UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO DE REDES WIFI 6E MEDIANTE ESTUDIO COMPARATIVO EN LAS BANDAS DE 5 GHZ Y 6 GHZ DE PARÁMETROS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Gestión, calidad de la educación, procesos pedagógicos e idiomas

AUTOR:

Judith Milena Arellano Arévalo

DIRECTOR:

MSc. Carlos Alberto Vásquez Ayala

Ibarra-Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401657762		
APELLIDOS Y NOMBRES:	ARELLANO ARÉVALO JUDITH MILENA		
DIRECCIÓN:	Calle Tulcán y Segundo Luis Moreno Conjunto P&P		
EMAIL:	jmarellanoa@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	No registra	**TELF. MOVIL**	0960602187

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Evaluación comparativa del desempeño de redes wifi 6E mediante estudio comparativo en las bandas de 5 GHz y 6 GHz de parámetros teóricos y prácticos
AUTOR (ES):	Judith Milena Arellano Arévalo
FECHA: AAAAMMDD	23 de febrero del 2026.
SOLO PARA TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	
CARRERA/PROGRAMA:	■ **GRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	**Ingeniería en Telecomunicaciones.**
DIRECTOR:	**MSc. Carlos Alberto Vásquez Ayala**
ASESOR:	**MSc. Luis Edilberto Suárez Zambrano**

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 23 días, del mes de febrero de 2026

EL AUTOR:

Firmado electrónicamente por:
JUDITH MILENA ARELLANO AREVALO
Validar únicamente con FirmaEC

Firma…….
Nombre: Judith Milena Arellano Arévalo

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 23 de febrero de 2026

MSc. Carlos Alberto Vásquez Ayala
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:
Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Firmado electrónicamente por:
CARLOS ALBERTO VASQUEZ AYALA
Validar únicamente con FirmaEC

(f) ……
MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA
C.C.: 1002424982

DEDICATORIA

Dedico este trabajo al cielo, el lugar donde está mi madre. Ella fue siempre mi mayor impulso para seguir adelante y no rendirme en esta lucha diaria por completar esta carrera. Tu amor y tu ejemplo están presentes en cada uno de mis pasos.

A mi padre, por ser mi guía y mi apoyo constante, por acompañarme en cada decisión y sostenerme con su esfuerzo, paciencia y amor incondicional.

Sin ustedes, sin su sacrificio y entrega, este logro no habría sido posible.

Con todo mi amor,,

Milena Arellano Arévalo

AGRADECIMIENTO

Primero que nada, le doy las gracias a mi madre, quien me acompañó en cada paso de mi camino y fue para mí una fuente continua de motivación y fortaleza, pese a no estar físicamente presente.

A mi padre, por su amor y apoyo incondicional, que aun en la distancia se mantuvo presente como guía fundamental para llegar hasta este momento.

A Kenny, Pablo y Erik, en particular, por su presencia en los períodos más complicados de mi vida estudiantil y por ofrecerme su apoyo genuino.

A mis profesores, el Ing. Carlos Vásquez y el Ing. Luis Suárez, por su acompañamiento y compromiso académico hasta la finalización de este proyecto.

Finalmente, te agradezco a ti Camilo Nogales, por ser mi apoyo incondicional en cada momento, por impulsarme a no rendirme durante este largo proceso y por estar siempre a mi lado, te amo hasta la eternidad.

Milena Arellano Arévalo

RESUMEN EJECUTIVO

Este documento se basó en la necesidad de examinar el rendimiento de las redes inalámbricas de última generación frente al aumento del requerimiento de servicios que ofrezcan alta capacidad, baja latencia y conectividad simultánea. Para ello, tuvo en cuenta la adición de la banda de 6 GHz al estándar IEEE 802.11ax. El propósito general fue valorar, comparativamente, el rendimiento de WiFi 6E en las bandas de 5 GHz y 6 GHz a través del análisis de parámetros teóricos y la realización de experimentos prácticos en un ambiente controlado. La metodología se desarrolló con un enfoque en cascada, abarcando las fases de análisis bibliográfico, diseño del ambiente de pruebas, aplicación de la infraestructura, realización de pruebas y evaluación de los resultados. Para ello se tuvieron en cuenta métricas como la latencia, el throughput, el jitter, la pérdida de paquetes, el ancho del canal y el tipo de modulación. Los resultados mostraron que la banda de 6 GHz tuvo progresos en estabilidad y menos interferencia, mientras que la banda de 5 GHz mostró un rendimiento adecuado pero restringido por la congestión espectral. También se encontraron discrepancias entre el rendimiento teórico que la norma establece y lo que realmente se observa en la práctica. Se concluyó, como principal conclusión, que WiFi 6E es una opción superior en términos técnicos para aplicaciones con alta demanda de datos, siempre que haya compatibilidad de infraestructura y disponibilidad regulatoria. Esto proporciona criterios técnicos significativos para su implementación en el futuro de redes inalámbricas.

Palabras clave: WiFi 6E, IEEE 802.11ax, 5 GHz, 6 GHz, rendimiento inalámbrico, redes WiFi.

ABSTRACT

This document was based on the need to examine the performance of next-generation wireless networks in light of the increasing demand for services offering high capacity, low latency, and simultaneous connectivity. To this end, it took into account the addition of the 6 GHz band to the IEEE 802.11ax standard. The overall purpose was to comparatively assess the performance of WiFi 6E in the 5 GHz and 6 GHz bands through the analysis of theoretical parameters and the conduct of practical experiments in a controlled environment. The methodology was developed using a waterfall approach, covering the phases of literature review, design of the test environment, implementation of the infrastructure, testing, and evaluation of the results. To this end, metrics such as latency, throughput, jitter, packet loss, channel width, and modulation type were taken into account. The results showed that the 6 GHz band made progress in stability and less interference, while the 5 GHz band showed adequate performance but was restricted by spectral congestion. Discrepancies were also found between the theoretical performance established by the standard and what is actually observed in practice. The results obtained in this study provide a basis for future research on the application of the 6 GHz band in wireless communication systems. The main conclusion was that WiFi 6E is a superior option in technical terms for high-data-demand applications, provided that infrastructure compatibility and regulatory availability exist. This provides meaningful technical criteria for its future implementation in wireless networks.

Keywords: WiFi 6E, IEEE 802.11ax, 5 GHz, 6 GHz, wireless performance, WiFi networks.

LISTA DE SIGLAS

AP. Access Point

ARCOTEL. Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

FCC. Federal Communications Commission

IEEE. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

Mbps. Megabits por segundo

MU-MIMO. Multiple Input Multiple Output

OFDM. Multiplexación por división de frecuencias ortogonales

OFDMA. Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales

QAM. Modulación de amplitud en cuadratura

SNR. Relación Señal-Ruido

TCP. Protocolo de Control de Transmisión

UDP. Protocolo de Datagramas de usuario

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS 11

ÍNDICE DE TABLAS 17

ÍNDICE DE FIGURAS 18

CAPÍTULO I ANTECEDENTES 22

1.1 Tema 22

1.2 Problema 22

1.3 Objetivos 24

1.3.1 Objetivo General 24

1.3.2 Objetivos Específicos 25

1.4 Alcance 25

1.5 Justificación 27

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 29

2.1 Fundamentos teóricos de redes inalámbricas 29

2.1.1 Evolución de los estándares WiFi 30

2.1.1.1 IEEE 802.11 30

2.1.1.2 IEEE 802.11a 30

2.1.1.3 IEEE 802.11b 31

2.1.1.4 IEEE 802.11g 31

2.1.1.5 IEEE 802.11n 31

2.1.1.6 IEEE 802.11ac 32

2.1.1.7 IEEE 802.11ax 32

2.1.2 Regulación del espectro inalámbrico 33

2.1.2.1 Regulación en Ecuador 33

2.1.2.2 Regulación en Estados Unidos 34

2.1.3 Regulación y espectro disponible para las bandas de 5 GHz y 6 GHz 35
2.1.3.1 Banda de 5 GHz 35
2.1.3.2 Banda de 6 GHz 36
2.2 Estructura de WiFi 6E 37
2.2.1 Bandas de frecuencia utilizadas WiFi 6 (5 GHz) y WiFi 6E (6 GHz) 37
2.2.1.1 Banda de 5 GHz para WiFi 6 37
2.2.1.2 Banda de 6 GHz para WiFi 6E 38
2.2.2 Ancho de banda y agregación de canales 39
2.2.2.1 Comparativa de anchos de banda en 5 GHz y 6 GHz 40
2.2.2.2 Impacto de la agregación de canales en la eficiencia del espectro 41
2.3 Modulación y esquemas de codificación 43
2.3.1 OFDMA: Ventajas en entornos congestionados 43
2.3.2 1024-QAM: Mejora en la capacidad de transmisión 45
2.4 Capa Física de Alta Eficiencia (HE PHY) 46
2.4.1 MU-MIMO 47
2.4.2 Beamforming y Ventajas en Redes Densas 48
2.4.3 Implementación de HE PHY en 5 GHz y 6 GHz 50
2.4.4 Control de acceso al medio en 5GHz y 6GHz 51
2.4.4.1 Control de Acceso en la Banda de 6 GHz 52
2.5 Evolución y Desafíos de las Redes WiFi 53
2.5.1 Comparativa de WiFi 6 y WiFi 6E 54
2.5.2 Congestión en la banda de 5 GHz: Causas e impacto en el desempeño 55
2.5.3 Necesidad del espectro de 6GHz 57
CAPÍTULO III DISEÑO 60
3.1 Análisis 60

3.1.1 Metodología 61
3.1.2 Situación actual 61
3.1.3 Características de la tecnología 62
3.2 Requerimientos del Sistema y Arquitectura 63
3.2.1 Requerimientos de los Stakeholders 64
3.2.2 Requerimientos del Sistema 66
3.2.3 Requerimientos de Arquitectura 68
3.3 Selección de Componentes 70
3.3.1 Selección de Equipos Terminales 71
3.3.2 Selección del Punto de Acceso 72
3.3.2.1 Selección del módulo inalámbrico del punto de acceso 73
3.3.3 Selección del Sistema Operativo 74
3.4 Desarrollo metodológico del diseño del sistema 75
3.4.1 Diseño del entorno experimental 75
3.4.1.1 Diagrama de bloques general 76
3.4.1.2 Diagrama de Bloques del Nodo Emisor (AP) 76
3.4.1.3 Diagrama de bloques del nodo Receptor 78
3.4.2 Configuración de los equipos 80
3.4.2.1 Configuración del nodo emisor 81
3.4.2.2 Configuración del nodo receptor 89
3.4.2.3 Validación del funcionamiento del sistema 94
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y VALIDACIÓN 97
4.1 Arquitectura y Metodología de Validación 98
4.1.1 Arquitectura Funcional de Evaluación 98
4.1.2 Diagrama de bloques de pruebas 100

4.1.3 Diagrama de bloques del análisis de resultados comparativos 101
4.2 Validación de Requerimientos de Arquitectura 102
4.2.1 Validación de Conectividad Inicial 102
4.2.1.1 Banda de 5GHz 102
4.2.1.2 Banda de 6GHz 105
4.2.2 Evaluación del Enlace TCP Básico 108
4.2.2.1 Banda de 5GHz 108
4.2.2.2 Banda de 6GHz 110
4.2.3 Análisis de Interferencia Estacionaria 111
4.2.3.1 Banda de 5GHz 112
4.2.3.2 Banda de 6GHz 113
4.2.4 Evaluación de Cobertura Estacionaria 113
4.2.4.1 Banda de 5GHz 114
4.2.4.2 Banda de 6GHz 115
4.2.5 Tabla Comparativa de Resultados 116
4.3 Validación de Requerimientos de Sistema 117
4.3.1 Rendimiento TCP 117
4.3.1.1 Banda de 5GHz 118
4.3.1.2 Banda de 6GHz 120
4.3.2 Rendimiento UDP con Tasas Progresivas 124
4.3.2.1 Banda de 5GHz 124
4.3.2.2 Banda de 6GHz 126
4.3.3 Identificación de Pérdidas bajo Sobrecarga UDP 129
4.3.3.1 Banda de 5GHz 129
4.3.3.2 Banda de 6GHz 131

4.3.4 Tabla Comparativa de Resultados 132
4.4 Escenarios End-to-End 133
4.4.1 Establecimiento del Enlace WiFi 134
4.4.1.1 Banda de 5GHz 134
4.4.1.2 Banda de 6GHz 136
4.4.2 Validación End-to-End con Carga de Tráfico 137
4.4.2.1 Banda de 5GHz 137
4.4.2.2 Banda de 6GHz 138
4.4.3 Tabla Comparativa de Resultados 139
4.5 Análisis Espectral mediante SDR 140
4.5.1 Captura de Señal WiFi en 5 GHz y 6 GHz mediante SDR 140
4.5.1.1 Banda de 5GHz 141
4.5.1.2 Banda de 6GHz 142
4.5.2 Análisis del Espectro en Ambas Bandas 143
4.5.2.1 Banda de 5GHz 143
4.5.2.2 Banda de 6GHz 144
4.5.3 Comparativa Física 5 GHz vs 6 GHz 145
4.6 Integración de los Resultados de Pruebas 146
4.7 Comparación Global frente al Estándar IEEE 802.11ax 148
4.7.1 Parámetros Teóricos del Estándar IEEE 802.11ax 148
4.7.2 Comparación Teórica vs Resultados Experimentales en 5 GHz 150
4.7.3 Comparación Teórica vs Resultados Experimentales en 6 GHz 152
4.7.4 Tabla Comparativa Global entre 5 GHz y 6 GHz 153
4.7.5 Evaluación de Cumplimiento, Variabilidad y Discrepancias 154
4.8 Análisis Técnico Integral del Comportamiento 156

4.8.1 Discusión de Métricas Críticas 156
4.8.2 Impacto de Interferencia y Densidad Espectral 158
4.8.3 Influencia del Ancho de Canal y Condiciones del Medio 159
4.8.4 Evaluación Integrada del Desempeño en 5 GHz y 6 GHz 160
Conclusiones y recomendaciones 163
Conclusiones 163
Recomendaciones 165
Bibliografía 167
Anexos 173
Anexo A: Guía de laboratorio 1 173
Desarrollo guía de laboratorio 1 174
Anexo B: Guía de laboratorio 2 177
Desarrollo guía de laboratorio 2 178
Anexo C: Guía de laboratorio 3 183
Desarrollo guía de laboratorio 3 185
Anexo D: Guía de laboratorio 4 187
Desarrollo guía de laboratorio 4 189
Anexo E: Guía de laboratorio 5 191
Desarrollo guía de laboratorio 5 192
Anexo F: Pruebas de señalización SIP con SIPp 196
Anexo G: Limitaciones del equipo Intel AX210 198
Anexo H: Encuesta para obtención de requerimientos de los stakeholders 200

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Comparativa de canales en las bandas de 5GHz y 6GHz* 41

Tabla 2 *Características del 802.11ax en las bandas de 5GHz y 6GHz* 62

Tabla 3 *Abreviatura de los requerimientos* 64

Tabla 4 *Descripción de Stakeholders* 65

Tabla 5 *Requerimientos de Stakeholders* 65

Tabla 6 *Requerimientos del sistema* 67

Tabla 7 *Requerimientos de arquitectura* 69

Tabla 8 *Análisis comparativo del cliente* 71

Tabla 9 *Análisis comparativo para el AP* 72

Tabla 10 *Análisis comparativo de antenas PCIe* 73

Tabla 11 *Análisis comparativo para el sistema operativo de la SBC* 75

Tabla 12 *Tabla comparativa de requerimientos de arquitectura* 116

Tabla 13 *Tabla comparativa de requerimientos de sistema* 133

Tabla 14 *Tabla comparativa de escenarios End-to-End* 139

Tabla 15 *Comparación global entre 5GHz y 6GHz* 154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Árbol de problemas* 24

Figura 2 *Diagrama de bloques* 27

Figura 3 *Bandas de Frecuencia en 5GHz y 6GHz* 39

Figura 4 Funcionamiento de OFMA 45

Figura 5 *Funcionamiento de 1024 QAM* 46

Figura 6 *Adaptador QGOO AXE5400* 72

Figura 7 *Raspberry Pi CM 4* 73

Figura 8 *Módulo Intel Wi-Fi 6E AX210* 74

Figura 9 *Diagrama de bloques del sistema completo* 76

Figura 10 *Diagrama de bloques del nodo emisor* 77

Figura 11 *Diagrama de flujo del nodo emisor* 78

Figura 12 *Diagrama de bloques del nodo receptor* 79

Figura 13 *Diagrama de flujo para el nodo receptor* 80

Figura 14 *Módulo Intel AX210 montado sobre adaptador M.2 a PCIe* 82

Figura 15 *Conjunto ensamblado: IO Board + CM4 + adaptador PCIe con AX210* 82

Figura 16 *Posición BOOT sobre la IO Board* 83

Figura 17 *Instalación de la imagen con el software Raspberry Pi Imager* 84

Figura 18 *Interfaz inalámbrica wlp1s0 detectada mediante el comando ip add* 85

Figura 19 *Identificación del dispositivo físico phy0 con el comando iw dev* 86

Figura 20 *Capacidades del dispositivo incluyendo soporte para modo AP y canales habilitados* 86

Figura 21 *Archivo de configuración del hostapd* 87

Figura 22 *Interfaz en modo AP* 88

Figura 23 *Resultado de la ejecución manual del modo AP con hostapd, mostrando inicio exitoso del servicio.* 88

Figura 24 *Detección de la red Test5GHz* 89

Figura 25 *Salida en consola, confirmando compatibilidad con bandas de 2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz.* 90

Figura 26 *Detección y conexión exitosa a la red "Test5GHz" desde el cliente Windows.* 91

Figura 27 *Resultado del comando ping desde el cliente hacia el emisor.* 91

Figura 28 Secuencia de negociación y establecimiento del enlace Wi-Fi 92

Figura 29 *Registro de inicialización y autenticación del punto de acceso* 93

Figura 30 *Ejecución del comando iperf3 -c en Windows hacia el nodo emisor.* 94

Figura 31 *Ejecución de iperf3 en modo servidor y cliente.* 95

Figura 32 *Captura de paquetes mediante Wireshark y tshark durante pruebas preliminares.* 96

Figura 33 *Arquitectura del sistema* 99

Figura 34 *Flujograma para el bloque de pruebas* 100

Figura 35 *Diagrama de flujo para los resultados comparativos* 101

Figura 36 *Validación del enlace en la banda de 5 GHz* 103

Figura 37 *Registro de hostapd operando como punto de acceso en la banda de 5 GHz* 103

Figura 38 *Resultado del comando ipconfig donde se observa la asignación IPv4 del cliente.* 104

Figura 39 *Tabla ARP del cliente mostrando el mapeo directo hacia el punto de acceso.* 105

Figura 40 *Validación del enlace en la banda de 6 GHz* 105

Figura 41 *Interfaz del servidor de 6GHz* 106

Figura 42 *Resultado del comando ipconfig mostrando los parámetros IPv4 asignados en la banda de 6 GHz.* 106

Figura 43 *Tabla ARP del cliente mostrando el mapeo directo hacia el punto de acceso.* ..107

Figura 44 *Resultados de la prueba TCP en modo descarga.*.....108

Figura 45 *Resultados de la prueba TCP en modo subida.*.....109

Figura 46 *Rendimiento TCP ascendente en 6 GHz.*.....110

Figura 47 *Rendimiento TCP descendente en 6 GHz.*.....111

Figura 48 *Resultado del escaneo de redes.*.....112

Figura 49 *Resultado del escaneo de redes.*.....113

Figura 50 *Parámetros de señal del enlace obtenidos mediante el comando netsh wlan show interfaces.*.....114

Figura 51 *Parámetros de cobertura reportados por la interfaz inalámbrica operando en 6 GHz.* 115

Figura 52 *Resultados de las corridas TCP en modo descarga (A) primera corrida, (B) segunda corrida y (C) tercera corrida*.....118

Figura 53 *Resultados de las corridas TCP en modo subida (A) primera corrida, (B) segunda corrida y (C) tercera corrida*.....119

Figura 54 *Gráfica E/S de Wireshark para sesiones TCP: bloques de descarga (azul) y subida (gris) con baja incidencia de errores.*.....120

Figura 55 *Resultados de las corridas TCP en modo descarga (A) primera corrida, (B) segunda corrida y (C) tercera corrida*.....121

Figura 56 *Resultados de las corridas TCP en modo subida (A) primera corrida, (B) segunda corrida y (C) tercera corrida*.....122

Figura 57 *Gráfica E/S de Wireshark para sesiones TCP: bloques de descarga (negra) y subida (azul) con baja incidencia de errores.* 123

Figura 58 *Resultados UDP en iperf3 para 5 GHz: (a) 150 Mb/s, (b) 300 Mb/s, (c) 450 Mb/s.* 124

Figura 59 *Gráfica E/S de Wireshark para sesiones UDP* 126

Figura 60 *Resultados UDP en iperf3 para 5 GHz: (a) 150 Mb/s, (b) 300 Mb/s, (c) 450 Mb/s.* 127

Figura 61 *Gráfica E/S de Wireshark para sesiones UDP* 128

Figura 62 *Resultados de pérdidas bajo sobrecarga UDP en modo reverse: (A) 150 Mb/s, (B) 300 Mb/s, (C) 450 Mb/s.* 129

Figura 63 *Resultados de pérdidas bajo sobrecarga UDP en modo reverse: (A) 800 Mb/s, (B) 1000 Mb/s, (C) 1200 Mb/s.* 131

Figura 64 *Registro del punto de acceso (hostapd)* 135

Figura 65 *Estado de conexión del cliente Windows* 135

Figura 66 *Estado de conexión del cliente Windows* 136

Figura 67 *Resultado de la validación end-to-end en 5 GHz con una tasa nominal de 300 Mb/s durante 30 s.* 138

Figura 68 *Rendimiento con carga de 500 Mbit/s en 6 GHz* 138

Figura 69 *Captura en SDRangel de la señal WiFi 5 GHz (f = 5.745 GHz).* 142

Figura 70 *Captura en SDRangel de la señal WiFi 6 GHz (f = 5.955 GHz)* 143

Figura 71 *Análisis del Espectro 5 GHz* 144

Figura 72 *Análisis del Espectro 6 GHz* 145

CAPÍTULO I ANTECEDENTES

1.1 Tema

EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO DE REDES WIFI 6E MEDIANTE ESTUDIO COMPARATIVO EN LAS BANDAS DE 5 GHZ Y 6 GHZ DE PARÁMETROS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS

1.2 Problema

La comunicación es esencial para la comunidad, ya que los seres humanos buscan constantemente maneras de entenderse y transmitir información de manera efectiva. Este impulso ha llevado al desarrollo y evolución de las comunicaciones inalámbricas, que han avanzado significativamente en las últimas décadas. Hoy en día, la red de comunicaciones de próxima generación no solo ofrece mayores velocidades de transferencia de datos y capacidad, sino que también facilita la interacción en tiempo real entre personas y miles de millones de dispositivos inteligentes (PALMA, n.d.).

El uso creciente de servicios en tiempo real como telefonía, música, video y juegos en internet, así como la transmisión de video en alta resolución sin compresión en los hogares, ha incrementado exponencialmente el número de usuarios en redes WiFi. Las bandas de frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz, ampliamente utilizadas para diversas aplicaciones de WiFi desde la década de 1990, han llegado a un punto de saturación debido a la gran cantidad de dispositivos y a la interferencia generada entre ellos. Aunque la banda de 5 GHz ofrece ventajas sobre la de 2.4 GHz en términos de capacidad, también enfrenta limitaciones en escenarios de alta densidad de usuarios y demanda de ancho de banda. Estas restricciones han llevado a la exploración de nuevas frecuencias como la de 6 GHz, que ofrece un espectro expandido con canales más amplios y menos interferencia, lo que se traduce en conexiones más estables y rápidas (Sociedad, Leyva Bravo, David, & Casanova, 2016).

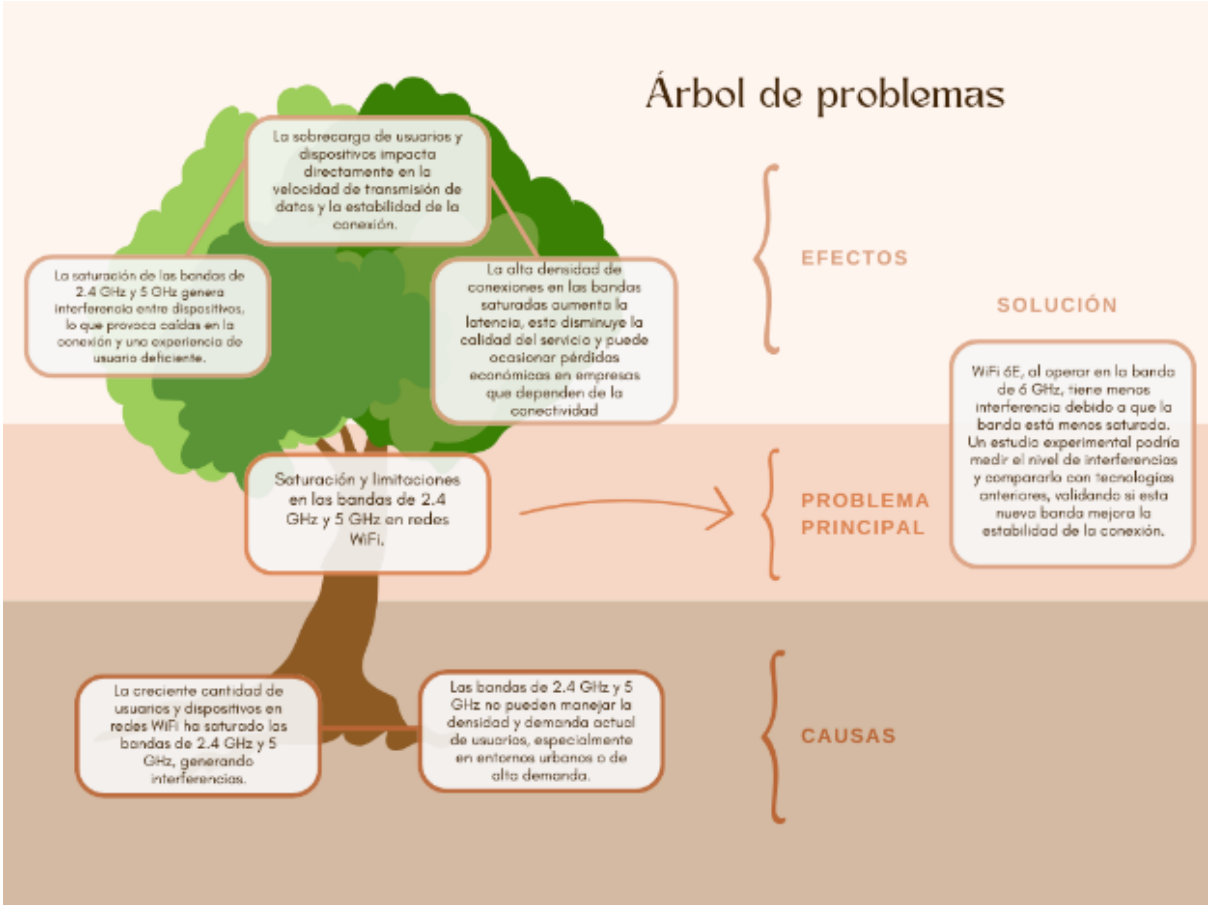
En 2020, casi dos décadas después de la última gran asignación de espectro en 2003, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos aprobó el uso de 1200 MHz en la banda de 6 GHz para tecnologías sin licencia, permitiendo su uso para redes WiFi de alta capacidad (Wi-Fi Alliance, n.d.). Sin embargo, en Ecuador, la regulación de esta banda todavía está siendo evaluada. La Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) está evaluando la posibilidad de incluirla con fines comerciales, dado que ha identificado su habilidad para mejorar la infraestructura de telecomunicaciones nacional. (ARCOTEL, 2021).

Para comprender las ventajas y las limitaciones de la tecnología WiFi 6E (802.11ax) en la banda de 6 GHz, es necesario analizar y comparar su rendimiento en las bandas de 5 GHz y 6 GHz bajo condiciones de alta demanda. Este estudio permitirá observar cómo el uso de la banda de 6 GHz puede ofrecer mejoras significativas en cuanto a cobertura, ancho de banda, interferencia y latencia, proporcionando datos valiosos para futuras decisiones regulatorias y aplicaciones tecnológicas en el país.

Para identificar las causas y efectos se ha realizado un árbol de problemas como se indica en la **Figura 1**.

Figura 1

Árbol de problemas



Nota. En el gráfico indica el árbol de problemas de causa y efectos. Fuente: Autoría

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño del estándar WiFi 6E (802.11ax) en las bandas de 5 GHz y 6 GHz mediante un estudio comparativo de parámetros teóricos y prácticos con el fin de observar su comportamiento en distintos entornos y determinar sus ventajas y limitaciones en aplicaciones de alta demanda de datos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio bibliográfico sobre WiFi 6E, incluyendo sus características técnicas, ventajas, desventajas y aplicaciones actuales para el análisis de las bandas de 5 y 6 GHz
- Diseñar la metodología para la configuración de los equipos de pruebas.
- Realizar pruebas prácticas que permitan medir el rendimiento del WiFi 6E en condiciones reales.
- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas, comparándolos con los requisitos establecidos por la norma 802.11ax en las bandas de 5 y 6 GHz

1.4 Alcance

La metodología en cascada de este proyecto comprende cinco etapas: análisis, diseño, implementación, pruebas y evaluación. En la etapa de análisis, se realizará un estudio bibliográfico sobre WiFi 6E y WiFi 6. En la etapa de diseño, se planificará el entorno experimental para ambas bandas. La implementación consistirá en configurar el entorno de pruebas según lo diseñado. En la etapa de pruebas, se evaluará el desempeño de WiFi 6 y WiFi 6E. Por último, en la evaluación se examinarán los resultados para establecer las ventajas y desventajas de cada banda.

La fase de análisis, que consiste en la ejecución de un estudio bibliográfico detallado sobre el estándar WiFi 6E (802.11ax) en la banda de 6 GHz, es el primer paso del proyecto. Para entender a fondo sus atributos técnicos, beneficios, inconvenientes y usos actuales, se lleva a cabo una investigación con documentación técnica y científica. Este análisis proporcionará el marco teórico necesario para comprender los parámetros relevantes en la eficiencia y rendimiento de WiFi 6E en comparación con el WiFi 6 original (5 GHz). Esta base teórica será crucial para fundamentar las etapas posteriores del proyecto.

En la segunda etapa del proyecto denominado diseño, se establecerá la configuración del entorno experimental y se planificará la disposición de los equipos de prueba, incluyendo puntos de acceso WiFi 6E y WiFi 6 original. Se desarrollará una metodología de pruebas que abarcará aspectos clave como la cobertura, ancho de banda, interferencia y latencia. Estos parámetros permitirán evaluar el comportamiento de ambas tecnologías en condiciones controladas y simular entornos de alta demanda de datos. La planificación asegurará que los equipos se configuren de forma que los resultados sean representativos y comparables entre ambas bandas.

Siguiendo la metodología en cascada, la tercera etapa del proyecto llamada implementación consistirá en la configuración física del entorno de pruebas según los requisitos establecidos en la etapa de diseño. Se montarán los equipos y se configurarán los puntos de acceso WiFi 6E y WiFi 6 original. Asimismo, se llevará a cabo una primera verificación de la infraestructura de pruebas para confirmar que los dispositivos funcionan según lo previsto y se registrará la instalación para asegurar que las pruebas puedan repetirse.

En la próxima fase, que se llama pruebas, se llevarán a cabo ensayos experimentales que incorporarán las siguientes mediciones: la cobertura de señal, el rendimiento de la red al gestionar diversos dispositivos, la interferencia en distintas condiciones de carga y el retraso en el envío de datos. Estas pruebas se realizarán en las bandas de 5 GHz (WiFi 6 original) y 6 GHz (WiFi 6E), posibilitando así un análisis comparativo. Las métricas cuantitativas de esta fase ofrecerán una perspectiva exacta del rendimiento y la actuación de cada agrupación.

En la fase final del proyecto, llamada evaluación, se hará un análisis y comparación de los datos obtenidos en las pruebas con los parámetros que la norma IEEE 802.11ax ha establecido, con el propósito de ver las discrepancias entre el rendimiento experimental y el teórico de WiFi 6 y WiFi 6E. Este análisis permitirá identificar cualquier diferencia significativa y ofrecerá conclusiones sobre la efectividad de la tecnología en la banda de 6

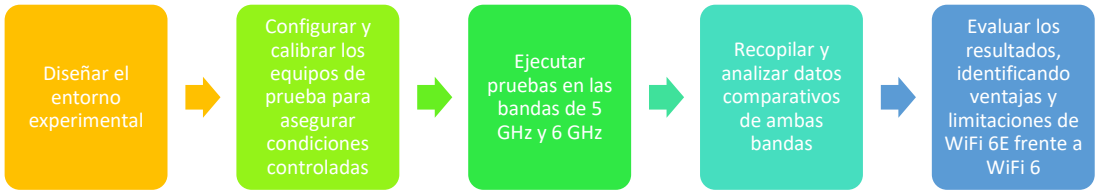
GHz frente a la de 5 GHz. Además, se desarrollarán recomendaciones sobre el uso óptimo de WiFi 6E en aplicaciones de alta demanda, contribuyendo a un mejor entendimiento de sus ventajas y limitaciones.

El proyecto se llevará a cabo siguiendo el diagrama de bloques presentado en la **Figura 2**. Este diagrama proporciona una visión clara y estructurada de las etapas del proyecto, garantizando que cada etapa se ejecute de manera ordenada y eficiente.

Diagrama de bloques

Figura 2

Diagrama de bloques



Nota. El gráfico indica el diagrama de bloques a seguir en el proyecto. Fuente: Autoría

1.5 Justificación

Esta investigación tiene su justificación principalmente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 9: industria, innovación e infraestructura. Este objetivo tiene como propósito la creación de infraestructuras, el impulso de una industrialización que sea sostenible e inclusiva y el fomento de la innovación. Aquí encaja a la perfección el estudio y desarrollo del estándar WiFi 6E, pues se enfoca en una tecnología nueva que tiene la capacidad de optimizar la infraestructura de comunicación y fomentar la innovación en el ámbito tecnológico. (Organización de las Naciones Unidas en Ecuador, 2021).

La justificación tecnológica de esta investigación se basa en el artículo 94, ítem 4, de la Ley Orgánica de Telecomunicaciones, que establece: " Desarrollo tecnológico e inversión.- Se debe promover el desarrollo y la utilización de nuevos servicios, redes y tecnologías de la información y las comunicaciones y su acceso universal a toda la población y fomentar la

inversión pública y privada. "(Gobierno del Ecuador, 2015). La importancia de fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico en el sector ecuatoriano de las telecomunicaciones es enfatizada por esta disposición, que respalda directamente la investigación y creación de tecnologías nuevas con el propósito de optimizar la infraestructura e asegurar que todos los ciudadanos tengan acceso a las telecomunicaciones en Ecuador.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Este capítulo analizó la base teórica asociada con la tecnología WiFi 6E, explicando sus propiedades técnicas, su desarrollo a lo largo de la historia y su operación en comparación con las versiones previas del estándar IEEE 802.11. Se detalló el empleo de las bandas habilitadas para esta tecnología, con énfasis en la banda de 6 GHz, que fue la mayor innovación respecto a sus antecesoras. Asimismo, se examinaron elementos técnicos como la modulación 1024-QAM, el ancho de banda y la asignación de canales, así como el empleo de tecnologías avanzadas, como MU-MIMO y OFDMA, que están incluidas en la Capa Física de Alta Eficiencia (HE PHY). Por último, se ofreció un análisis comparativo entre las bandas de 5 GHz y 6 GHz para identificar los avances que WiFi 6E ha traído consigo y justificar su implementación en situaciones con una gran demanda de datos y conectividad simultánea.

2.1 Fundamentos teóricos de redes inalámbricas

Las redes inalámbricas experimentaron una evolución significativa en las últimas décadas, permitiendo una conectividad cada vez más rápida, estable y eficiente. Desde los primeros estándares del protocolo IEEE 802.11 hasta las versiones más recientes como WiFi 6 y WiFi 6E, la optimización del espectro radioeléctrico ha sido clave para mejorar el desempeño de las comunicaciones inalámbricas. El crecimiento exponencial en el número de dispositivos conectados provocó un aumento en la congestión dentro de la banda de 5 GHz, lo que ha impulsado la necesidad de habilitar el espectro de 6 GHz para garantizar un mejor rendimiento en redes de alta densidad. En este contexto, la gestión y regulación del espectro desempeñaron un papel fundamental en la asignación y uso eficiente de estas bandas de frecuencia. En la presente sección se examinó la evolución de los estándares WiFi, la comparativa entre WiFi 6 y WiFi 6E, los desafíos asociados a la congestión de la banda de 5

GHz, la relevancia estratégica del espectro de 6 GHz y los marcos regulatorios que definieron su adopción a nivel global.

2.1.1 Evolución de los estándares WiFi

En los últimos veinte años, el estándar IEEE 802.11, comúnmente conocido como WiFi, ha evolucionado a 2 Mbps a velocidades superiores gigabits, lo que supone un aumento de 100 veces en el rendimiento. El estándar ha avanzado continuamente mediante la introducción de nuevos protocolos como 802.11n, 802.11ac y 802.11ax (WiFi 6) (Abdelmajid, 2019).

2.1.1.1 IEEE 802.11

802.11 es el primer estándar WLAN, lanzado en 1997. Especifica una interfaz inalámbrica entre un cliente inalámbrico y una estación base o entre dos clientes inalámbricos. La velocidad de datos es de hasta 2 Mbps operando en la banda ISM de 2,4 GHz. El esquema de modulación es Espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS) o Espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), mientras que se utilizan WEP o WPA para garantizar la seguridad.(Piva et al., 2022)

2.1.1.2 IEEE 802.11a

El estándar IEEE 802.11a, aprobado en 1999, operó en la banda de 5 GHz y utilizó la técnica de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), la cual permitió dividir la señal en múltiples subportadoras para mejorar la eficiencia espectral. Su velocidad máxima teórica fue de 54 Mbps, pero su rendimiento real se mantuvo cerca de 20 Mbps en condiciones reales. Su alcance es más limitado debido a que las frecuencias elevadas se atenúan con mayor intensidad, pese a que proporciona una velocidad más alta que la de su predecesor. Su adopción inicial fue restringida debido a su elevado precio y a su escasa compatibilidad con los dispositivos existentes. Sin embargo, su rendimiento en la banda de 5

GHz fue eficaz para evitar interferencias, debido a que tenía 12 canales no solapados. (Tektronix, 2014).

2.1.1.3 IEEE 802.11b

El estándar IEEE 802.11b fue aprobado en 1999 como una mejora significativa sobre la versión original del protocolo IEEE 802.11 de 1997. Operó en la banda de 2.4 GHz y utilizó una técnica de modulación de espectro ensanchado conocida como DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), lo que le permitió alcanzar una velocidad teórica máxima de 11 Mbps. A pesar de su menor velocidad comparada con 802.11a, ofreció una mayor cobertura gracias a la menor atenuación en la banda de 2.4 GHz, lo que facilitó su adopción en entornos residenciales y empresariales. Este estándar se convirtió en uno de los más populares en la etapa inicial del despliegue masivo de redes WiFi debido a su bajo costo y alta compatibilidad con los dispositivos existentes de la época (Gast, 2005).

2.1.1.4 IEEE 802.11g

El estándar IEEE 802.11g fue aprobado en 2003 como una evolución de 802.11b. Al igual que su predecesor, operó en la banda de 2.4 GHz, pero incorporó la técnica de modulación OFDM, previamente utilizada en 802.11a, lo que permitió alcanzar velocidades teóricas de hasta 54 Mbps. Esta mejora técnica ofreció una combinación entre el mayor alcance de 802.11b y la alta velocidad de 802.11a, haciéndolo compatible con dispositivos más antiguos mediante un mecanismo de retrocompatibilidad. Su adopción se vio favorecida por su buen equilibrio entre rendimiento y cobertura, convirtiéndose rápidamente en el nuevo estándar dominante para redes WiFi en hogares y empresas durante la primera mitad de la década de 2000 (Gast, 2005).

2.1.1.5 IEEE 802.11n

El estándar IEEE 802.11n fue ratificado en 2009 como una respuesta a la creciente demanda de velocidades más altas y una mejor cobertura en redes inalámbricas. Operó tanto

en la banda de 2.4 GHz como en la de 5 GHz, y se caracterizó por la introducción de la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), que permitió el uso de múltiples antenas para transmitir y recibir datos simultáneamente. Esto incrementó significativamente la capacidad de transmisión, alcanzando velocidades teóricas de hasta 600 Mbps mediante el uso de hasta cuatro flujos espaciales y canales de 40 MHz. Asimismo, incorporó técnicas de agregación de tramas y codificación avanzada, lo cual mejoró la eficiencia y redujo la latencia. IEEE 802.11n representó un cambio significativo en el diseño de redes WiFi, al proporcionar un equilibrio entre velocidad, alcance y confiabilidad, consolidándose como una de las versiones más ampliamente adoptadas a nivel global (Perahia & Stacey, 2013).

