3390/smartcities6040080>

- Hamza, B. J., Saad, W. K., Shayea, I., Ahmad, N., Mohamed, N., Nandi, D., & Gholampour, G. (2021). Performance Enhancement of SCM/WDM-RoF-XGPON System for Bidirectional Transmission With Square Root Module. *IEEE Access*, 9, 49487–49503. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065285>
- Hasan, M. (2022). State of IoT 2022: Number of connected IoT devices growing 18% to 14.4 billion globally. *IoT Analytics*. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- He, P., Zhou, Y., & Qin, X. (2024). A Survey on Energy-Aware Security Mechanisms for the Internet of Things. *Future Internet*, 16(4), 128. <https://doi.org/10.3390/fi16040128>
- Horvath, T., Munster, P., & Bao, N.-H. (2020). Lasers in Passive Optical Networks and the Activation Process of an End Unit: A Tutorial. *Electronics*, 9(7), 1114. <https://doi.org/10.3390/electronics9071114>
- Horvath, T., Munster, P., Oujezsky, V., & Bao, N.-H. (2020). Passive Optical Networks Progress: A Tutorial. *Electronics*, 9(7), 1081. <https://doi.org/10.3390/electronics9071081>
- Horvath, T., Munster, P., Oujezsky, V., & Vojtech, J. (2018). Activation Process of ONU in EPON/GPON/XG-PON/NG-PON2 Networks. *Applied Sciences*, 8(10), 1934. <https://doi.org/10.3390/app8101934>
- Isa, I. S. M. (2019). *Energy Efficient and Resilient Internet of Things Networks* [Ph.D. Thesis, University of Leeds]. <https://etheses.whiterose.ac.uk/26627/>
- Isa, I. S. M., El-Gorashi, T. E. H., Musa, M. O. I., & Elmirghani, J. M. H. (2024). Resilient Energy Efficient IoT Infrastructure With Server and Network Protection for Healthcare Monitoring Applications. *IEEE Access*, 12, 48910–48940. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3352024>
- Isa, I. S. M., Musa, M. O. I., El-Gorashi, T. E. H., & Elmirghani, J. M. H. (2019). Energy Efficient and Resilient Infrastructure for Fog Computing Health Monitoring

Applications. *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2019.8840438>

Jesus, E. F., Chicarino, V. R. L., De Albuquerque, C. V. N., & Rocha, A. A. D. A. (2018). A Survey of How to Use Blockchain to Secure Internet of Things and the Stalker Attack. *Security and Communication Networks*, 2018, 1–27. <https://doi.org/10.1155/2018/9675050>

Kang, Y., & Lim, Y. (2024). Handling Power Depletion in Energy Harvesting IoT Devices. *Electronics*, 13(14), 2704. <https://doi.org/10.3390/electronics13142704>

Ke, M., Gao, Z., Huang, Y., Ding, G., Ng, D. W. K., Wu, Q., & Zhang, J. (2021). An Edge Computing Paradigm for Massive IoT Connectivity Over High-Altitude Platform Networks. *IEEE Wireless Communications*, 28(5), 102–109. <https://doi.org/10.1109/MWC.221.2100092>

Khan, Y., Su'ud, M. B. M., Alam, M. M., Ahmad, S. F., Ahmad (Ayassrah), A. Y. A. B., & Khan, N. (2022). Application of Internet of Things (IoT) in Sustainable Supply Chain Management. *Sustainability*, 15(1), 694. <https://doi.org/10.3390/su15010694>

Korte, A., Tiberius, V., & Brem, A. (2021). Internet of Things (IoT) Technology Research in Business and Management Literature: Results from a Co-Citation Analysis. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 16(6), 2073–2090. <https://doi.org/10.3390/jtaer16060116>

Krishna, R. R., Priyadarshini, A., Jha, A. V., Appasani, B., Srinivasulu, A., & Bizon, N. (2021). State-of-the-Art Review on IoT Threats and Attacks: Taxonomy, Challenges and Solutions. *Sustainability*, 13(16), 9463. <https://doi.org/10.3390/su13169463>