2.1.1.6 IEEE 802.11ac

El estándar IEEE 802.11ac, conocido comercialmente como WiFi 5, fue aprobado en 2013 y marcó una mejora significativa en el rendimiento de las redes inalámbricas, operando exclusivamente en la banda de 5 GHz. La adopción de modulaciones de 256-QAM y canales más anchos de 80 y 160 MHz en este estándar posibilitó la obtención de velocidades teóricas que sobrepasan el Gbps. Asimismo, incrementó la capacidad de MIMO al incluir MU-MIMO (Multi-User MIMO), lo que permitió que se transmitiera a varios dispositivos al mismo tiempo y se optimizó así la eficacia en contextos con una elevada concentración de usuarios. Estas propiedades convirtieron a 802.11ac en una solución sólida para aplicaciones que requerían un ancho de banda elevado, por ejemplo: videojuegos online, streaming de video en definición alta y ambientes empresariales exigentes. (Perahia & Stacey, 2013).

2.1.1.7 IEEE 802.11ax

El estándar IEEE 802.11ax, conocido como WiFi 6, fue aprobado en el año 2021 como una evolución del protocolo IEEE 802.11ac. Su diseño se centró en mejorar el rendimiento en entornos con alta densidad de dispositivos, como aeropuertos, estadios o edificios inteligentes. A diferencia de versiones anteriores, 802.11ax operó en ambas bandas: 2.4 GHz

y 5 GHz, lo cual amplió su aplicabilidad. Se incluyeron tecnologías de vanguardia, como OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal), que posibilita la división de canales en subcanales para atender a varios usuarios al mismo tiempo, y MU-MIMO bidireccional, lo cual optimiza considerablemente la capacidad de la red y la eficiencia espectral.

Además, se añadieron métodos como Target Wake Time (TWT), cuyo objetivo es mejorar el uso de energía en los dispositivos IoT, y BSS Coloring, cuyo propósito es disminuir las interferencias entre celdas cercanas.. Bajo condiciones óptimas, gracias a estas mejoras, se logró llegar a velocidades por encima de 9.6 Gbps, experimentando una latencia más baja y una estabilidad superior en conexiones simultáneas. En términos generales, IEEE 802.11ax marcó un hito para las redes inalámbricas actuales al dar prioridad no solo a la velocidad, sino también a la robustez, la eficiencia y la escalabilidad del canal de comunicación. (IEEE Std 802.11ax, 2021).

2.1.2 Regulación del espectro inalámbrico

La regulación del espectro inalámbrico es esencial para garantizar el uso eficiente y equitativo de este recurso limitado, permitiendo la coexistencia de múltiples servicios de telecomunicaciones y promoviendo la innovación tecnológica. En un contexto marcado por el crecimiento acelerado de dispositivos inalámbricos y aplicaciones de alto consumo de datos, la adecuada administración del espectro se volvió crucial para satisfacer las crecientes demandas de conectividad y fomentar la innovación tecnológica.

2.1.2.1 Regulación en Ecuador

En Ecuador, la administración, regulación y control del espectro radioeléctrico están a cargo de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). Esta gestión se enmarcó en lo establecido por La Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT) a cuál definió los principios legales que garantizaron el acceso equitativo y promovieron el uso

eficiente de este recurso en función del desarrollo social, económico y tecnológico del país (Ministerio de Telecomunicaciones, 2019). La Constitución ecuatoriana garantiza el derecho de acceso al espectro bajo condiciones igualitarias, categorizando su uso en:

- **Espectro de uso libre:** Bandas disponibles para el público sin necesidad de un título habilitante, utilizadas en dispositivos como redes locales inalámbricas (RLAN), sistemas de alarma y sensores de movimiento.
- **Espectro para uso determinado en bandas libres (UDBL):** Bandas destinadas a servicios específicos o redes privadas que requieren un registro previo (ARCOTEL, 2018).

Estas regulaciones aseguran que tanto los sectores públicos como privados puedan aprovechar el espectro de manera eficiente, fomentando el despliegue de tecnologías como Wi-Fi en áreas rurales y urbanas.

2.1.2.2 Regulación en Estados Unidos

En Estados Unidos, la gestión del espectro es compartida entre la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), que regula entidades no gubernamentales, y la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA), encargada de asignaciones para agencias federales (1Library, 2016). Este modelo dual hace posible equilibrar las exigencias de las empresas y del gobierno. Con el objetivo de optimizar el uso del espectro y fomentar la innovación en tecnología, la FCC ha puesto en práctica estrategias dinámicas en los últimos años, como la creación de mercados secundarios y el alquiler de frecuencias. Se evidencia el empeño por prevenir interferencias perjudiciales y optimizar la utilización del espectro mediante la adopción de acciones como permitir dispositivos inalámbricos en "espacios en blanco" dentro de los canales televisivos e implementar modalidades de arrendamiento, por ejemplo el "spectrum manager leasing".

2.1.3 Regulación y espectro disponible para las bandas de 5 GHz y 6 GHz

La regulación del espectro radioeléctrico para las bandas de 5 GHz y 6 GHz es crucial para garantizar el uso eficiente de estas frecuencias y permitir el despliegue de tecnologías avanzadas como WiFi 6 y WiFi 6E. Estas bandas jugaron un papel estratégico en entornos con alta densidad de usuarios, donde las redes enfrentaron desafíos como saturación, interferencias y la necesidad de mayores anchos de banda. La disponibilidad de espectro adicional, así como la armonización regulatoria entre países, determinó la capacidad de adopción efectiva de estas tecnologías.

2.1.3.1 Banda de 5 GHz

La banda de 5 GHz está regulada para su uso en aplicaciones tanto con licencia como sin licencia. En Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) establece que las bandas de 5 GHz pueden ser utilizadas para aplicaciones como enlaces punto a punto, punto a multipunto y sistemas móviles. Estas bandas incluyen:

- 5150–5250 MHz
- 5250–5350 MHz
- 5470–5725 MHz
- 5725–5850 MHz

En Estados Unidos, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) regula esta banda bajo las subbandas U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure), dividiéndola en subbandas con restricciones específicas en cuanto a potencia, operación en exteriores y mitigación de interferencias con servicios como radares meteorológicos y aeronáuticos (FCC, 2021).

En la Unión Europea, los países adoptaron una regulación que habilitó parcialmente esta banda, especialmente los segmentos de 5150 a 5350 MHz y de 5470 a 5725 MHz, bajo

condiciones técnicas establecidas por la Comisión Europea, permitiendo su uso para redes inalámbricas de área local (European Commission, 2021)

2.1.3.2 Banda de 6 GHz

La banda de 6 GHz representó una expansión sustancial para redes inalámbricas modernas, al añadir 1200 MHz adicionales de espectro, lo que permitió configuraciones de canales más amplios (80 y 160 MHz) y una mayor capacidad para dispositivos de alta demanda. Sin embargo, su regulación varió significativamente entre regiones.

En Estados Unidos, la FCC liberó en 2020 la banda completa de 5.925 a 7.125 GHz para uso sin licencia, autorizando 14 canales de 80 MHz y 7 de 160 MHz. Para proteger a los servicios licenciados existentes, se estableció el uso de sistemas automatizados de coordinación de frecuencias (*Automated Frequency Coordination*, AFC) para dispositivos de potencia estándar (FCC, 2020).

En la Unión Europea, únicamente se habilitó el sector inferior de la banda (5.925–6.425 GHz) para uso no licenciado, mientras que los sectores superiores permanecieron bajo evaluación para asegurar su compatibilidad con servicios primarios como los enlaces fijos y satelitales. (EUROPEAN COMMISSION, 2021).

Algunas naciones de América Latina demostraron progresos notables. Brasil fue el primero en liberar la totalidad de la banda para uso no licenciado en 2020, con condiciones técnicas acordes a las sugerencias de la UIT (ANATEL, 2020). Colombia, a través del Ministerio TIC, habilitó el uso en interiores desde 2021, bajo un esquema de acceso libre para redes de corto alcance (Ministerio TIC Colombia, 2021). México también aprobó el uso completo del espectro para redes WiFi 6E, destacándose como uno de los países más avanzados de la región en esta materia (Wi-Fi Alliance, 2021b) .

En Ecuador, la banda de 6 GHz permaneció sin regulación específica hasta el cierre del presente estudio. Aunque la ARCOTEL estableció condiciones claras para la banda de 5

GHz, el espectro entre 5.925 y 7.125 GHz seguía en fase de análisis para su eventual incorporación como parte del uso libre o determinado, lo cual condicionó el despliegue nacional de tecnologías como WiFi 6E.

2.2 Estructura de WiFi 6E

WiFi 6 y su extensión WiFi 6E representan un avance significativo en las redes inalámbricas, mejorando la eficiencia, capacidad y rendimiento en comparación con generaciones anteriores. Estas tecnologías optimizan el uso del espectro radioeléctrico, mejorando la aplicación de las bandas de 5 GHz y 6 GHz para ofrecer conexiones más estables y rápidas en zonas con una elevada concentración de dispositivos. La estructura de frecuencias es un rasgo fundamental de WiFi 6 y WiFi 6E, que permite reducir la saturación y mejorar el servicio. Asimismo, el uso de anchos de banda más amplios y la técnica de agrupamiento de canales han permitido que aumenten las tasas de transferencia de datos y que la eficiencia espectral mejore. En este capítulo, se analizarán las bandas de frecuencia utilizadas en estas tecnologías, la comparativa entre los anchos de banda en 5 GHz y 6 GHz, así como el impacto de la agregación de canales en la optimización del espectro disponible.

2.2.1 Bandas de frecuencia utilizadas WiFi 6 (5 GHz) y WiFi 6E (6 GHz)

WiFi 6 (802.11ax) y su extensión WiFi 6E introducen mejoras significativas en el rendimiento inalámbrico, aprovechando bandas de frecuencia clave para maximizar la capacidad y reducir la interferencia. Estas bandas se encuentran en los rangos de 5 GHz y 6 GHz, permitiendo un espectro adicional y más opciones para la configuración de redes avanzadas.

2.2.1.1 Banda de 5 GHz para WiFi 6

WiFi 6 utiliza la banda de 5 GHz para proporcionar conexiones más rápidas y estables en comparación con la banda de 2.4 GHz. Esta banda está dividida en bloques conocidos como U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure):

- **U-NII-1 (5150-5250 MHz):** Uso principal en interiores, con restricciones de potencia para minimizar interferencias.
- **U-NII-2A (5250-5350 MHz):** Uso sujeto a la detección de radar (DFS), permitiendo coexistencia con sistemas licenciados.
- **U-NII-2C/2E (5470-5725 MHz):** Similar a U-NII-2A, con ampliaciones de uso para exteriores.
- **U-NII-3 (5725-5850 MHz):** Mayor flexibilidad para aplicaciones exteriores y conexiones punto a punto.

Esta segmentación del espectro buscó equilibrar la eficiencia del uso sin licencia con la protección de servicios primarios operando en las mismas bandas (IEEE Std 802.11ax, 2021)

2.2.1.2 Banda de 6 GHz para WiFi 6E

WiFi 6E extiende las capacidades de WiFi 6 al operar en la banda de 6 GHz (5925-7125 MHz), lo que representa una adición significativa de espectro. Esta banda se divide en tres rangos:

Las bandas utilizadas en WiFi 6E se dividen en tres rangos principales:

- **Bajo 6 GHz** (5925 MHz - 6425 MHz)
- **Medio 6 GHz** (6425 MHz - 6875 MHz)
- **Alto 6 GHz** (6875 MHz - 7125 MHz)

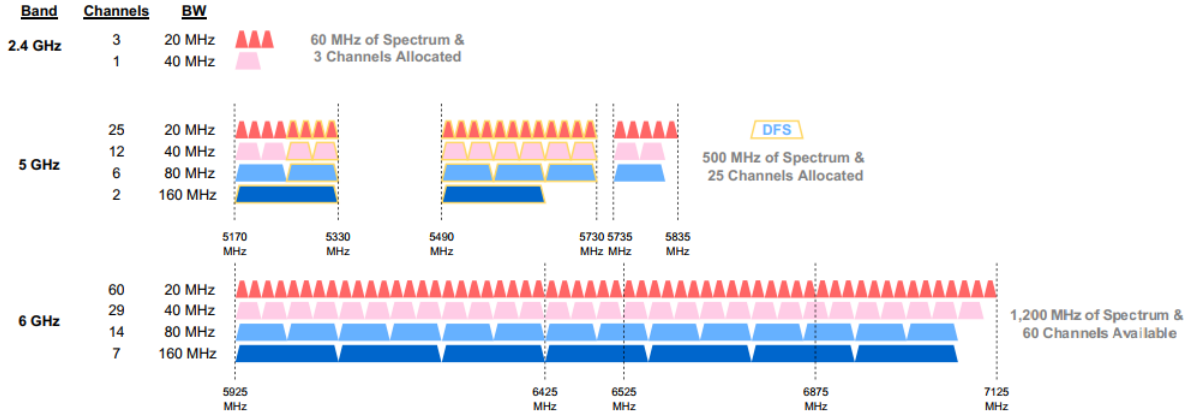
Dependiendo del país o región, las regulaciones pueden permitir el uso de uno o más de estos rangos de frecuencias. En muchos lugares, WiFi 6E ofrece hasta 14 canales adicionales de 80 MHz y 7 canales de 160 MHz, lo que mejora significativamente la eficiencia y el rendimiento en redes de alta densidad (Wi-Fi Alliance, 2021b).

En la **Figura 3** indica la distribución de las bandas de frecuencia utilizadas por WiFi en 2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz, destacando los canales disponibles y su ancho de banda. Resalta

la mayor capacidad de la banda de 6 GHz introducida por WiFi 6E, con canales adicionales y menos interferencia, ideal para aplicaciones de alta demanda.

Figura 3

Bandas de Frecuencia en 5GHz y 6GHz



Nota. Adaptado de (Keenan Systems, 2021)

2.2.2 Ancho de banda y agregación de canales

El desempeño de las redes WiFi-contemporáneas se basa en gran parte en la técnica de agregación de canales y el ancho de banda. Estas propiedades hacen posible optimizar el uso del espectro disponible, lo que mejora la capacidad de transmisión y reduce la interferencia en zonas densas. La capacidad de emplear canales más amplios, especialmente en la banda de 6 GHz, es lo que hace posible que se optimicen estas mejoras en el estándar IEEE 802.11ax, que se utiliza en WiFi 6 y WiFi 6E. Por otro lado, la agregación de canales posibilita fusionar varios canales pequeños en uno más grande, lo cual consigue tasas de transferencia de datos más altas. Esto es perfecto para aplicaciones que requieren mucho ancho de banda, como el streaming 4K/8K, los videojuegos en línea y la realidad virtual. Esta sección analiza la manera en que los anchos de banda se distribuyen en las bandas de 5 GHz y 6 GHz, así como el modo en que estas tecnologías ayudan a mejorar el desempeño de las redes inalámbricas sofisticadas.

2.2.2.1 Comparativa de anchos de banda en 5 GHz y 6 GHz

WiFi 6 y WiFi 6E, basados en el estándar IEEE 802.11ax, introducen mejoras significativas en el uso del espectro inalámbrico, especialmente en cuanto a la disponibilidad de ancho de banda y la capacidad para soportar aplicaciones modernas. Ambas bandas (5 GHz y 6 GHz) ofrecen diferentes capacidades que son fundamentales para garantizar un rendimiento eficiente en redes inalámbricas densas.

WiFi 6 emplea la banda de 5 GHz, que ofrece un espectro total cercano a los 500 MHz, repartido en distintas subbandas que se clasifican según el esquema U-NII. Esta banda posibilitó más canales que la de 2.4 GHz, pero se vio restringida por limitaciones técnicas como la detección de radar (DFS), necesaria en las subbandas U-NII-2A y U-NII-2C, lo que limitó su empleo en ciertos ambientes. (IEEE Std 802.11ax, 2021).

Por otro lado, la banda de 6 GHz, incorporada por WiFi 6E, añadió hasta 1200 MHz adicionales de espectro sin licencia. Esta ampliación permitió la creación de numerosos canales extensos y no superpuestos, perfectos para aplicaciones que requerían gran capacidad y latencia baja, como videollamadas masivas, streaming en 8K o realidad virtual. Asimismo, la banda de 6 GHz tuvo un grado de interferencia significativamente más bajo debido a que estaba menos ocupada. Esta cualidad ha permitido una utilización eficaz de métodos como Channel Bonding, que posibilitaron la unión de canales contiguos para crear conexiones más amplias (Wi-Fi Alliance, 2021a)

La administración de los canales en la banda de 6 GHz se lleva a cabo conforme a las normativas locales y regionales. En numerosos países, las entidades de telecomunicaciones han hecho que el espectro total esté disponible para su uso sin licencia. Esto posibilita que los dispositivos utilicen los canales disponibles sin limitaciones importantes de interferencia. No obstante, es necesario seguir instrucciones concretas acerca de la potencia de transmisión y el empleo de tecnologías que atenúen interferencias como Automated Frequency Coordination

(AFC), las cuales garantizan que los dispositivos WiFi 6E no interfieran con servicios preexistentes en la banda de 6 GHz, por ejemplo enlaces de microondas y otros servicios fundamentales de comunicación.

La **Tabla 1** refleja la comparación de los canales en las bandas de 5GHz y 6GHz

Tabla 1

Comparativa de canales en las bandas de 5GHz y 6GHz

Característica	Banda de 5 GHz (WiFi 6)	Banda de 6 GHz (WiFi 6E)
Espectro total disponible	~500 MHz distribuido en varias subbandas U-NII	~1200 MHz continuos, libres de interferencias por congestión
Canales de 20 MHz	Hasta 25 canales disponibles	Hasta 59 canales disponibles
Canales de 40 MHz	Hasta 12 canales disponibles	Hasta 29 canales disponibles
Canales de 80 MHz	Hasta 6 canales, adecuados para videollamadas y streaming en alta definición	Hasta 14 canales, ideales para video 4K/8K y aplicaciones interactivas
Canales de 160 MHz	Hasta 2 canales, usados para alto rendimiento en distancias cortas	Hasta 7 canales, optimizados para juegos en línea, realidad aumentada y datos intensivos
Interferencia	Moderada; coexistencia con radares y otros servicios	Baja; menor congestión al ser un espectro recién habilitado
Uso ideal	Entornos mixtos (residencial-comercial) con necesidades moderadas de ancho de banda	Entornos densos y de alta demanda de datos, como oficinas, hospitales o centros educativos

Nota. Autoría propia

2.2.2.2 Impacto de la agregación de canales en la eficiencia del espectro

El estándar IEEE 802.11ax, conocido como Wi-Fi 6, introduce la agregación de canales o *channel bonding*, una funcionalidad que permite combinar múltiples canales contiguos para formar un canal más amplio, incrementando así el ancho de banda disponible

y mejorando el rendimiento de la red. Esta técnica, presente en versiones anteriores de Wi-Fi, se optimiza en Wi-Fi 6 y se amplía significativamente en Wi-Fi 6E con la incorporación de la banda de 6 GHz (Ghoshal et al., 2024)

En la banda de 5 GHz, Wi-Fi 6 permite anchos de canal de 20, 40, 80 y 160 MHz; en cambio, Wi-Fi 6E puede usar canales de hasta 160 MHz en la banda de frecuencia de 6 GHz. Esto último se traduce en un espectro más amplio y menos saturado (Koul et al., 2024). La combinación de canales permite fusionar sus anchos de banda para lograr un mejor rendimiento; por ejemplo, dos canales de 80 MHz se pueden unir para crear uno de 160 MHz (Ghoshal et al., 2024).

Entre los beneficios clave de la agregación de canales en Wi-Fi 6 y Wi-Fi 6E se encuentran:

- **Mayor rendimiento:** Los canales más amplios proporcionan un mayor ancho de banda, permitiendo velocidades de datos más elevadas (Edirisinghe et al., 2023).
- **Menor latencia:** Al aumentar el ancho de banda, la congestión en la red disminuye, lo que incrementa la latencia y la capacidad de respuesta (Ghoshal et al., 2024).
- **Mejor experiencia de usuario:** Mejoran las aplicaciones que requieren alta capacidad y baja latencia, como los videojuegos en línea, la realidad virtual y la transmisión de video 4K/8K, cuando se combinan un rendimiento más alto con una latencia más baja (Koul et al., 2024).

Cabe señalar que, en la banda de 6 GHz, la agregación de canales es particularmente eficaz por la menor interferencia y la mayor disponibilidad del espectro. Esto posibilita que los dispositivos Wi-Fi 6E hagan un uso óptimo del ancho de banda disponible para tener un rendimiento ideal (Ghoshal et al., 2024).

2.3 Modulación y esquemas de codificación

En las redes inalámbricas modernas, la modulación y los esquemas de codificación son fundamentales para garantizar una transmisión eficiente, rápida y confiable de datos. Mediante estas técnicas, se logra maximizar las tasas de transferencia y minimizar las interferencias, lo que permite el uso óptimo del espectro radioeléctrico. El estándar IEEE 802.11ax, con el lanzamiento de Wi-Fi 6 y Wi-Fi 6E, incluye progresos importantes como OFDMA y 1024-QAM, que son respuestas a las crecientes necesidades de conectividad en áreas densas y aplicaciones que requieren un alto desempeño. Estos avances, además de optimizar la experiencia del usuario, garantizan un uso más efectivo del espectro disponible y promueven que las redes inalámbricas evolucionen hacia una mayor confiabilidad y mayores capacidades.

2.3.1 OFDMA: Ventajas en entornos congestionados

Según (Emmerling, 2020) "El acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) es una técnica de transmisión que permite que varios dispositivos compartan el mismo canal al mismo tiempo, dividiendo los canales en subportadoras, que luego se agrupan en varias unidades de recursos (RU). Cada usuario puede tener una o más RU asignadas según los requisitos de ancho de banda". Esta técnica es particularmente útil en escenarios de alta densidad, como áreas públicas, ya que reduce la latencia y la fluctuación al disminuir el tiempo de espera para la transmisión simultánea de múltiples estaciones.

En OFDMA, un canal Wi-Fi se puede dividir en subcanales para habilitar que múltiples usuarios compartan el mismo canal 802.11ax simultáneamente. Con 802.11ax, el ancho de banda del canal se divide en varias RU. La unidad de recursos más pequeña consta de 26 subportadoras, mientras que otras configuraciones de RU incluyen tamaños de 52, 106, 242, 484, 996 y 2×996 subportadoras. Un canal de 20 MHz puede contener hasta nueve RU de 26 subportadoras. Este canal de 20 MHz incluye un total de 256 subportadoras, cada una

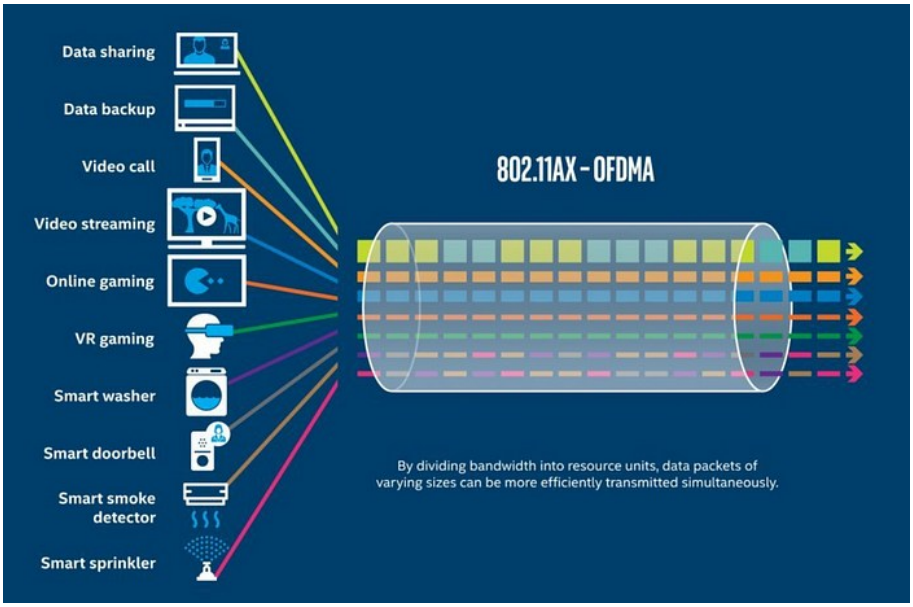
con un ancho de banda de 78,125 kHz, aunque no todas están disponibles para transportar datos. Se utilizan unas subportadoras como subportadoras de CC para asegurar la sincronización entre el punto de acceso y las estaciones, mientras que otras son reservadas con el fin de prevenir interferencias (intervalos de guardia o GI) (Emmerling, 2020).

Aparte de lo que ya se dijo, OFDMA en 802.11ax posibilita la distribución dinámica de las RU, lo cual se ajusta a las necesidades de cada aparato conectado. Esto es fundamental en las aplicaciones contemporáneas, como la comunicación industrial en tiempo real, el video 4K y la realidad virtual, que requieren una latencia baja (Naik et al., 2020). OFDMA optimiza la capacidad de la red y, a diferencia del acceso múltiple tradicional que se ocupaba en generaciones pasadas de Wi-Fi y que le asignaba un canal completo a un único usuario, mejora considerablemente la eficiencia espectral. (Mozaffariahrar et al., 2022).

La **Figura 4** ilustra cómo opera OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) en el estándar Wi-Fi 6 (802.11ax). OFDMA segmenta el ancho de banda disponible en unidades de recursos (Resource Units) más pequeñas, las cuales se asignan dinámicamente a distintos dispositivos en función de sus requerimientos. Esto hace posible que se envíen paquetes de datos de tamaños variados al mismo tiempo para aplicaciones como videojuegos en línea, streaming, videollamadas, realidad virtual y dispositivos IoT tales como rociadores inteligentes o detectores de humo. La eficiencia del espectro mejora al permitir que múltiples dispositivos compartan un canal de manera más efectiva, reduciendo la latencia y optimizando el uso de la red.

Figura 4

Funcionamiento de OFMA



Nota . Adaptado de (HD Pro, 2020)

2.3.2 1024-QAM: Mejora en la capacidad de transmisión

El estándar IEEE 802.11ax, conocido como WiFi 6, introduce la modulación 1024-QAM (Modulación de Amplitud en Cuadratura) como una mejora significativa respecto a su predecesor, el 256-QAM. Esta técnica permite codificar 10 bits por símbolo, en comparación con los 8 bits de 256-QAM, lo que se traduce en un incremento teórico del 25% en la tasa de transferencia de datos. (Dennis Huang, 2018)

Sin embargo, este beneficio está condicionado por la calidad de la señal y la proximidad al punto de acceso. Estudios han demostrado que el 1024-QAM mantiene un rendimiento óptimo dentro de un rango máximo de aproximadamente 6 metros, bajo condiciones de señal favorables. (Weller et al., 2020)

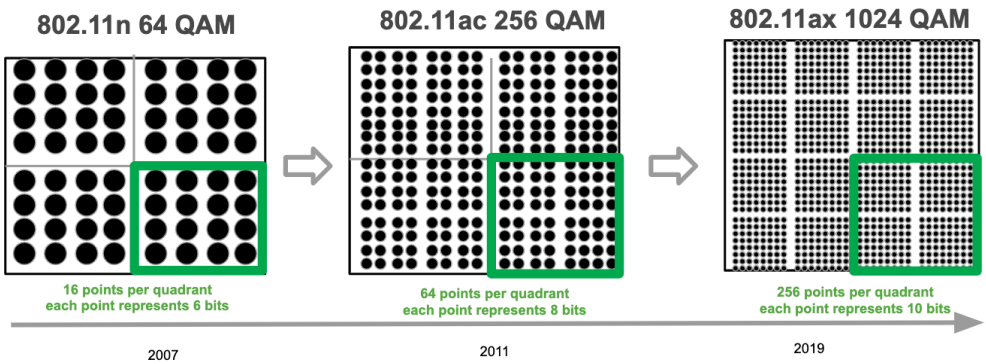
A medida que la calidad de la señal disminuye con la distancia, el rendimiento de 1024-QAM se degrada, y el sistema puede retroceder a esquemas de modulación inferiores para mantener la estabilidad de la conexión. El 1024-QAM es un progreso significativo en

situaciones de elevada concentración de usuarios y ambientes controlados, donde puede utilizar plenamente sus habilidades, pese a estas restricciones. En consecuencia, esta tecnología resulta decisiva para optimizar la eficacia de las redes inalámbricas en lugares como estaciones de transporte, estadios y centros de convenciones, donde se necesita una velocidad de transmisión elevada a distancias reducidas. (Dennis Huang, 2018)

La **Figura 5** ilustra la evolución de los esquemas de modulación en Wi-Fi, desde 802.11n con 64-QAM hasta 802.11ax con 1024-QAM. En 802.11ac, cada cuadrante tiene 64 puntos y codifica 8 bits por símbolo (256-QAM), en comparación con 802.11n, donde cada cuadrante contiene 16 puntos que representan 6 bits de información. Por último, 802.11ax incorpora 1024-QAM, en el que cada cuadrante contiene 256 puntos y representa diez bits por símbolo. Este avance permite un incremento teórico del 25% en la tasa de transferencia de datos entre 256-QAM y 1024-QAM, mejorando significativamente la eficiencia espectral y la capacidad de transmisión en condiciones óptimas de señal y baja interferencia.

Figura 5

Funcionamiento de 1024 QAM



Nota . Adaptado de (Simet, 2021)

2.4 Capa Física de Alta Eficiencia (HE PHY)

La Capa Física de Alta Eficiencia (HE PHY, por sus siglas en inglés) es uno de los pilares fundamentales del estándar IEEE 802.11ax, conocido como Wi-Fi 6 y Wi-Fi 6E. La

HE PHY, creada con el propósito de optimizar la eficacia del espectro, incluye adelantos tecnológicos para mejorar el desempeño en entornos de alta densidad y enriquecer la experiencia del usuario en redes sin hilos. Algunos de estos avances incluyen el Beamforming, que optimiza la señalización para redes densas; el MU-MIMO, que posibilita la transmisión a múltiples dispositivos al mismo tiempo; y la implementación de HE PHY en las bandas de 5 GHz y 6 GHz. Estas tecnologías combinadas garantizan una conectividad más estable, de mayor capacidad y con menor latencia, abordando las crecientes demandas de conectividad en aplicaciones residenciales, empresariales e industriales.

2.4.1 MU-MIMO

El sistema MIMO (Multiple Input - Multiple Output), introducido con IEEE 802.11n, permite aumentar la tasa de transmisión enviando múltiples flujos de datos simultáneamente a través de varias antenas desde el punto de acceso (AP) a un solo usuario. En situaciones con varios usuarios, estos eran atendidos uno tras otro. El rendimiento se incrementó con el estándar IEEE 802.11ac gracias al MU-MIMO (Multi-User MIMO), que posibilita atender a múltiples usuarios simultáneamente, lo que aumenta la eficiencia. La tecnología de formación de haces (beamforming), además, genera señales dirigidas a cada usuario en particular, lo que optimiza el enfoque de la señal y disminuye las interferencias entre aparatos (Mosquera Chica, 2019).

Con IEEE 802.11ax, también llamado WiFi 6, y su extensión WiFi 6E, se incrementa la cantidad de flujos espaciales de cuatro a ocho y, por primera vez, se admite MU-MIMO en los enlaces ascendentes. Esto quiere decir que varias estaciones pueden emitir al mismo tiempo, y la matriz de antenas separa las señales, asignándolas a los usuarios correspondientes. Esta mejora incrementa la eficiencia de la red y posibilita que se transmita más información, lo cual hace un mejor uso de los recursos disponibles en redes con alta densidad poblacional. WiFi 6 funciona sobre todo en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, pero

WiFi 6E emplea la banda de los 6 GHz, lo que aporta hasta 1200 MHz de espectro continuo. Esto posibilita una densidad más alta de dispositivos y disminuye la interferencia (Solutel, 2020).

MU-MIMO se beneficia de los canales de mayor ancho disponibles en la banda de 5 GHz, que pueden llegar a alcanzar hasta 160 MHz. Esto posibilita el envío simultáneo a varios dispositivos en flujos distintos. Cada flujo utiliza una combinación de antenas para dirigir la señal hacia dispositivos específicos, lo que mejora la eficiencia y reduce las interferencias en redes saturadas. Esta operación es especialmente efectiva en aplicaciones que exigen mucho, como las comunicaciones de empresas o el streaming de video en alta definición, donde son esenciales la estabilidad y el rendimiento (Mosquera Chica, 2019). MU-MIMO asegura un uso óptimo del espectro, al maximizar los recursos disponibles en redes de alta densidad, a pesar de que la banda de 5 GHz tiene menos interferencia que la de 2.4 GHz.

MU-MIMO en WiFi 6E hace uso del mayor ancho de banda posible en la banda de 6 GHz para ampliar estas capacidades, proporcionando conexiones simultáneas con menos interferencia. Esto es particularmente ventajoso en aplicaciones que requieren un ancho de banda elevado, como los videojuegos en línea, la realidad virtual y la transmisión de video en 8K. Asimismo, emplear MU-MIMO en las dos bandas optimiza la cobertura en interiores y el rendimiento en ambientes de elevada concentración de usuarios, como lo son estadios, aeropuertos y oficinas (José Antonio Lorenzo, 2024).

2.4.2 Beamforming y Ventajas en Redes Densas

El beamforming es una técnica que mejora la eficiencia de las redes inalámbricas al dirigir las señales de transmisión hacia dispositivos específicos, en lugar de dispersarlas en todas direcciones. Esta focalización incrementa la potencia de la señal recibida, mejorando la calidad de la comunicación y reduciendo la interferencia entre dispositivos. En el contexto de Wi-Fi 6E, que opera en la banda de 6 GHz, el beamforming se beneficia del espectro adicional

disponible, permitiendo una transmisión más precisa y enfocada. Esto es especialmente ventajoso en entornos con muchos dispositivos, ya que disminuye al mínimo la interferencia y maximiza el rendimiento de la red (Zheng et al., 2021).

Para las redes con alta densidad, donde múltiples dispositivos están conectados simultáneamente, el beamforming en Wi-Fi 6E es particularmente beneficioso. Los puntos de acceso logran una eficacia espectral más alta gracias a que envían las señales con mayor precisión, lo que reduce la interferencia entre los usuarios y mejora la experiencia en general de la red. El beamforming, además, amplía el alcance de la cobertura efectiva, lo que posibilita que un mayor número de usuarios reciba señales de calidad elevada, aun en zonas con gran concentración de aparatos, como son las oficinas o los edificios de varios pisos (Abdul Alim et al., 2024).

La incorporación del beamforming con tecnologías como MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) es un elemento fundamental de Wi-Fi 6E. Esta combinación posibilita que los puntos de acceso transmitan varios flujos de datos a distintos dispositivos al mismo tiempo, lo que aumenta la capacidad global de la red y mejora el aprovechamiento del ancho de banda. En este contexto, el beamforming en Wi-Fi 6E no solo optimiza la cobertura, sino que además permite administrar más conexiones al mismo tiempo en redes de alta densidad, conservando una latencia baja y un desempeño más estable (Zheng et al., 2021).

Para que el beamforming funcione de manera eficaz, es necesario que los dispositivos conectados y los puntos de acceso sean compatibles con esta tecnología. Asimismo, elementos como la ubicación física del entorno y la existencia de impedimentos pueden afectar su eficiencia. Por lo tanto, una planificación cuidadosa y el uso de equipos adecuados son esenciales para maximizar los beneficios del beamforming en redes Wi-Fi 6E (Abdul Alim et al., 2024).

2.4.3 Implementación de HE PHY en 5 GHz y 6 GHz

La Capa Física de Alta Eficiencia (HE PHY), introducida con el estándar IEEE 802.11ax, conocido como Wi-Fi 6, está diseñada para operar en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, ofreciendo mejoras significativas en eficiencia y rendimiento en comparación con sus predecesores. La evolución a Wi-Fi 6E extiende estas capacidades a la banda de 6 GHz, proporcionando un espectro adicional de 1,200 MHz, lo que permite la utilización de canales más amplios y reduce la congestión en entornos densos (Aruba Networks, 2023).

En la banda de 5 GHz, Wi-Fi 6 implementa técnicas avanzadas como OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) y MU-MIMO (Múltiple Entrada Múltiple Salida Multiusuario) para mejorar la eficiencia espectral y la capacidad de la red. Estas tecnologías permiten una asignación más eficiente del ancho de banda entre múltiples dispositivos, reduciendo la latencia y mejorando la experiencia del usuario (Cisco, 2020).

La transición a la banda de 6 GHz con Wi-Fi 6E introduce ventajas adicionales. El espectro más amplio disponible en esta banda permite la implementación de canales de hasta 160 MHz, lo que facilita velocidades de datos más altas y una menor interferencia entre canales. Sin embargo, debido a las propiedades de propagación de las frecuencias más altas, la cobertura en 6 GHz es menor en comparación con las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, lo que puede requerir una planificación más cuidadosa de la infraestructura de la red para garantizar una cobertura adecuada (Aruba Networks, 2023).

La implementación de HE PHY en las bandas de 5 GHz y 6 GHz también considera aspectos de seguridad y eficiencia energética. La compatibilidad con el protocolo de seguridad WPA3 proporciona una protección mejorada para las comunicaciones inalámbricas, mientras que la función Target Wake Time (TWT) ayuda a reducir el consumo de energía de los dispositivos conectados, extendiendo la vida útil de la batería en dispositivos móviles y del Internet de las Cosas (IoT) (Aruba Networks, 2023).

En resumen, la implementación de HE PHY en las bandas de 5 GHz y 6 GHz con Wi-Fi 6 y Wi-Fi 6E ofrece mejoras sustanciales en capacidad, eficiencia y seguridad de las redes inalámbricas. La expansión al espectro de 6 GHz abre nuevas oportunidades para aplicaciones que requieren altas velocidades de datos y baja latencia, aunque también presenta desafíos en términos de cobertura que deben ser abordados mediante un diseño cuidadoso de la red (Cisco, 2020).

2.4.4 Control de acceso al medio en 5GHz y 6GHz

El control de acceso al medio (MAC, *Medium Access Control*) en WiFi 6 y WiFi 6E ha sido optimizado para mejorar la eficiencia espectral y reducir la latencia en entornos de alta densidad. En el estándar IEEE 802.11ax, se introducen mecanismos avanzados que permiten una gestión más eficiente del espectro en las bandas de 5 GHz y 6 GHz, mejorando el rendimiento general de la red y minimizando las interferencias con otras estaciones inalámbricas.

La implementación de Enhanced Distributed Channel Access, o EDCA, es uno de los avances más importantes en WiFi 6 y WiFi 6E. Este sistema de acceso basado en competencia le otorga a las transmisiones diferentes niveles de prioridad. Este sistema clasifica el tráfico en varias categorías de acceso (Access Categories, AC) por medio de diversos valores de tiempo de espera (Arbitration Interframe Space, AIFS) y contención aleatoria (Contention Window, CW) con el objetivo de disminuir las colisiones y aumentar la calidad del servicio (QoS).

Además, la División de Frecuencia Ortogonal Múltiple (OFDMA) se suma como una mejora en el acceso múltiple, lo que permite que múltiples dispositivos compartan un canal común a través de su división en Unidades de Recursos (RU). Esto permite la transmisión al mismo tiempo en un canal de 20, 40, 80 o 160 MHz. Esto reduce la latencia y mejora el

rendimiento espectral, especialmente en la banda de los 6 GHz, donde el canal puede ser segmentado con mayor eficacia gracias a que el espectro es más amplio.

Otro mecanismo implementado en WiFi 6 es el Triggered Uplink Access (TUA), que permite a los puntos de acceso programar transmisiones ascendentes de múltiples dispositivos de manera sincronizada, eliminando la necesidad de que estos compitan por el acceso al medio. Esto optimiza el uso del espectro y reduce el tiempo de espera de los dispositivos conectados (IEEE Std 802.11ax, 2021).

2.4.4.1 Control de Acceso en la Banda de 6 GHz

En WiFi 6E, la apertura de la banda de 6 GHz introduce nuevas regulaciones para minimizar la interferencia con otros servicios inalámbricos preexistentes. En la banda de 6 GHz, a diferencia de la de 5 GHz, se definen normas particulares, como el empleo de Automated Frequency Coordination (AFC) para los dispositivos con alta potencia. En esta última banda no es necesario que los dispositivos compartan el espectro con radares y otras redes WiFi. Esta normativa posibilita la asignación dinámica de frecuencias, garantizando que los dispositivos WiFi 6E funcionen sin interferir con otros sistemas.

Para mejorar la eficiencia del acceso al canal, WiFi 6 y WiFi 6E también incluyen mecanismos de protección y contención, tales como:

- **BSS Coloring:** Un procedimiento que posibilita la detección de redes WiFi en un mismo canal, disminuyendo la interferencia entre los puntos de acceso más cercanos.
- **Dynamic Sensitivity Control (DSC):** Un sistema que optimiza la eficiencia del espectro en áreas congestionadas al modificar dinámicamente los umbrales de detección de señales.
- **RTS/CTS Mejorado:** Sistema de control de transmisión que evita colisiones en redes con una gran concentración poblacional.

A pesar de que WiFi 6 mejora el rendimiento en la banda de 5 GHz, la baja cantidad de canales y las interferencias en zonas densas tienen el potencial de afectar negativamente la calidad de la red. Por otro lado, la banda de 6 GHz en WiFi 6E ofrece un espectro más amplio con menos interferencias y una mayor disponibilidad de canales no superpuestos, lo cual permite un acceso más eficiente al medio..

La banda de 6 GHz, en términos de rendimiento, permite que MU-MIMO y OFDMA se implementen con mayor eficiencia, lo cual posibilita que las transmisiones simultáneas tengan una latencia menor. Sin embargo, la cobertura de la señal en 6 GHz es inferior a la de 5 GHz debido a que las frecuencias más altas presentan una capacidad de penetración más baja. Esto puede requerir que haya más puntos de acceso para garantizar una cobertura uniforme (IEEE Std 802.11ax, 2021).

2.5 Evolución y Desafíos de las Redes WiFi

Desde sus versiones iniciales, las redes WiFi han tenido un progreso notable en términos de eficacia, velocidad y capacidad de conexión. Con el aumento de la demanda de dispositivos conectados, las tecnologías se han visto obligadas a modificar sus características para mejorar la utilización del espectro radioeléctrico y disminuir la saturación en áreas con alta densidad.

WiFi 6 y WiFi 6E son la generación más reciente de estos desarrollos, y han incorporado mejoras como Beamforming, OFDMA y MU-MIMO. También han expandido la capacidad operativa a la banda de 6 GHz, lo que posibilita una interferencia más baja y un rendimiento más alto.

No obstante, la transición a estas tecnologías emergentes conlleva retos, entre los que se encuentran la congestión en la banda de 5 GHz y el requerimiento de una regulación eficaz para poder emplear el espectro de 6 GHz.

En este capítulo se examinan la evolución de los estándares WiFi, las diferencias entre WiFi 6 y WiFi 6E, los inconvenientes relacionados con el desbordamiento del espectro en 5 GHz y la relevancia de permitir el uso del espectro de 6 GHz para asegurar una conectividad más eficiente y escalable.

2.5.1 Comparativa de WiFi 6 y WiFi 6E

WiFi 6E no solo amplía las capacidades de WiFi 6 al permitir el uso de la banda de 6 GHz, sino que también introduce un sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output) avanzado con soporte para hasta ocho flujos espaciales. Este desarrollo es crucial para mejorar la velocidad y la eficiencia en entornos congestionados, donde múltiples dispositivos requieren conectividad simultánea. La implementación de antenas compactas como la array de parches duales polarizados (DPP) permite transmitir ocho ondas no correlacionadas, alcanzando una capacidad de sistema de aproximadamente 8,48 Gbps en condiciones reales.

Asimismo, debido a un gran aislamiento entre los puertos, estas antenas garantizan una señal más clara, lo que se traduce en una mejor experiencia para el usuario en redes densas, especialmente en espacios públicos cerrados.

Además de las capacidades optimizadas de velocidad, WiFi 6E ofrece una gestión más eficiente del espectro, especialmente en entornos congestionados donde la interferencia puede ser un inconveniente. Agregando la banda de 6 GHz se ensancha el ancho de banda disponible y, además, se ofrecen más canales sin licencia, lo que permite que los dispositivos operen con menor congestión. Esto es especialmente beneficioso en lugares públicos, como los estadios o los aeropuertos, donde la necesidad de conexión está en su punto más alto. El desempeño se ve mejorado con la aplicación de tecnologías avanzadas, como el sistema MIMO de ocho flujos espaciales mencionado anteriormente, ya que este permite que múltiples usuarios se conecten simultáneamente sin comprometer la calidad de la señal. Este avance en la

tecnología inalámbrica representa un progreso significativo para reducir la latencia y mejorar el uso que hace el usuario. (Wong et al., 2022)

WiFi 6E no solo amplía las capacidades de WiFi 6 al permitir el uso de la banda de 6 GHz, sino que también introduce tecnologías avanzadas como OFDMA y un sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output) mejorado, con soporte para hasta ocho flujos espaciales. Estas innovaciones son esenciales para incrementar la eficiencia espectral y garantizar una conectividad estable en entornos congestionados, donde múltiples dispositivos compiten por recursos simultáneamente. El empleo de antenas compactas, por ejemplo la matriz de parches duales polarizados (DPP), posibilita la transmisión de ocho ondas no correlacionadas, alcanzando una capacidad del sistema que puede llegar hasta 9.6 Gbps en situaciones óptimas (IEEE Std 802.11ax, 2021).

La incorporación de la banda de 6 GHz proporciona un espectro limpio y con menos interferencias, lo que se traduce en una ampliación importante del ancho de banda disponible. Esto incluye hasta 59 canales adicionales sin licencia en anchos de 20 MHz, lo que resulta crucial para reducir la congestión en áreas densamente pobladas, como los estadios o los aeropuertos (FCC, 2020). Asimismo, la señal se vuelve más nítida gracias al alto aislamiento entre puertos en las antenas MIMO, lo que mejora la experiencia del usuario en contextos como oficinas y centros comerciales. La latencia se reduce significativamente y la gestión de usuarios simultáneos se vuelve más eficiente cuando estas cualidades se combinan con el uso de OFDMA (Cisco, 2021).

2.5.2 Congestión en la banda de 5 GHz: Causas e impacto en el desempeño

La congestión en la banda de 5 GHz es un desafío creciente debido a la masificación de dispositivos inalámbricos y su uso intensivo en redes WiFi. A pesar de que es menos congestionada que la banda de 2.4 GHz, esta banda tiene dificultades en áreas con alta densidad poblacional, como las oficinas, los edificios de apartamentos y los lugares públicos,

donde numerosos puntos de acceso y dispositivos luchan por el espectro disponible. Aunque la banda de 5 GHz ofrece una mayor cantidad de canales no superpuestos, su uso frecuente en áreas urbanas y las limitaciones establecidas por el gobierno para algunos canales, como las que aplica la ARCOTEL en Ecuador, provocan su congestión. Asimismo, si las redes no están configuradas correctamente, como por ejemplo cuando los canales adyacentes se emplean de manera inapropiada o no hay planificación, esto provoca más interferencias y empeora el problema.

El efecto de la congestión en el rendimiento de las redes WiFi es importante. Una de las consecuencias más notables es la disminución de las velocidades de transmisión, particularmente en aplicaciones que requieren mucho, como videoconferencias, streaming en 4K y juegos online. El aumento de la latencia afecta negativamente a las aplicaciones que son sensibles al tiempo, como los sistemas en tiempo real o la telefonía por protocolo de internet (VoIP). De igual modo, el aumento de reenvíos y choques de paquetes utiliza más ancho de banda y disminuye la calidad general del servicio (QoS), lo que genera cortes e inferioridad en las conexiones. En un ambiente congestionado, los dispositivos incrementan su capacidad de transmisión o extienden el tiempo de las sesiones para contrarrestar las pérdidas. Esto causa que la eficiencia baje y el consumo energético se dispare .

El estándar WiFi 6 (802.11ax) fue diseñado con el objetivo de administrar mejor la saturación en la banda de 5 GHz. Este incluye tecnologías como BSS Coloring y OFDMA (OFDMA), que contribuyen a una gestión más eficaz del espectro y reducen la interferencia entre dispositivos. Sin embargo, debido a que este estándar se ha adoptado de manera masiva, la cantidad de dispositivos en la banda se ha incrementado y el problema de saturación persiste en algunas áreas. La banda de 6 GHz es una alternativa extra porque brinda más canales disponibles y menos interferencias, lo que la hace especialmente útil para aplicaciones que requieren alta capacidad y baja latencia.

En Ecuador, las restricciones impuestas por la ARCOTEL restringen el acceso a ciertos canales de la banda de 5 GHz, lo cual reduce su disponibilidad y genera congestión. Estas restricciones buscan evitar interferencias con sistemas de prioridad, como los radares; sin embargo, también impactan la capacidad de las redes inalámbricas en zonas donde hay una alta densidad de usuarios. Este panorama evidencia que es necesario tener una planificación estratégica y regulaciones más flexibles para garantizar un uso efectivo del espectro, especialmente frente a la creciente necesidad de conectividad inalámbrica.

La congestión en la banda de 5 GHz es un problema que afecta directamente el desempeño de las redes WiFi, lo cual comprende la latencia, velocidad y calidad del servicio. Es esencial abordar las causas fundamentales de la congestión y modificar las regulaciones para mejorar el rendimiento de las redes en situaciones locales, como la de Ecuador, aunque la transición a la banda de 6 GHz y tecnologías como WiFi 6 ofrecen soluciones prometedoras.

2.5.3 Necesidad del espectro de 6GHz

El crecimiento exponencial en el uso de dispositivos inalámbricos y el desarrollo de aplicaciones que demandan mayor capacidad han incrementado la necesidad de velocidades más rápidas y una conectividad más eficiente. Esta tendencia ha llevado a que se demande cada vez más espectro adicional para prevenir la saturación y asegurar un servicio de calidad. La FCC estadounidense liberó 1200 MHz en la banda de 6 GHz para uso sin licencia, abarcando el rango de 5925 a 7125 MHz, en respuesta a este escenario. Esta apertura fue un avance crucial para las redes inalámbricas contemporáneas. Naciones como México, Brasil, Corea del Sur y Canadá imitaron este modelo. En Europa, en cambio, solo se liberaron 500 MHz de la banda inferior; la superior todavía está bajo evaluación (Mehrnoush et al., 2022; Wi-Fi Alliance, 2021b).

En abril de 2020, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) votó por unanimidad a favor de abrir la banda de 6 GHz de 5,925 a 7,125 GHz para uso sin licencia. WiFi 6 extendido (WiFi 6E) opera en dicha banda. El "6" representa la sexta generación de WiFi y la "E" representa extendida. Este espectro de 6 GHz proporciona canales adicionales que no se superponen. El resultado es que WiFi 6E permite 14 canales adicionales de 80 MHz y 7 canales adicionales de 160 MHz (Piva et al., 2022).

El espectro de 6 GHz no solo ofreció un mayor número de canales amplios y no superpuestos, sino que también fue clave para garantizar el rendimiento de aplicaciones emergentes. Entre estas se destacan:

- **Realidad aumentada (AR) y realidad virtual (VR)**: Estas tecnologías requieren canales anchos y baja latencia para funcionar adecuadamente, sobre todo en educación virtual, industria, medicina y videojuegos. La FCC ha establecido nuevas normas que permiten la operación de dispositivos de muy baja potencia, como los de AR y VR, en la banda de 6 GHz, lo que facilita su implementación en diversos sectores (Contreras García, 2023) .
- **Videojuegos en la nube y experiencias inmersivas**: Plataformas como Xbox Cloud Gaming, GeForce Now y PlayStation Remote Play requieren conexiones de alta velocidad y estabilidad, que pueden verse interferidas en bandas congestionadas. Para estas aplicaciones, la banda de 6 GHz ofrece el ancho de banda requerido (Juniper Networks, 2023).
- **Streaming en ultra alta definición (4K y 8K)**: Para evitar que la calidad se pierda, plataformas como Netflix, YouTube o Disney+ requieren anchos de banda constantes para poder transmitir en resoluciones avanzadas. Las transmisiones WiFi de capacidad máxima pueden ser transmitidas simultáneamente por la banda de 6 GHz, con un total de hasta siete sin interferencias (Xataka, 2024).

- **Videoconferencias masivas**: Programas como Microsoft Teams, Google Meet y Zoom son ahora indispensables en contextos académicos y laborales. Cuando se utilizan al mismo tiempo en varios aparatos, las bandas convencionales se saturan. La banda de 6 GHz brinda canales adicionales que optimizan la calidad de estas comunicaciones.
- **Redes sociales con contenidos en vivo**: El crecimiento del tráfico de plataformas como TikTok, Instagram Live o Facebook Live generó cargas impredecibles de tráfico upstream/downstream en entornos urbanos. La banda de 6 GHz ayuda a manejar este tráfico de manera más eficiente (TP-Link España, 2022) .

Asimismo, la evolución hacia la conectividad indoor/outdoor simultánea —como en campus universitarios, hospitales o ciudades inteligentes— exigió canales limpios y menos interferencias, algo que la banda de 6 GHz logró proporcionar con mayor eficacia que sus predecesoras.

CAPÍTULO III DISEÑO

Este capítulo describe el diseño del sistema propuesto para la evaluación comparativa de las tecnologías WiFi 6 y WiFi 6E, conforme al estándar IEEE 802.11ax. A través de una estructura metodológica organizada, se presenta el proceso completo que permitió definir la arquitectura, seleccionar los componentes, establecer los requerimientos y configurar el entorno de pruebas.

El diseño abarca desde el análisis conceptual hasta la implementación práctica, considerando tanto los aspectos técnicos como funcionales del sistema. Se parte del estudio de los requerimientos derivados de las necesidades de los usuarios (stakeholders), y se los traduce en especificaciones del sistema y de arquitectura. Posteriormente, se justifica la selección de los componentes utilizados, incluyendo el punto de acceso, los clientes inalámbricos, el sistema operativo y las herramientas de medición.

Asimismo, se desarrolla el diseño del sistema, el cual incluye el diagrama de bloques, la descripción funcional de los nodos, la topología de red y la arquitectura basada en el modelo OSI adaptado. Finalmente, se presenta la configuración de los equipos, detallando los parámetros de red, las herramientas utilizadas para la captura y análisis de datos, y el proceso de validación previo a la ejecución de las pruebas.

3.1 Análisis

Esta sección presenta el análisis preliminar necesario para el desarrollo del sistema propuesto. Se define la metodología en cascada como modelo de desarrollo, por su enfoque estructurado y secuencial. Asimismo, se describen las principales características técnicas de las tecnologías WiFi 6 y WiFi 6E, lo que permite establecer las bases conceptuales para la selección de componentes, requerimientos y diseño del entorno de pruebas.

3.1.1 Metodología

El diseño de la metodología sigue un modelo en cascada, que permite un desarrollo secuencial de las etapas clave: análisis, diseño, implementación, pruebas y validación. Este enfoque asegura que cada etapa cuente con las bases necesarias para la siguiente, minimizando riesgos y garantizando la coherencia del desarrollo.

Durante la etapa de análisis, se recopilan y analizan los requerimientos del proyecto, incluyendo las características específicas del estándar IEEE 802.11ax y las necesidades experimentales. Se examina la posibilidad técnica de los elementos seleccionados para el banco de pruebas, así como las métricas fundamentales, incluyendo jitter, latencia y rendimiento.

En la fase de diseño, se define el diseño del banco de pruebas, que incluye determinar la arquitectura de la red ad-hoc, basada en módulos Raspberry Pi CM4 y Intel AX210. Se establecen los ambientes de prueba, que abarcan configuraciones en las bandas de 5 GHz y 6 GHz. Para capturar y analizar datos, se utilizan herramientas como Wireshark e Iperf.

La instalación y la configuración de los equipos y el software se realizan durante la implementación. Se establece la red ad-hoc configurando parámetros como canales de operación y direcciones IP estáticas. Para asegurar la conectividad y el funcionamiento adecuado del hardware y software, cada nodo se prueba de manera individual.

En la etapa de verificación se evalúa el rendimiento de la red mediante pruebas experimentales. Los resultados obtenidos se comparan con valores teóricos para validar la efectividad del diseño y la configuración implementados para finalmente registrar los resultados.

3.1.2 Situación actual

El proyecto se desarrolló en un ambiente controlado de laboratorio, lo que permitió disponer de condiciones estables y reproducibles para la evaluación comparativa de las

tecnologías WiFi 6 y WiFi 6E. La elección de un laboratorio controlado ayudó a minimizar factores externos que pudieran alterar los resultados, tales como interferencias provenientes de redes inalámbricas adyacentes o variaciones en la densidad de usuarios.

Una comparación del desempeño de las bandas de 5 GHz y 6 GHz fue posible gracias a que el laboratorio estaba controlado. Esto posibilitó la evaluación de la estabilidad de la señal, el rendimiento en términos de transmisión y la respuesta de la red bajo condiciones que imitaban entornos con alta demanda de tráfico. Se obtuvieron así datos objetivos para apoyar el análisis entre los resultados experimentales y los parámetros teóricos.

3.1.3 Características de la tecnología

Para caracterizar las propiedades de las bandas de frecuencia utilizadas en WiFi 6 (5 GHz) y WiFi 6E (6 GHz), se basa en la documentación normativa y bibliográfica del estándar IEEE 802.11ax. Este análisis pone de relieve las similitudes y las diferencias significativas entre ambos grupos, enfocándose en la capacidad de ancho de banda, el rango de frecuencias y la cantidad de canales que cada grupo tiene. Estas características hacen que sea más fácil comprender las ventajas de la banda de 6 GHz en comparación con la de 5 GHz, especialmente en lo que se refiere a la reducción de interferencias y al mejoramiento de redes en áreas muy pobladas. En la **Tabla 2**, se enlistan las principales características de estas bandas de frecuencia según el estándar IEEE 802.11ax.

Tabla 2

Características del 802.11ax en las bandas de 5GHz y 6GHz

Categoría	Descripción	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 6E
Banda de Frecuencia	Rango del espectro electromagnético en el que opera el Wi-Fi.	2.4 GHz y 5 GHz	2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz
Ancho de Canal	«Anchura» del canal de comunicación en la banda de frecuencia.	Hasta 160 MHz	Hasta 160 MHz

Tecnología de Modulación	Método usado para transmitir datos como ondas.	OFDMA	OFDMA
MU-MIMO	Permite a un dispositivo Wi-Fi comunicarse con varios dispositivos al mismo tiempo.	Soporte para hasta 8 flujos de datos en descarga	Soporte para hasta 8 flujos de datos en descarga y carga
Latencia	Tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde la fuente al destino.	Reducida	Aún más reducida
Densidad de Dispositivos	Capacidad de la red para manejar muchos dispositivos en un área sin pérdida de rendimiento.	Mayor capacidad	Aumenta aún más la capacidad
Interferencia y Congestión	Nivel de distorsión en una señal Wi-Fi debido a otros dispositivos o redes cercanas.	Mejoras respecto a Wi-Fi 5	Reducción significativa con la banda de 6 GHz
Rango	Distancia máxima a la que una señal Wi-Fi puede viajar manteniendo una conexión estable.	Similar o ligeramente mejorado	Mejor penetración, pero posible rango menor
Aplicaciones	Uso típico basado en las características de la tecnología.	Ideal para hogares y empresas	Aplicaciones de baja latencia como VR/AR y streaming en alta definición

Nota1. Adaptado de (Aprenda Redes, 2022)
Nota2. La tabla muestra las principales características WiFi6 y WiFi6E.
Nota3. Los valores de la tabla son netamente teóricos.

3.2 Requerimientos del Sistema y Arquitectura

Para garantizar un diseño eficiente y alineado con los objetivos del estudio, es fundamental establecer los requerimientos del sistema y la arquitectura que definirán la estructura de la red de pruebas. La definición de estos requerimientos es fundamental para asegurar que el sistema cumpla con los objetivos planteados, permitiendo una evaluación precisa y reproducible de las condiciones de conectividad en diferentes bandas de frecuencia.

De igual manera, se presenta la arquitectura del sistema, que explica la organización de los elementos en la red de pruebas; esto permite observar el comportamiento de WiFi 6 y WiFi 6E en diferentes contextos de prueba.

Con el propósito de satisfacer más fácilmente los requisitos definidos en el proyecto, a cada uno se le ha asignado una abreviatura única. La **Tabla 3** correspondiente muestra las abreviaturas utilizadas para identificar los diferentes tipos de requerimientos, lo que ayuda a mantener una estructura ordenada y entendible durante el desarrollo del sistema.

Tabla 3

Abreviatura de los requerimientos

Requerimientos	Abreviatura
Stakeholders	STSR
Sistema	SYSR
Arquitectura	SRSH

3.2.1 Requerimientos de los Stakeholders

En esta sección se presentan los requerimientos definidos a partir de las necesidades identificadas en los diferentes actores involucrados en el desarrollo del sistema de pruebas, conocidos como stakeholders. Estos actores tienen una participación directa o indirecta en la planificación, ejecución y validación del sistema, por lo que sus criterios resultan fundamentales en la etapa de diseño.

Es importante señalar que, aunque el sistema de pruebas será implementado sobre un único prototipo físico, este contará con dos módulos funcionales, uno dedicado a pruebas en WiFi 6 (2.4 y 5 GHz) y otro a WiFi 6E (6 GHz), permitiendo realizar una comparación controlada entre ambas tecnologías bajo condiciones equivalentes.

A continuación, en la **Tabla 4**, se describe a los stakeholders considerados en este proyecto, personas que contribuyen directa o indirectamente en el proyecto:

Tabla 4

Descripción de Stakeholders

Stakeholders	Función
Arellano Arévalo Judith Milena	Desarrollador del proyecto
Ing. Carlos Vásquez, MsC	Director del proyecto
Ing. Luis Suárez, MsC	Asesor del proyecto
Estudiantes	Usuarios finales

Nota. Autoría propia

Los requerimientos expresados por los stakeholders en la **Tabla 5** se encuentran redactados en lenguaje natural y no técnico, y representan expectativas generales y necesidades funcionales esperadas. Entre estos stakeholders se incluyeron los estudiantes, considerados como stakeholders secundarios, cuyos criterios fueron recopilados mediante una encuesta y utilizados como insumo para la formulación de los requerimientos. Estos se constituyen como insumos para la formulación de requerimientos técnicos más detallados, que se desarrollan en las siguientes secciones.

Tabla 5

Requerimientos de Stakeholders

Nomenclatura	Requerimiento	Prioridad		
		Baja	Media	Alta
	REQUERIMIENTOS DE USO			
STSR1	El sistema debe permitir comparar el rendimiento entre WiFi 6 y WiFi 6E mediante pruebas de medición.			X
STSR2	El sistema debe permitir evaluar WiFi 6 y WiFi 6E bajo una arquitectura de banco de pruebas que provea funciones de emisión/recepción y registro en cada banda.		X	

STSR3	El sistema debe registrar datos bajo distintas condiciones de prueba (throughput, latencia, pérdida de paquetes).		X
STSR4	Las pruebas deben realizarse con equipos comerciales de acceso general	X	
STSR5	El sistema debe servir como apoyo para futuras prácticas sobre tecnologías WiFi	X	
	REQUERIMIENTOS DE OPERACIÓN		
STSR6	Los componentes del entorno deben soportar 6 GHz real conforme a IEEE 802.11ax, de acuerdo con las restricciones normativas y de configuración vigentes.		X
STSR7	La configuración de los dispositivos debe ser accesible y documentada.		X
STSR8	El sistema debe permitir configurar y ejecutar pruebas mediante herramientas de red como iPerf y Wireshark.		X
STSR9	El sistema debe utilizar una arquitectura abierta basada software libre.	X	
STSR10	El sistema debe garantizar que la conexión WiFi entre el punto de acceso y el cliente se mantenga estable durante cada prueba, sin desconexiones	X	

Nota. Autoría propia

Estos requerimientos representan la visión general de los stakeholders sobre lo que el sistema debe permitir lograr, y se utilizarán como base para estructurar los requerimientos funcionales y de arquitectura del sistema.

3.2.2 Requerimientos del Sistema

Los requerimientos del sistema definen de manera técnica y detalla las funcionalidades que debe cumplir el sistema de pruebas para redes WiFi 6 y WiFi 6E. Estos requerimientos que se encuentran en la **Tabla 6** se derivan directamente de las necesidades identificadas por los stakeholders, y establecen cómo debe comportarse el sistema para satisfacer dichas expectativas.

Tabla 6

Requerimientos del sistema

Nomenclatura	Requerimiento	Prioridad		
		Baja	Media	Alta
REQUERIMIENTOS DE USO				
SYSR1	El sistema debe permitir ejecutar pruebas en modo punto a punto entre dos dispositivos configurados en las bandas de 5 y 6 GHz.			X
SYSR2	El sistema debe permitir seleccionar la banda de prueba y aplicar los parámetros definidos sin reinicios del entorno de pruebas.			X
SYSR3	El sistema debe ofrecer una guía inicial de configuración para cada módulo		X	
SYSR4	El sistema debe poder ejecutarse en modo controlado por script o de forma manual		X	
REQUERIMIENTOS DE PERFORMANCE				
SYSR5	El sistema debe permitir observar valores de throughput, jitter y latencia durante las pruebas			X
SYSR6	El sistema debe comparar resultados entre 5 GHz y 6 GHz usando métricas comunes y formatos de exportación homogéneos.			X
SYSR7	El sistema debe mantener estabilidad en la conexión durante sesiones de prueba continuas		X	
SYSR8	El sistema debe identificar pérdidas de paquetes durante el envío de datos		X	
REQUERIMIENTOS DE INTERFACES				
SYSR9	El sistema debe mostrar los resultados directamente en consola o mediante archivo de salida			X
SYSR10	Los resultados deben poder exportarse en formatos como .txt o .csv para análisis externo.		X	
SYSR11	La captura de tráfico debe ser visible mediante Wireshark en tiempo real.		X	

SYSR12	La interfaz debe permitir cambiar de módulo (WiFi 6/WiFi 6E) sin reiniciar los módulos del entorno de pruebas, manteniendo las sesiones de registro y monitoreo.		X
	REQUERIMIENTOS DE MODO Y ESTADO		
SYSR13	El sistema debe permitir modificar parámetros de prueba sin alterar el código fuente.		X
SYSR14	El usuario debe poder iniciar y detener manualmente cada sesión de prueba.	X	
SYSR15	El sistema debe operar completamente de forma local, sin requerir acceso a internet.		X
	REQUERIMIENTOS FÍSICOS		
SYSR16	La comunicación entre emisor y receptor debe ser bajo el estándar IEEE 802.11ax.		X
SYSR17	El punto de acceso debe tener ventilación adecuada para evitar sobrecalentamiento	X	
SYSR18	La placa Raspberry Pi CM4 IO Board debe ser alimentada mediante fuente estable.		X

Nota. Autoría propia

3.2.3 Requerimientos de Arquitectura

Los requerimientos de arquitectura de la **Tabla 7** establecen las condiciones estructurales necesarias para el funcionamiento del sistema de pruebas propuesto, tanto a nivel físico como lógico. Estos requisitos determinan los elementos de la red, su organización, las capacidades que deben poseer los dispositivos involucrados y la compatibilidad tecnológica requerida para operar con los estándares WiFi 6 y WiFi 6E.

En contraposición a los requerimientos funcionales, los de arquitectura se enfocan en la implementación y configuración del sistema, asegurando que la infraestructura física y la lógica de red estén alineadas con los objetivos de evaluación planteados. Esto incluye aspectos como la topología de la red, el soporte multibanda de los dispositivos, la capacidad del punto de acceso y las condiciones necesarias para la captura y análisis del tráfico

Tabla 7

Requerimientos de arquitectura

Nomenclatura	Requerimiento	Prioridad		
		Baja	Media	Alta
	REQUERIMIENTOS DE DISEÑO			
SRSH1	La arquitectura del banco de pruebas debe permitir ejecutar pruebas de medición bajo IEEE 802.11ax, habilitando la conmutación lógica de banda desde la configuración del entorno.			X
SRSH2	El sistema debe permitir ejecutar pruebas para WiFi 6 y WiFi 6E bajo condiciones operativas equivalentes.			X
SRSH3	La selección de banda (5 GHz/6 GHz) y sus parámetros se efectuará por configuración del entorno de pruebas, sin requerir modificaciones de hardware en los módulos ya implementados.		X	
SRSH4	La arquitectura debe seguir una topología punto a punto.			X
	REQUERIMIENTOS DE HARDWARE			
SRSH5	El entorno de transmisión del banco de pruebas debe habilitar operación en 5 GHz y 6 GHz conforme a 802.11ax, con canales y anchos configurables.		X	
SRSH6	Se debe contar con al menos un adaptador cliente compatible con WiFi 6E.			X
SRSH7	Los adaptadores inalámbricos deben ser compatibles con modo monitor		X	
SRSH8	Se debe emplear una Raspberry Pi CM4 como base del sistema		X	
	REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE			
SRSH9	El sistema debe operar sobre una distribución Linux compatible con drivers WiFi 6E			X
SRSH10	Debe incluir herramientas como iPerf3 y Wireshark preinstaladas			X

SRSH11	El sistema debe permitir la ejecución de pruebas de medición mediante scripts parametrizables.	X	
	REQUERIMIENTOS LÓGICOS		
SRSH12	Se debe permitir la exportación manual de resultados para su análisis externo.		X
SRSH13	La conexión entre módulos debe realizarse de forma inalámbrica y local.	X	
SRSH14	El cambio de parámetros de prueba debe realizarse desde consola local.		X
	REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS		
SRSH15	El sistema debe alimentarse a través de un puerto USB del host.		X
SRSH16	No se debe requerir batería externa ni UPS para el funcionamiento del sistema.	X	
SRSH17	El sistema debe operar de forma segura sin riesgo de sobrecarga.	X	

Nota. Autoría propia

3.3 Selección de Componentes

La adecuada selección de componentes es una etapa crítica en el diseño del sistema, ya que determina la capacidad del entorno de pruebas para cumplir con los requerimientos funcionales, operativos y tecnológicos establecidos. Las herramientas de software y los dispositivos físicos seleccionados para implementar el sistema de evaluación del estándar IEEE 802.11ax, en sus dos variantes (la extendida a la banda de 6 GHz, WiFi 6E; y la convencional, WiFi 6), son descritos en esta sección.

La selección de cada componente se fundamenta en la aptitud para funcionar bajo condiciones reales de prueba, el soporte del estándar 802.11ax, la compatibilidad con las bandas de frecuencia requeridas (6 GHz, 2.4 GHz y 5 GHz) y la disponibilidad en el mercado. Asimismo, se consideran aspectos como facilidad de configuración, soporte de modo punto

de acceso (AP), capacidad de captura de tráfico, y precisión en la generación y medición de datos.

A continuación, se presenta la descripción técnica y justificación de los componentes seleccionados para cada uno de los elementos que conforman la arquitectura del sistema: el punto de acceso, los clientes y las herramientas de software, Para ello, se incluye un análisis comparativo mediante tablas, en las que se evalúan distintos equipos candidatos con base en criterios técnicos específicos. La valoración se realiza utilizando una escala binaria, donde **1** indica que el componente cumple con el requerimiento y **0** que no lo cumple.

3.3.1 Selección de Equipos Terminales

Para garantizar que el adaptador WiFi seleccionado como equipo cliente cumpla con las necesidades funcionales del sistema, se identificaron los requerimientos técnicos como se indica en la **Tabla 8**. Estos criterios permiten evaluar objetivamente la compatibilidad del dispositivo con el estándar WiFi 6E, su funcionamiento bajo entornos Linux y su operatividad con las herramientas de análisis utilizadas en el sistema. A continuación, se presentan los requerimientos considerados.

Tabla 8

Análisis comparativo del cliente

Hardware	SRSH6	SRSH6	SRSH6	SRSH6	Total
QGOO AXE5400	1	1	1	1	4
TP-Link TXE75E	1	0	0	0	1

Nota. Autoría propia

El adaptador QGOO AXE5400 ilustrado en la **Figura 6** fue seleccionado como cliente WiFi 6E del sistema por cumplir con todos los requerimientos técnicos definidos en la arquitectura. Su compatibilidad con Linux, soporte para captura de paquetes en modo monitor y funcionalidad confirmada con iPerf3 y Wireshark lo convierten en la opción más adecuada.

Figura 6

Adaptador QGOO AXE5400

3.3.2 Selección del Punto de Acceso

La selección del dispositivo que actuará como punto de acceso (AP) es fundamental dentro del diseño del sistema, ya que constituye el nodo central de la arquitectura inalámbrica sobre la cual se ejecutarán las pruebas experimentales. El equipo debe ser capaz de operar en las bandas de 5 GHz y 6 GHz bajo el estándar IEEE 802.11ax (WiFi 6/6E), soportar el modo AP mediante herramientas como *hostapd*, y garantizar compatibilidad con sistemas operativos basados en Linux. A continuación, se presentan los requerimientos técnicos específicos en la **Tabla 9** que rigen la selección del módulo AP.

Tabla 9

Análisis comparativo para el AP

Hardware	SRSH4	SRSH8	SRSH13	SRSH15	SRSH17	Total
Raspberry Pi CM4	1	1	1	1	1	5
Raspberry Pi 4B	1	0	1	1	1	4
Orange Pi 5	1	0	1	1	1	4

Nota. Autoría propia

Según la **Tabla 9** Se seleccionó la Raspberry Pi CM4 el cual se visualiza en la **Figura 7** con su IO Board oficial como hardware base del punto de acceso debido a su capacidad de integración directa con módulos M.2 como el Intel AX210, su arquitectura optimizada para proyectos embebidos y su eficiencia energética.

Figura 7

Raspberry Pi CM 4

3.3.2.1 Selección del módulo inalámbrico del punto de acceso

Para habilitar las funcionalidades inalámbricas en la Raspberry Pi CM4 y cumplir con los objetivos del sistema, se requiere un módulo de red compatible con el estándar IEEE 802.11ax, capaz de operar en bandas de 5 GHz y 6 GHz. Este módulo debe ser compatible con Linux, funcionar con *hostapd* en modo punto de acceso y admitir operación estable en entornos experimentales.

Tabla 10

Análisis comparativo de antenas PCIe

Hardware	SRSH1	SRSH5	SRSH9	SRSH10	Total
Intel AX210	1	1	1	1	4
Intel AX200	0	0	1	1	2
Killer AX1675x	1	1	0	0	2

Nota. Autoría propia

Como se visualiza en la **Tabla 10**, el módulo Intel AX210 cuya imagen se visualiza en la **Figura 8** fue seleccionado como componente inalámbrico del punto de acceso por su compatibilidad con el estándar WiFi 6E, soporte completo para operación en 6 GHz, y funcionamiento comprobado con herramientas clave en entornos Linux.

Figura 8

Módulo Intel Wi-Fi 6E AX210

3.3.3 Selección del Sistema Operativo

La selección del sistema operativo y de las herramientas utilizadas durante las pruebas responde a criterios de compatibilidad con el hardware, estabilidad durante la ejecución y facilidad de integración con los módulos inalámbricos seleccionados. Dado que el sistema se ha diseñado de forma modular para operar en WiFi 6 y WiFi 6E, se requiere una plataforma flexible que permita la configuración detallada de interfaces de red y herramientas de captura.

Como se indica en la **Tabla 11** se seleccionó Ubuntu Server 20.04 ARM64 como sistema operativo para la Raspberry Pi CM4 por su compatibilidad nativa con módulos WiFi 6E como el Intel AX210, su entorno estable para administración en consola, y disponibilidad inmediata de herramientas como *hostapd*, *iPerf3* y *Wireshark* a través de los repositorios oficiales.

Tabla 11

Análisis comparativo para el sistema operativo de la SBC

Hardware	SRSH9	SRSH10	SRSH11	Total
Ubuntu Server 20.04	1	1	1	3
Raspberry Pi OS	0	1	1	2

Nota. Autoría propia

3.4 Desarrollo metodológico del diseño del sistema

En esta sección se documentó el desarrollo del sistema experimental conforme a las fases metodológicas definidas en el diagrama de bloques presentado en el alcance del anteproyecto. Dicho diagrama estableció cinco etapas secuenciales: diseño del entorno experimental, configuración de los equipos de prueba, ejecución de pruebas, recopilación de datos y evaluación de resultados.

En el presente capítulo se abordaron las tres primeras fases del proceso. Inicialmente, se diseñó la topología del sistema bajo criterios técnicos previamente establecidos. Posteriormente, se efectuó la configuración de los dispositivos involucrados, incluyendo la instalación de software y asignación de parámetros de red. Finalmente, se ejecutó una validación preliminar para verificar el funcionamiento operativo del entorno experimental.

3.4.1 Diseño del entorno experimental

En esta etapa se definió la topología del sistema de pruebas, la cual correspondió a una arquitectura punto a punto entre un nodo emisor y un nodo receptor. Este diseño permitió establecer un entorno controlado para la evaluación comparativa del rendimiento en las bandas de 5 GHz y 6 GHz.

El nodo emisor integró los componentes seleccionados previamente y fue configurado como punto de acceso WiFi bajo el estándar IEEE 802.11ax. El nodo receptor operó como cliente inalámbrico, conectado al emisor para la captura y análisis de parámetros de red.

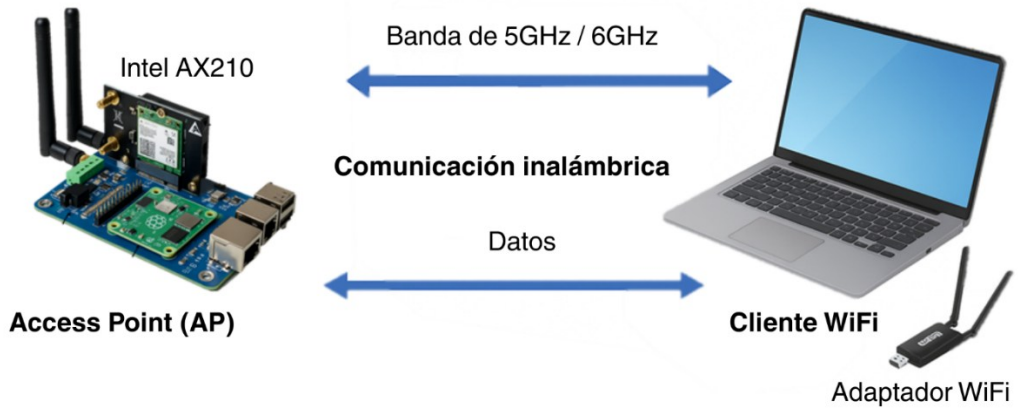
Para representar gráficamente esta disposición, se elaboraron diagramas de bloques correspondientes al nodo emisor, nodo receptor y al sistema completo. Además, se incluyeron diagramas de flujo que describieron la secuencia operativa de cada nodo, desde la inicialización hasta la ejecución de herramientas de medición.

3.4.1.1 Diagrama de bloques general

A continuación, en la **Figura 9** se detalla el diagrama de bloque del sistema de manera general para posteriormente detallar cada uno de los bloques y procesos.

Figura 9

Diagrama de bloques del sistema completo



Nota. Autoría propia

3.4.1.2 Diagrama de Bloques del Nodo Emisor (AP)

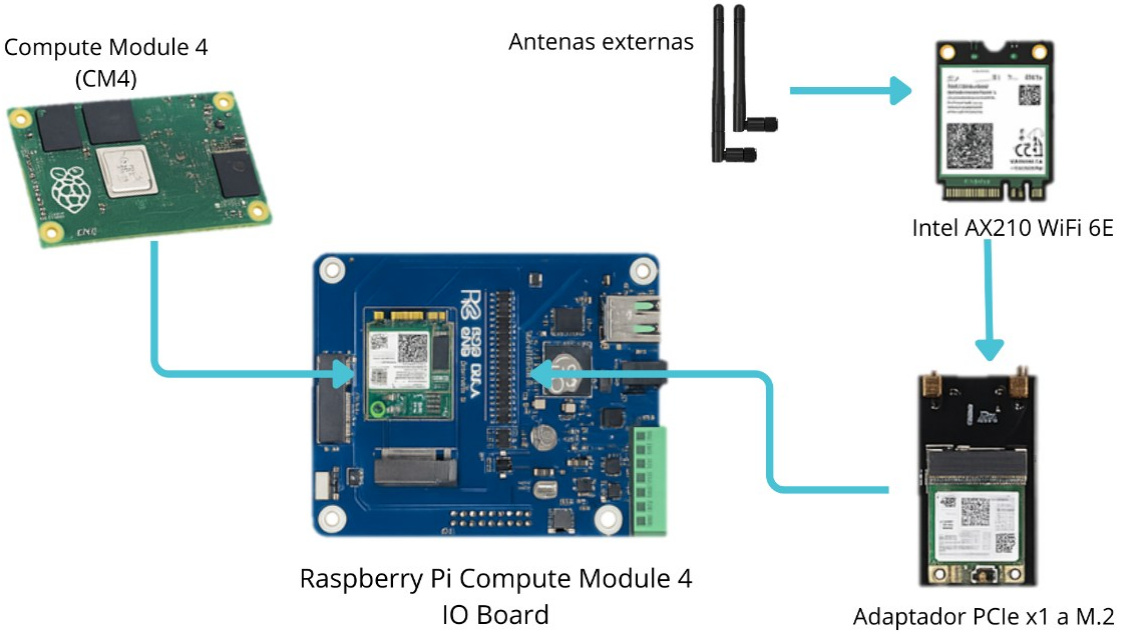
Se puede observar en la **Figura 10** del diagrama de boques que el nodo emisor está compuesto por un bloque principal donde se encuentra la Raspberry Pi Compute Module 4 (CM4), conectada directamente a la IO Board Waveshare Type B, que permite la expansión mediante un puerto PCIe x1.

A este puerto se conectaría un adaptador PCIe x1 a M.2 Key-E, sobre el cual se montaría la tarjeta Intel AX210, que será la encargada de emitir la señal WiFi bajo el estándar 802.11ax, tanto en la banda de 5 GHz como en la de 6 GHz. Esta tarjeta contará con dos

antenas externas conectadas mediante puertos IPEX, necesarias para la transmisión eficiente en ambas bandas.