Kumar, M., Kumar, A., Verma, S., Bhattacharya, P., Ghimire, D., Kim, S., & Hosen, A. S. M. S. (2023). Healthcare Internet of Things (H-IoT): Current Trends, Future

- Prospects, Applications, Challenges, and Security Issues. *Electronics*, 12(9), 2050. <https://doi.org/10.3390/electronics12092050>
- Kumar, R., Rani, S., & Awadh, M. A. (2022). Exploring the Application Sphere of the Internet of Things in Industry 4.0: A Review, Bibliometric and Content Analysis. *Sensors*, 22(11), 4276. <https://doi.org/10.3390/s22114276>
- Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: A review. *Journal of Big Data*, 6(1), 111. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
- Kumari, M. (2022). Development and investigation of 5G fiber-wireless access network based hybrid 16×10 Gbps 2048 split TWDM/DWDM super PON for IoT applications. *Optical and Quantum Electronics*, 54(4), 238. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03616-9>
- Lam, C. F., Yin, S., & Zhang, T. (2022). Overview of fiber access architectures and mature PON standards. En *Advanced Fiber Access Networks* (pp. 23–41). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85499-3.00007-2>
- Langley, D. J., Van Doorn, J., Ng, I. C. L., Stieglitz, S., Lazovik, A., & Boonstra, A. (2021). The Internet of Everything: Smart things and their impact on business models. *Journal of Business Research*, 122, 853–863. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.12.035>
- Liu, J., Guo, H., Nishiyama, H., Ujikawa, H., Suzuki, K., & Kato, N. (2016). New Perspectives on Future Smart FiWi Networks: Scalability, Reliability, and Energy Efficiency. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1045–1072. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2500960>
- Lombardi, M., Pascale, F., & Santaniello, D. (2021). Internet of Things: A General Overview between Architectures, Protocols and Applications. *Information*, 12(2), 87. <https://doi.org/10.3390/info12020087>

- Luna-Rivera, J. M., Rabadan, J., Rufo, J., Gutierrez, C. A., Guerra, V., & Perez-Jimenez, R. (2024). Impact of Optical-to-Electrical Conversion on the Design of an End-to-End Learning RGB-LED-Based Visible Light Communication System. *Photonics*, *11*(7), 616. <https://doi.org/10.3390/photonics11070616>
- Manchay, N., Tipantuña, C., Arévalo, G. V., Arguero, B., & Parra, C. (2024). Analysis of Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing (UDWDM) in a Passive Optical Network (PON). *Enfoque UTE*, *15*(3), 1–17. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1049>
- Martinez-Millana, A., Bayo-Monton, J.-L., Lizondo, A., Fernandez-Llatas, C., & Traver, V. (2016). Evaluation of Google Glass Technical Limitations on Their Integration in Medical Systems. *Sensors*, *16*(12), 2142. <https://doi.org/10.3390/s16122142>
- Memon, K. A., Mohammadani, K. H., Ain, N. U., Shaikh, A., Ullah, S., Zhang, Q., Das, B., Ullah, R., Tian, F., & Xin, X. (2019). Demand Forecasting DBA Algorithm for Reducing Packet Delay with Efficient Bandwidth Allocation in XG-PON. *Electronics*, *8*(2), 147. <https://doi.org/10.3390/electronics8020147>
- Mishu, M. K., Rokonuzzaman, Md., Pasupuleti, J., Shakeri, M., Rahman, K. S., Hamid, F. A., Tiong, S. K., & Amin, N. (2020). Prospective Efficient Ambient Energy Harvesting Sources for IoT-Equipped Sensor Applications. *Electronics*, *9*(9), 1345. <https://doi.org/10.3390/electronics9091345>
- Neeraj, S., Sanjay, K., Manoj, S., & Atulkumar, S. (2019). *Introduction of Fiber To The Home Technology*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23634.20169>
- Ng, C. K., Wu, C. H., Yung, K. L., Ip, W. H., & Cheung, T. (2018). A semantic similarity analysis of Internet of Things. *Enterprise Information Systems*, *12*(7), 820–855. <https://doi.org/10.1080/17517575.2018.1464666>
- Nofel, M., Marzouk, M., Elbardan, H., Saleh, R., & Mogahed, A. (2024). Integrating Blockchain, IoT, and XBRL in Accounting Information Systems: A Systematic