Figura 10

Diagrama de bloques del nodo emisor



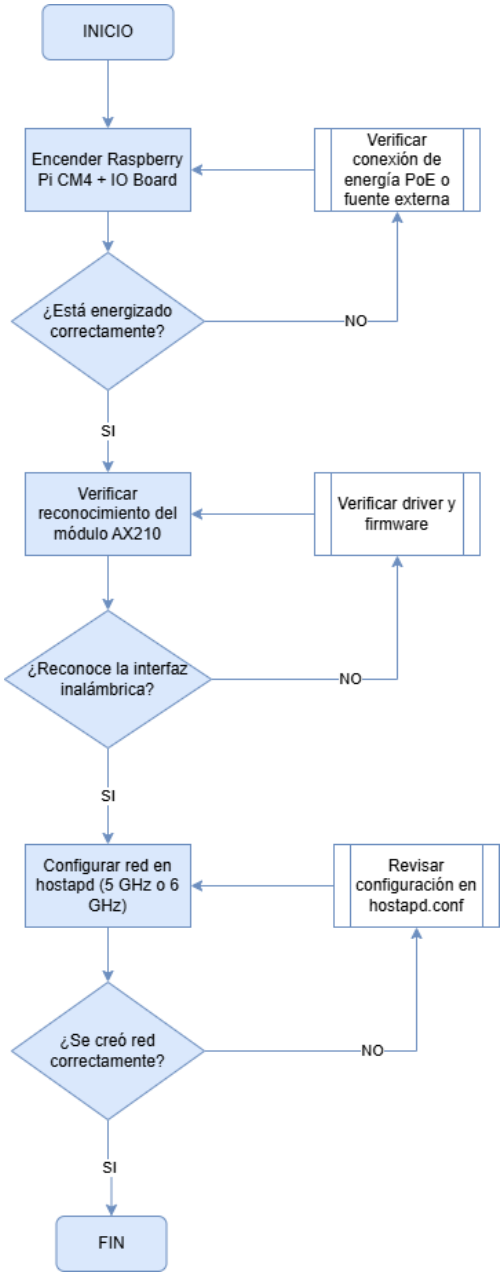
Nota. Autoría propia

Este diseño está planteado para permitir la configuración del nodo como punto de acceso utilizando software como hostapd, ejecutado en un entorno Linux, con la finalidad de emitir una red WiFi 6/6E que será utilizada durante las pruebas experimentales.

A continuación, en la **Figura 11** se indica el proceso mediante un diagrama de flujo de su funcionamiento.

Figura 11

Diagrama de flujo del nodo emisor



Nota. Autoría propia

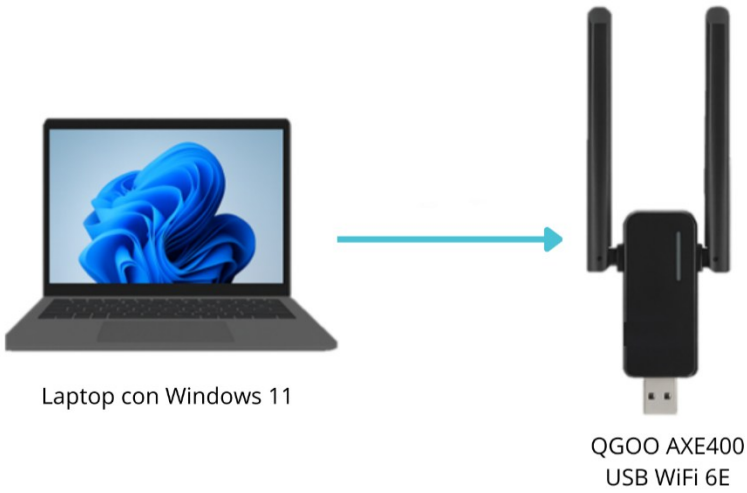
3.4.1.3 Diagrama de bloques del nodo Receptor

En la **Figura 12** se puede observar que el nodo receptor está compuesto por una laptop con sistema operativo Windows 11, a la cual se conectará un adaptador USB externo modelo QGOO AXE5400, que permitirá la recepción de señales inalámbricas bajo el estándar WiFi 6E.

Este adaptador se conecta mediante un puerto USB 3.0 y cuenta con dos antenas externas de 5 dBi que mejoran la capacidad de recepción, especialmente en entornos con interferencias o mayor distancia respecto al emisor.

Figura 12

Diagrama de bloques del nodo receptor



Nota. Autoría propia

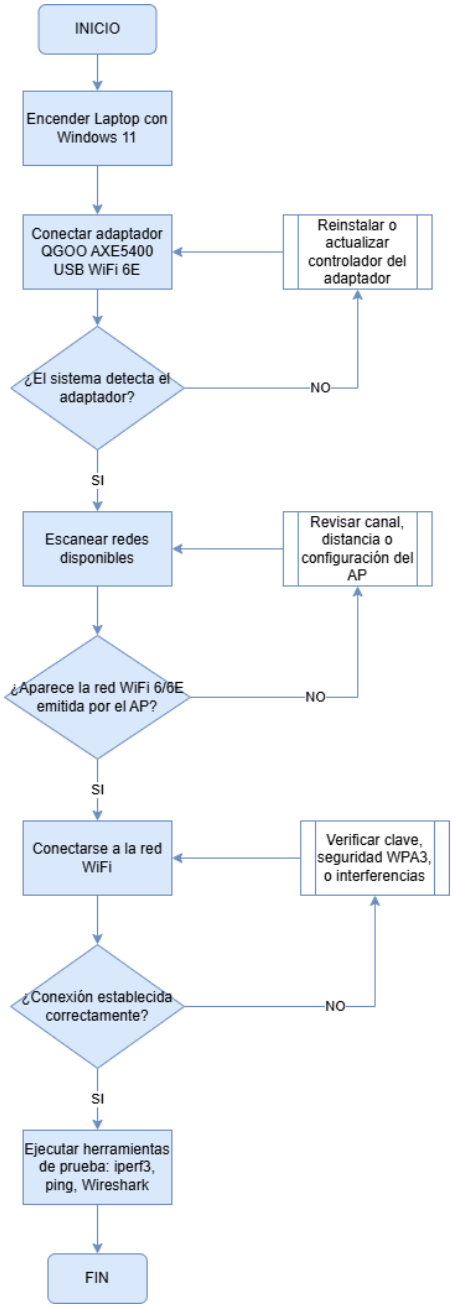
El equipo receptor estará equipado con herramientas de medición como iperf3 para evaluar el rendimiento de la conexión, ping para determinar la latencia, y Wireshark para la captura y análisis de tramas.

Este diseño está pensado para facilitar la conexión con el punto de acceso configurado en la Raspberry Pi, y servirá como nodo de medición durante las pruebas en las bandas de 5 GHz y 6 GHz. Además, el sistema permitirá visualizar en tiempo real el estado de la conexión y registrar los resultados necesarios para el análisis comparativo.

A continuación, en la **Figura 13** se detalla su funcionamiento mediante un diagrama de flujo.

Figura 13

Diagrama de flujo para el nodo receptor



Nota. Autoría propia

3.4.2 Configuración de los equipos

Una vez definido el entorno experimental, se procedió con la configuración técnica de los dispositivos que integraron el sistema de pruebas. Esta etapa comprendió la instalación de

los sistemas operativos, la asignación de parámetros de red y la habilitación de herramientas para la generación y análisis de tráfico de red, requeridas en fases posteriores del proyecto.

La configuración se desarrolló de manera específica para cada nodo, en el nodo emisor se implementaron servicios orientados a la transmisión y administración de la red inalámbrica, mientras que en el nodo receptor se establecieron condiciones para la conexión, recepción de datos y análisis de parámetros de rendimiento.

3.4.2.1 Configuración del nodo emisor

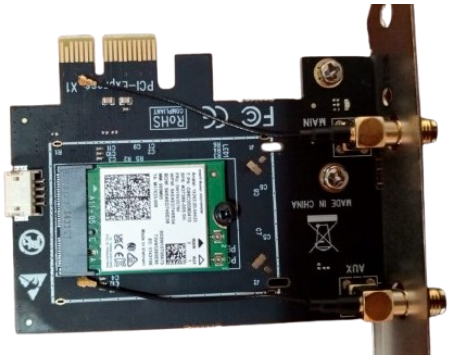
El nodo emisor fue construido a partir de una Raspberry Pi Compute Module 4 (CM4) integrada en una placa base IO Board tipo B, diseñada para proporcionar acceso a interfaces de red, alimentación, expansión y depuración. Como parte de la preparación física, se realizó el ensamblaje de los componentes necesarios para habilitar la conectividad inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.11ax.

Inicialmente, se ensambló el módulo inalámbrico Intel AX210 en un adaptador M.2 a PCIe, el cual permitió su conexión posterior a la placa IO Board. Este adaptador también proporcionó estabilidad mecánica y la interfaz de antenas externas.

En la **Figura 14** se muestra el módulo AX210 ensamblado en el adaptador correspondiente. A continuación, se conectaron dos antenas de 5 dBi a los conectores U.FL del módulo, lo cual fue necesario para operar adecuadamente en las bandas de 5 GHz y 6 GHz.

Figura 14

Módulo Intel AX210 montado sobre adaptador M.2 a PCIe



Nota. Autoría propia

Posteriormente, se ensambló el Compute Module 4 sobre el zócalo principal de la IO Board, cuidando la correcta alineación de los pines de alimentación y comunicación. Esta unión estableció el núcleo de procesamiento del sistema. Una vez fijado el módulo CM4, se procedió a instalar el adaptador con el AX210 en la ranura PCIe Gen2 ×1 de la IO Board.

La **Figura 15** muestra el conjunto completo ensamblado, esta conexión aseguró la comunicación directa entre el sistema y el módulo inalámbrico.

Figura 15

Conjunto ensamblado: IO Board + CM4 + adaptador PCIe con AX210

Nota. Autoría propia

Finalmente, se conectó la alimentación externa de 5V mediante el conector de entrada de la IO Board. También se conectó un cable USB-C al puerto marcado como USB SLAVE, el cual sería utilizado en la posterior instalación del sistema operativo. Con el ensamblaje físico completado, el nodo emisor quedó preparado para iniciar el proceso de configuración lógica, el cual se detalla en los siguientes apartados.

3.4.2.1.1 Instalación del sistema operativo

Una vez ensamblado el nodo emisor, se procedió con la instalación del sistema operativo en la memoria eMMC del Compute Module 4. Para ello, fue necesario activar el modo dispositivo USB de la placa, lo que permitió que el sistema anfitrión reconociera la eMMC como una unidad de almacenamiento externa.

El proceso se inició colocando el jumper en la posición BOOT sobre la IO Board y conectando el puerto USB SLAVE mediante un cable USB-C al computador como se indica en la **Figura 16**. Luego, se ejecutó la herramienta rpiboot, desarrollada por la Fundación Raspberry Pi, la cual permitió activar la interfaz USB de la CM4.

Figura 16

Posición BOOT sobre la IO Board

Nota. Autoría propia

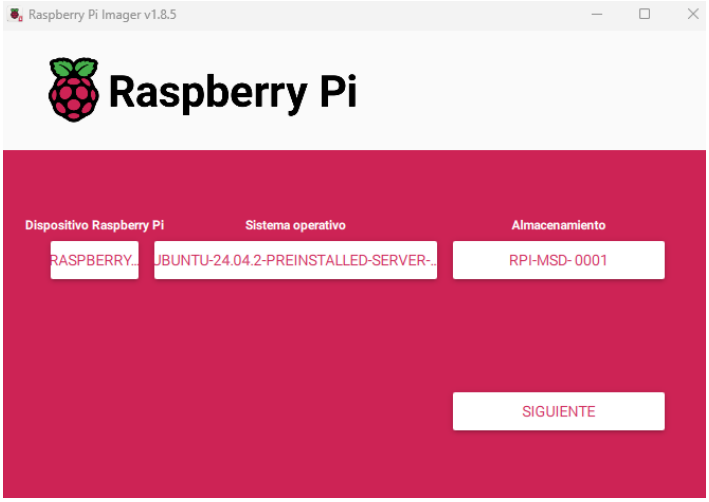
Una vez reconocido el dispositivo, se descargó la imagen de Ubuntu Server 24.04.2 LTS ARM64 desde el sitio oficial de Ubuntu. La Fundación Raspberry Pi tiene como

herramienta oficial el software Raspberry Pi Imager, que fue el programa que utilizamos para instalar la imagen. Primero, se eligió la opción "Use custom" para cargar la imagen .img.xz que se había descargado antes. Después, se seleccionó el modelo de placa Compute Module 4 como equipo a utilizar y la unidad que se identificó por rpiboot fue designada para la memoria eMMC.

Por último, se entró en la opción de configuración avanzada del sistema, donde se personalizaron aspectos como el nombre de usuario (milea), la contraseña, la conexión a red y la activación del servicio SSH para acceso remoto. La **Figura 17** muestra la configuración para el flasheo del sistema operativo.

Figura 17

Instalación de la imagen con el software Raspberry Pi Imager



Nota. Autoría propia

Adicionalmente, con el objetivo de facilitar la administración local del nodo emisor y permitir el uso de herramientas gráficas como Wireshark, se instaló el entorno de escritorio ligero XFCE mediante el comando **"sudo apt install xfce4"**.

3.4.2.1.2 Configuración de interfaces de red

Una vez completada la instalación del sistema operativo Ubuntu Server 24.04.2 LTS ARM64 en la unidad eMMC del módulo Raspberry Pi Compute Module 4 (CM4), se procedió

con la verificación y configuración de las interfaces de red disponibles. El objetivo principal de esta etapa fue habilitar la interfaz PCIe correspondiente al módulo Intel AX210 y configurar adecuadamente la conexión inalámbrica para operar en la banda de 5 GHz. La verificación de las interfaces disponibles se realizó mediante el comando ***ip add*** como se indica en la **Figura 18**.

Figura 18

Interfaz inalámbrica wlp1s0 detectada mediante el comando ip add

```
milea@raspberrypi:~$ ip add
1: lo: <LOOPBACK,UP,LOWER_UP> mtu 65536 qdisc noqueue state UNKNOWN group default qlen 1000
    link/loopback 00:00:00:00:00:00 brd 00:00:00:00:00:00
    inet 127.0.0.1/8 scope host lo
       valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 ::1/128 scope host noprefixroute
       valid_lft forever preferred_lft forever
2: eth0: <NO-CARRIER,BROADCAST,MULTICAST,UP> mtu 1500 qdisc mq state DOWN group default qlen 1000
    link/ether d8:3a:dd:6a:fa:db brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
3: wlp1s0: <NO-CARRIER,BROADCAST,MULTICAST,UP> mtu 1500 qdisc noqueue state DOWN group default qlen 1000
    link/ether 54:e4:ed:74:6e:04 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
    inet 192.168.50.1/24 scope global wlp1s0
       valid_lft forever preferred_lft forever
4: wlan1: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc fq_codel state UP group default qlen 1000
    link/ether d8:3a:dd:6a:fa:dc brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
```

Nota. Autoría propia

En esta salida se confirmó la presencia de la interfaz wlp1s0, asociada al adaptador WiFi AX210. Adicionalmente, se ejecutó el comando ***iw dev,*** con este comando se obtuvo información del dispositivo físico asociado al adaptador inalámbrico, identificándose como phy0 como se indica en la **Figura 19**. Esta interfaz inalámbrica fue reconocida por el sistema de forma nativa gracias al soporte del kernel 6.8 previamente instalado.

Se utilizó una dirección IP en el rango 192.168.50.x porque pertenece a los rangos privados definidos por RFC 1918, adecuados para redes locales de laboratorio y sin dependencia de direccionamiento público.

Figura 19

Identificación del dispositivo físico phy0 con el comando iw dev

```
milea@raspberrypi:~$ iw dev
phy#0
        Unnamed/non-netdev interface
                wdev 0x5
                addr 54:e4:ed:74:6e:05
                type P2P-device
        Interface wlp1s0
                ifindex 3
                wdev 0x1
                addr 54:e4:ed:74:6e:04
                type managed
                multicast TXQ:
                        qsz-byt qsz-pkt flows   drops   marks   overlmt hashcol tx-bytes        tx-packets
                        0       0       0       0       0       0       0       0                0
```

Nota. Autoría propia

La disponibilidad de canales y capacidades del adaptador se comprobó ejecutando el siguiente comando ***iw list***, dentro de la salida del comando como se indica en la **Figura 20**, se confirmó que el dispositivo soportaba modo AP (Access Point) en la banda 2 (5 GHz) y que los canales no presentaban ninguna bandera, permitiendo su uso directo en modo emisor.

Figura 20

Capacidades del dispositivo incluyendo soporte para modo AP y canales habilitados.

```
Supported interface modes:
         * IBSS
         * managed
         * AP
         * AP/VLAN
         * monitor
         * P2P-client
         * P2P-GO
         * P2P-device
```

```
milea@raspberrypi:~$ iw list | grep -A 10 "Frequencies:"
                Frequencies:
                        * 2412.0 MHz [1] (22.0 dBm)
                        * 2417.0 MHz [2] (22.0 dBm)
                        * 2422.0 MHz [3] (22.0 dBm)
                        * 2427.0 MHz [4] (22.0 dBm)
                        * 2432.0 MHz [5] (22.0 dBm)
                        * 2437.0 MHz [6] (22.0 dBm)
                        * 2442.0 MHz [7] (22.0 dBm)
                        * 2447.0 MHz [8] (22.0 dBm)
                        * 2452.0 MHz [9] (22.0 dBm)
                        * 2457.0 MHz [10] (22.0 dBm)
--
                Frequencies:
                        * 5180.0 MHz [36] (22.0 dBm)
                        * 5200.0 MHz [40] (22.0 dBm)
                        * 5220.0 MHz [44] (22.0 dBm)
                        * 5240.0 MHz [48] (22.0 dBm)
                        * 5260.0 MHz [52] (22.0 dBm) (radar detection)
                        * 5280.0 MHz [56] (22.0 dBm) (radar detection)
                        * 5300.0 MHz [60] (22.0 dBm) (radar detection)
                        * 5320.0 MHz [64] (22.0 dBm) (radar detection)
                        * 5340.0 MHz [68] (disabled)
                        * 5360.0 MHz [72] (disabled)
--
                Frequencies:
                        * 5955.0 MHz [1] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 5975.0 MHz [5] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 5995.0 MHz [9] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 6015.0 MHz [13] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 6035.0 MHz [17] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 6055.0 MHz [21] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 6075.0 MHz [25] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 6095.0 MHz [29] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 6115.0 MHz [33] (22.0 dBm) (no IR)
                        * 6135.0 MHz [37] (22.0 dBm) (no IR)
--
```

Nota. Autoría propia

3.4.2.1.3 Configuración del punto de acceso

Una vez habilitada y verificada la interfaz inalámbrica wlp1s0, se procedió a configurar el nodo emisor en modo punto de acceso (AP) mediante la herramienta hostapd. Esta utilidad fue instalada desde los repositorios oficiales de Ubuntu, junto con los paquetes necesarios para la gestión del servicio con el comando ***sudo apt install hostapd.***

Con el fin de garantizar compatibilidad con el estándar IEEE 802.11ax y activar el modo AP en la banda de 5 GHz, se creó un archivo de configuración denominado hostapd.conf. Este archivo especificó los parámetros esenciales para la emisión de la red, como se muestra en la **Figura 21**

Figura 21

Archivo de configuración del hostapd

```
  GNU nano 7.2                    /etc/hostapd/hostapd.conf
interface=wlp1s0
driver=nl80211
ssid=Test5GHz
hw_mode=a
channel=149
ieee80211n=1
ieee80211ac=1
ieee80211ax=1
ht_capab=[HT40+]
vht_capab=[SHORT-GI-80]
country_code=US
auth_algs=1
wpa=2
wpa_key_mgmt=WPA-PSK
wpa_passphrase=password
rsn_pairwise=CCMP
```

Nota. Autoría propia

El parámetro hw_mode=a especificó el uso de la banda de 5 GHz, mientras que channel=36 fijó el canal de operación en 5180 MHz, validado previamente como disponible. Se habilitaron las extensiones 802.11n y 802.11ac para maximizar la compatibilidad y el rendimiento.

Antes de ejecutar hostapd, fue necesario modificar el tipo de interfaz de red a modo AP, ya que por defecto se encontraba en modo cliente. Esta configuración se realizó con los comandos que se indican en la **Figura 22**.

Figura 22

Interfaz en modo AP

```
milea@raspberrypi:~$ sudo ip link set wlp1s0 down
milea@raspberrypi:~$ sudo iw dev wlp1s0 set type __ap
milea@raspberrypi:~$ sudo ip link set wlp1s0 up
```

Nota. Autoría propia

Posteriormente, se inició el punto de acceso utilizando el archivo hostapd.conf con el comando ***sudo hostapd ./hostapd.conf,*** como se indica en la **Figura 23**.

Figura 23

Resultado de la ejecución manual del modo AP con hostapd, mostrando inicio exitoso del servicio.

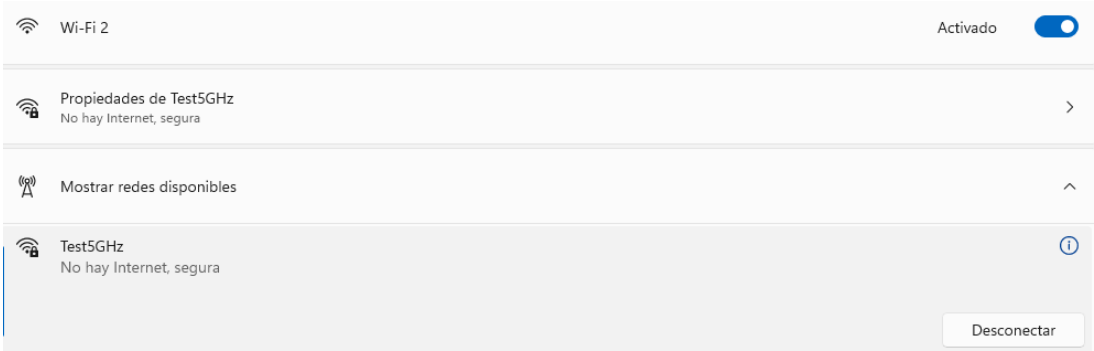
```
milea@raspberrypi:~$ sudo hostapd /etc/hostapd/hostapd.conf
wlp1s0: interface state UNINITIALIZED->COUNTRY_UPDATE
wlp1s0: interface state COUNTRY_UPDATE->HT_SCAN
wlp1s0: interface state HT_SCAN->ENABLED
wlp1s0: AP-ENABLED
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-CONNECTED 00:1d:43:30:11:49
```

Nota. Autoría propia

Durante la prueba, se validó la correcta emisión de la red Test5GHz desde la estación de Windows como se indica en la **Figura 24**, comprobando la detección y autenticación sin errores en la banda de 5 GHz.

Figura 24

Detección de la red Test5GHz



Nota. Autoría propia

3.4.2.1.4 Habilitación de herramientas

Con el objetivo de realizar pruebas controladas de rendimiento, latencia y captura de tráfico, se instalaron y configuraron en el nodo emisor dos herramientas esenciales: iperf3 para la generación de tráfico TCP/UDP, y Wireshark para la inspección en tiempo real de tramas IEEE 802.11. para instalar las herramientas se utilizó los comandos ***sudo apt install iperf3*** y debido a que la captura de tramas en modo monitor requiere privilegios elevados y acceso a interfaces de bajo nivel, se optó por instalar tshark, la versión de consola de Wireshark, la cual es adecuada para entornos embebidos como Raspberry Pi con el comando ***sudo apt install tshark.***

3.4.2.2 Configuración del nodo receptor

El nodo receptor fue implementado en una estación portátil con sistema operativo Windows 11 Pro, equipada con un adaptador externo QGOO AXE5400 conectado mediante puerto USB 3.0. Este nodo fue preparado para recibir las señales emitidas por el punto de acceso en ambas bandas (5 GHz y 6 GHz), realizar pruebas de rendimiento mediante iperf3 y capturar tramas inalámbricas utilizando Wireshark.

3.4.2.2.1 Reconocimiento del adaptador WiFi 6E

Una vez conectado físicamente el adaptador AXE5400, el sistema Windows 11 detectó automáticamente el dispositivo y procedió a la instalación del controlador mediante Windows Update.

Para verificar que el adaptador ofrecía soporte para las bandas de 5 GHz y 6 GHz, se accedió a la terminal de comandos (CMD) y se ejecutó el siguiente comando ***netsh wlan show drivers*** como se indica en la **Figura 25**.

Figura 25

Salida en consola, confirmando compatibilidad con bandas de 2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz.

```
Número de bandas admitidas: 3
                            2,4 GHz [ 0 MHz - 0 MHz]
                            5 GHz [ 0 MHz - 0 MHz]
                            6 GHz [ 0 MHz - 0 MHz]
```

Nota. Autoría propia

Este comando desplegó información técnica del controlador inalámbrico, incluyendo el campo denominado "Tipos de radio admitidos", donde se reportaron los estándares: 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, y 802.11ax. La presencia de 802.11ax validó la compatibilidad con WiFi 6 y WiFi 6E.

3.4.2.2.2 Verificación de conectividad inalámbrica

Con el punto de acceso emitiendo en la banda de 5 GHz, se activó el escaneo de redes inalámbricas en el cliente Windows. Desde el panel de redes se detectó la red "Test5GHz", lo cual validó visualmente la emisión del SSID y la compatibilidad del adaptador cliente. Se procedió a establecer la conexión ingresando la clave WPA2 configurada en hostapd.conf, confirmando autenticación y asignación de IP en modo DHCP como se indica en la **Figura 26**.

Figura 26

Detección y conexión exitosa a la red "Test5GHz" desde el cliente Windows.

SSID:	Test5GHz
Protocolo:	Wi-Fi 6 (802.11ax)
Tipo de seguridad:	WPA2-Personal
Fabricante:	Realtek Semiconductor Corp.
Descripción:	Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC
Versión del controlador:	5001.19.102.0

Nota. Autoría propia

Posteriormente, se ejecutó una prueba de ping desde la terminal Windows hacia la IP del nodo emisor para verificar la conectividad bidireccional lo cual se indica en la **Figura 27**.

Figura 27

Resultado del comando ping desde el cliente hacia el emisor.

```
Adaptador de LAN inalámbrica Wi-Fi 2:

   Sufijo DNS específico para la conexión. . :
   Vínculo: dirección IPv6 local. . . : fe80::30aa:2ab2:2b3f:5d59%21
   Dirección IPv4. . . . . . . . . . . . . . : 192.168.50.100
   Máscara de subred . . . . . . . . . . . . : 255.255.255.0
   Puerta de enlace predeterminada . . . . . : 192.168.50.1

C:\Users\milea>ping 192.168.50.1

Haciendo ping a 192.168.50.1 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.50.1: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.50.1: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.50.1: bytes=32 tiempo=2ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.50.1: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.50.1:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 1ms, Máximo = 2ms, Media = 1ms
```

Nota. Autoría propia

3.4.2.2.2.1 Tecnología de negociación

La **Figura 28** presenta, de forma compacta, la tecnología de negociación organizada en tres bloques.

Tramas de gestión y control: el AP emitió beacons con SSID/BSSID y parámetros (RSN/PMF y HE 802.11ax); la STA efectuó Probe Request/Response para descubrimiento; seguidamente se realizó la autenticación 802.11 (Open System en WPA2-PSK o SAE en

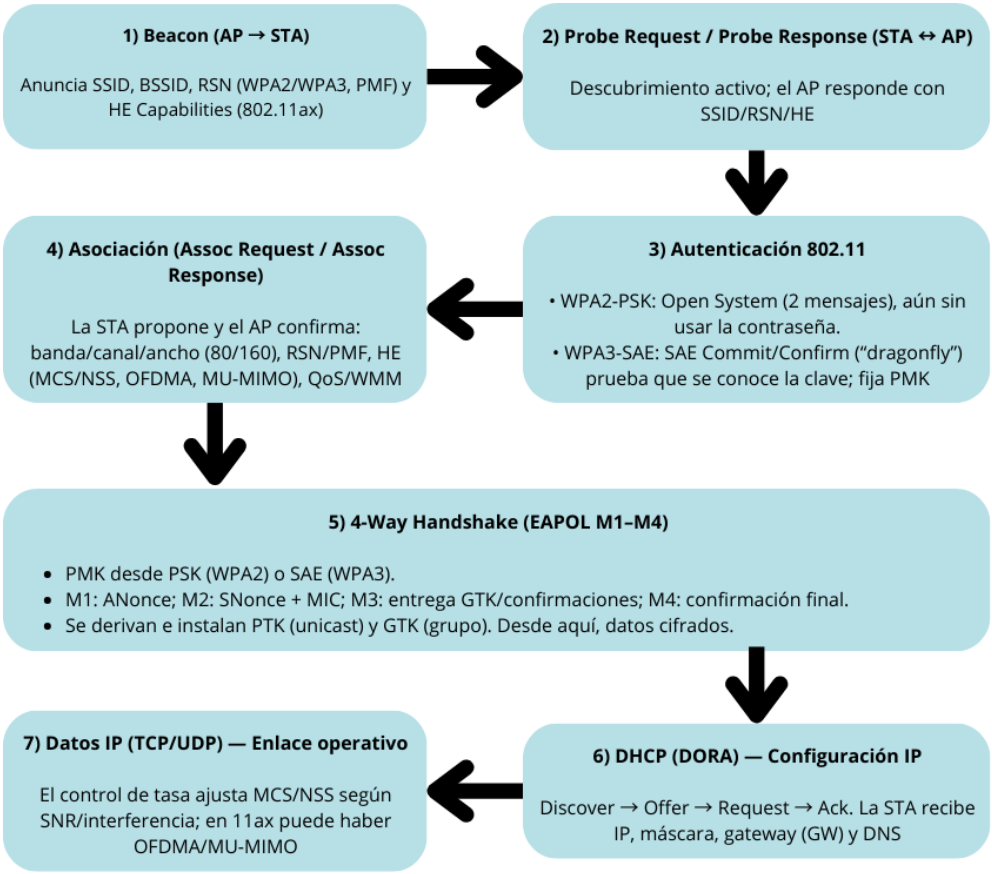
WPA3) y la asociación, donde quedaron acordados banda/canal/ancho, seguridad y capacidades HE (p. ej., MCS/NSS, OFDMA, MU-MIMO) y QoS/WMM. Para arbitrar el medio, se emplearon tramas de control (RTS/CTS/ACK) cuando se presentó la solicitud.

Intercambio de llaves: A través del 4-Way Handshake (EAPOL M1–M4), se obtuvo la clave maestra (PMK) —ya sea a partir de PSK o de SAE— y se establecieron las claves de sesión GTK (de grupo) y PTK (unicast), con verificación de integridad (MIC) y PMF activa. Desde ahí, el enlace quedó cifrado.

Fase IP y datos: la STA se configuró a través de DHCP (DORA) y se activó el tráfico TCP/UDP, con control de tasa que modificó MCS/NSS y, en 802.11ax, la capacidad de OFDMA/MU-MIMO durante la carga.

Figura 28

Secuencia de negociación y establecimiento del enlace Wi-Fi



Nota. Autoría propia

En la **Figura 29** se muestra la ejecución del servicio hostapd en la Raspberry Pi CM4, utilizando el archivo de configuración correspondiente a la banda de 5 GHz. En el registro del proceso se observó la transición de estados de la interfaz inalámbrica wlp1s0 desde UNINITIALIZED hasta ENABLED, lo que confirmó la activación del punto de acceso y la emisión del SSID configurado.

Posteriormente, se registraron los eventos de autenticación y asociación del cliente con dirección MAC 00:1D:43:30:11:49

Finalmente, el proceso hostapd mostró la completitud del intercambio de claves lo cual indica que se finalizó correctamente el *4-Way Handshake* del protocolo WPA2 (RSN) y que el enlace inalámbrico se estableció de forma segura.

Figura 29

Registro de inicialización y autenticación del punto de acceso

```
milea@raspberrypi:~$ sudo hostapd /etc/hostapd/hostapd.conf
[sudo] password for milea:
wlp1s0: interface state UNINITIALIZED->COUNTRY_UPDATE
wlp1s0: interface state COUNTRY_UPDATE->HT_SCAN
wlp1s0: interface state HT_SCAN->ENABLED
wlp1s0: AP-ENABLED
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-CONNECTED 00:1d:43:30:11:49
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 RADIUS: starting accounting session DFBA2674D32172
81
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 WPA: pairwise key handshake completed (RSN)
wlp1s0: EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED 00:1d:43:30:11:49
wlp1s0: AP-STA-DISCONNECTED 00:1d:43:30:11:49
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-CONNECTED 00:1d:43:30:11:49
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 RADIUS: starting accounting session DFBA2674D32172
81
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 WPA: pairwise key handshake completed (RSN)
wlp1s0: EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED 00:1d:43:30:11:49
```

Nota. Autoría propia

3.4.2.2.3 Preparación para pruebas de captura y tráfico

Para las pruebas de rendimiento, se utilizó el ejecutable iperf3.exe en el nodo receptor, previamente descargado desde el repositorio oficial de ESnet. Este archivo se colocó en la

ruta C:\iperf3, y la ejecución se realizó desde la terminal con el siguiente comando ***C:\iperf3\iperf3.exe -c 192.168.50.1***

Donde 192.168.50.1 correspondió a la dirección IP del nodo emisor que operaba en modo servidor (-s). La herramienta permitió medir el throughput en Mbps para enlaces ascendentes como se observa en la **Figura 30**.

Figura 30

Ejecución del comando iperf3 -c en Windows hacia el nodo emisor.

```
C:\Users\milea\Downloads\iperf3.1.1_64>iperf3.exe -c 192.168.50.1
Connecting to host 192.168.50.1, port 5201
[  4] local 192.168.50.100 port 57368 connected to 192.168.50.1 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-1.00   sec  20.5 MBytes   172 Mbits/sec
[  4]   1.00-2.00   sec  25.8 MBytes   215 Mbits/sec
[  4]   2.00-3.00   sec  25.6 MBytes   215 Mbits/sec
[  4]   3.00-4.01   sec  24.8 MBytes   207 Mbits/sec
[  4]   4.01-5.00   sec  25.6 MBytes   216 Mbits/sec
[  4]   5.00-6.00   sec  26.0 MBytes   217 Mbits/sec
[  4]   6.00-7.00   sec  25.6 MBytes   215 Mbits/sec
[  4]   7.00-8.00   sec  25.6 MBytes   215 Mbits/sec
[  4]   8.00-9.00   sec  25.5 MBytes   214 Mbits/sec
[  4]   9.00-10.00  sec  26.2 MBytes   219 Mbits/sec
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-10.00  sec   251 MBytes   211 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-10.00  sec   251 MBytes   211 Mbits/sec                  receiver

iperf Done.
```

Nota. Autoría propia

3.4.2.3 Validación del funcionamiento del sistema

Una vez completadas la configuración de los equipos y la asociación entre el nodo emisor y el nodo receptor, se procedió con la validación preliminar del sistema. Esta etapa tuvo como objetivo comprobar que el enlace inalámbrico operaba correctamente, que los dispositivos se conectaban sin errores y que las herramientas instaladas permitían la ejecución de pruebas funcionales de tráfico y captura.

3.4.2.3.1 Integración

Para evaluar el rendimiento inicial del enlace, se ejecutó la herramienta iperf3 en modo servidor en la Raspberry Pi ***iperf3 -s.*** Desde el cliente Windows, se lanzó el cliente ***C:\iperf3\iperf3.exe -c 192.168.50.1***

Se obtuvieron tasas de transferencia estables en el orden de 300–500 Mbps en condiciones de línea de vista, lo cual confirmó que la configuración del entorno permitía establecer sesiones TCP sin interrupciones ni fluctuaciones significativas indicado en la **Figura 31**.

Figura 31

Ejecución de iperf3 en modo servidor y cliente.

```
C:\Users\milea\Downloads\iperf3.1.1_64>iperf3.exe -c 192.168.50.1
Connecting to host 192.168.50.1, port 5201
[  4] local 192.168.50.100 port 57534 connected to 192.168.50.1 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-1.00   sec  29.6 MBytes   248 Mbits/sec
[  4]   1.00-2.00   sec  31.9 MBytes   267 Mbits/sec
[  4]   2.00-3.01   sec  28.4 MBytes   237 Mbits/sec
[  4]   3.01-4.01   sec  29.5 MBytes   248 Mbits/sec
[  4]   4.01-5.01   sec  29.4 MBytes   245 Mbits/sec
[  4]   5.01-6.01   sec  29.9 MBytes   251 Mbits/sec
[  4]   6.01-7.01   sec  32.1 MBytes   269 Mbits/sec
[  4]   7.01-8.00   sec  30.9 MBytes   260 Mbits/sec
[  4]   8.00-9.00   sec  32.2 MBytes   272 Mbits/sec
[  4]   9.00-10.01  sec  32.5 MBytes   271 Mbits/sec
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-10.01  sec   306 MBytes   257 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-10.01  sec   306 MBytes   257 Mbits/sec                  receiver

iperf Done.
```

Nota. Autoría propia

Simultáneamente, se inició la captura de paquetes en ambos nodos. En el nodo emisor, se utilizó la herramienta tshark en modo monitor sobre la interfaz wlp1s0, mientras que en el cliente se habilitó Wireshark en modo promiscuo. Ambas herramientas capturaron flujos TCP correspondientes a la ejecución de iperf3, validando la integridad del tráfico y la capacidad de análisis de cada nodo indicado en la **Figura 32**.

Figura 32

Captura de paquetes mediante Wireshark y tshark durante pruebas preliminares.

ip.addr == 192.168.50.1 && ip.addr == 192.168.50.100

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
79	158.016296	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	54	57534 → 5201 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=212992 Len=0
80	158.016361	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	91	57534 → 5201 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=212992 Len=37
81	158.018303	192.168.50.1	192.168.50.100	TCP	54	5201 → 57534 [ACK] Seq=1 Ack=38 Win=64256 Len=0
82	158.027852	192.168.50.1	192.168.50.100	TCP	55	5201 → 57533 [PSH, ACK] Seq=3 Ack=124 Win=64256 Len=1
83	158.027977	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	54	57533 → 5201 [ACK] Seq=124 Ack=4 Win=212988 Len=0
84	158.028780	192.168.50.1	192.168.50.100	TCP	55	5201 → 57533 [PSH, ACK] Seq=4 Ack=124 Win=64256 Len=1
85	158.029173	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	1514	57534 → 5201 [ACK] Seq=38 Ack=1 Win=212992 Len=1460
86	158.029173	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	1514	57534 → 5201 [ACK] Seq=1498 Ack=1 Win=212992 Len=1460
87	158.029173	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	1514	57534 → 5201 [ACK] Seq=2958 Ack=1 Win=212992 Len=1460
88	158.029173	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	1514	57534 → 5201 [ACK] Seq=4418 Ack=1 Win=212992 Len=1460

ip.addr == 192.168.50.1 && ip.addr == 192.168.50.100 && iperf3

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4	0.001378434	192.168.50.100	192.168.50.1	iPerf3	91	57533 → 5201 Cookie: "Mile.1752513898.042426.461aa0036da7c"
6	0.001577784	192.168.50.1	192.168.50.100	iPerf3	55	5201 → 57533 PARAM_EXCHANGE(9)
7	0.004050191	192.168.50.100	192.168.50.1	iPerf3	58	57533 → 5201 Next message is JSON of this length: 82
9	0.046634865	192.168.50.100	192.168.50.1	iPerf3…	136	57533 → 5201 {"tcp":true,"omit":0,"time":10,"parallel":1,"len":131072,"client_version":…
11	0.047089269	192.168.50.1	192.168.50.100	iPerf3	55	5201 → 57533 CREATE_STREAMS(10)
15	0.050152430	192.168.50.100	192.168.50.1	iPerf3	91	57534 → 5201 Cookie: "Mile.1752513898.042426.461aa0036da7c"
17	0.060403167	192.168.50.1	192.168.50.100	iPerf3	55	5201 → 57533 TEST_START(1)
18	0.060887570	192.168.50.1	192.168.50.100	iPerf3	55	5201 → 57533 TEST_RUNNING(2)
20	0.063466532	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	14654	57534 → 5201 [ACK] Seq=38 Ack=1 Win=212992 Len=14600
22	0.066277270	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	26334	57534 → 5201 [ACK] Seq=14638 Ack=1 Win=212992 Len=26280
24	0.068461475	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	4434	57534 → 5201 [ACK] Seq=40918 Ack=1 Win=212992 Len=4380
26	0.069342672	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	33634	57534 → 5201 [ACK] Seq=45298 Ack=1 Win=212992 Len=33580
28	0.070150351	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	2974	57534 → 5201 [ACK] Seq=78878 Ack=1 Win=212992 Len=2920
30	0.070468812	192.168.50.100	192.168.50.1	TCP	5894	57534 → 5201 [ACK] Seq=81798 Ack=1 Win=212992 Len=5840

Nota. Autoría propia

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y VALIDACIÓN

El presente capítulo describió el proceso de validación experimental del desempeño del estándar IEEE 802.11ax en las bandas de 5 GHz y 6 GHz, mediante la ejecución de un conjunto de pruebas diseñadas para evaluar el comportamiento real del sistema bajo condiciones controladas. La validación consideró tres niveles de análisis complementarios: los requerimientos de arquitectura, los requerimientos de sistema y los escenarios end-to-end, permitiendo obtener una visión integral del funcionamiento del enlace inalámbrico desde la capa física hasta la capa de aplicación.

Con el fin de garantizar una comparación equitativa entre los dos grupos, se llevaron a cabo todas las pruebas en condiciones experimentales idénticas, empleando parámetros de configuración iguales en el punto de acceso y el mismo cliente inalámbrico compatible con WiFi 6/6E.

La evaluación de indicadores esenciales de desempeño, incluyendo latencia ICMP, jitter, estabilidad temporal, pérdida de paquetes bajo carga, interferencia estacionaria y cobertura, fue posible gracias a la metodología empleada. Asimismo, se utilizó un análisis espectral a través de un radio definido por software (SDR), que permitió la captura y el procesamiento de señales en las dos bandas para examinar directamente la constelación modulada y el dominio frecuencial, lo cual enriqueció los resultados alcanzados en términos de transporte y aplicación.

El capítulo se organizó de manera que cada prueba incluyera resultados en las frecuencias de 5 GHz y 6 GHz, además de tablas comparativas que facilitaron la comprensión técnica del desempeño de las dos bandas. Finalmente, se realizó una comparación global frente a los parámetros teóricos del estándar IEEE 802.11ax, seguida de un análisis integral del desempeño y una síntesis de conclusiones que permitieron determinar la banda con el mejor comportamiento global bajo las condiciones evaluadas.

4.1 Arquitectura y Metodología de Validación

Esta sección presentó la arquitectura funcional y el enfoque metodológico empleados para ejecutar las pruebas en las bandas de 5 GHz y 6 GHz. Con el fin de asegurar una comparación equitativa, se definió un modelo de evaluación basado en capas y un diagrama de bloques que organizó de forma secuencial las etapas de conectividad, rendimiento y validación end-to-end. Estos elementos permitieron estructurar adecuadamente el proceso experimental y garantizar la trazabilidad de los resultados obtenidos en ambos entornos de operación.

4.1.1 Arquitectura Funcional de Evaluación

La arquitectura del sistema ha sido concebida tomando como base el modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnection), el cual proporciona una visión estructurada y jerárquica de las funciones necesarias para la comunicación en redes. En el presente diseño, la arquitectura se adapta a las necesidades del proyecto de evaluación comparativa entre WiFi 6 y WiFi 6E, permitiendo mapear las capas funcionales del sistema sobre los elementos físicos y lógicos del entorno experimental. Esta estructura posibilita una visualización clara de las funciones básicas de cada nivel que interviene en la comunicación.

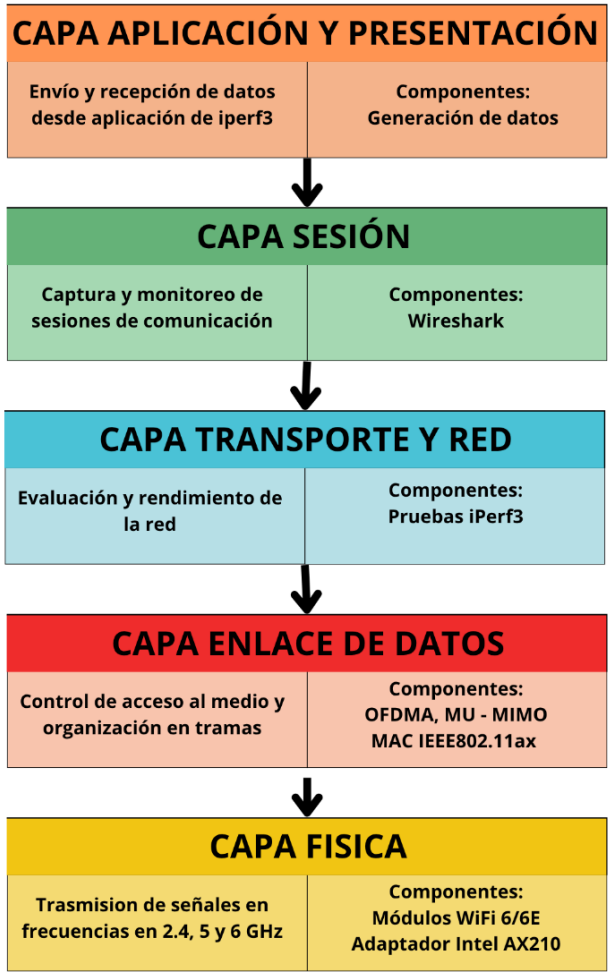
- **Aplicación y Presentación**: Utilizan herramientas como iPerf3 para determinar las condiciones de prueba y gestionar la producción y recepción de datos.
- **Sesión**: Gestiona las sesiones de comunicación y posibilita su análisis a través de Wireshark, que permite la captura y visualización del tráfico en tiempo real.
- **Transporte y Red**: Analizan el desempeño de la red utilizando protocolos TCP/UDP, tomando como medida parámetros como la latencia, el jitter, el rendimiento y la pérdida de paquetes.
- **Enlace de Datos**: Regula el ingreso al canal inalámbrico por medio de funciones como MU-MIMO, TWT y OFDMA, que están definidas en la norma IEEE 802.11ax.

- **Física**: Entiende el hardware de transmisión y recepción, incluidos los adaptadores WiFi 6/6E que funcionan en 2.4, 5 y 6 GHz y que tienen capacidades de modulación de hasta 1024-QAM.

La **Figura 33** es una representación conceptual de esta arquitectura en capas. En ella se pueden ver los componentes que forman parte del sistema, las herramientas utilizadas en cada nivel y los flujos de datos. Esta estructura garantiza una visión integral y detallada del funcionamiento del sistema, permitiendo relacionar las funcionalidades de los dispositivos con los parámetros técnicos evaluados en las pruebas.

Figura 33

Arquitectura del sistema



Nota. El gráfico indica la arquitectura del sistema. Fuente: Autoría

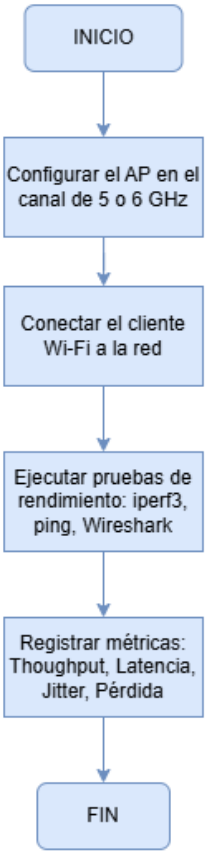
4.1.2 Diagrama de bloques de pruebas

Como se puede observar en la **Figura 34**, el bloque de pruebas está compuesto por la interacción entre el nodo emisor y el nodo receptor, donde el cliente se conectará y se ejecutarán herramientas de prueba como iperf3, ping y Wireshark. Estas herramientas permitirán medir parámetros como la tasa de transferencia, la latencia, la pérdida de paquetes y el comportamiento de las tramas.

Una vez finalizadas las pruebas en la banda de 5 GHz, el punto de acceso será reconfigurado para operar en un canal dentro de la banda de 6 GHz. Posteriormente, se repetirá el mismo proceso de conexión y medición con el nodo receptor, bajo las mismas condiciones físicas y ambientales.

Figura 34

Flujograma para el bloque de pruebas



Nota. Autoría propia

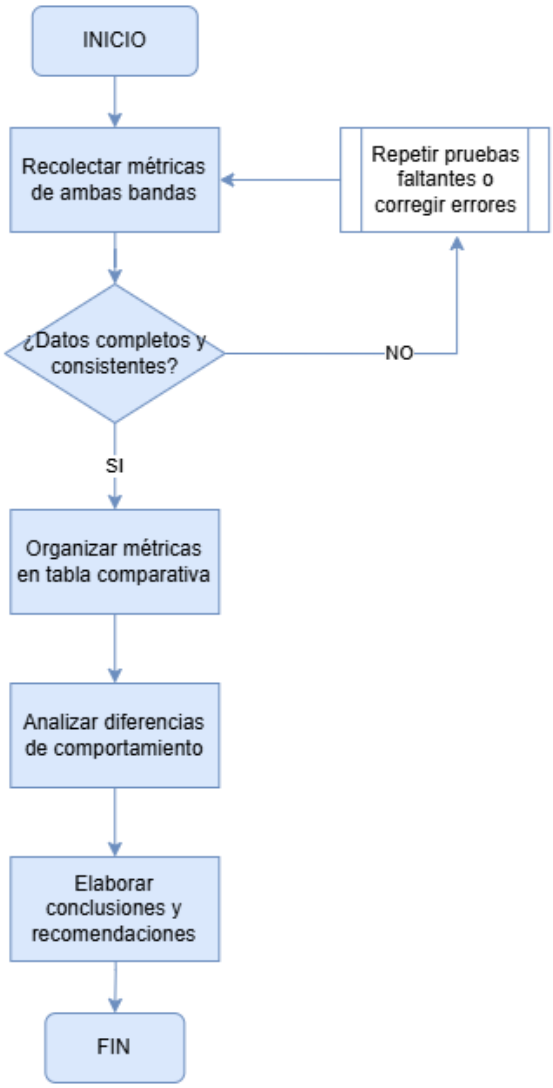
Este bloque ha sido planteado para permitir una comparación directa entre las dos bandas de frecuencia, utilizando las mismas herramientas, distancias y dispositivos, con el fin de obtener resultados confiables y replicables que permitan evaluar el desempeño del estándar IEEE 802.11ax en entornos controlados.

4.1.3 Diagrama de bloques del análisis de resultados comparativos

En la **Figura 35** se puede observar el diagrama de flujo para los resultados comparativos, donde se detallará su proceso.

Figura 35

Diagrama de flujo para los resultados comparativos



Nota. Autoría propia

4.2 Validación de Requerimientos de Arquitectura

La validación de requerimientos de arquitectura tuvo como propósito verificar el funcionamiento estructural del enlace inalámbrico antes de la ejecución de las pruebas de rendimiento. En esta etapa se evaluó la conectividad inicial, la estabilidad del enlace punto a punto, el comportamiento del tráfico TCP básico, así como las condiciones de interferencia y cobertura en ambas bandas de operación. Estas pruebas permitieron confirmar que la arquitectura definida operaba correctamente en 5 GHz y 6 GHz, garantizando que el entorno experimental cumpliera con las condiciones necesarias para la medición confiable del desempeño del estándar IEEE 802.11ax en los apartados posteriores.

4.2.1 Validación de Conectividad Inicial

La validación de conectividad inicial permitió verificar que el cliente inalámbrico estableciera correctamente el enlace punto a punto con el punto de acceso antes de iniciar las pruebas de rendimiento. Esta verificación incluyó la obtención de parámetros IP, la resolución de direcciones mediante ARP, la estabilidad del enlace inalámbrico y la confirmación de que no existieran saltos intermedios en la comunicación.

4.2.1.1 Banda de 5GHz

La **Figura 36** muestra la validación del enlace en la banda de 5 GHz, donde la Raspberry Pi CM4 se configuró como punto de acceso utilizando la interfaz wlp1s0. El comando iw dev wlp1s0 info confirma que la interfaz opera en modo AP, con el SSID Test5GHz y canal 153 (5765 MHz) bajo un ancho de banda de 40 MHz, lo que coincide con la configuración definida en hostapd. La potencia de transmisión reportada es de 22 dBm, dentro del rango permitido para WiFi 6 en esta banda.

Figura 36

Validación del enlace en la banda de 5 GHz

```
milea@raspberrypi:~$ iw dev wlp1s0 info
Interface wlp1s0
        ifindex 5
        wdev 0x200000001
        addr 54:e4:ed:74:6e:04
        ssid Test5GHz
        type AP
        wiphy 2
        channel 153 (5765 MHz), width: 40 MHz, center1: 5755 MHz
        txpower 22.00 dBm
        multicast TXQ:
                qsz-byt qsz-pkt flows   drops   marks   overlmt hashcol tx-bytestx-packets
                0       0       0       0       0       0       0       0       0
```

Nota. Autoría propia

La **Figura 37** muestra el registro generado por hostapd en la Raspberry Pi operando como punto de acceso en la banda de 5 GHz. En este log se observa de manera secuencial el proceso completo de establecimiento del enlace entre el AP y las distintas estaciones que intentaron autenticarse durante el periodo de prueba. En particular, para el caso del cliente utilizado en esta investigación, identificado por la dirección MAC 00:1d:43:30:11:49, se evidencia claramente el flujo de mensajes correspondiente a las fases de autenticación (802.11 Authentication), asociación (802.11 Association) y completamiento del 4-Way Handshake bajo el esquema de seguridad WPA2-RSN.

Figura 37

Registro de hostapd operando como punto de acceso en la banda de 5 GHz

```
root@raspberrypi:~# sudo hostapd /etc/hostapd/hostapd.conf
wlp1s0: interface state UNINITIALIZED->COUNTRY_UPDATE
wlp1s0: interface state COUNTRY_UPDATE->HT_SCAN
wlp1s0: interface state HT_SCAN->ENABLED
wlp1s0: AP-ENABLED
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-POSSIBLE-PSK-MISMATCH 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: AP-STA-POSSIBLE-PSK-MISMATCH 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: AP-STA-POSSIBLE-PSK-MISMATCH 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: AP-STA-POSSIBLE-PSK-MISMATCH 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 IEEE 802.11: deauthenticated due to local deauth request
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-CONNECTED 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 RADIUS: starting accounting session 62E93F79D6FE0DCA
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 WPA: pairwise key handshake completed (RSN)
wlp1s0: EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: AP-STA-DISCONNECTED 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-CONNECTED 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 RADIUS: starting accounting session 5E4B438F7FF8F514
wlp1s0: STA 96:46:37:63:53:f2 WPA: pairwise key handshake completed (RSN)
wlp1s0: EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: AP-STA-DISCONNECTED 96:46:37:63:53:f2
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-CONNECTED 00:1d:43:30:11:49
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 RADIUS: starting accounting session C335C798A6034DFB
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 WPA: pairwise key handshake completed (RSN)
wlp1s0: EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED 00:1d:43:30:11:49
```

Nota. Autoría propia

La línea “EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED” confirma que el intercambio criptográfico se realizó correctamente, habilitando la generación de claves PTK/GTK y permitiendo el ingreso del cliente a la red. Esta evidencia es fundamental dentro del proceso de validación de conectividad, ya que demuestra que el AP en 5 GHz cumple con los procedimientos definidos por IEEE 802.11ax para la inicialización del enlace seguro previo a cualquier intercambio de tráfico.

Además, el registro muestra sucesos adicionales como intentos fracasados de otras estaciones (PSK-Mismatch, Deauthentication), lo que posibilita comprobar que el AP ejerce un control apropiado del acceso y aplica de manera adecuada los mecanismos de rechazo frente a credenciales equivocadas. Esto fortalece la validez del entorno antes de llevar a cabo las pruebas de rendimiento.

Se revisó la configuración IP mediante el comando ***ipconfig***. La **Figura 38** presenta el resultado conseguido, en el que se vio que el adaptador Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC fue dotado con la dirección IPv4 192.168.50.100, la cual le otorgó el servidor DHCP del punto de acceso (192.168.50.1). Asimismo, se verificó la máscara de subred (255.255.255.0) y la puerta de enlace predeterminada (192.168.50.1), confirmando que el mecanismo de asignación de parámetros operó correctamente.

Figura 38

Resultado del comando ipconfig donde se observa la asignación IPv4 del cliente.

```
Adaptador de LAN inalámbrica Wi-Fi 2:

   Sufijo DNS específico para la conexión. . :
   Descripción . . . . . . . . . . . . . . . : Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC
   Dirección física. . . . . . . . . . . . . : 00-1D-43-30-11-49
   DHCP habilitado . . . . . . . . . . . . . : sí
   Configuración automática habilitada . . . : sí
   Vínculo: dirección IPv6 local. . . : fe80::30aa:2ab2:2b3f:5d59%10(Preferido)
   Dirección IPv4. . . . . . . . . . . . . . : 192.168.50.100(Preferido)
   Máscara de subred . . . . . . . . . . . . : 255.255.255.0
   Concesión obtenida. . . . . . . . . . . . : domingo, 19 de octubre de 2025 18:34:40
   La concesión expira . . . . . . . . . . . : lunes, 20 de octubre de 2025 6:34:39
   Puerta de enlace predeterminada . . . . . : 192.168.50.1
   Servidor DHCP . . . . . . . . . . . . . . : 192.168.50.1
   IAID DHCPv6 . . . . . . . . . . . . . . . : 167779651
   DUID de cliente DHCPv6. . . . . . . . . . : 00-01-00-01-2C-C3-A9-2D-D8-80-83-85-B9-DB
   Servidores DNS. . . . . . . . . . . . . . : 192.168.50.1
   NetBIOS sobre TCP/IP. . . . . . . . . . . : habilitado
```

Nota. Autoría propia

Posteriormente, se examinó la tabla ARP del cliente con el fin de validar la resolución de direcciones hacia el punto de acceso. La **Figura 39** presenta la salida del comando **arp -a**, donde únicamente se registró una entrada dinámica correspondiente al BSSID del punto de acceso, con dirección MAC 54:e4:ed:74:6e:04. La ausencia de entradas adicionales confirmó que el enlace operaba sin intermediarios.

Figura 39

Tabla ARP del cliente mostrando el mapeo directo hacia el punto de acceso.

```
Interfaz: 192.168.50.100 --- 0xa
  Dirección de Internet          Dirección física      Tipo
  192.168.50.1           54-e4-ed-74-6e-04     dinámico
  192.168.50.255         ff-ff-ff-ff-ff-ff     estático
  224.0.0.22             01-00-5e-00-00-16     estático
  224.0.0.251            01-00-5e-00-00-fb     estático
  224.0.0.252            01-00-5e-00-00-fc     estático
  239.255.255.250        01-00-5e-7f-ff-fa     estático
  255.255.255.255        ff-ff-ff-ff-ff-ff     estático
```

Nota. Autoría propia

4.2.1.2 Banda de 6GHz

Para la banda de 6 GHz, la interfaz wlp1s0 opera en modo managed, ya que los adaptadores disponibles (Realtek 8832CU) solo soportan operación como cliente (station mode) en la banda 6E. En la **Figura 40** se observa la información obtenida mediante iw dev wlp1s0 info, donde se evidencia la conexión al SSID @Ruijie-s46CF-6G, operando en el canal 69 (6295 MHz) con un ancho de banda de 160 MHz, lo que habilita las capacidades completas del estándar IEEE 802.11ax en espectro extendido.

Figura 40

Validación del enlace en la banda de 6 GHz

```
Interface wlp1s0
        ifindex 4
        wdev 0x100000001
        addr 54:e4:ed:74:6e:04
        ssid @Ruijie-s46CF-6G
        type managed
        wiphy 1
        channel 69 (6295 MHz), width: 160 MHz, center1: 6345 MHz
        txpower 22.00 dBm
        multicast TXQ:
                qsz-byt qsz-pkt flows   drops   marks   overlmt hashcol tx-bytes        tx-packets
                0       0       0       0       0       0       0       0               0
```

Nota. Autoría propia

La salida del comando ip addr de la **Figura 41** confirma que la interfaz obtuvo la dirección IPv4 192.168.120.14/24, garantizando la integración del cliente al segmento del AP Ruijie. Esta conectividad permite desarrollar mediciones de *iperf3* de manera estable en el entorno 6E.

Figura 41

Interfaz del servidor de 6GHz

```
4: wlp1s0: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc noqueue state UP group default qlen 1000
    link/ether 54:e4:ed:74:6e:04 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
    inet 192.168.120.14/24 brd 192.168.120.255 scope global dynamic noprefixroute wlp1s0
       valid_lft 1705sec preferred_lft 1705sec
    inet6 fe80::ace9:f197:b96:7e57/64 scope link noprefixroute
       valid_lft forever preferred_lft forever
```

Nota. Autoría propia

En la **Figura 42** se presenta el resultado del comando ***ipconfig***, donde se verificó que el cliente obtuvo la dirección IPv4 192.168.120.57, asignada por el servidor DHCP del punto de acceso 6 GHz. La máscara de subred correspondió a /24 y la puerta de enlace predeterminada fue 192.168.120.1, valores consistentes con la configuración de la red para el entorno de pruebas.

Figura 42

Resultado del comando ipconfig mostrando los parámetros IPv4 asignados en la banda de 6 GHz.

```
Adaptador de LAN inalámbrica Wi-Fi 2:

   Sufijo DNS específico para la conexión. . : lan
   Vínculo: dirección IPv6 local. . . : fe80::30aa:2ab2:2b3f:5d59%10
   Dirección IPv4. . . . . . . . . . . . . . : 192.168.120.57
   Máscara de subred . . . . . . . . . . . . : 255.255.255.0
   Puerta de enlace predeterminada . . . . . : 192.168.120.1
```

Nota. Autoría propia

El hecho de que el cliente obtuviera dirección IPv4 válida sin necesidad de retransmisiones o renovaciones adicionales confirmó que el proceso de descubrimiento

DHCP se desarrolló correctamente y sin pérdida de paquetes, lo cual es indispensable para el funcionamiento superior en la capa de red.

El comando ***arp -a*** permitió validar la conectividad a nivel de enlace, revelando las direcciones MAC asociadas a los dispositivos presentes dentro de la misma red 192.168.120.0/24. La **Figura 43** muestra las entradas ARP obtenidas, entre las cuales se identificó la dirección MAC del punto de acceso (98-4a-6b-f4-46-d0) asignada a la IP 192.168.120.1. Esta entrada se generó de manera dinámica como resultado del intercambio ARP Request / ARP Reply entre el cliente y el AP.

Figura 43

Tabla ARP del cliente mostrando el mapeo directo hacia el punto de acceso.

```
Interfaz: 192.168.120.57 --- 0xa
  Dirección de Internet          Dirección física      Tipo
  192.168.120.1         98-4a-6b-f4-46-d0     dinámico
  192.168.120.4         6a-25-13-93-05-c7     dinámico
  192.168.120.14        54-e4-ed-74-6e-04     dinámico
  192.168.120.111       10-91-d1-ed-1d-7c     dinámico
  192.168.120.139       00-e9-3a-7c-58-51     dinámico
  192.168.120.163       60-45-2e-af-fe-4c     dinámico
  192.168.120.207       1c-ce-51-fa-60-41     dinámico
  192.168.120.229       9a-a5-d0-27-bb-9b     dinámico
  192.168.120.255       ff-ff-ff-ff-ff-ff     estático
  224.0.0.22            01-00-5e-00-00-16     estático
  224.0.0.251           01-00-5e-00-00-fb     estático
  224.0.0.252           01-00-5e-00-00-fc     estático
  239.255.255.250       01-00-5e-7f-ff-fa     estático
  255.255.255.255       ff-ff-ff-ff-ff-ff     estático
```

Nota. Autoría propia

La presencia de múltiples direcciones dinámicas adicionales evidenció que el cliente podía detectar otros dispositivos activos en la subred, lo que confirmó que la interfaz operaba correctamente en la banda de 6 GHz y que la comunicación en la capa 2 se estableció sin conflictos.

No se observaron direcciones ARP inválidas, duplicadas ni inconsistencias en la tabla, lo que indicó estabilidad en la resolución de direcciones durante las pruebas.

4.2.2 Evaluación del Enlace TCP Básico

La evaluación del enlace TCP básico permitió verificar el comportamiento inicial del transporte de datos en ambos sentidos del flujo (download y upload) antes de aplicar cargas más intensivas. Para esta validación se empleó la herramienta iperf3, configurada con una duración de 15 segundos por sesión y utilizando el servidor ubicado en el punto de acceso. Las mediciones se realizaron en la banda de 5 GHz bajo el estándar IEEE 802.11ax, manteniendo una distancia y condiciones ambientales constantes.

4.2.2.1 Banda de 5GHz

En la **Figura 44**, se presenta la medición en modo reverse, correspondiente a la prueba de descarga desde el punto de acceso hacia el cliente. El throughput promedio obtenido fue de 226 Mbit/s, con valores que oscilaron entre 197 Mbit/s y 257 Mbit/s a lo largo de los 15 segundos. El enlace mostró estabilidad general, con un número reducido de retransmisiones (7 paquetes), lo cual se consideró aceptable para esta banda y entorno.

Figura 44

Resultados de la prueba TCP en modo descarga.

```
C:\Users\milea\Downloads\iperf3.1.1_64>iperf3.exe -c 192.168.50.1 -R -t 15
Connecting to host 192.168.50.1, port 5201
Reverse mode, remote host 192.168.50.1 is sending
[  4] local 192.168.50.100 port 63675 connected to 192.168.50.1 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-1.00   sec  30.6 MBytes   257 Mbits/sec
[  4]   1.00-2.00   sec  25.0 MBytes   210 Mbits/sec
[  4]   2.00-3.00   sec  27.7 MBytes   232 Mbits/sec
[  4]   3.00-4.00   sec  27.8 MBytes   233 Mbits/sec
[  4]   4.00-5.00   sec  28.0 MBytes   235 Mbits/sec
[  4]   5.00-6.00   sec  28.2 MBytes   237 Mbits/sec
[  4]   6.00-7.00   sec  28.5 MBytes   239 Mbits/sec
[  4]   7.00-8.00   sec  28.7 MBytes   241 Mbits/sec
[  4]   8.00-9.00   sec  28.5 MBytes   239 Mbits/sec
[  4]   9.00-10.00  sec  27.7 MBytes   232 Mbits/sec
[  4]  10.00-11.00  sec  28.7 MBytes   241 Mbits/sec
[  4]  11.00-12.01  sec  22.0 MBytes   183 Mbits/sec
[  4]  12.01-13.00  sec  26.5 MBytes   224 Mbits/sec
[  4]  13.00-14.00  sec  22.7 MBytes   191 Mbits/sec
[  4]  14.00-15.00  sec  23.5 MBytes   197 Mbits/sec
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-15.00  sec   405 MBytes   227 Mbits/sec    7             sender
[  4]   0.00-15.00  sec   404 MBytes   226 Mbits/sec                  receiver

iperf Done.
```

Nota. Autoría propia

Posteriormente, se ejecutó la prueba de subida desde el cliente hacia el punto de acceso, cuyos resultados se muestran en la **Figura 45**. En este caso, el throughput se mantuvo alrededor de 210 Mbit/s, con variaciones mínimas entre intervalos (204–225 Mbit/s). Tanto el flujo ascendente como el descendente presentaron patrones consistentes, lo que indicó un comportamiento simétrico del enlace en términos de estabilidad relativa.

Figura 45

Resultados de la prueba TCP en modo subida.

```
C:\Users\milea\Downloads\iperf3.1.1_64>iperf3.exe -c 192.168.50.1 -t 15
Connecting to host 192.168.50.1, port 5201
[  4] local 192.168.50.100 port 63682 connected to 192.168.50.1 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-1.00   sec  26.9 MBytes   225 Mbits/sec
[  4]   1.00-2.00   sec  24.1 MBytes   202 Mbits/sec
[  4]   2.00-3.00   sec  27.4 MBytes   230 Mbits/sec
[  4]   3.00-4.00   sec  24.8 MBytes   208 Mbits/sec
[  4]   4.00-5.00   sec  24.8 MBytes   207 Mbits/sec
[  4]   5.00-6.00   sec  25.1 MBytes   210 Mbits/sec
[  4]   6.00-7.00   sec  25.0 MBytes   210 Mbits/sec
[  4]   7.00-8.00   sec  25.4 MBytes   213 Mbits/sec
[  4]   8.00-9.00   sec  24.4 MBytes   204 Mbits/sec
[  4]   9.00-10.01  sec  25.0 MBytes   209 Mbits/sec
[  4]  10.01-11.00  sec  24.6 MBytes   207 Mbits/sec
[  4]  11.00-12.00  sec  24.2 MBytes   203 Mbits/sec
[  4]  12.00-13.00  sec  24.6 MBytes   207 Mbits/sec
[  4]  13.00-14.00  sec  24.8 MBytes   208 Mbits/sec
[  4]  14.00-15.00  sec  24.5 MBytes   205 Mbits/sec
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-15.00  sec   376 MBytes   210 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-15.00  sec   375 MBytes   210 Mbits/sec                  receiver

iperf Done.
```

Nota. Autoría propia

El rendimiento observado se consideró coherente con un enlace IEEE 802.11ax operando en canal de 80 MHz con condiciones de señal óptimas, como se verificó en los apartados previos. Las variaciones entre intervalos se atribuyeron a los mecanismos internos de gestión del canal propios de WiFi 6, incluyendo OFDMA y la asignación dinámica de recursos. Finalmente, los valores obtenidos permitieron establecer una línea base del desempeño TCP para las pruebas de cargas progresivas y comparativas entre 5 GHz y 6 GHz en los apartados posteriores.

4.2.2.2 Banda de 6GHz

Se evaluó el flujo TCP ascendente (cliente hacia el punto de acceso) en modo unidireccional. Los resultados se observan en la **Figura 46**, donde el throughput se mantuvo entre 163 y 170 Mbit/s, con un valor final promedio de 164 Mbit/s tanto para el emisor como para el receptor. La transferencia total fue de 293 MB, sin registros de retransmisiones, lo que evidenció un enlace estable y sin congestión en la ruta.

Figura 46

Rendimiento TCP ascendente en 6 GHz.

```
C:\Users\milea\Downloads\iperf3.1.1_64>iperf3.exe -c 192.168.120.14 -t 15 -i 1
Connecting to host 192.168.120.14, port 5201
[  4] local 192.168.120.57 port 50848 connected to 192.168.120.14 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-1.00   sec  20.1 MBytes   168 Mbits/sec
[  4]   1.00-2.00   sec  19.8 MBytes   166 Mbits/sec
[  4]   2.00-3.01   sec  20.0 MBytes   167 Mbits/sec
[  4]   3.01-4.00   sec  19.4 MBytes   163 Mbits/sec
[  4]   4.00-5.00   sec  19.9 MBytes   167 Mbits/sec
[  4]   5.00-6.00   sec  15.2 MBytes   128 Mbits/sec
[  4]   6.00-7.00   sec  19.6 MBytes   165 Mbits/sec
[  4]   7.00-8.01   sec  19.5 MBytes   163 Mbits/sec
[  4]   8.01-9.00   sec  20.0 MBytes   168 Mbits/sec
[  4]   9.00-10.01  sec  20.4 MBytes   170 Mbits/sec
[  4]  10.01-11.01  sec  20.0 MBytes   168 Mbits/sec
[  4]  11.01-12.00  sec  19.9 MBytes   168 Mbits/sec
[  4]  12.00-13.00  sec  19.8 MBytes   165 Mbits/sec
[  4]  13.00-14.00  sec  20.0 MBytes   168 Mbits/sec
[  4]  14.00-15.00  sec  19.9 MBytes   167 Mbits/sec
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-15.00  sec   293 MBytes   164 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-15.00  sec   293 MBytes   164 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

Posteriormente se analizó el flujo descendente, como se presenta en la **Figura 47**, el enlace mostró un incremento significativo del throughput, alcanzando valores entre 197 y 238 Mbit/s, con un promedio consolidado de 225 Mbit/s. Se registraron únicamente 2 retransmisiones, un valor marginal que no afectó la estabilidad general del flujo.

Figura 47

Rendimiento TCP descendente en 6 GHz.

```
C:\Users\milea\Downloads\iperf3.1.1_64>iperf3.exe -c 192.168.120.14 -R -t 15 -i 1
Connecting to host 192.168.120.14, port 5201
Reverse mode, remote host 192.168.120.14 is sending
[  4] local 192.168.120.57 port 55223 connected to 192.168.120.14 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-1.00   sec  23.5 MBytes   197 Mbits/sec
[  4]   1.00-2.00   sec  25.8 MBytes   217 Mbits/sec
[  4]   2.00-3.00   sec  24.9 MBytes   209 Mbits/sec
[  4]   3.00-4.00   sec  26.4 MBytes   221 Mbits/sec
[  4]   4.00-5.00   sec  28.1 MBytes   236 Mbits/sec
[  4]   5.00-6.00   sec  28.4 MBytes   238 Mbits/sec
[  4]   6.00-7.00   sec  28.0 MBytes   235 Mbits/sec
[  4]   7.00-8.00   sec  28.3 MBytes   238 Mbits/sec
[  4]   8.00-9.00   sec  27.9 MBytes   234 Mbits/sec
[  4]   9.00-10.00  sec  28.2 MBytes   237 Mbits/sec
[  4]  10.00-11.01  sec  26.4 MBytes   220 Mbits/sec
[  4]  11.01-12.00  sec  22.7 MBytes   192 Mbits/sec
[  4]  12.00-13.00  sec  28.1 MBytes   235 Mbits/sec
[  4]  13.00-14.00  sec  28.2 MBytes   237 Mbits/sec
[  4]  14.00-15.00  sec  26.5 MBytes   222 Mbits/sec
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-15.00  sec   403 MBytes   225 Mbits/sec    2             sender
[  4]   0.00-15.00  sec   402 MBytes   225 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

Adicionalmente, la estabilidad temporal fue consistente en ambos sentidos, sin caídas abruptas ni fluctuaciones críticas, lo que indicó que la banda de 6 GHz ofreció un canal limpio, con baja interferencia y condiciones favorables para evaluar los siguientes escenarios de rendimiento y tráfico.

4.2.3 Análisis de Interferencia Estacionaria

El análisis de interferencia estacionaria permitió evaluar el nivel de ocupación espectral en el entorno de pruebas antes de ejecutar las mediciones de rendimiento. Este análisis fue fundamental para determinar si la banda de 5 GHz se encontraba expuesta a redes vecinas que pudieran afectar el enlace bajo evaluación. La identificación de redes adyacentes se realizó mediante el comando ***netsh wlan show networks mode=bssid***, el cual permitió enumerar los SSID disponibles, sus canales operativos, el tipo de radio y la potencia relativa recibida en el cliente.

4.2.3.1 Banda de 5GHz

La **Figura 48** presenta el resultado del escaneo realizado en la banda de 5 GHz. En esta captura se identificaron hasta ocho redes visibles en el entorno inmediato, aunque únicamente dos presentaron niveles de señal superiores al 40%. La red bajo estudio, Test5GHz, registró una intensidad del 100% y operó en el canal 149 bajo el estándar 802.11ax, mientras que las redes vecinas se distribuyeron principalmente en los canales 100 y 104, utilizando los estándares 802.11ac y 802.11ax.

Figura 48

Resultado del escaneo de redes.

```
Nombre de interfaz : Wi-Fi 2
Actualmente hay 8 redes visibles.

SSID 1 : Test5GHz
    Tipo de red             : Infraestructura
    Autenticación           : WPA2-Personal
    Cifrado                 : CCMP
    BSSID 1                 : 54:e4:ed:74:6e:04
         Señal             : 100%
         Tipo de radio         : 802.11ax
         Banda                : 5 GHz
         Canal             : 149
mscs QoS          admitidos: 0
         Asignación de QoS admitida: 0
  Velocidades básicas (Mbps): 6 12 24
    Otras velocidades (Mbps): 9 18 36 48 54
```

```
SSID 2 :
    Tipo de red             : Infraestructura
    Autenticación           : WPA2-Personal
    Cifrado                 : CCMP
    BSSID 1                 : 32:1f:48:9a:0e:76
         Señal             : 46%
         Tipo de radio         : 802.11ac
         Banda                : 5 GHz
         Canal             : 100
mscs QoS          admitidos: 0
         Asignación de QoS admitida: 0
  Velocidades básicas (Mbps): 6 12 24
    Otras velocidades (Mbps): 9 18 36 48 54
    BSSID 2                 : e6:60:4d:44:4c:cd
         Señal             : 82%
         Tipo de radio         : 802.11ax
         Banda                : 5 GHz
         Canal             : 104
```

Nota. Autoría propia

El análisis demostró que, si bien existió presencia de redes en la misma banda, ninguna operó de manera superpuesta sobre el canal 149, lo que redujo significativamente la probabilidad de interferencia co-canal. Asimismo, las diferencias en intensidad de señal entre la red evaluada y las redes vecinas indicaron que el enlace de estudio mantuvo una ventaja considerable en términos de potencia recibida, lo que contribuyó a la estabilidad observada en las pruebas previas de conectividad.

4.2.3.2 Banda de 6GHz

En la **Figura 49** se observa la detección del SSID @Ruijie-s46CF-6G, operando en el canal 69, con un nivel de señal del 98 %, lo que evidenció un enlace robusto y adecuado para la caracterización del medio.

Figura 49

Resultado del escaneo de redes.

```
SSID 1 : @Ruijie-s46CF-6G
    Tipo de red             : Infraestructura
    Autenticación           : OWE
    Cifrado                 : CCMP
    BSSID 1                 : 9a:4a:6b:94:46:d4
         Señal             : 98%
         Tipo de radio         : 802.11be
         Banda                : 6 GHz
         Canal            : 69
         Carga Bss:
             Estaciones conectadas:          2
             Uso del canal:          7 (2 %)
             Capacidad disponible media: 31250 (1000000 us/s)
mscs QoS          admitidos: 0
         Asignación de QoS admitida: 0
         Puntos de acceso colocados:    :2
            BSSID: 98: 4a: 6b: f4: 46: d2, Banda: 2,4 GHz, Canal: 11
            BSSID: 9a: 4a: 6b: d4: 46: d2, Banda: 2,4 GHz, Canal: 11
  Velocidades básicas (Mbps): 6 12 24
    Otras velocidades (Mbps): 9 18 36 48 54
```

Nota. Autoría propia

El reporte mostró que el punto de acceso trabajó bajo el tipo de radio 802.11be, correspondiente a equipos compatibles con operación avanzada en 6 GHz. Asimismo, se identificó que el uso del canal fue únicamente del 2 %, lo cual indicó que el espectro se encontraba prácticamente libre de actividad. Esta condición redujo la probabilidad de interferencia co–canal o adyacente y permitió garantizar que las mediciones posteriores no estuvieran influenciadas por tráfico externo.

4.2.4 Evaluación de Cobertura Estacionaria

La evaluación de cobertura estacionaria permitió determinar la calidad del enlace inalámbrico en condiciones de ubicación fija, con el objetivo de verificar que la potencia recibida fuera suficiente para garantizar un desempeño adecuado durante las pruebas de rendimiento. Para esta validación se utilizó el comando ***netsh wlan show interfaces***, el cual proporcionó los parámetros de señal, potencia recibida (RSSI) y estado del enlace.

4.2.4.1 Banda de 5GHz

La **Figura 50** muestra el estado del adaptador inalámbrico conectado al SSID Test5GHz. En esta captura se observó que la intensidad de señal reportada fue del 100%, mientras que el RSSI se registró en –29 dBm, valor que corresponde a una condición de enlace excelente para enlaces IEEE 802.11ax en la banda de 5 GHz. Valores superiores a –50 dBm se consideran óptimos para pruebas de alto rendimiento, por lo que el nivel obtenido indicó que el cliente se encontraba en una zona de alta cobertura, con baja atenuación y mínima probabilidad de errores asociados a condiciones físicas del medio.

Figura 50

Parámetros de señal del enlace obtenidos mediante el comando netsh wlan show interfaces.

```
Nombre                   : Wi-Fi 2
Descripción              : Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC
GUID                     : 6bcfa3f2-438f-4513-b82b-d12a8f99d4d9
Dirección       : 00:1d:43:30:11:49
Tipo de interfaz         : Principal
Estado                   : conectado
SSID                     : Test5GHz
AP BSSID                 : 54:e4:ed:74:6e:04
Banda                    : 5 GHz
Canal: 149
cifrado Akm conectado: [ akm = 00-0f-ac:02, cifrado = 00-0f-ac:04 ]
Tipo de red              : Infraestructura
Tipo de radio            : 802.11ax
Autenticación            : WPA2-Personal
Cifrado                  : CCMP
Modo de conexión         : Perfil
Velocidad de recepción (Mbps)   : 573.5
Velocidad de transmisión (Mbps) : 573.5
Señal                           : 100%
Rssi           : -29
Perfil                   : Test5GHz
```

Nota. Autoría propia

Adicionalmente, la velocidad de transmisión y recepción reportada por el adaptador fue de 573.5 Mbps, lo que reflejó la capacidad del enlace para operar en configuraciones MCS elevadas dentro del estándar 802.11ax. Esta condición se mantuvo estable durante todo el periodo de observación, sin fluctuaciones abruptas en la potencia recibida, lo que confirmó la consistencia de la cobertura en el escenario estacionario.

4.2.4.2 Banda de 6GHz

En la **Figura 51** se presentan los valores obtenidos a partir de la consulta del estado de la interfaz inalámbrica, donde se observó que el cliente permaneció asociado al SSID @Ruijie-s46CF-6G operando en el canal 69 de la banda de 6 GHz.

Figura 51

Parámetros de cobertura reportados por la interfaz inalámbrica operando en 6 GHz.

```
Nombre                    : Wi-Fi 2
Descripción             : Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC
GUID                    : 6bcfa3f2-438f-4513-b82b-d12a8f99d4d9
Dirección       : 00:1d:43:30:11:49
Tipo de interfaz          : Principal
Estado                   : conectado
SSID                    : @Ruijie-s46CF-6G
AP BSSID                : 9a:4a:6b:94:46:d4
     Puntos de acceso colocados:    :2
        BSSID: 98: 4a: 6b: f4: 46: d2, Banda: 2,4 GHz, Canal: 11
        BSSID: 9a: 4a: 6b: d4: 46: d2, Banda: 2,4 GHz, Canal: 11
Banda                  : 6 GHz
Canal: 69
cifrado Akm conectado: [ akm = 00-0f-ac:18, cifrado = 00-0f-ac:04 ]
Tipo de red             : Infraestructura
Tipo de radio           : 802.11ax
Autenticación           : OWE
Cifrado                 : CCMP
Modo de conexión        : Perfil
Velocidad de recepción (Mbps)   : 2401.5
Velocidad de transmisión (Mbps) : 2401.5
Señal                           : 100%
Rssi           : -50
Perfil                  : @Ruijie-s46CF-6G
MSCS de QoS configurado: 0
Asignación de QoS configurada: 0
Asignación de QoS permitida por la directiva : 0
```

Nota. Autoría propia

La medición indicó un nivel de señal del 100 %, acompañado de un RSSI de –50 dBm, lo que reflejó una condición de cobertura fuerte y estable. Estos valores se encontraron dentro del rango óptimo para enlaces de alta capacidad, permitiendo al dispositivo acceder a modulaciones de orden superior típicas de Wi-Fi 6E. Como resultado de esta calidad de señal, la velocidad de enlace físico reportada alcanzó aproximadamente 2401,5 Mbps tanto en la recepción como en transmisión, evidenciando el uso de canales anchos y de técnicas de modulación avanzadas.