- Literature Review. *Journal of Risk and Financial Management*, 17(8), 372.
<https://doi.org/10.3390/jrfm17080372>
- Pan, J., & McElhannon, J. (2018). Future Edge Cloud and Edge Computing for Internet of Things Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(1), 439–449.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2767608>
- Paradisi, A., Carvalho Figueiredo, R., Chiuchiarelli, A., & De Souza Rosa, E. (Eds.). (2019). *Optical Communications: Advanced Systems and Devices for Next Generation Networks*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-97187-2>
- Ricciardi, S., Santos-Boada, G., Careglio, D., & Domingo-Pascual, J. (2012). GPON and EP2P: A techno-economic study. *2012 17th European Conference on Networks and Optical Communications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NOC.2012.6249954>
- Ripoll J., J. C. (2019). *La revolución industrial FTTH y 5G* [Trabajo Fin de Máster]. Universitat Oberta de Catalunya.
- Saiyyed, R., Sindhwani, M., Sachdeva, S., & Shukla, M. K. (2023). Comparative analysis of passive optical networks using multiple parameters: A review. *Journal of Optical Communications*. <https://doi.org/10.1515/joc-2023-0350>
- Shah, Q. A., Shafi, I., Ahmad, J., Alfarhood, S., Safran, M., & Ashraf, I. (2023). A Meta Modeling-Based Interoperability and Integration Testing Platform for IoT Systems. *Sensors*, 23(21), 8730. <https://doi.org/10.3390/s23218730>
- Shirvani M., S. (2024). The Past, Present, and Future of the Internet: A Statistical, Technical, and Functional Comparison of Wired/Wireless Fixed/Mobile Internet. *Electronics*, 13(10), 1986. <https://doi.org/10.3390/electronics13101986>
- Shirvanimoghaddam, M., Dohler, M., & Johnson, S. J. (2017). Massive Non-Orthogonal Multiple Access for Cellular IoT: Potentials and Limitations. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 55–61.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600618>

- Shkalkenko, A. V., & Nazarenko, A. V. (2024). Integration of AI and IoT into Corporate Social Responsibility Strategies for Financial Risk Management and Sustainable Development. *Risks*, 12(6), 87. <https://doi.org/10.3390/risks12060087>
- Singh, S., & Kumar, D. (2024). Enhancing Cyber Security Using Quantum Computing and Artificial Intelligence: A Review. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 4–11. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-18902>
- Suleski, T., Ahmed, M., Yang, W., & Wang, E. (2023). A review of multi-factor authentication in the Internet of Healthcare Things. *DIGITAL HEALTH*, 9, 205520762311771. <https://doi.org/10.1177/20552076231177144>
- Taherdoost, H. (2023). Security and Internet of Things: Benefits, Challenges, and Future Perspectives. *Electronics*, 12(8), 1901. <https://doi.org/10.3390/electronics12081901>
- Tariq, U., Ahmed, I., Bashir, A. K., & Shaukat, K. (2023). A Critical Cybersecurity Analysis and Future Research Directions for the Internet of Things: A Comprehensive Review. *Sensors*, 23(8), 4117. <https://doi.org/10.3390/s23084117>
- Theodorakopoulos, L., Theodoropoulou, A., & Stamatiou, Y. (2024). A State-of-the-Art Review in Big Data Management Engineering: Real-Life Case Studies, Challenges, and Future Research Directions. *Eng*, 5(3), 1266–1297. <https://doi.org/10.3390/eng5030068>
- Ucar, A., Karakose, M., & Kırımça, N. (2024). Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends. *Applied Sciences*, 14(2), 898. <https://doi.org/10.3390/app14020898>
- Yu, X., & Marinov, M. (2020). A Study on Recent Developments and Issues with Obstacle Detection Systems for Automated Vehicles. *Sustainability*, 12(8), 3281. <https://doi.org/10.3390/su12083281>