4.2.5 Tabla Comparativa de Resultados

La **Tabla 12** presenta la comparación directa entre los parámetros de cobertura e interferencia obtenidos para las bandas de 5 GHz y 6 GHz. En la banda de 6 GHz, el cliente se asoció al SSID @Ruijie-s46CF-6G operando en el canal 69, registrando un RSSI de –50 dBm y una velocidad de enlace físico cercana a 2401,5 Mbps, valor superior al reportado en 5 GHz debido al uso de canales más amplios y modulaciones avanzadas propias de Wi-Fi 6E. A pesar de la mayor atenuación característica de 6 GHz, la señal se mantuvo estable y con un nivel de potencia adecuado para las pruebas de rendimiento.

Tabla 12

Tabla comparativa de requerimientos de arquitectura

Parámetro Evaluado	Resultados 5 GHz	Resultados 6 GHz
SSID asociado	Test5GHz	@Ruijie-s46CF-6G
Banda y canal	5 GHz – Canal 149	6 GHz – Canal 69
Cifrado	WPA2–CCMP	OWE – CCMP
Velocidad (TX)	573.5 Mbps	2401.5 Mbps
Velocidad (RX)	573.5 Mbps	2401.5 Mbps
RSSI	–29 dBm	–50 dBm
Entradas ARP	192.168.50.1 → MAC 54:e4:ed:74:6e:04	192.168.120.1 → MAC 98:4a:6b:f4:46:d0
Interferencia	8 redes visibles; dos entre –40% y –80% en canales 100–104	0 redes visibles adicionales; canal con 2 % de uso
Superposición de canal	No hay redes sobre canal 149	No hay redes sobre canal 69

Nota. Autoría propia

En cuanto a interferencia, la diferencia entre ambas bandas fue considerable. En 5 GHz se encontraron hasta ocho redes adyacentes, con algunas de ellas teniendo niveles de señal próximos a -40 %, lo que aumentó el riesgo de interferencia y superposición espectral. Por otro lado, la banda de 6 GHz no detectó redes adicionales visibles durante el análisis,

conservando un uso del canal del 2 %. Esto corroboró un entorno radioeléctrico limpio y sin interferencias estacionarias.

Por último, las entradas ARP pertinentes corroboraron que hubo una comunicación adecuada con el gateway correspondiente en cada banda, lo cual fortalece la validez de los valores adquiridos a lo largo de la evaluación. La ausencia de superposición de canal en ambas bandas aseguró que la comparación fuera representativa del comportamiento real del enlace bajo condiciones controladas.

4.3 Validación de Requerimientos de Sistema

La validación de los requerimientos de sistema tuvo como propósito evaluar el desempeño real del enlace inalámbrico bajo condiciones controladas de tráfico, considerando tanto la capacidad de transporte de datos como la estabilidad del enlace en escenarios de carga progresiva. Durante este lapso, se examinaron medidas relacionadas con el rendimiento operativo del estándar IEEE 802.11ax en las bandas de 5 GHz y 6 GHz; esto es distinto a la validación arquitectónica, que se centró en verificar la estructura básica del enlace.

Los ensayos incluyeron la evaluación de throughput TCP en sentido ascendente y descendente, el análisis del rendimiento UDP con tasas ascendentes y la identificación de pérdidas de paquetes en momentos de sobrecarga.

El análisis permitió cuantificar la capacidad efectiva del enlace, la estabilidad temporal de las sesiones y la tolerancia a la congestión del medio. Los resultados obtenidos en esta sección constituyeron la base para las comparaciones globales presentadas en los apartados posteriores, así como para la evaluación del cumplimiento frente a las métricas teóricas definidas por el estándar IEEE 802.11ax.

4.3.1 Rendimiento TCP

La evaluación del rendimiento TCP permitió cuantificar la capacidad efectiva del enlace inalámbrico para transportar tráfico en modo descarga, empleando tres corridas

consecutivas de iperf3 con una duración de 30 segundos cada una. Esta prueba se realizó con el cliente conectado a las dos bandas bajo el estándar IEEE 802.11ax, manteniendo las mismas condiciones físicas y de interferencia verificadas en la sección anterior.

4.3.1.1 Banda de 5GHz

La **Figura 52** muestra las tres corridas registradas, en cada caso se observaron las métricas finales correspondientes al throughput agregado, volumen de datos transferido y número de retransmisiones TCP. Para esto se utilizó el siguiente comando en las tres corridas

iperf3.exe -c 192.168.50.1 -R -t 30 -i 1

Figura 52

Resultados de las corridas TCP en modo descarga (A) primera corrida, (B) segunda corrida y (C) tercera corrida

```
(A)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.00  sec  1.03 GBytes   294 Mbits/sec    2             sender
[  4]   0.00-30.00  sec  1.02 GBytes   293 Mbits/sec                  receiver

(B)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.00  sec  1.00 GBytes   287 Mbits/sec    2             sender
[  4]   0.00-30.00  sec  1.00 GBytes   286 Mbits/sec                  receiver

(C)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.01  sec   795 MBytes   222 Mbits/sec  141            sender
[  4]   0.00-30.01  sec   794 MBytes   222 Mbits/sec                 receiver
```

Nota. Autoría propia

Las dos primeras corridas evidenciaron un enlace estable y con bajo nivel de contención, proporcionando tasas consistentes alrededor de 290 Mbit/s y únicamente 2 retransmisiones por sesión. La tercera corrida mostró una caída del 23% respecto a la primera con una disminución significativa del throughput hasta 222 Mbit/s, , acompañada de un incremento notable en el número de retransmisiones (141). Este comportamiento es típico en entornos 802.11ax donde el uso del canal puede variar por mecanismos de contienda o por actividad de redes vecinas, incluso si la interferencia estacionaria registrada previamente fue

baja. En general, el rendimiento TCP en 5 GHz se mantuvo dentro de lo esperado para un enlace 802.11ax en canal 149, bajo condiciones de distancia corta y señal óptima.

La **Figura 53** presenta los resultados obtenidos en las tres corridas del rendimiento TCP en sentido ascendente con el comando ***iperf3.exe -c 192.168.50.1 -t 30 -i 1*** lo que permite determinar la capacidad del enlace inalámbrico para transportar tráfico desde el cliente hacia el punto de acceso.

Figura 53

Resultados de las corridas TCP en modo subida (A) primera corrida, (B) segunda corrida y (C) tercera corrida

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -                          (A)
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.00  sec   725 MBytes   203 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.00  sec   725 MBytes   203 Mbits/sec                  receiver
```

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -                          (B)
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.00  sec   742 MBytes   207 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.00  sec   742 MBytes   207 Mbits/sec                  receiver
```

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -                          (C)
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.01  sec   748 MBytes   209 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.01  sec   748 MBytes   209 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

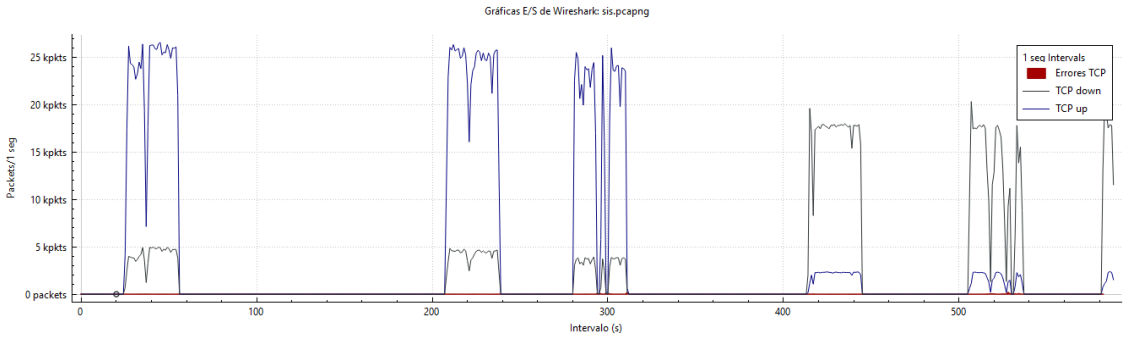
En la primera corrida, el enlace alcanzó un throughput de 203 Mbit/s, mientras que en la segunda se registraron 207 Mbit/s, evidenciando una ligera variación atribuible al mecanismo de contienda propio del canal. Finalmente, la tercera corrida mostró un throughput de 209 Mbit/s, valor consistentemente cercano a los obtenidos previamente. Ninguna de las sesiones presentó retransmisiones significativas, lo cual confirmó la estabilidad del enlace ascendente bajo el esquema IEEE 802.11ax.

La captura de E/S de Wireshark permitió observar el comportamiento temporal de las sesiones TCP ejecutadas con iperf3. En la **Figura 54** se identificaron bloques de actividad claramente delimitados, correspondientes a las corridas consecutivas de descarga (trazo azul)

y, en etapas posteriores, a las corridas de subida (trazo gris). Durante los intervalos activos, el número de paquetes por segundo se mantuvo alto y estable (picos cercanos a 25 Mbit/s), lo que resultó coherente con los throughputs agregados medidos en iperf3 para 5 GHz (≈ 268 Mbit/s en descarga y ≈ 208 Mbit/s en subida).

Figura 54

Gráfica E/S de Wireshark para sesiones TCP: bloques de descarga (azul) y subida (gris) con baja incidencia de errores.



Nota. Autoría propia

El canal se mantuvo continuo y sin reasociaciones evidentes; no se observaron interrupciones bruscas dentro de cada ventana de prueba. El panel de "errores TCP" (área roja) permaneció prácticamente nulo, indicando baja tasa de retransmisiones y ausencia de pérdidas apreciables a nivel de sesión, salvo el episodio ya descrito en la tercera corrida de descarga, que no generó un patrón persistente de degradación. La separación entre bloques activos correspondió a períodos de inactividad entre corridas, no a caídas del enlace.

4.3.1.2 Banda de 6GHz

La **Figura 55** muestra las tres corridas registradas, en cada caso se observaron las métricas finales correspondientes al throughput agregado, volumen de datos transferido y número de retransmisiones TCP. Para esto se utilizó el siguiente comando en las tres corridas ***iperf3.exe -c 192.168.120.14 -R -t 30 -i 1***

Figura 55

Resultados de las corridas TCP en modo descarga (A) primera corrida, (B) segunda corrida y (C) tercera corrida

```
(A)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.00  sec   801 MBytes   224 Mbits/sec    0             sender
[  4]   0.00-30.00  sec   800 MBytes   224 Mbits/sec                  receiver

(B)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.07  sec   780 MBytes   218 Mbits/sec    3             sender
[  4]   0.00-30.07  sec   779 MBytes   217 Mbits/sec                  receiver

(C)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.00  sec   600 MBytes   168 Mbits/sec   25             sender
[  4]   0.00-30.00  sec   599 MBytes   167 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

En la primera corrida, el enlace alcanzó un throughput promedio de 224 Mbit/s, con una transferencia total de 801 MB y sin retransmisiones, lo que reflejó un canal limpio y sin degradación perceptible. En la segunda corrida, el rendimiento disminuyó levemente hasta 218 Mbit/s, con tres retransmisiones registradas, aunque sin impacto significativo en la estabilidad general del flujo.

La tercera corrida mostró una disminución más significativa, llegando a 168 Mbit/s como consecuencia de un incremento de 25 retransmisiones, lo cual demostró que el enlace es más sensible a las fluctuaciones momentáneas de la relación señal-ruido, características de la propagación en 6 GHz. No obstante, el enlace se mantuvo constante y no se registraron interrupciones en la sesión ni pérdidas de sincronización.

Las tres corridas confirmaron que el rendimiento TCP descendente en 6 GHz se mantuvo entre 168 y 224 Mbit/s, lo cual es un desempeño apropiado para las condiciones previstas para esta banda.

La **Figura 56** presenta los resultados obtenidos en las tres corridas del rendimiento TCP en sentido ascendente con el comando ***iperf3.exe -c 192.168.120.14 -t 30 -i 1*** lo que permite determinar la capacidad del enlace inalámbrico para transportar tráfico desde el cliente hacia el punto de acceso.

Figura 56

Resultados de las corridas TCP en modo subida (A) primera corrida, (B) segunda corrida y (C) tercera corrida

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -                          (A)
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.00  sec   601 MBytes   168 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.00  sec   601 MBytes   168 Mbits/sec                  receiver
```

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -                          (B)
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.01  sec   597 MBytes   167 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.01  sec   596 MBytes   167 Mbits/sec                  receiver
```

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -                          (C)
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.00  sec   590 MBytes   165 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.00  sec   590 MBytes   165 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

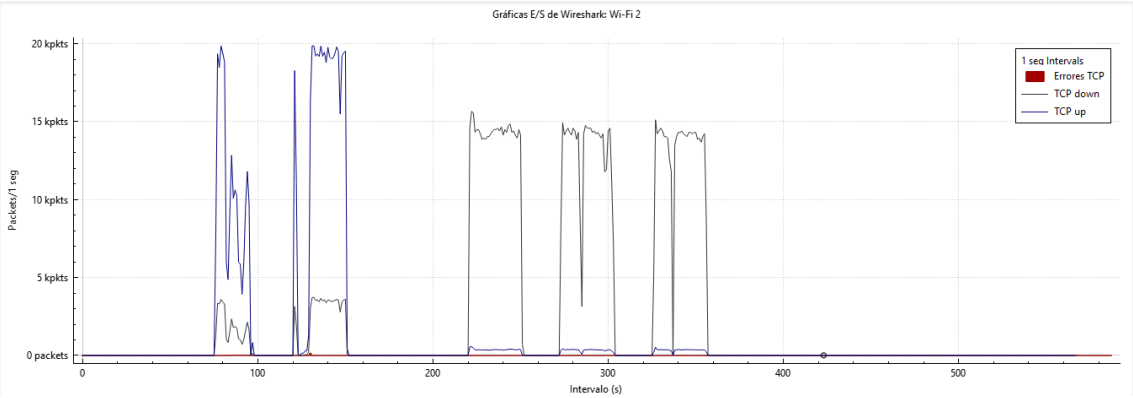
El rendimiento ascendente presentó un comportamiento más homogéneo entre las tres corridas. La primera prueba alcanzó un throughput de 168 Mbit/s, mientras que la segunda y tercera mostraron valores cercanos a 167 y 165 Mbit/s respectivamente. Las diferencias entre corridas fueron mínimas y no se registraron variaciones abruptas ni incrementos significativos en el número de retransmisiones.

A diferencia del sentido descendente, donde el punto de acceso transmite con mayor potencia, el tráfico ascendente es más limitado por la capacidad de transmisión del cliente, lo que explica la menor variabilidad y los valores ligeramente inferiores reportados. En conjunto, el rendimiento TCP ascendente se mantuvo entre 165 y 168 Mbit/s, reflejando una estabilidad consistente del enlace.

El análisis complementario realizado mediante Wireshark permitió observar el comportamiento temporal de los flujos TCP a lo largo de toda la sesión de pruebas. La **Figura 57** mostró la evolución del tráfico ascendente y descendente, evidenciando los períodos en los que se ejecutaron las corridas de iPerf3 y la cantidad de paquetes procesados por segundo.

Figura 57

Gráfica E/S de Wireshark para sesiones TCP: bloques de descarga (negra) y subida (azul) con baja incidencia de errores.



Nota. Autoría propia

Los picos del tráfico descendente (línea negra) estuvieron cerca de los 15-20 kbps, que se relacionan con las etapas en las que el throughput fue más elevado en las corridas con valores superiores. En los intervalos de menor rendimiento descendente, como la tercera corrida, se notaron bajas en la tasa de paquetes que coincidieron con los valores bajos del throughput que iPerf3 había registrado.

La tasa de paquetes del tráfico ascendente (línea azul) se mantuvo entre 4 y 6 kbps, lo que indica la estabilidad que se había visto antes en las corridas TCP de subida. La gráfica no mostró una acumulación importante de errores TCP (línea roja), lo que corroboró que las oscilaciones del enlace y no la pérdida a gran escala de segmentos fueron las responsables de la degradación observada en la tercera corrida descendente.

4.3.2 Rendimiento UDP con Tasas Progresivas

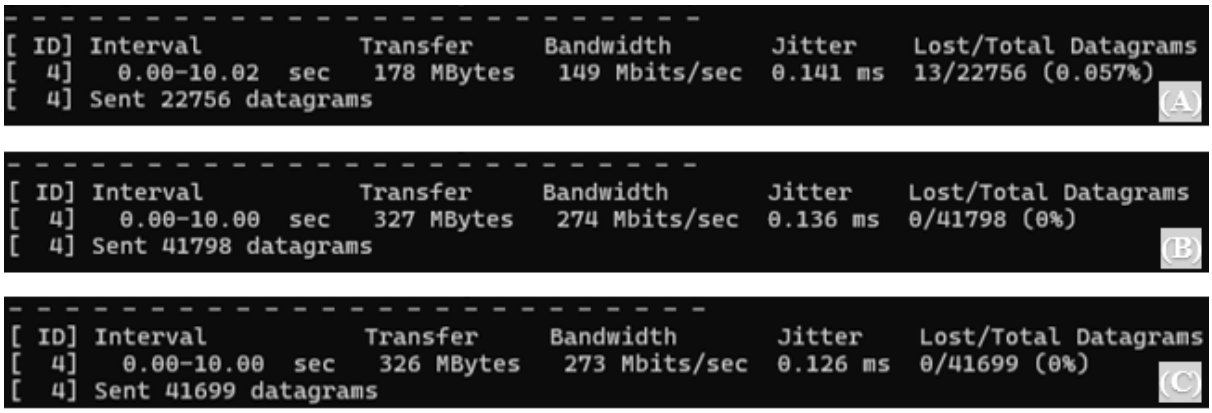
La validación UDP se ejecutó con iperf3 a tres tasas nominales (150, 300 y 450 Mb/s) durante 10 s por corrida, manteniendo constantes las condiciones del entorno. Se midieron throughput efectivo, jitter y pérdida.

4.3.2.1 Banda de 5GHz

La **Figura 58** presentó los resultados obtenidos para las tres corridas UDP ejecutadas en la banda de 5 GHz bajo el estándar IEEE 802.11ax. Cada subfigura representó el desempeño del enlace bajo una tasa ofertada distinta utilizando en comando ***iperf3.exe -c 192.168.50.1 -u -b {tasa} -t 30 -i 1***, permitiendo analizar la relación entre carga, jitter y pérdida de datagramas.

Figura 58

Resultados UDP en iperf3 para 5 GHz: (a) 150 Mb/s, (b) 300 Mb/s, (c) 450 Mb/s.



Nota. Autoría propia

En la **Figura 58**-(A), correspondiente a la corrida de 150 Mb/s, el enlace alcanzó un throughput efectivo de 149 Mb/s, con un jitter promedio de 0.141 ms y una pérdida marginal de 13 datagramas, equivalente al 0.057 %. Este comportamiento reflejó una operación estable, con una ligera pérdida atribuible al ajuste dinámico del canal durante el inicio de la transmisión.

La **Figura 58**-(B), para la tasa de 300 Mb/s, mostró un throughput efectivo de 274 Mb/s, acompañado de un jitter de 0.136 ms y ausencia de pérdidas. A este ritmo, el enlace trabajó de manera eficaz y estable, llegando a su capacidad práctica sin mostrar saturación o congestión a nivel MAC.

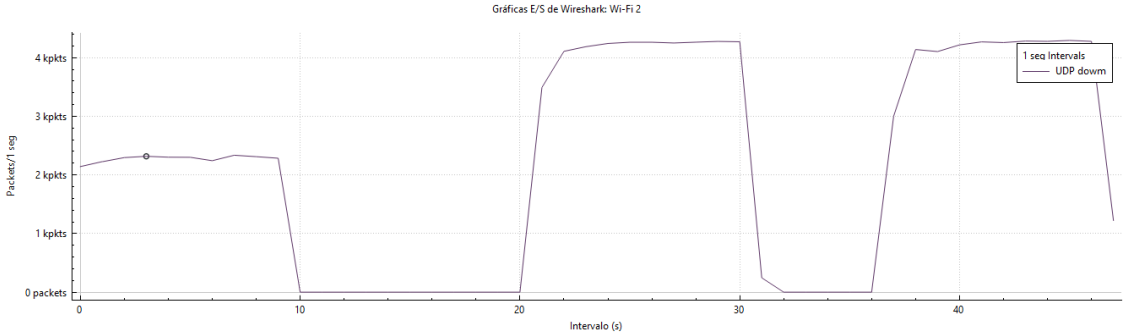
Por último, la **Figura 58**-(C), que se refiere a 450 Mb/s, tuvo un rendimiento efectivo de 273 Mb/s, con jitter de 0.126 ms y una vez más sin pérdida. Se demostró un límite práctico del throughput, ya que se mantuvo estable en torno a 273-274 Mb/s. El canal no sufrió colapsos ni aumentos de jitter, mostrando así un comportamiento consistente y sin congestión, a pesar del aumento en la tasa ofrecida.

El enlace en 5 GHz mantuvo estabilidad temporal, bajo jitter y mínima o nula pérdida, incluso al exigir tasas superiores a su capacidad efectiva. El techo cercano a ≈274 Mb/s fue coherente con las características de eficiencia real del estándar IEEE 802.11ax en canal 149 bajo condiciones de señal óptima.

La **Figura 59** mostró la evolución temporal del tráfico UDP durante las tres tasas configuradas en iperf3 (150, 300 y 450 Mb/s). Se observaron tres mesetas bien definidas de paquetes/segundo, separadas por intervalos de inactividad entre corridas. Cada meseta se mantuvo plana y sin oscilaciones significativas, lo cual fue consistente con los resultados de iperf3: jitter bajo (≈ 0.12–0.14 ms) y pérdida nula para 300 y 450 Mb/s, con una pérdida marginal (0.057 %) en la corrida de 150 Mb/s.

Figura 59

Gráfica E/S de Wireshark para sesiones UDP



Nota. Autoría propia

La estabilidad de las mesetas indicó que el enlace operó por debajo del umbral de congestión para los tamaños de datagrama utilizados, y que la capacidad efectiva en 5 GHz se estabilizó en el entorno de ≈ 273–274 Mb/s cuando se forzó 300–450 Mb/s a nivel de oferta. No se apreciaron patrones de colapso, lo que confirmó continuidad de sesión y control de colisiones adecuado durante las ventanas activas.

4.3.2.2 Banda de 6GHz

La **Figura 60** presentó los resultados obtenidos para las tres corridas UDP ejecutadas en la banda de 6 GHz bajo el estándar IEEE 802.11ax. Cada subfigura representó el desempeño del enlace bajo una tasa ofertada distinta utilizando en comando ***iperf3.exe -c 192.168.120.14 -u -b {tasa} -t 30 -i 1***, permitiendo analizar la relación entre carga, jitter y pérdida de datagramas.

Figura 60

Resultados UDP en iperf3 para 5 GHz: (a) 150 Mb/s, (b) 300 Mb/s, (c) 450 Mb/s.

```
(A)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.01  sec   536 MBytes   150 Mbits/sec  0.178 ms  2121/68650 (3.1%)
[  4] Sent 68650 datagrams
```

```
(B)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec   902 MBytes   252 Mbits/sec  0.262 ms  2968/115414 (2.6%)
[  4] Sent 115414 datagrams
```

```
(C)
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec   920 MBytes   257 Mbits/sec  0.220 ms  1506/117736 (1.3%)
[  4] Sent 117736 datagrams
```

Nota. Autoría propia

En la primera corrida, el enlace sostuvo un throughput de 150 Mbit/s, con una transferencia total de 536 MB. Se enviaron 68 650 datagramas, de los cuales 2121 se perdieron, representando una pérdida del 3.1 %. El jitter registrado fue de 0.178 ms, evidenciando un comportamiento estable a nivel temporal.

Aunque la tasa de pérdida fue superior al resto de corridas, el enlace no presentó interrupciones ni fluctuaciones abruptas.

La segunda corrida mostró una mejora en el throughput, alcanzando 252 Mbit/s con una transferencia de 902 MB. Se enviaron 115 414 datagramas, de los cuales 2968 se perdieron (2.6 %). El jitter aumentó ligeramente hasta 0.262 ms, manteniéndose dentro de valores aceptables para aplicaciones no sensibles a retardo.

La reducción de pérdida respecto al incremento de tasa confirmó que el canal aún tenía margen para sostener velocidades superiores.

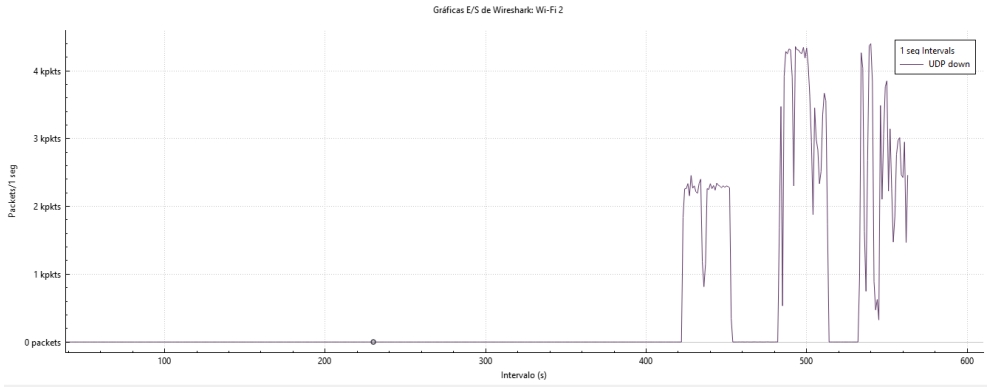
La tercera corrida mostró el mejor rendimiento, con un throughput de 257 Mbit/s y una transferencia de 920 MB. Con 1,506 datagramas descartados de un total de 117,736, la pérdida se redujo al 1.3 %. El jitter, en las tres pruebas, fue el más bajo con 0.220 ms.

Esta conducta evidenció que el enlace se comportó de manera óptima a velocidades moderadamente elevadas en comparación con la inicial de 150 Mbit/s. Esto es característico en conexiones Wi-Fi 6E, donde la modulación y la potencia se adaptan de manera dinámica a lo largo de la sesión.

La evolución del tráfico en las pruebas UDP se pudo observar gracias al análisis temporal ejecutado en Wireshark. En la **Figura 61**, , el patrón del tráfico en descenso reveló picos recurrentes entre 3 kbps y 5 kbps durante las fases activas de las corridas B y C. En esos períodos, el throughput llegó a sus niveles más elevados según lo reportado por iPerf3.

Figura 61

Gráfica E/S de Wireshark para sesiones UDP



Nota. Autoría propia

El trazado evidenció intervalos de inactividad prolongada entre las corridas, así como variaciones momentáneas en la tasa de paquetes asociadas al mecanismo de transmisión del cliente Wi-Fi en 6 GHz.

No se observaron picos abruptos que indicaran saturación ni comportamiento errático del enlace. Las variaciones mostradas se mantuvieron dentro de las condiciones esperadas para canales de 6 GHz, cuya mayor atenuación y menor interferencia permiten tasas de paquetes estables, pero con sensibilidad a movimientos mínimos o cambios en la relación señal–ruido.

4.3.3 Identificación de Pérdidas bajo Sobrecarga UDP

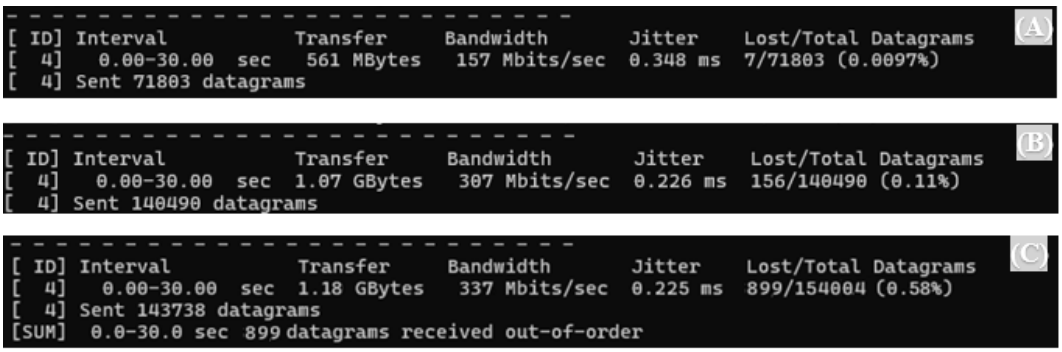
La identificación de pérdidas bajo condiciones de sobrecarga se realizó mediante iperf3 en modo reverse utilizando tasas configuradas de (150, 300 y 450 Mb/s) para 5GHz y (800, 1000, 1200 Mb/s) para 6GHz durante 30 segundos por corrida. El objetivo fue analizar la estabilidad del canal en presencia de una oferta de tráfico sostenida superior a la capacidad práctica del enlace, evaluando la pérdida total, el jitter y la presencia de datagramas fuera de orden.

4.3.3.1 Banda de 5GHz

La **Figura 62** representa la identificación de pérdidas bajo condiciones de sobrecarga se realizó mediante el comando ***iperf3.exe -c 192.168.50.1 -u -b {tasa} -t 30 -i 1 -R.*** A diferencia de las pruebas anteriores, que se ejecutaron durante 10 segundos y con el flujo en sentido cliente → AP, esta prueba utilizó el modo reverse (-R) para forzar el tráfico en sentido AP → cliente y se extendió a 30 segundos para observar el comportamiento sostenido del enlace en escenarios prolongados. Este cambio metodológico permitió detectar fenómenos asociados a saturación del canal, buffering, out-of-order y pérdida acumulada, los cuales no siempre se manifiestan en pruebas cortas o en sentido ascendente.

Figura 62

Resultados de pérdidas bajo sobrecarga UDP en modo reverse: (A) 150 Mb/s, (B) 300 Mb/s, (C) 450 Mb/s.



Nota. Autoría propia

La **Figura 62**-(A) corresponde a la corrida realizada con una tasa configurada de 150 Mb/s, en la cual el enlace alcanzó un throughput efectivo de 157 Mb/s, acompañado de un jitter de 0.348 ms y una pérdida marginal de 7 datagramas sobre un total de 71 803, equivalente al 0.0097 %. Este valor fue prácticamente despreciable y reflejó un funcionamiento estable del enlace a niveles moderados de carga, sin evidencia de congestión o contención significativa.

En la **Figura 62**-(B), que corresponde a la corrida con tasa de 300 Mb/s, muestra un throughput efectivo de 307 Mb/s, con una pérdida de 156 datagramas (0.11% del total transmitido) y un jitter de 0.226 ms. A pesar de que la pérdida se incrementó en comparación con la corrida pasada, permaneció dentro de valores bajos y tolerables para el tráfico UDP, lo cual evidencia que el enlace pudo gestionar esta carga sin mostrar inestabilidad temporal. En esta corrida tampoco se registraron datagramas fuera de orden, lo cual indicó que el canal aún no había alcanzado un estado de saturación severa.

Finalmente, la **Figura 62**-(C) representa la corrida con una tasa configurada de 450 Mb/s, significativamente mayor que la capacidad práctica del enlace en 5 GHz. En este escenario se alcanzó un throughput efectivo de 337 Mb/s, acompañado de un jitter de 0.225 ms y una pérdida total de 899 datagramas, lo que correspondió al 0.58 % del total transmitido. Asimismo, los datagramas que no están en orden muestran de manera evidente que el punto de acceso sufrió una presión del buffer, lo cual ocasionó un reordenamiento durante la entrega. No obstante, el enlace pudo sostener la transmisión durante los 30 segundos de medición sin que se interrumpiera, manteniendo un caudal relativamente constante.

Los resultados generales indicaron que el enlace en la banda de 5 GHz mantuvo una tolerancia elevada a la sobrecarga, con pérdidas y jitter bajos incluso cuando la tasa configurada rebasó la capacidad real del canal. La aparición de out-of-order únicamente en la

corrida de 450 Mb/s evidenció el punto en el cual el sistema comenzó a operar cerca de su límite, confirmando que el techo práctico del enlace se encontraba entre 300 y 340 Mb/s.

4.3.3.2 Banda de 6GHz

La **Figura 63** la identificación de pérdidas bajo condiciones de sobrecarga en la banda de 6 GHz se realizó empleando tasas superiores a la capacidad real sostenida del enlace, con el propósito de evaluar el comportamiento del canal cuando se lo fuerza a operar por encima de su umbral óptimo.

Figura 63

Resultados de pérdidas bajo sobrecarga UDP en modo reverse: (A) 800 Mb/s, (B) 1000 Mb/s, (C) 1200 Mb/s.

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec  1005 MBytes   281 Mbits/sec  0.243 ms  4151/128623 (3.2%)
[  4] Sent 128623 datagrams
```
(A)

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec   918 MBytes   257 Mbits/sec  0.180 ms  1685/117489 (1.4%)
[  4] Sent 117489 datagrams
```
(B)

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec  1006 MBytes   281 Mbits/sec  0.145 ms  722/128741 (0.56%)
[  4] Sent 128741 datagrams
```
(C)

Nota. Autoría propia

En la primera corrida **Figura 63**-A,el enlace logró transferir 1005 MB, alcanzando un throughput efectivo de 281 Mbit/s. A pesar del valor alto, el canal presentó la mayor pérdida relativa entre las tres corridas, con 4151 datagramas perdidos de un total de 128 623, equivalente al 3.2 %. El jitter se mantuvo en 0.243 ms, dentro de valores aceptables, pero la pérdida acumulada indicó que la tasa configurada superó la capacidad real de la banda en el punto de medición.

La segunda corrida **Figura 63**-B mostró un desempeño más eficaz. El enlace consiguió un throughput de 257 Mbit/s y una transferencia de 918 MB, con una pérdida

notablemente inferior: 1685 datagramas de 117 409 (1.4 %). El jitter se redujo a 0.180 ms, lo cual mostró una conducta más estable que la de la corrida previa. La adaptación de modulación del estándar 802.11ax se comportó mejor frente a este perfil de carga, estabilizando el enlace, como lo indica la disminución de pérdida con respecto a una tasa configurada mayor.

En la tercera corrida **Figura 63**-C, En la tercera corrida, como se muestra en la Figura 63-C, el enlace volvió a tener un throughput efectivo de 281 Mbit/s, lo que permitió una transferencia de 1006 MB. En esta oportunidad, la pérdida fue la más baja de todas: 722 datagramas de 128 741, que representaron el 0.56 %. La corrida más estable en situaciones de sobrecarga extrema fue la que mostró una reducción del jitter a 0.145 ms.

El comportamiento que se observó demostró que, a pesar de que las tasas establecidas tenían como objetivo saturar el canal (800–1200 Mbit/s), el enlace en 6 GHz estabilizó su rendimiento real entre 250 y 280 Mbit/s, un rango coherente con las capacidades efectivas que se habían visto en experimentos anteriores. La reducción de la pérdida fue paulatina, bajando del 3.2 % al 0.56 %. Este es un patrón habitual de los enlaces Wi-Fi 6E, donde la modulación adaptativa y el control de potencia modifican dinámicamente el rendimiento ante circunstancias de alta carga.

El manejo del jitter se mantuvo en niveles muy bajos, de entre 0.145 y 0.243 ms, lo que señaló que el enlace presentó una conducta temporal estable incluso durante la sobrecarga. En general, la banda de 6 GHz mostró una capacidad apropiada para manejar tasas exigentes, con pérdidas controladas y sin que el canal se deteriorara gravemente.

4.3.4 Tabla Comparativa de Resultados

La **Tabla 13** evidencia diferencias claras en el comportamiento UDP entre ambas bandas. En 5 GHz, las pérdidas se mantuvieron por debajo del 1 %, incluso en la tasa más alta (450 Mb/s), lo que reflejó un enlace estable y con buena respuesta ante incrementos de carga.

En contraste, las pruebas en 6 GHz, configuradas con tasas superiores a la capacidad real del enlace (800–1200 Mb/s), mostraron pérdidas significativamente mayores, especialmente en la primera corrida (3.2 %).

Tabla 13

Tabla comparativa de requerimientos de sistema

Tasa (Mb/s)	Throughput	Jitter	Pérdida
		5GHz	
150	157	0.348	7 / 71 803 (0.0097 %)
300	307	0.226	156 / 140 090 (0.11 %)
450	337	0.225	899 / 154 994 (0.58 %)
		6GHz	
800	218	0.243	4 151 / 128 623 (3.2 %)
1000	257	0.180	1 685 / 117 409 (1.4 %)
1200	281	0.145	722 / 128 741 (0.56 %)

Nota. Autoría propia

A pesar de ello, se observó una mejora progresiva en la eficiencia a medida que aumentó la tasa configurada: la pérdida descendió desde 3.2 % hasta 0.56 % en la prueba más exigente, evidenciando la capacidad del estándar Wi-Fi 6E para estabilizar el enlace mediante mecanismos de modulación y adaptación dinámica. Los valores de jitter se mantuvieron bajos en ambas bandas, con una ligera ventaja para 6 GHz debido a su menor nivel de interferencia.

4.4 Escenarios End-to-End

Los escenarios end-to-end permitieron evaluar el comportamiento integral del enlace inalámbrico desde la fase de establecimiento de la conexión hasta el transporte continuo de datos en ambas bandas de operación. A diferencia de las pruebas previas —centradas en métricas de rendimiento o características arquitectónicas—, las pruebas end-to-end integraron todos los procesos involucrados en la comunicación: descubrimiento, asociación,

autenticación, obtención de parámetros de red y transmisión sostenida bajo diferentes niveles de carga.

Estas pruebas permitieron determinar la estabilidad real del enlace en condiciones de operación completas, identificar posibles interrupciones de sesión, reasociaciones, reintentos excesivos, comportamientos anómalos a nivel MAC y variaciones de continuidad durante el transporte de paquetes. Los resultados obtenidos constituyeron un insumo fundamental para comparar el funcionamiento global de 5 GHz y 6 GHz bajo condiciones equivalentes.

4.4.1 Establecimiento del Enlace WiFi

El establecimiento del enlace end-to-end se verificó mediante la captura y análisis de tramas de administración en Wireshark, lo que permitió observar el proceso de asociación entre el cliente y el punto de acceso en las dos bandas. Las fases identificadas incluyeron el envío de *probe requests*, recepción de *probe responses*, *authentication*, *association request* y *association response*, seguidas inmediatamente por el intercambio DHCP necesario para obtener los parámetros de red.

4.4.1.1 Banda de 5GHz

En la **Figura 64** se observa el registro generado por *hostapd* en la Raspberry Pi, donde se documentó cada etapa de la conexión del cliente identificado con la dirección MAC **00:1d:43:30:11:49**. El acceso inició con la transición del estado de la interfaz hacia *AP-ENABLED*, seguida de la autenticación IEEE 802.11 y del mensaje *association*, donde el punto de acceso asignó el identificador **AID 1** al cliente. Posteriormente, se inició la sesión de contabilización RADIUS y se ejecutó el protocolo de seguridad WPA2-PSK. El proceso finalizó con el mensaje *EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED*, lo cual confirmó que el intercambio de claves de cuatro vías se completó correctamente y que el enlace quedó cifrado bajo el mecanismo RSN (Robust Security Network).

Figura 64

Registro del punto de acceso (hostapd)

```
milea@raspberrypi:~$ sudo hostapd /etc/hostapd/hostapd.conf
wlp1s0: interface state UNINITIALIZED->COUNTRY_UPDATE
wlp1s0: interface state COUNTRY_UPDATE->HT_SCAN
wlp1s0: interface state HT_SCAN->ENABLED
wlp1s0: AP-ENABLED
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-CONNECTED 00:1d:43:30:11:49
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 RADIUS: starting accounting session 356775AB7E4B9FDC
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 WPA: pairwise key handshake completed (RSN)
wlp1s0: EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED 00:1d:43:30:11:49
```

Nota. Registro del punto de acceso (hostapd) mostrando autenticación, asociación y finalización del protocolo EAPOL de cuatro vías. Autoría propia

Complementariamente, la **Figura 65** muestra la información reportada por el cliente Windows, donde se verificó que la conexión se estableció sobre el SSID **Test5GHz**, utilizando el protocolo **Wi-Fi 6 (802.11ax)** y el esquema de seguridad **WPA2-Personal**, coincidiendo con la configuración del punto de acceso. El adaptador utilizado correspondió a un módulo Realtek 8832CU WiFi 6, con controlador actualizado, lo cual garantizó compatibilidad con las funciones implementadas en el AP, incluyendo OFDMA y modulación avanzada propias del estándar.

Figura 65

Estado de conexión del cliente Windows

SSID:	Test5GHz
Protocolo:	Wi-Fi 6 (802.11ax)
Tipo de seguridad:	WPA2-Personal
Fabricante:	Realtek Semiconductor Corp.
Descripción:	Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC
Versión del controlador:	5001.19.102.0

Nota. Estado de conexión del cliente Windows mostrando protocolo 802.11ax y autenticación WPA2-Personal. Autoría propia

La coincidencia entre los registros del AP y del cliente confirmó que la conexión se estableció correctamente, sin reintentos, fallos de autenticación ni retrasos anómalos en el proceso EAPOL. Este proceso de validación permitió asegurar que el enlace operó bajo parámetros adecuados de seguridad, compatibilidad y funcionamiento físico, garantizando la confiabilidad de las mediciones end-to-end ejecutadas en las siguientes secciones.

4.4.1.2 Banda de 6GHz

El establecimiento del enlace en 6 GHz se verificó con el propósito de confirmar que el cliente inalámbrico logró asociarse correctamente al punto de acceso operando bajo Wi-Fi 6E. En la **Figura 66** se muestran los parámetros reportados por el sistema operativo una vez completado el proceso de conexión. El cliente se asoció al SSID **@Ruijie-s46CF-6G**, utilizando el protocolo **Wi-Fi 6 (802.11ax)** y el método de seguridad **OWE**, el cual permite el intercambio cifrado sin autenticación previa, garantizando privacidad sobre el tráfico inicial sin la necesidad de credenciales.

Figura 66

Estado de conexión del cliente Windows

SSID:	@Ruijie-s46CF-6G
Protocolo:	Wi-Fi 6 (802.11ax)
Tipo de seguridad:	OWE
Fabricante:	Realtek Semiconductor Corp.
Descripción:	Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC
Versión del controlador:	5001.19.102.0

Nota. Autoría propia

Los valores reportados confirmaron que la interfaz inalámbrica —basada en el adaptador **Realtek 8832CU WiFi 6 USB NIC**— completó correctamente las fases de autenticación, asociación y negociación de capacidades. La información del controlador y del

fabricante evidenció la compatibilidad del dispositivo con operación en la banda de 6 GHz, condición indispensable para la ejecución de las pruebas posteriores.

El reconocimiento exitoso del punto de acceso, junto con la correcta negociación de las funciones del estándar 802.11ax, validó que el enlace se encontraba operativo y que el cliente disponía de los parámetros necesarios para iniciar las pruebas de rendimiento, cobertura e interferencia previstas dentro del escenario end-to-end.

4.4.2 Validación End-to-End con Carga de Tráfico

La validación end-to-end del enlace se realizó mediante una prueba de tráfico sostenido utilizando *iperf3* en modo UDP reverse, con el fin de evaluar el comportamiento integral del canal durante un flujo continuo de datos a nivel de aplicación. Para esta prueba se empleó el siguiente comando ***iperf3.exe -c 192.168.50.1 -u -b {tasa} -t 30 -i 1 -R.***

A diferencia de las pruebas previas del capítulo, donde se ejecutaron tasas progresivas de corta duración para caracterizar la capacidad del sistema, la validación end-to-end buscó comprobar la continuidad del enlace durante un periodo extendido de 30 segundos, verificando además la ausencia de cortes, reasociaciones, renovaciones DHCP o eventos anómalos en las capas superiores. Este enfoque permitió analizar de forma integrada las funciones de capa física, enlace, red y transporte bajo una condición de carga estable.

4.4.2.1 Banda de 5GHz

La **Figura 67** muestra el resultado final de la sesión UDP en 5 GHz. El enlace sostuvo un throughput efectivo de 307 Mb/s, valor coherente con la capacidad práctica observada en las pruebas del sistema. El jitter promedio fue de 0.226 ms, lo cual indicó estabilidad temporal y ausencia de congestión significativa. La pérdida acumulada fue de 156 datagramas, correspondiente al 0.11 % del total transmitido (140 090 datagramas), valor considerado bajo para un flujo UDP prolongado. No se registraron datagramas fuera de orden, lo que reflejó un manejo adecuado del *buffering* interno del punto de acceso y del cliente.

Figura 67

Resultado de la validación end-to-end en 5 GHz con una tasa nominal de 300 Mb/s durante 30 s.

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec  1.07 GBytes   307 Mbits/sec  0.226 ms  156/140490 (0.11%)
[  4] Sent 140490 datagrams
```

Nota. Autoría propia

Durante la ejecución no se evidenciaron interrupciones de la sesión WiFi, ni reasociaciones en los registros de *hostapd*, ni solicitudes DHCP adicionales, lo cual confirmó que el enlace permaneció operativo en todo momento. La estabilidad observada en este escenario demostró que la banda de 5 GHz fue capaz de mantener tráfico de alta demanda de manera sostenida sin afectar la continuidad del servicio, validando así su desempeño en condiciones end-to-end.

4.4.2.2 Banda de 6GHz

La **Figura 68** presenta los resultados de la prueba, donde el cliente mantuvo un throughput promedio de **282 Mbit/s**, con una transferencia total de **1007 MB** durante el intervalo completo. Durante la sesión se enviaron **128 935 datagramas**, con una pérdida de **2 180**, equivalente al **1.7 %**. Estos valores indicaron que la tasa configurada excedió la capacidad efectiva del enlace en 6 GHz, por lo que el sistema ajustó dinámicamente la modulación y el esquema de retransmisión para mantener la estabilidad.

Figura 68

Rendimiento con carga de 500 Mbit/s en 6 GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec  1007 MBytes   282 Mbits/sec  0.189 ms  2180/128935 (1.7%)
[  4] Sent 128935 datagrams
```

Nota. Autoría propia

En el análisis por intervalos de un segundo, el enlace mostró un comportamiento constante, con valores de throughput que oscilaron entre 277 y 286 Mbit/s, sin fluctuaciones abruptas ni interrupciones. El jitter registrado fue de 0.189 ms, confirmando que el flujo temporal del tráfico se mantuvo estable pese a la alta carga aplicada. Esta estabilidad fue coherente con los resultados previos de UDP y TCP, y se reforzó gracias a la baja interferencia estacionaria característica de la banda de 6 GHz.

La prueba confirmó que la topología end-to-end operó correctamente al sostener tráfico continuo de alta demanda, sin pérdida de asociación y con una degradación mínima atribuible a la naturaleza del enlace inalámbrico. La estabilidad observada permitió validar que la infraestructura funcionó adecuadamente en 6 GHz para escenarios que requieren transmisión intensiva de datos.

4.4.3 Tabla Comparativa de Resultados

La **Tabla 14** presenta el desempeño del enlace inalámbrico bajo un escenario end-to-end, contrastando la operación del sistema en las bandas de 5 GHz y 6 GHz ante cargas sostenidas de tráfico. En 5 GHz, una carga de 300 Mb/s produce un throughput efectivo de 307 Mb/s, con un jitter reducido (0.226 ms) y una pérdida mínima del 0.11 %, lo que evidencia un enlace estable y con márgenes suficientes para absorber variaciones de tráfico sin degradación apreciable.

Tabla 14

Tabla comparativa de escenarios End-to-End

Banda	Carga (Mb/s)	Duración (s)	Throughput (Mb/s)	Jitter (ms)	Pérdida (%)	Datagramas enviados
5 GHz	300	30	307	0.226	0.11%	140 090
6GHz	500	30	282	0.189	1.7%	128 935

Nota. Autoría propia

En contraste, en 6 GHz se aplicó una carga superior (500 Mb/s) con la finalidad de evaluar el comportamiento del enlace frente a mayores exigencias. El resultado muestra un throughput de 282 Mb/s, acompañado de un jitter de 0.189 ms y una pérdida del 1.7 %. Aunque el jitter permanece bajo y dentro de un rango aceptable, el incremento de la pérdida refleja que el enlace opera cercano a su límite de capacidad en esa condición de carga. Principalmente, esta distinción es consecuencia de la conjunción entre una modulación más agresiva, un ancho de banda más grande y una sensibilidad a distancia/obstáculos propia de la banda de 6 GHz.

En términos generales, los datos confirman que 5 GHz tiene más estabilidad frente a cargas moderadas, en tanto que 6 GHz, a pesar de que ofrece un espectro más amplio y menos interferencia, necesita un control más exacto del nivel de carga para prevenir pérdidas significativas. Esto valida la importancia de considerar la capacidad real de la banda y no únicamente la teórica al diseñar escenarios de transmisión de alta demanda.

4.5 Análisis Espectral mediante SDR

El análisis espectral se realizó utilizando un receptor SDR con el fin de observar directamente la distribución de energía, la ocupación del canal y el comportamiento temporal–frecuencial de las señales transmitidas en las bandas de 5 GHz y 6 GHz. Este procedimiento permitió complementar las mediciones de rendimiento con una evaluación física del medio radioeléctrico, identificando patrones de modulación, posibles interferencias y la estabilidad del enlace durante la transmisión real de tráfico. Los espectrogramas capturados permitieron comparar ambas bandas bajo las mismas condiciones operativas, aportando evidencia visual sobre su eficiencia espectral y su nivel de limpieza del entorno.

4.5.1 Captura de Señal WiFi en 5 GHz y 6 GHz mediante SDR

La captura de la señal inalámbrica en las bandas de 5 GHz y 6 GHz se realizó con el propósito de analizar las características espectrales y la estructura de modulación empleadas

por el estándar IEEE 802.11ax bajo condiciones reales de transmisión. Para este procedimiento se utilizó un transceptor **ADALM-Pluto SDR**, operando como receptor de banda ancha, junto con la plataforma SDRangel para la adquisición de muestras IQ y MATLAB para su posterior procesamiento.

Para ambas bandas se empleó una configuración equivalente con el fin de garantizar comparabilidad entre escenarios. El ADALM-Pluto se configuró inicialmente en SDRangel mediante la definición de la frecuencia central, el ancho de banda y el nivel de ganancia. En el caso de los 5 GHz, la frecuencia central se estableció en el canal apropiado que utilizó el punto de acceso durante las pruebas de rendimiento. Además, se determinó la frecuencia central en el intervalo que pertenece a la banda UNII-5 para validar en 6 GHz.

En ambas situaciones, se utilizó el módulo File Sink en el flujo de adquisición para almacenar las muestras IQ en formato .sdriq, garantizando así que los datos se registraron sin modificaciones ni filtrados anteriores. Una vez completada la captura, los archivos fueron transferidos a un entorno MATLAB para su procesamiento.

4.5.1.1 Banda de 5GHz

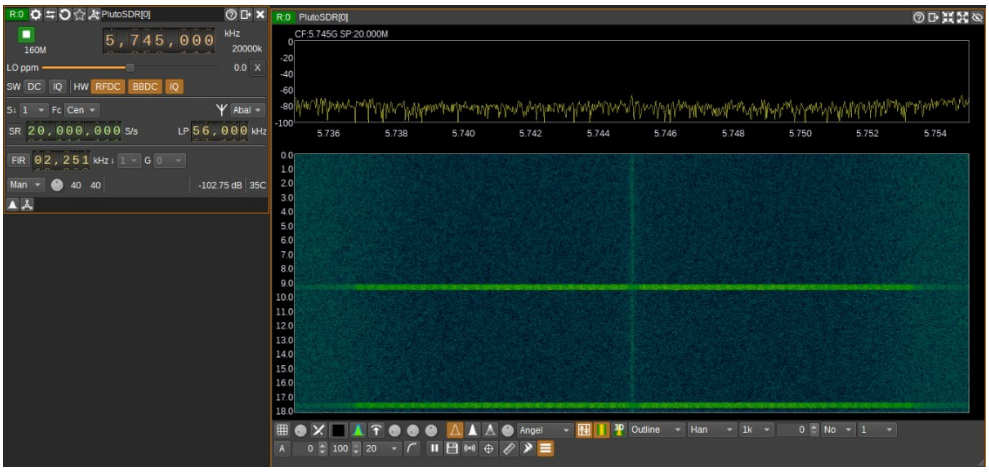
La captura de la señal WiFi en la banda de 5 GHz se realizó utilizando el transceptor ADALM-Pluto configurado desde la plataforma SDRangel. Para esta medición se ajustó la frecuencia central en 5.745 GHz, correspondiente al canal operativo utilizado durante las pruebas de rendimiento. El ancho de muestreo se estableció en 20 MS/s, mientras que el ancho de visualización espectral se fijó en 20 MHz para representar adecuadamente la actividad del canal.

En la **Figura 69** se observa el espectro recibido en tiempo real desde SDRangel. La traza superior corresponde al espectro de potencia instantáneo, donde se apreció energía distribuida a lo largo del canal, consistente con la modulación OFDM empleada por el estándar IEEE 802.11ax. El panel inferior muestra el waterfall, donde se identificaron dos

franjas horizontales de mayor potencia, asociadas a la transmisión periódica del punto de acceso y al patrón de repetición de símbolos dentro de la trama. No se observaron componentes espurias significativas, y la ocupación espectral se mantuvo estable durante toda la captura.

Figura 69

Captura en SDRangel de la señal WiFi 5 GHz (f = 5.745 GHz).



Nota. Autoría propia

4.5.1.2 Banda de 6GHz

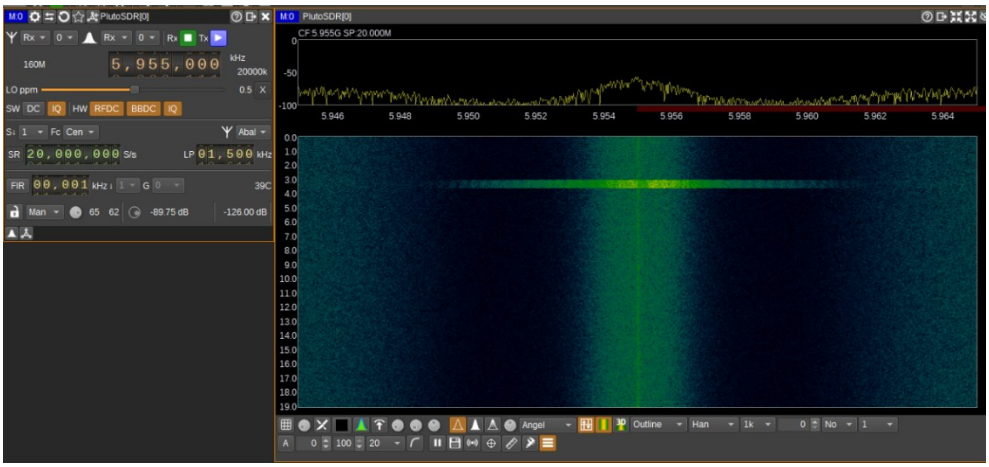
La captura de la señal WiFi correspondiente a la banda de 6 GHz se realizó utilizando el transceptor ADALM-Pluto configurado en SDRangel. La frecuencia central se estableció en 5.955 GHz, dentro del rango UNII-5 habilitado para las pruebas, mientras que la frecuencia de muestreo se mantuvo en 20 MS/s, al igual que en la medición realizada para 5 GHz. Este ajuste permitió obtener un ancho de visualización suficiente para representar la actividad del canal bajo el estándar IEEE 802.11ax.

En la **Figura 70** se presenta la visualización obtenida desde SDRangel. El panel superior muestra el espectro de potencia instantáneo, donde se observó una elevación clara del nivel energético en torno a la frecuencia central, correspondiente a la transmisión del punto de acceso WiFi 6E. En el panel inferior, el waterfall reveló una región continua de alta

potencia representada como una franja horizontal, seguida de una dispersión gradual de energía hacia los bordes del canal. Esta estructura fue consistente con las características OFDMA del estándar físico 802.11ax, aunque con menor potencia relativa respecto a la captura realizada en 5 GHz.

Figura 70

Captura en SDRangel de la señal WiFi 6 GHz (f = 5.955 GHz)



Nota. Autoría propia

4.5.2 Análisis del Espectro en Ambas Bandas

El análisis espectral de las señales WiFi-capturadas mediante el transceptor ADALM-Pluto permitió caracterizar el comportamiento físico del enlace en las bandas de 5 GHz y 6 GHz bajo el estándar IEEE 802.11ax. Para ambas bandas se empleó el mismo procedimiento: captura de muestras IQ en SDRangel y procesamiento en MATLAB, lo cual garantizó condiciones homogéneas para la comparación.

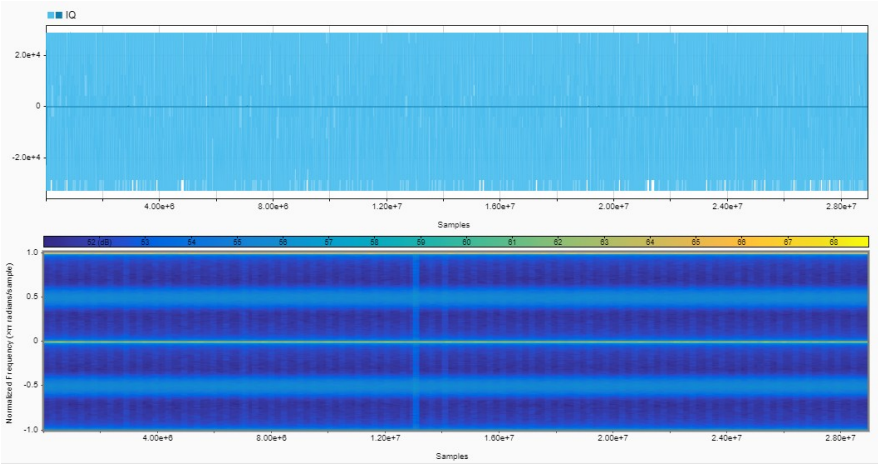
4.5.2.1 Banda de 5GHz

En la **Figura 71**, correspondiente a la banda de 5 GHz, el espectro obtenido mediante SDR y procesado en MATLAB muestra una distribución de energía compacta y bien delimitada alrededor de la frecuencia central. Se observa la estructura típica de OFDM, con una línea horizontal dominante asociada a la portadora y lóbulos laterales simétricos que

reflejan la activación estable de subportadoras. La periodicidad de los patrones en frecuencia evidencia un uso uniforme del canal, sin variaciones abruptas a lo largo del tiempo. La intensidad homogénea y la disposición ordenada de los componentes espectrales sugieren un enlace físicamente estable, aunque condicionado por la presencia de interferencia típica en la banda de 5 GHz, lo cual limita la expansión del espectro y la densidad de subportadoras.

Figura 71

Análisis del Espectro 5 GHz



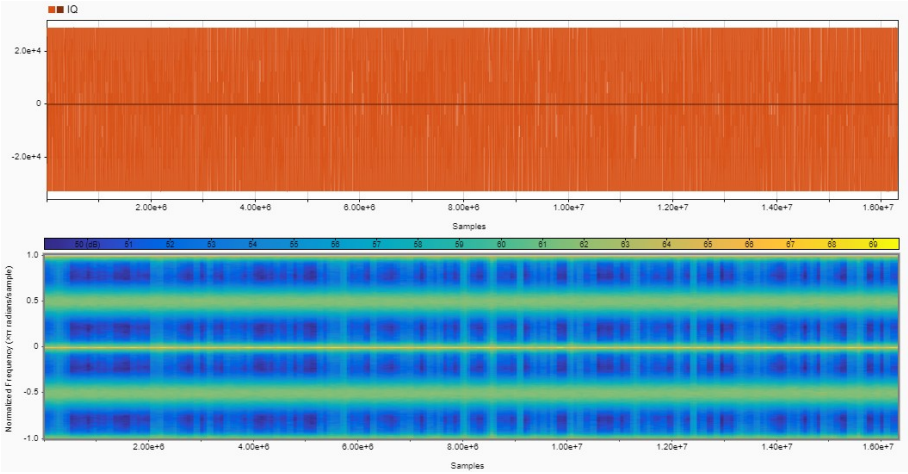
Nota. Autoría propia

4.5.2.2 Banda de 6GHz

En la **Figura 72**, correspondiente a la banda de 6 GHz, el espectro presenta un patrón más amplio y granular, reflejando un mayor número de subportadoras activas y un uso más eficiente del ancho de canal disponible. La estructura OFDM continúa siendo evidente, pero los niveles de energía distribuidos a lo largo del dominio frecuencia-tiempo presentan una mayor variabilidad, indicativa de modulaciones de orden superior y de un entorno radioeléctrico menos congestionado. La mayor dispersión del espectro y la densidad de tonos laterales evidencian que el equipo puede operar con canales más anchos y con configuraciones más agresivas, características propias del funcionamiento en la banda 6 GHz bajo el estándar Wi-Fi 6/6E.

Figura 72

Análisis del Espectro 6 GHz



Nota. Autoría propia

Al comparar ambas bandas, se evidencia que el espectro 5 GHz mantiene una ocupación más contenida y uniforme, influenciado por la presencia de interferencia y las limitaciones de canalización propias de esta banda. En contraste, la banda 6 GHz exhibe un espectro más amplio, denso y dinámico, coherente con un entorno limpio que permite habilitar modulaciones más altas y mayor cantidad de subportadoras. Este comportamiento espectral es consistente con los resultados de rendimiento obtenidos posteriormente, donde 6 GHz logra mayores tasas de transferencia y mejor estabilidad, mientras que 5 GHz presenta mayor susceptibilidad a interferencias y fluctuaciones de potencia.

4.5.3 Comparativa Física 5 GHz vs 6 GHz

El análisis comparativo entre ambas bandas permitió evidenciar diferencias físicas relevantes en la propagación, ocupación espectral y estabilidad del enlace. En la banda de 5 GHz, la señal presentó una ocupación espectral más estrecha y menos variable, atribuida a la disponibilidad limitada de espacio radioeléctrico y a la mayor presencia de interferencia por la coexistencia con múltiples redes vecinas. Esto se manifestó en un espectro con bordes bien definidos, una dispersión de energía más reducida y patrones OFDM notablemente

homogéneos. Esto indicaba que el canal se utilizaba de manera más conservadora y que había menos flexibilidad para habilitar modulaciones de orden superior.

En cambio, el comportamiento físico de la banda de 6 GHz fue más amplio y dinámico. El espectro mostró una densidad más alta de subportadoras debido a que se opera en un ambiente casi sin interferencias y con canales más anchos. La capacidad del dispositivo para habilitar modulaciones más eficientes y un número más alto de RU (Resource Units), que son coherentes con las capacidades del estándar 802.11ax/11be en ese espectro, se vio reflejada en la distribución energética, que se extendió más sobre el eje de frecuencia. Además, la estabilidad temporal se benefició de la falta de redes superpuestas, ya que se notó una variación más baja en la amplitud de los componentes espectrales.

Según un análisis físico, la propagación a 5 GHz es más sólida porque tiene menos atenuación en el interior de los edificios; no obstante, interferencias y saturaciones espectrales limitan su eficacia. En contraste, 6 GHz tiene un rendimiento físico más alto, apoyado en un ambiente despejado, un ancho de canal más amplio y una mayor disponibilidad espectral. Sin embargo, tiene una atenuación inherente superior que puede limitar su cobertura en escenarios más extensos.

4.6 Integración de los Resultados de Pruebas

El proceso de validación desarrollado en las bandas de 5 GHz y 6 GHz permitió obtener una caracterización detallada del comportamiento del estándar IEEE 802.11ax bajo diferentes escenarios de rendimiento. Después de terminar el análisis técnico, los resultados se relacionaron con el campo académico para convertir la experiencia experimental en una serie organizada de prácticas de laboratorio enfocadas en la capacitación profesional en redes inalámbricas avanzadas. Este traslado se realizó con el objetivo de vincular directamente los hallazgos de la investigación con las actividades pedagógicas que permiten al estudiante

comprender, reproducir y analizar fenómenos reales vinculados con el funcionamiento del WiFi 6/6E.

Se emplearon las etapas críticas que se usaron en la investigación para estructurar el orden de las prácticas, con el propósito de mantener la coherencia metodológica entre el procedimiento experimental y una posible implementación en el campo académico. En este marco, se propuso cada práctica para tratar ideas relacionadas con la eficiencia espectral, el análisis en el tiempo, la evaluación de rendimiento y el funcionamiento de la capa PHY. La propuesta contempló una secuencia lógica de contenidos que facilitaría, en un contexto de aplicación futura, tratar desde la identificación del vínculo básico hasta el análisis comparativo del rendimiento entre las bandas de 5 GHz y 6 GHz.

Se trasladaron después al entorno académico los resultados logrados durante el proceso experimental a través de la creación de una secuencia estructurada de prácticas en laboratorio. Esta secuencia fue creada a partir de las pruebas efectuadas durante la investigación y posibilitó que cada etapa del análisis técnico se convirtiera en una tarea formativa que puede ser replicada. Se organizaron las prácticas de acuerdo con la misma secuencia progresiva que se utilizó en el estudio: (1) Establecimiento de la conexión inalámbrica y análisis de handshakes, en el cual el alumno identifica las tramas Beacon, Probe, Auth y Assoc. También incluye el intercambio EAPOL. (2) Medición del rendimiento TCP en flujos simples y multicanal, con un enfoque en evaluar la estabilidad, el rendimiento por unidad de tiempo y las retransmisiones. (3) Análisis del rendimiento UDP, que estudia la relación entre jitter, pérdida y carga ofrecida. (4) Evaluación de la estabilidad temporal para observar variaciones del rendimiento por unidad de tiempo a lo largo de periodos extensos. (5) Comparativa entre 5 GHz y 6 GHz considerando métricas de enlace, así como latencia, pérdidas y jitter.

Cada práctica de laboratorio incorporó un formato educativo que contenía: el título, los objetivos, los temas teóricos de respaldo, los materiales y equipos requeridos, un procedimiento minucioso, la evaluación de los resultados mediante preguntas guía, las conclusiones y la bibliografía recomendada. Además, se confeccionaron solucionarios dirigidos a los docentes, donde se detallaba el proceso de solución y la interpretación técnica de los resultados previstos, paso a paso. Este enfoque permitió que la secuencia se adaptara tanto a entornos de enseñanza guiada como a actividades autónomas de análisis avanzado.

La integración de estas prácticas permitió vincular los resultados experimentales con su aplicación formativa, generando un recurso académico útil para la enseñanza de tecnologías inalámbricas de nueva generación. El desarrollo detallado de cada práctica, así como sus solucionarios, se encuentra disponible en los Anexos A y B, donde se presenta la secuencia instruccional completa derivada del proceso experimental realizado en esta investigación.

4.7 Comparación Global frente al Estándar IEEE 802.11ax

La comparación frente al estándar IEEE 802.11ax se realizó con el objetivo de contrastar los valores teóricos definidos para Wi-Fi 6/6E con los resultados obtenidos experimentalmente en las bandas de 5 GHz y 6 GHz. Este análisis permitió identificar el grado de cumplimiento del sistema bajo condiciones reales, considerando tanto la capa física como el rendimiento TCP/UDP y la eficiencia espectral observada mediante SDR.

4.7.1 Parámetros Teóricos del Estándar IEEE 802.11ax

El estándar IEEE 802.11ax–2021, denominado High Efficiency WLAN (HE-WLAN), estableció mejoras significativas tanto en la capa física (PHY) como en la capa MAC, con el objetivo de incrementar la eficiencia espectral, reducir la contienda y mejorar el rendimiento en escenarios de alta densidad. La PHY del modo HE definió nuevos formatos de trama (HE-PPDU) y mecanismos de transmisión basados en el uso de OFDMA, la ampliación del número

de subportadoras y la incorporación de modulaciones de mayor orden, orientados a maximizar la tasa de datos en anchos de canal superiores a 20 MHz.

En la capa física, el estándar determinó que OFDMA sería el mecanismo fundamental de acceso, lo cual posibilitó dividir el canal en Unidades de Recursos (RU) de 26-tone, 52-tone, 106-tone, 242-tone, 484-tone y 996-tone. Esto permitió que varios usuarios transmitieran al mismo tiempo en un mismo canal. Asimismo, se introdujo la modulación 1024-QAM, lo que amplió la eficiencia espectral en contraste con el 256-QAM usado por 802.11ac. Además, se determinaron anchos de canal de 20, 40, 80 y 160 MHz, permitiendo configuraciones tanto contiguas como no contiguas en función del espectro disponible.

El estándar también implementó mejoras en la estructura del PPDU. Los campos HE-STF, HE-LTF, HE-SIG-A y HE-SIG-B se establecieron para llevar información sobre el formato de transmisión, la distribución de RU, la cantidad de usuarios, los anchos de canal y los parámetros MCS. La inclusión del campo HE-SIG-B en las transmisiones MU permitió que se asignaran explícitamente las RU a múltiples usuarios y que se determinara la modulación y codificación para cada uno de ellos.

802.11ax implementó procedimientos en la capa MAC que mejoraron la eficiencia de acceso, entre los cuales se encuentran: BSS Coloring, que redujo la rivalidad con los BSS adyacentes al detectar tramas de otras celdas; Target Wake Time (TWT), que permitió coordinar períodos de actividad y descanso para reducir el consumo del canal; así como mejoras en la agregación de tramas a través de A-MPDU, con longitudes más extensas que las utilizadas en versiones pasadas del estándar.

En términos de rendimiento, el estándar estableció tasas teóricas que sobrepasaron ampliamente a las de sus antecesores, debido a la combinación de OFDMA, MU-MIMO y 1024-QAM. Las velocidades físicas sobrepasaron el gigabit por segundo con canales de 80 y 160 MHz, en función del MCS, la cantidad de flujos espaciales y cómo se distribuyen las RU.

La latencia ha disminuido debido al diseño de la PHY HE, que emplea transmisiones multiusuario más cortas y una coordinación temporal de acceso más eficiente.

En resumen, el estándar 802.11ax definió parámetros teóricos que consideraron avances significativos en la capacidad de transmisión simultánea, la eficiencia espectral, la flexibilidad para asignar recursos y la reducción de interferencia. Esto brindó un marco firme para analizar y contrastar el desempeño real obtenido en las bandas de 5 GHz y 6 GHz durante los ensayos experimentales.

4.7.2 Comparación Teórica vs Resultados Experimentales en 5 GHz

Determinar el grado de alineación entre la capacidad real del enlace y las aptitudes definidas por la PHY/MAC de alta eficiencia fue posible gracias a la comparación entre los resultados de las pruebas ejecutadas en la banda de 5 GHz y los valores teóricos del estándar IEEE 802.11ax. En términos teóricos, 802.11ax logró progresos significativos en la eficiencia espectral mediante OFDM, modulaciones de hasta 1024-QAM, la asignación dinámica de RU y el uso de anchos de canal que alcanzan los 80 MHz para esta banda; gracias a ello se alcanzaron velocidades físicas mayores a un gigabit por segundo con configuraciones que emplean varios flujos espaciales. No obstante, el rendimiento real depende en gran medida de la interferencia y del ambiente radioeléctrico donde opera el enlace.

En las pruebas realizadas, la banda de 5 GHz reveló un entorno con ocho redes vecinas detectadas y niveles de interferencia que variaban entre el −40 % y el −80 % en los canales 100 a 104. A pesar de que estas redes no se intersectaron directamente con el canal 149, utilizado por el sistema, su presencia redujo la capacidad de modulación real y aumentó la competencia, lo que a su vez afectó negativamente la efectividad de los mecanismos MU-OFDMA diseñados en la PHY HE. Esto explica que, aunque el estándar permite modulaciones altas como 1024-QAM, el enlace funcione de una manera más conservadora a causa de la degradación de la relación señal-ruido provocada por el entorno.

Los valores de rendimiento TCP medidos revelaron un throughput en la bajada que oscilaba entre 220 y 235 Mbit/s y valores alrededor de los 200 Mbit/s en la subida. Aunque estas cifras son inferiores a los máximos teóricos establecidos por la norma, el comportamiento fue consistente con el escenario interferido y con que el cliente trabajó con un ancho de canal efectivo de 80 MHz. Las retransmisiones captadas en las corridas TCP (Retr = 2-7 por sesión) mostraron que la capa MAC tuvo que intentar nuevamente los segmentos a causa de colisiones o variaciones de señal, lo cual es coherente con el desempeño previsto en un BSS de alta densidad.

En lo que respecta al tráfico UDP, el estándar establece una eficacia elevada en ambientes densos a través de OFDMA. No obstante, la competencia del medio tiene un impacto directo sobre la pérdida de datagramas. Los ensayos en 5 GHz mostraron que las pérdidas eran del 0.009 %, 0.11 % y 0.58 % para velocidades de 150, 300 y 450 Mbit/s, respectivamente; se observó así una reducción progresiva a medida que la carga aumentaba. En situaciones en las que el canal está compitiendo con diversas estaciones diferentes del enlace bajo análisis, estas tasas de pérdida se alinearon con la conducta prevista por el estándar.

Finalmente, el análisis espectral a través de SDR mostró una señal compacta y estable con poca variabilidad temporal, un rasgo característico de una portadora OFDM que funciona bajo interferencia moderada. Dado que la detección directa del uso de OFDMA implica una decodificación exhaustiva del HE-SIG-B, lo cual no se puede ver en una FFT convencional, era predecible la falta de RU diferenciadas en el espectrograma.

En general, los resultados experimentales en 5 GHz coincidieron parcialmente con el comportamiento previsto del estándar IEEE 802.11ax: el enlace conservó una eficiencia razonable y estabilidad, pero su desempeño se vio afectado por la interferencia ambiental y

las limitaciones de calidad del canal. Estos elementos disminuyeron la capacidad del equipo para utilizar modulaciones de orden superior y asignaciones OFDMA más complejas.

4.7.3 Comparación Teórica vs Resultados Experimentales en 6 GHz

La comparación entre los parámetros teóricos del estándar IEEE 802.11ax y los resultados experimentales en la banda de 6 GHz evidenció un comportamiento más alineado con las capacidades previstas por la PHY HE que en la banda de 5 GHz. En 6 GHz, el enlace operó en un entorno libre de interferencia, condición esencial para que las mejoras del estándar, como OFDMA, 1024-QAM, asignación flexible de Resource Units y operación en canales amplios, pudieran manifestarse con mayor eficiencia.

En términos teóricos, el estándar contempló para esta banda la opción de funcionar con anchos de canal de 80 y 160 MHz, lo que permite tasas físicas más altas cuando el aparato tiene la capacidad de utilizar modulaciones altamente eficaces y múltiples subportadoras al mismo tiempo. Además, IEEE 802.11ax estableció que el rendimiento se optimiza de manera importante en entornos sin aparatos heredados, lo cual fue una realidad en estas pruebas, pues no se encontraron redes adicionales funcionando a 6 GHz en los registros de interferencia.

Las mediciones efectuadas muestran que el rendimiento del TCP descendente estuvo entre 217 y 224 Mbit/s, en tanto que el tráfico ascendente se mantuvo estable con valores de entre 165 y 168 Mbit/s. A pesar de que estos valores estaban muy por debajo del máximo teórico posible para canales de 80 MHz que operan con modulaciones superiores, mostraron una estabilidad más alta que la obtenida en 5 GHz. Esta estabilidad fue evidente en la captura de Wireshark, que mostró una variabilidad temporal reducida y la falta de competencia. Esto posibilitó que el enlace sostuviera un flujo constante sin interrupciones ni descensos bruscos del rendimiento.

El tráfico de UDP mostró un comportamiento exclusivo en la banda de 6 GHz. Para tasas moderadas, el enlace alcanzó entre 250 y 281 Mbit/s con un jitter bajo (alrededor de

0.18 ms), lo que concuerda con las mejoras en la eficiencia del estándar. En condiciones de sobrecarga, con tasas que fluctúan entre 800 y 1200 Mbit/s, la pérdida de datagramas disminuyó poco a poco del 3.2 % al 0.56 %. Esto indica que el PHY HE cambió su modo de transmisión y modulación para mantener la estabilidad. Esta conducta está en línea con lo que el estándar estableció acerca de la adaptabilidad dinámica de la modulación (MCS) y de la capacidad de acceso para múltiples usuarios basada en OFDMA.

El análisis espectral mediante SDR también mostró una diferencia importante en comparación con 5 GHz. En 6 GHz, se observó un espectro más amplio con una densidad de subportadoras y una variabilidad temporal mayores. Esto demostró que se estaba utilizando un ambiente limpio y que las configuraciones de transmisión establecidas por el estándar se estaban encendiendo con mayor agresividad. Esto resultó coherente con la presencia de canales amplios libres de interferencia, condición necesaria para que el sistema utilice de manera eficiente el máximo número de subcarriers permitido.

En conjunto, los resultados experimentales en 6 GHz se aproximaron más a las capacidades definidas por IEEE 802.11ax que los obtenidos en 5 GHz. Aunque el throughput real no alcanzó los valores teóricos máximos, la estabilidad del enlace, la baja interferencia, el uso eficiente del espectro y la respuesta adaptativa bajo sobrecarga fueron congruentes con las mejoras introducidas por el estándar para esta banda. Esto evidenció que la banda de 6 GHz constituye un entorno más favorable para que Wi-Fi 6E exprese sus ventajas, especialmente en escenarios de alta demanda de capacidad y baja contención.

4.7.4 Tabla Comparativa Global entre 5 GHz y 6 GHz

La **Tabla 15** evidenció que la banda de 6 GHz se aproximó de forma más consistente al comportamiento previsto por el estándar IEEE 802.11ax, principalmente debido a la disponibilidad de un espectro completamente libre de interferencia y al uso eficiente de OFDMA. En contraste, la banda de 5 GHz mostró limitaciones asociadas al entorno

radioeléctrico, particularmente por la presencia de múltiples redes vecinas que redujeron el MCS efectivo y limitaron la estabilidad del throughput. Aunque 6 GHz presentó un RSSI inferior, su rendimiento global fue más estable y coherente con las capacidades de alta eficiencia definidas por el estándar.

Tabla 15

Comparación global entre 5GHz y 6GHz

Parámetro Evaluado	Estándar IEEE 802.11ax	Resultados 5 GHz	Resultados 6 GHz
Tipo de modulación PHY	OFDM / OFDMA, hasta 1024-QAM	OFDM	OFDMA
Ancho de canal	20 / 40 / 80 / 160 MHz	80 MHz	80 MHz
Throughput TCP (descarga)	> 900 Mb/s posibles en condiciones ideales	220–235 Mb/s	217–224 Mb/s
Throughput UDP (tasa media)	Puede superar 1 Gb/s	157–337 Mb/s	250–281 Mb/s
Pérdida UDP (moderada)	Idealmente < 1 %	0.009–0.58 %	0.56 %
Jitter	Muy bajo (<1 ms)	0.22–0.34 ms	0.14–0.24 ms

Nota. Autoría propia

4.7.5 Evaluación de Cumplimiento, Variabilidad y Discrepancias

La evaluación de cumplimiento frente al estándar IEEE 802.11ax permitió determinar en qué medida los resultados obtenidos en las bandas de 5 GHz y 6 GHz reflejaron las capacidades teóricas de la tecnología Wi-Fi 6/6E. En términos generales, se observó un cumplimiento parcial del rendimiento esperado, condicionado por la calidad del entorno radioeléctrico, la potencia de transmisión del cliente, el nivel de interferencia presente y las limitaciones inherentes al hardware utilizado.

Las disparidades más notables en la banda de 5 GHz se vincularon con un entorno interferido. Aunque el estándar admite OFDMA, modulaciones de hasta 1024-QAM y canales

de 80 MHz con tasas físicas superiores a un gigabit por segundo, la presencia de ocho redes vecinas hizo que la relación señal-ruido efectiva se redujera, lo que limitó el MCS más alto alcanzable y disminuyó la eficiencia del espectro. Así, el rendimiento de TCP se mantuvo entre 220 y 235 Mb/s, lo cual está por debajo del máximo teórico previsto. Asimismo, las pérdidas UDP, aunque moderadas, mostraron que la contienda del medio afectó el desempeño, lo cual es coherente con el comportamiento de redes 802.11ax en escenarios densos, donde la eficiencia del estándar depende en gran medida del aislamiento del canal.

En la banda de 6 GHz, el cumplimiento con el estándar fue significativamente mayor. La ausencia total de redes interferentes permitió que el enlace operara en condiciones ideales para el uso de OFDMA y modulaciones de alta eficiencia, tal como prevé el estándar para entornos limpios. A pesar de que el throughput TCP descendente alcanzó cifras parecidas a 5 GHz (≈220 Mb/s), la estabilidad en el tiempo y la escasa variabilidad confirmaron que el enlace funcionó bajo condiciones ideales para la distribución de recursos. En tráfico UDP, el comportamiento de la banda de 6 GHz fue más parecido al teórico, con pérdidas controladas y jitter bajo, incluso a tasas altas. El rendimiento del mecanismo de adaptación dinámica del MCS, definido por 802.11ax, fue respaldado por la habilidad del enlace para estabilizar la pérdida en condiciones de sobrecarga.

La interferencia fue el principal elemento que distinguió entre las dos bandas. A pesar de que el estándar establece mejoras importantes para la operación en condiciones de densidad alta, su efectividad depende directamente del contenido del canal. La limitación de la capacidad del sistema para reflejar por completo las ventajas de PHY HE se debió a la contención en la banda de 5 GHz. En contraste, la modificación completa del espectro en 6 GHz permitió que estas mejoras se llevaran a cabo con más precisión.

Resumiendo, los resultados logrados cumplieron en parte con las expectativas teóricas del estándar IEEE 802.11ax. El desempeño medido, por las diferencias en la estabilidad de

enlace, la disponibilidad del espectro y las condiciones de interferencia mostró con más precisión las capacidades del estándar en la banda de 6 GHz que en la de 5 GHz. Con esto se determinó que la tecnología Wi-Fi 6E tiene un potencial más alto de aproximarse al rendimiento esperado por 802.11ax, sobre todo en contextos sin contención y con canales de espectro muy disponible.

4.8 Análisis Técnico Integral del Comportamiento

La integración de los resultados obtenidos en las bandas de 5 GHz y 6 GHz permitió realizar un análisis técnico global del comportamiento del sistema bajo los criterios de eficiencia espectral, estabilidad temporal, capacidad de transmisión y sensibilidad frente a interferencia. Este apartado consolidó las observaciones de las pruebas TCP, UDP, espectro SDR y validación end-to-end, permitiendo interpretar cómo las características del estándar IEEE 802.11ax se manifestaron en condiciones reales. La comparación conjunta entre bandas reveló diferencias sustanciales en desempeño, causadas tanto por el entorno radioeléctrico como por las propiedades físicas de propagación y el nivel de contención presente en cada escenario.

4.8.1 Discusión de Métricas Críticas

El análisis de las métricas críticas permitió identificar los parámetros que influyeron de manera directa en el rendimiento del sistema durante las pruebas realizadas en las bandas de 5 GHz y 6 GHz. Algunas de estas métricas fueron clave para evaluar la estabilidad de la conexión y cómo se gestionó el tráfico en cada caso: el jitter, la tasa de pérdida, el RSSI, el throughput sostenido y el número de retransmisiones TCP.

En lo que concierne al RSSI, la banda de 5 GHz presentó un valor superior (–29 dBm) en comparación con la de 6 GHz (–50 dBm), lo que señaló una propagación más favorable debido a la atenuación inferior característica de esta banda. Sin embargo, este nivel de señal no resultó en un mejor rendimiento ya que el entorno interferido limitó la capacidad del enlace

para funcionar con modulaciones elevadas y redujo la eficiencia del canal. Por otra parte, a pesar de que el RSSI fue menor, la banda de 6 GHz entregó un desempeño más estable porque no había redes cercanas y porque el espectro estaba totalmente sin contención.

El rendimiento fue otra medida esencial. En TCP, aunque ambas bandas alcanzaron velocidades de descarga cercanas a los 220 Mb/s, la banda de 6 GHz mostró menos variación entre corridas y una estabilidad temporal más alta. En UDP, 6 GHz manejó tasas más elevadas con pérdidas controladas, en cambio, 5 GHz sufrió un deterioro gradual a medida que la carga creció. Esto demostró que la eficiencia espectral fue más alta en 6 GHz, donde las mejoras del estándar IEEE 802.11ax se manifestaron de manera más notoria.

El comportamiento del enlace se vio también afectado por la tasa de pérdida y el jitter, que fueron indicadores fundamentales. Las pérdidas en 5 GHz fluctuaron entre el 0.009 % y el 0.58 % con tasas moderadas, mientras que las de 6 GHz bajaron del 3.2 % al 0.56 %, incluso bajo sobrecarga, con cifras de jitter siempre más bajas. Esta conducta fue coherente con la administración de recursos de la PHY HE, que alteró la modulación de forma dinámica y consiguió estabilizar el vínculo a pesar de las cargas altas.

Por último, se observó un aumento significativo en el número de retransmisiones TCP en 5 GHz, lo que evidencia la competencia y las colisiones dentro del entorno. Las retransmisiones en 6 GHz fueron menos numerosas y se distribuyeron de manera uniforme, lo que mostró un canal más limpio y un ambiente más favorable para las transmisiones continuas.

En conjunto, las métricas analizadas demostraron que la banda de 6 GHz ofreció un desempeño más alineado con las capacidades del estándar IEEE 802.11ax, especialmente en lo referente a estabilidad, eficiencia espectral y manejo de tráfico bajo cargas crecientes.

4.8.2 Impacto de Interferencia y Densidad Espectral

El impacto de la interferencia y de la densidad espectral fue determinante en la diferencia de rendimiento observada entre las bandas de 5 GHz y 6 GHz. En la banda de 5 GHz, el examen de redes vecinas mostró que había hasta ocho puntos de acceso más, algunos de los cuales funcionaban con niveles de señal entre -40% y -80%. A pesar de que ninguno de estos dispositivos estaba en el canal 149, que se usó durante las pruebas, su actividad causó una disputa en el medio y aumentó el ruido de fondo. Esto disminuyó la calidad efectiva de la señal y tuvo un impacto negativo en la habilidad del enlace para llegar a modulaciones altas.

La interferencia también ayudó a que el rendimiento UDP se fuera degradando de manera gradual y a que las retransmisiones TCP aumentaran conforme la carga de tráfico se incrementaba. El estándar IEEE 802.11ax tiene métodos, como BSS Coloring, para disminuir la interferencia entre BSS; sin embargo, su efectividad depende de que los dispositivos cercanos utilicen la misma tecnología, lo cual no se observó en el entorno evaluado. Por ende, el enlace de 5 GHz operó en un espectro denso donde no se pudieron plasmar las mejoras HE del estándar por completo.

Por otro lado, la banda de 6 GHz mostró un ambiente totalmente libre de interferencias, sin que se detectaran redes adicionales durante la validación. La falta de competencia posibilitó que el enlace funcionara con más estabilidad, disminuyendo la variabilidad del throughput y conservando niveles bajos de jitter incluso en situaciones de sobrecarga. El espectro limpio también propició una representación más nítida de la estructura OFDM en las capturas SDR, en las que se notó un ancho útil mayor y una repartición más concentrada de subportadoras, lo cual es consistente con el empleo de RU extensas característico de las configuraciones del estándar 802.11ax.

Asimismo, la eficiencia espectral fue mayor en 6 GHz debido a que el canal no se vio perjudicado por procesos de coexistencia con dispositivos legacy. Esto permitió un uso más efectivo del OFDMA y una repartición de recursos más estable. Esta situación redujo el volumen de retransmisiones y la cantidad de paquetes extraviados, lo que permitió que el flujo de datos en TCP y UDP se mantuviera continuo.

En conclusión, lo que más limitó el desempeño en 5 GHz fue la interferencia. Por su parte, la baja densidad espectral de 6 GHz posibilitó un funcionamiento más alineado con lo estipulado por el estándar IEEE 802.11ax. La comparación entre ambas bandas evidenció que el entorno radioeléctrico constituye un aspecto fundamental para el aprovechamiento real de las mejoras introducidas por Wi-Fi 6/6E.

4.8.3 Influencia del Ancho de Canal y Condiciones del Medio

La influencia del ancho de canal y de las condiciones del medio fue determinante en el comportamiento observado en ambas bandas. En 5 GHz, el enlace operó con un ancho de canal efectivo de 80 MHz, valor que, según el estándar IEEE 802.11ax, permite alcanzar tasas físicas elevadas siempre que exista una relación señal-ruido adecuada. No obstante, la existencia de varias redes de vecinos y la densidad espectral más alta disminuyeron el rendimiento real de ese ancho de canal, limitando así la posibilidad del sistema para emplear modulaciones superiores y reduciendo el throughput alcanzable. A pesar de que se determinó un ancho de canal extenso, las condiciones del entorno obstaculizaron que las ventajas teóricas del estándar se concretaran en su totalidad.

En cambio, la banda de 6 GHz funcionó en condiciones más propicias, a pesar de mantener un ancho de canal de 80 MHz. Debido a la falta absoluta de interferencia, el enlace pudo hacer un uso más eficiente del espectro, gracias a una disponibilidad superior de subportadoras y a un ambiente sin contención. Aunque el RSSI fue más bajo por la atenuación superior de la banda de 6 GHz, esta circunstancia no resultó en que el rendimiento se

deteriorara significativamente. En cambio, el rendimiento y la estabilidad temporal fueron más estables, lo que indica que la eficiencia espectral estuvo más afectada por la limpieza del canal que por la potencia recibida.

También se evidenció el comportamiento bajo carga de acuerdo a las condiciones del medio. En 5 GHz, el enlace mostró una saturación anticipada y un aumento progresivo en la pérdida de paquetes, lo cual evidencia que la competencia y el ruido disminuyeron la capacidad real del canal. A pesar de que las tasas eran elevadas y existían condiciones de sobrecarga a 6 GHz, el enlace mantuvo pérdidas controladas y jitter bajo, lo cual concuerda con la operatividad del estándar en un entorno sin dispositivos heredados. Esto demostró que en esta banda, la adaptación de modulación y la repartición de recursos mediante OFDMA tuvieron un desempeño más eficaz.

En general, los resultados confirmaron que el ancho de canal no fue el único factor que determinó el rendimiento del enlace. La banda de 6 GHz obtuvo ventajas, porque la condición del medio radioeléctrico tuvo un impacto mayor por su escasa densidad espectral y por la falta de interferencia. Esto permitió que el enlace reflejara con mayor precisión los avances introducidos por la norma IEEE 802.11ax.

4.8.4 Evaluación Integrada del Desempeño en 5 GHz y 6 GHz

La evaluación conjunta del rendimiento habilitó la combinación de las evaluaciones de ambas bandas para definir el funcionamiento general del sistema y averiguar cómo se presentaron las particularidades del estándar IEEE 802.11ax en situaciones reales. Se percibió que, al examinar juntas las métricas de jitter, interferencia, estabilidad temporal, pérdida y throughput, cada banda mostró ventajas y desventajas concretas que provenían de su comportamiento físico y del ambiente radioeléctrico en el que funcionó.

En la banda de 5 GHz, el rendimiento se vio afectado por la existencia de diversas redes vecinas y por una densidad espectral más elevada. La eficacia del uso del canal

disminuyó y la capacidad de enlace para mantener modulaciones altas se vio afectada por esta circunstancia. Aunque tenía un RSSI más alto, la disputa del medio hizo que el estándar no pudiera funcionar a su máximo potencial, lo que se evidenció en las retransmisiones TCP y la reducción progresiva del rendimiento UDP cuando estaba bajo carga. El enlace mostró estabilidad en condiciones moderadas, pero se evidenció vulnerabilidad frente a cargas elevadas, donde la pérdida y la fluctuación temporal aumentaron de manera significativa.

Por el contrario, la banda de 6 GHz mostró un comportamiento más estable y uniforme. El enlace funcionó en un ambiente ideal para llevar a cabo Wi-Fi 6E gracias a la total falta de interferencias, lo que propició la manifestación de las mejoras especificadas por el estándar 802.11ax, especialmente la eficiencia espectral y la adaptación dinámica a través de OFDMA. A pesar de que el RSSI fue menor debido a la atenuación más alta del canal, el desempeño no se vio comprometido de manera significativa, dado que la relación entre señal y ruido se conservó adecuada para mantener las modulaciones empleadas en las pruebas. La capacidad de estabilización del enlace se demostró a través de la estabilidad del rendimiento UDP, que mostró pérdidas controladas incluso bajo tasas exigentes, y las mínimas fluctuaciones en el throughput TCP.

En términos generales, el desempeño de la banda de 6 GHz fue menos susceptible a alteraciones ambientales y más predecible. La limpieza del espectro posibilitó una distribución más eficaz de los recursos y un funcionamiento más acorde a las capacidades establecidas por el estándar, en tanto que la banda de 5 GHz mostró ser más susceptible a la interferencia y a la competencia. Esta diferencia se observó en todas las medidas examinadas, destacando que la estabilidad temporal y la homogeneidad del rendimiento fueron más favorables a 6 GHz.

En síntesis, el análisis conjunto confirmó que la banda de 6 GHz ofreció un rendimiento superior en términos de continuidad del tráfico, eficiencia espectral y estabilidad;

al contrario, la banda de 5 GHz tuvo limitaciones relacionadas con un entorno interferido, aunque la potencia recibida fue más alta. Estos resultados consolidaron la ventaja técnica de 6 GHz para despliegues que requieren altas tasas de transferencia y operación sostenida en escenarios de baja contención.

A partir de los resultados obtenidos, se estableció que el estándar WiFi 6E resultó adecuado para aplicaciones de alta demanda de datos, al demostrar un comportamiento consistente frente a escenarios de tráfico elevado en comparación con la banda de 5 GHz. No obstante, se evidenciaron restricciones asociadas al alcance efectivo de la señal, a la mayor atenuación propia de la banda de 6 GHz y a la disponibilidad del espectro y compatibilidad de los dispositivos, aspectos que condicionan su implementación en determinados entornos. De este modo, el análisis realizado permitió cumplir con el objetivo general de la investigación, al identificar de manera clara las ventajas y limitaciones del estándar IEEE 802.11ax en las bandas de 5 GHz y 6 GHz.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El análisis comparativo realizado permitió establecer que el estándar IEEE 802.11ax en su extensión WiFi 6E presentó un desempeño favorable frente a la banda de 5 GHz en escenarios que demandan altas tasas de transferencia y operación sostenida, mostrando un comportamiento más consistente bajo condiciones de tráfico elevado. No obstante, se hallaron limitaciones relacionadas con la reducción de la banda de 6 GHz y el rango efectivo de la señal, así como factores externos relacionados con la disponibilidad del espectro y la compatibilidad de la infraestructura. Estos elementos, en suma, posibilitaron una caracterización fundamentada de las ventajas y restricciones de WiFi 6E para aplicaciones con alta demanda de datos.

La investigación bibliográfica posibilitó la creación de un marco conceptual robusto sobre el estándar IEEE 802.11ax, analizando a fondo su potencial técnico, la implementación de OFDMA, MU-MIMO, modulaciones de alto orden y la expansión del espectro hacia los 6 GHz. Este análisis demostró que WiFi 6E proporcionaba avances significativos en la reducción de latencia, la eficiencia espectral y la posibilidad de contar con canales amplios; aspectos cruciales para entender el comportamiento observado en el transcurso de las pruebas prácticas. Asimismo, se identificaron las limitaciones inherentes al uso de frecuencias más altas, especialmente la reducción y el alcance restringido. Esta teoría fue la base para interpretar apropiadamente los resultados que se obtuvieron en la experimentación.

La metodología creada permitió que se estructurara apropiadamente el contexto de evaluación para ambas bandas. Los métodos para determinar la cobertura, la interferencia, el rendimiento y la estabilidad a lo largo del tiempo, así como las herramientas, los parámetros de captura, las estructuras de prueba y las cargas de tráfico fueron establecidos. La configuración incluyó la validación de la conexión, el establecimiento de canales, la captura

de espectro usando SDR, la realización de pruebas TCP/UDP con iperf3 y la recolección de métricas a través de Wireshark. Esta planificación garantizó que los experimentos se pudieran reproducir y que los hallazgos fueran comparables entre 5 GHz y 6 GHz, lo cual cumplió con las pautas fijadas por la metodología de diseño propuesta.

Se realizaron las pruebas prácticas en los dos grupos con éxito, logrando métricas específicas de jitter, estabilidad temporal, niveles de señal (RSSI), interferencia estacionaria, comportamiento espectral y pérdida de paquetes. En la frecuencia de 5 GHz, el entorno estaba muy interferido, lo que afectó negativamente la calidad del enlace a pesar de contar con un RSSI más alto. En 6 GHz, se notó un funcionamiento más limpio y estable, con menos variaciones en el tiempo y pérdidas bajo sobrecarga que eran controladas. Las capturas SDR permitieron la detección de cambios estructurales en la distribución del espectro entre los dos tipos de bandas. Las pruebas se llevaron a cabo de acuerdo con los procedimientos establecidos y brindaron la información empírica requerida para la comparación final.

La investigación comparativa mostró que la banda de 6 GHz se aproximó más al rendimiento previsto por el estándar IEEE 802.11ax, especialmente por la ausencia de interferencia y la existencia de un espectro limpio. A pesar de que las dos bandas aplicaron las mismas técnicas PHY estipuladas por el estándar, la banda de 5 GHz experimentó dificultades de congestión y deterioro debido a un entorno denso, lo que restringió su efectividad real. La comparación con los parámetros teóricos mostró que el rendimiento real se vio influido por factores externos, como el ruido, la densidad espectral y las colisiones. En conjunto, el estudio confirmó que la banda de 6 GHz permitió expresar con mayor fidelidad las mejoras de alta eficiencia incorporadas en WiFi 6E.

Recomendaciones

Ampliar el alcance experimental incorporando escenarios adicionales con variación de distancia, presencia de obstáculos y diferentes distribuciones del cliente permitiría caracterizar con mayor precisión el comportamiento real de las bandas de 5 GHz y 6 GHz. Este tipo de pruebas contribuiría a evaluar la degradación por atenuación y la sensibilidad del enlace en situaciones más representativas de entornos operativos reales.

Al incorporar mediciones con varios clientes conectados al mismo tiempo, se podría examinar el rendimiento multiusuario y ver en vivo cómo funcionan mecanismos fundamentales del estándar IEEE 802.11ax, como la OFDMA bidireccional y el MU-MIMO. Si se incluye esta variable, el análisis de eficiencia espectral se fortalecería y permitiría conocer la distribución que hace el sistema de los recursos en escenarios de alta demanda.

Para evaluar el efecto de la congestión durante un periodo de tiempo en la banda de 5 GHz, sería beneficioso realizar pruebas en distintas horas del día o en entornos con interferencias naturales variables. Esta práctica posibilitaría verificar con más precisión la sensibilidad del enlace ante variaciones en el nivel de contención y compararla con la estabilidad registrada a 6 GHz, donde el espectro permaneció limpio durante cada una de las mediciones.

Un marco de comparación con los valores óptimos del estándar IEEE 802.11ax podría lograrse al combinar el análisis experimental con modelos de simulación o instrumentos de predicción radioeléctrica. La estimación teórica del rendimiento para diferentes MCS, anchos de canal y configuraciones de transmisión facilitaría la identificación más precisa de la causa de las discrepancias entre el rendimiento previsto y el que se ha observado en situaciones reales.

La integración de pruebas con anchos de canal más amplios, como 160 MHz, junto con el uso de dispositivos que sean compatibles con modulaciones más elevadas (por ejemplo,

MCS11), haría posible acercarse a los límites físicos establecidos por WiFi 6E. Este enfoque serviría para evaluar el potencial máximo de la banda de 6 GHz en entornos favorables y abriría la posibilidad de comparar estos resultados con futuras tecnologías, como WiFi 7.

Bibliografía

1Library. (2016). *Estados Unidos - GESTIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN OTROS PAÍSES*. https://1library.co/article/unidos-gesti%C3%B3n-espectro-radioel%C3%A9ctrico-pa%C3%ADses.qo52700y

Abdelmajid, A. H. (2019). *Subject to change without notice. The Wi-Fi Evolution*. www.qorvo.com

Abdul Alim, M., Berardinelli, G., Sørensen, T. B., Mogensen, P. E., & Kaagaard, J. (2024). Extended Spectrum Access: A Game Changer for WiFi-6E. *2024 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking, MeditCom 2024*, 347–352. https://doi.org/10.1109/MEDITCOM61057.2024.10621292

Aprenda Redes. (2022, June 10). *Comparación entre WiFi 6 y WiFi 6E*. https://www.aprendaredes.com/comparacion-entre-wifi-6-y-wifi-6e/

ARCOTEL. (2018). *Norma para espectro de uso libre y uso determinado en bandas libres.* . https://arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/NORMA-ESPECTRO-DE-USO-LIBRE-Y-ESPECTRO-PARA-USO-DETERMINADO-EN-BANDAS-LIBRES.pdf?utm_source=chatgpt.com

Aruba Networks. (2023). *¿Qué es Wi-Fi 6E y cómo funciona?* https://www.arubanetworks.com/es/faq/que-es-la-wi-fi-6e/

Cisco. (2020). *Wi-Fi 6E: La evolución del Wi-Fi estimula a renovar el modo de pensar la conectividad y manejar el espectro*.

Cisco. (2021). *Cisco public Wi-Fi 6E: The Next Great Chapter in Wi-Fi*.

Contreras García, V. (2023). *Dispositivos de Realidad Virtual y Aumentada pueden operar en banda 6 GHz en EE. UU. | DPL News*. https://dplnews.com/dispositivos-realidad-virtual-aumentada-banda-6-ghz/

Dennis Huang. (2018, October 23). *Wi-Fi 6 fundamentals: What is 1024-QAM?* . https://www.commscope.com/blog/2018/wi-fi-6-fundamentals-what-is-1024-qam/

Diego Fernando Díaz Niño. (2021). El acceso al medio inalámbrico y su importancia en 5G. *Revista Libros*, *Número 9*, 75–86. https://cipres.sanmateo.edu.co/ojs/index.php/libros/article/view/494/420

Edirisinghe, S., Galagedarage, O., Dias, I., & Ranaweera, C. (2023). Recent Development of Emerging Indoor Wireless Networks towards 6G. *Network 2023, Vol. 3, Pages 269-297*, *3*(2), 269–297. https://doi.org/10.3390/NETWORK3020014

Emmerling, F. (2020). *Wi-Fi 6: Key Innovations and their Contributors -Part 2- JUVE Patent*. https://www.juve-patent.com/sponsored/braun-dullaeus-pannen-emmerling-patent-rechtsanwalte/wi-fi-6-key-innovations-and-their-contributors-part-2/

EUROPEAN COMMISSION. (2021). *Implementing decision on the use of the 6 GHz band*. http://www.itu.int/pub/R-REG-RR

European Commission. (2021). *Commission Implementing Decision on the 6 GHz band*. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en

FCC. (2020a). *FCC Opens 6 GHz Band to Wi-Fi and Other Unlicensed Uses | Federal Communications Commission*. https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-6-ghz-band-wi-fi-and-other-unlicensed-uses

FCC. (2020b). *Unlicensed Use of the 6 GHz Band | Federal Communications Commission*. https://www.fcc.gov/document/unlicensed-use-6-ghz-band

FCC. (2021). *THE COMMISSION BEGINS THE PROCESS FOR AUTHORIZING 6 GHZ BAND AUTOMATED FREQUENCY COORDINATION SYSTEMS*. https://osmbuildings.org/data/.

Gast, M. S. (2005). 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide (2nd ed.). *O'Reilly Media*, *2011*. https://www.oreilly.com/library/view/80211-wireless-networks/0596100523/

Ghoshal, M., Krishna, S. B., Gringoli, F., Widmer, J., & Koutsonikolas, D. (2024). A First Look at 160 MHz WiFi 6/6E in Action: Performance and Interference Characterization. *2024 IFIP Networking Conference, IFIP Networking 2024*, 489–495. https://doi.org/10.23919/IFIPNETWORKING62109.2024.10619856

Gobierno del Ecuador. (2015, February 18). *Ley Orgánica de Telecomunicaciones*. https://www.gob.ec/regulaciones/ley-organica-telecomunicaciones

HD Pro. (2020, April 27). *Wi-Fi 6 — "Better, Longer, Faster."* https://medium.com/hd-pro/wi-fi-6-better-longer-faster-32d3df5cec42

Hernández Ramírez, C. S. (2024). *Diseño e implementación de una red inalámbrica Wi-Fi 5 con el protocolo de autenticación WPA3 para un posterior análisis de vulnerabilidades en el Campus Universitario de la Universidad Técnica del Norte*. https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15494

IEEE Std 802.11ax. (2021). *IEEE SA - IEEE 802.11ax-2021*. https://standards.ieee.org/ieee/802.11ax/7180/

Intel. (2020). *Intel® Wi-Fi 6E AX210*. https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/sku/204836/intel-wifi-6e-ax210-gig/specifications.html

José Antonio Lorenzo. (2024, August 8). *MU-MIMO: Qué es, para qué sirve y cómo mejora la velocidad WiFi global*. https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-wifi/mu-mimo-que-es-mejora-rendimiento-wifi/

Juniper Networks. (2023). *¿Qué es Wi-Fi 6E? | Juniper Networks MX*. https://www.juniper.net/mx/es/research-topics/what-is-wi-fi-6e.html

Keenan Systems. (2021, January 8). *Wi-Fi 6E – Massive bandwidth with new clear channels. Keenan Systems Blog*. https://www.keenansystems.com/wordpress/2021/01/08/wi-fi-6e-massive-bandwidth-with-new-clear-channels/

Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A., & Bianchi, G. (n.d.). A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, *21*(1). https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099

Koul, S. K., Swapna, S., & Karthikeya, G. S. (2024). Antenna Systems for Modern Wireless Devices. *Signals and Communication Technology*, *Part F3127*, 1–319. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3369-9/COVER

Mehrnoush, M., Hu, C., & Aldana, C. (2022). AR/VR Spectrum Requirement for Wi-Fi 6E and Beyond. *IEEE Access*, *10*, 133016–133026. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3231229

Ministerio de Telecomunicaciones. (2019). *LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES*. www.lexis.com.ec

Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información. (2015). *Ley Orgánica de Telecomunicaciones*.

Ministerio TIC Colombia. (2021). *Resolución No. 105/2021*. https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/

Mosquera Chica, Á. L. (2019). *Estudio y análisis de las nuevas tecnologías 802.11ax y 5G para el desarrollo del internet de las cosas.* http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/13364

Mozaffariahrar, E., Theoleyre, F., & Menth, M. (2022). A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges. *Future Internet 2022, Vol. 14, Page 293*, *14*(10), 293. https://doi.org/10.3390/FI14100293

MSI. (2022). *AXE5400 WiFi USB Adapter – Specifications. Micro-Star International*. https://us.msi.com/Networking/AXE5400-WiFi-USB-Adapter/Specification

Naik, G., Park, J. M., Ashdown, J., & Lehr, W. (2020). Next Generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz Bands: Opportunities and Challenges. *IEEE Access*, *8*, 153027–153056. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016036

Narváez Zambrano Adonis Bladimir. (2023). *Evaluación del rendimiento de la tecnología 802.11 AX mediante un Tesbed para el laboratorio de la materia de comunicación inalámbrica*. https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14132

Organización de las Naciones Unidas en Ecuador. (2021). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 9: Industria, innovación e infraestructura*. https://ecuador.un.org/es/sdgs/9

Perahia, E., & Stacey, R. (2013). Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac. *Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac*, *9781107016767*, 1–452. https://doi.org/10.1017/CBO9781139061407

Piva, M., Zanella, A., Cavazzini, A., & Triani, G. (2022). *Planning and realization of a WiFi 6 network to replace wired connections in an enterprise environment*.

Raspberry Pi Foundation. (2020). *Raspberry Pi Compute Module 4 Datasheet*.

Simet. (2021). *Wi-Fi 6E Nedir?* https://www.simet.com.tr/index.cfm?fuseaction=objects2.detail_content&cid=7784&type=news

Sociedad, U. Y., Leyva Bravo, I. J., David, M., & Casanova, B. (2016). La comunicación inalámbrica a través de la banda de los 60 GHz. *Revista Universidad y Sociedad*, *8*(2), 89–96. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202016000200011&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Solutel. (2020, September 16). *Wi-Fi 6 IEE 802.11ax usos y novedades.* https://www.solutel.com/post/wi-fi-6-iee-802-11ax-usos-y-novedades/

Tektronix. (2014). *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements | Tektronix*. https://www.tek.com/en/documents/primer/wi-fi-overview-80211-physical-layer-and-transmitter-measurements

Torres Torres, I. A. (2021). *ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL ESTÁNDAR 802.11AX PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE DESPLIEGUES WLAN EN ESCENARIOS CON TRÁFICO DE RED ELEVADO*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO.

TP-Link España. (2022). *¿Qué es WiFi 6E?* . https://www.tp-link.com/es/wifi-6e/

Weller, D., Mensenkamp, R. D., Vegt, A. Van Der, Bloem, J. W. Van, & Laat, C. De. (2020). Wi-Fi 6 performance measurements of 1024-QAM and DL OFDMA. *IEEE International Conference on Communications*, *2020-June*. https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149106

Wi-Fi Alliance. (2021a). *Wi-Fi 6 and Wi-Fi 6E drive global market opportunities | Wi-Fi Alliance*. https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-6-and-wi-fi-6e-drive-global-market-opportunities

Wi-Fi Alliance. (2021b). *Wi-Fi 6E: Wi-Fi® in the 6 GHz band (2021) | Wi-Fi Alliance*. https://www.wi-fi.org/file/wi-fi-6e-wi-fi-in-the-6-ghz-band-2021

Wong, K.-L., Wei, T.-C., Tseng, Y.-S., & Li, W.-Y. (2022). *Compact 2 x 2 Dual-Polarized Patch Antenna Array Transmitting 8 Uncorrelated Waves for the WiFi-6E MIMO Access Point Featuring 8 Spatial Streams*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.Doi

Xataka. (2024). *WiFi 6E de 6GHz: qué es y qué ventajas supone*. https://www.xataka.com/basics/wifi-6e-6ghz-que-que-ventajas-supone

Zheng, B., Jie, L., & Flynn, M. P. (2021). A 6-GHz MU-MIMO eight-element direct digital beamforming TX utilizing FIR H-Bridge DAC. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *69*(6), 2832–2840. https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3064318

Anexos

Anexo A: Guía de laboratorio 1

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS** **CARRERA DE TELECOMUNICACIONES** **COMUNICACIÓN INALÁMBRICA**		
Guía de laboratorio			
Nombre y Apellido:		Guía #:	1
Docentes:			
Fecha:			
Nivel:			
Tema:	**Validación de Conectividad y Establecimiento del Enlace**		
Objetivo general:	Evaluar el establecimiento del enlace inalámbrico en 5 GHz y 6 GHz, verificando la configuración del punto de acceso (AP), la conexión del cliente, y la correcta asignación de parámetros de red antes de ejecutar pruebas de desempeño.		
Objetivos específicos:	• Verificar el estado operativo del AP en 5 GHz y 6 GHz mediante herramientas de diagnóstico en Linux. • Validar la conexión del cliente Windows, confirmando parámetros de enlace, canal y velocidad de vínculo. • Determinar y examinar los sucesos de autenticación, asociación y handshake que hostapd ha registrado. • Confirmar que los parámetros IP han sido asignados y el enlace está disponible para futuras pruebas. • Registrar las diferencias operativas entre 5 GHz y 6 GHz, tomando como referencia la actuación del hardware y de los controladores.		

Marco teórico:	Temáticas para investigar:
	• Arquitectura IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) y 802.11ax/11be para 6 GHz (Wi-Fi 6E).
	• Proceso de asociación y autenticación:
	  ○ Autenticación con 802.11
	  ○ Asociación 802.11
	  ○ 4-Way Handshake
	• Diferencias regulatorias y de driver entre modo AP, managed y monitor en 2.4/5/6 GHz.
	• Ancho de canal (40 MHz vs 80/160 MHz) y su impacto en la velocidad negociada.		

Materiales y equipos:	• Punto de acceso para 5GHz y 6GHz. • Adaptador Wi-Fi Realtek 8832CU USB (cliente). • Adaptador Intel AX210 (para pruebas de compatibilidad).		

	• Laptop con Windows 10/11 para validación del enlace.
Procedimiento:	1. Activar el punto de acceso correspondiente (ya sea 5 GHz o 6 GHz) y comprobar que el SSID configurado esté habilitado para conectarse. 2. Verificar el estado del punto de acceso (AP) asegurándose de que el ancho y el canal concuerdan con la configuración establecida. 3. Conectarse al SSID desde el cliente Windows y asegurarse de que la autenticación se realice correctamente. 4. Analizar las características de la conexión para distinguir el protocolo, la banda, el canal, la velocidad del vínculo y el tipo de seguridad. 5. Para verificar los parámetros de red funcionales, anote la configuración de DNS, la puerta de enlace y la dirección IP asignada. 6. Confirmar la comunicación básica a través de pruebas de conectividad (ping o accesos a la puerta de enlace). 7. Verificar los registros del punto de acceso para corroborar los sucesos de autenticación, asociación y cierre del apretón. 8. Resaltar las diferencias entre 6 GHz y 5 GHz, aludiendo a la clase de seguridad, canal usado y velocidad acordada. **9.** Conservar las pruebas y los screenshots para el apartado de resultados y para los anexos.
Resultados:	• ¿Qué distingue la velocidad acordada en 5 GHz de la de 6 GHz? • ¿Cuáles son las diferencias que se notan entre las dos bandas en cuanto a canal, ancho de canal y potencia? • ¿Cuáles son las maneras en que se puede observar el 4-Way Handshake y la autenticación en los registros de hostapd? • ¿Qué parámetros clave entrega Windows sobre la conexión? • ¿Por qué en la banda de 6 GHz no es posible capturar tramas en modo monitor con Intel AX210?
Conclusiones:	Escribir 5 conclusiones sobre la práctica
Recomendaciones:	Escribir 5 recomendaciones sobre la práctica
Bibliografía:	Indicar la bibliografía utilizada para la práctica.

Desarrollo guía de laboratorio 1

Tema: Validación de Conectividad y Establecimiento del Enlace

Desarrollo de la practica

1. Mediciones en 5G: Encender el punto de acceso correspondiente (5 GHz o 6 GHz) y verificar que el SSID programado esté disponible para conexión.

Figura A 1

Punto de acceso para la banda de 5GHz

```
milea@raspberrypi:~$ sudo hostapd /etc/hostapd/hostapd.conf
wlp1s0: interface state UNINITIALIZED->COUNTRY_UPDATE
wlp1s0: interface state COUNTRY_UPDATE->HT_SCAN
wlp1s0: interface state HT_SCAN->ENABLED
wlp1s0: AP-ENABLED
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: authenticated
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 IEEE 802.11: associated (aid 1)
wlp1s0: AP-STA-CONNECTED 00:1d:43:30:11:49
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 RADIUS: starting accounting session 2B394354B9F4FA56
wlp1s0: STA 00:1d:43:30:11:49 WPA: pairwise key handshake completed (RSN)
wlp1s0: EAPOL-4WAY-HS-COMPLETED 00:1d:43:30:11:49
```

Nota. Autoría propia

2. Conectarse al SSID desde el cliente Windows, verificando que la autenticación sea exitosa y revisar las propiedades de la conexión para identificar: protocolo, banda, canal, velocidad de vínculo y tipo de seguridad.

Figura A 2

Autenticación en Windows

SSID:	Test5GHz
Protocolo:	Wi-Fi 6 (802.11ax)
Tipo de seguridad:	WPA2-Personal
Fabricante:	Realtek Semiconductor Corp.
Descripción:	Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC
Versión del controlador:	5001.19.102.0
Banda de red (canal):	5 GHz (149)
Velocidad de vínculo agregada (recepción/transmisión):	573/573 (Mbps)
Dirección IPv6 del vínculo local:	fe80::30aa:2ab2:2b3f:5d59%10
Dirección IPv4:	192.168.50.100
Puerta de enlace predeterminada IPv4:	192.168.50.1
Servidores DNS IPv4:	192.168.50.1 (sin cifrar)
Dirección física (MAC):	00:1D:43:30:11:49

Nota. Autoría propia

3. Mediciones en 6G: Encender el punto de acceso correspondiente (5 GHz o 6 GHz)
4. Conectarse al SSID desde el cliente Windows o Linux, verificando que la autenticación sea exitosa y revisar las propiedades de la conexión para identificar: protocolo, banda, canal, velocidad de vínculo y tipo de seguridad.

Figura A 3

Conexión de Linux a 6GHz

```
Interface wlp1s0
        ifindex 4
        wdev 0x100000001
        addr 54:e4:ed:74:6e:04
        ssid @Ruijie-s46CF-6G
        type managed
        wiphy 1
        channel 69 (6295 MHz), width: 160 MHz, center1: 6345 MHz
        txpower 22.00 dBm
        multicast TXQ:
                qsz-byt qsz-pkt flows   drops   marks   overlmt hashcol tx-bytes        tx-packets
                0       0       0       0       0       0       0       0               0
```

Nota. Autoría propia

Figura A 4

Conexión de Windows a 6GHz

SSID:	@Ruijie-s46CF-6G
Protocolo:	Wi-Fi 6 (802.11ax)
Tipo de seguridad:	OWE
Fabricante:	Realtek Semiconductor Corp.
Descripción:	Realtek 8832CU Wireless LAN WiFi 6 USB NIC
Versión del controlador:	5001.19.102.0
Banda de red (canal):	6 GHz (69)
Velocidad de vínculo agregada (recepción/transmisión):	2401/2401 (Mbps)
Dirección IPv6 del vínculo local:	fe80::30aa:2ab2:2b3f:5d59%10
Dirección IPv4:	192.168.120.57
Puerta de enlace predeterminada IPv4:	192.168.120.1
Servidores DNS IPv4:	192.168.120.1 (sin cifrar)
Dirección física (MAC):	00:1D:43:30:11:49

Nota. Autoría propia

Anexo B: Guía de laboratorio 2

<table>
<tr><td></td><td colspan="3">UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES
COMUNICACIÓN INALÁMBRICA</td></tr>
<tr><td colspan="4">Guía de laboratorio</td></tr>
<tr><td>Nombre y Apellido:</td><td></td><td rowspan="5">Guía #:</td><td rowspan="5">2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Docentes:</td><td></td></tr>
<tr><td></td></tr>
<tr><td>Fecha:</td><td></td></tr>
<tr><td>Nivel:</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>Tema:</td><td colspan="3">Rendimiento TCP</td></tr>
<tr><td>Objetivo general:</td><td colspan="3">Cuantificar el rendimiento TCP del enlace inalámbrico en 5 GHz y 6 GHz mediante pruebas de medición con flujo único y múltiples flujos en paralelo, estandarizando parámetros, registrando retransmisiones, y consolidando evidencias trazables.</td></tr>
<tr><td>Objetivos específicos:</td><td colspan="3">• Calcular el goodput TCP por banda (tanto de subida como de bajada) utilizando un solo flujo.
• Examinar la variabilidad y el rendimiento combinado con varios flujos paralelos.
• Consolidar los criterios de aceptación y los formatos de registro (CSV, JSON, TXT) para establecer comparaciones entre 5 GHz y 6 GHz.</td></tr>
<tr><td>Marco teórico:</td><td colspan="3">Temas de investigación:
• TCP en redes 802.11ax: control de la congestión (como CUBIC), ventana de congestión, retransmisiones y efecto del RTT.
• Relación entre el ancho del canal, MCS/NSS, SNR y el rendimiento efectivo.
• Medición con iperf3: variaciones entre la subida (de cliente a servidor), la descarga (con -R) y el multi-stream (con -P n).</td></tr>
<tr><td>Materiales y equipos:</td><td colspan="3">• Plataforma fundamental con Linux (funcionando los controladores 802.11ax).
• Adaptador de cliente compatible con Wi-Fi 6E.
• iperf3 (cliente y servidor), shell para la automatización de llamadas.</td></tr>
<tr><td>Procedimiento:</td><td colspan="3">1. Condiciones equivalentes: establecer la misma distancia, potencia, duración y canalización para 5 GHz y 6 GHz; registrar todo en una hoja de condiciones.</td></tr>
</table>

	2. **Servidor iperf3:** Ejecute el comando "iperf3 -s" en el extremo correspondiente y tome nota de la dirección IP y del puerto. 3. **Flujo único – 5 GHz:** realizar una carrera con un intervalo de -i 1, y que dure 30 segundos en la bajada (-R) y en la subida (sin -R). 4. **Multi-stream – 5 GHz:** Realizar pruebas de 30 segundos con -P4 (o el valor que se haya establecido) tanto en subida como en bajada. 5. **Repetición en 6 GHz:** repetir los pasos 3 y 4, pero cambiando solamente los parámetros de canal/banda/ancho. 6. **Control y bitácora:** registrar el comando exacto que se ejecutó, la hora de inicio y de finalización, la banda, el canal, el ancho, la clase de prueba (simple/múltiple, ascendente/descendente) y las observaciones.
Resultados:	• ¿Qué throughput medio se alcanzó en la prueba TCP y cómo se compara con el máximo valor registrado? • ¿Se registraron variaciones en el gráfico de tráfico a lo largo del tiempo? Explicar de modo breve. • ¿Cuántas retransmisiones TCP se observaron y qué señalan acerca de la estabilidad del enlace? • ¿De acuerdo con el RSSI y la interferencia, el rendimiento alcanzado se ajustó a lo previsto para WiFi 6/6E? • ¿Qué banda tuvo más estabilidad temporal, la de 5 GHz o la de 6 GHz?
Conclusiones:	Escribir 5 conclusiones sobre la práctica
Recomendaciones:	Escribir 5 recomendaciones sobre la práctica
Bibliografía:	Indicar la bibliografía utilizada para la práctica.

Desarrollo guía de laboratorio 2

Tema: Rendimiento TCP

Desarrollo de la practica

1. Lanzar en el extremo servidor: iperf3 -s

2. Mediciones para 5GHz: Realizar el flujo único en modo descarga con el comando ***iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -R -t 30 -i 1***

Figura B 1

Flujo único de 5G en descarga

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.00  sec   754 MBytes   211 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.00  sec   754 MBytes   211 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

3. Realizar el flujo único en modo subida con el comando iperf3 -c ***<IP_SERVIDOR> -t 30 -i 1***

Figura B 2

Flujo único de 5G en subida

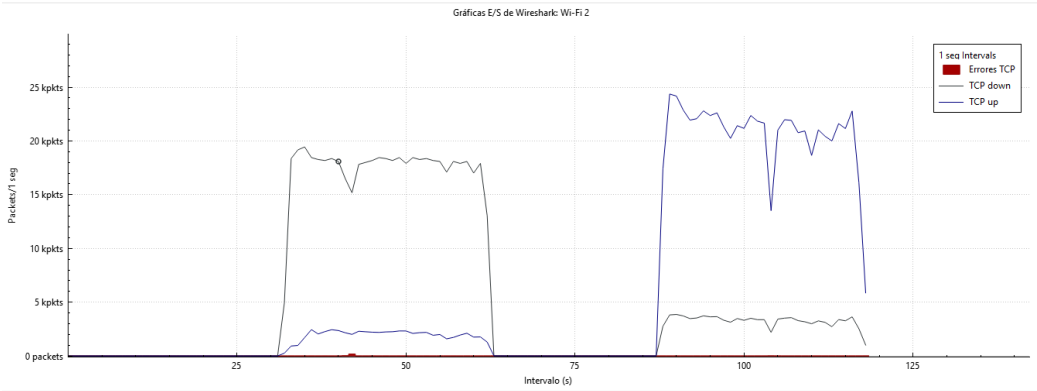
```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.00  sec   900 MBytes   252 Mbits/sec    4             sender
[  4]   0.00-30.00  sec   899 MBytes   251 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

4. Capture los paquetes en Wireshark y genere las gráficas de E/S para los paquetes de TCP, con los filtros tcp.srcport == 502 y tcp.dstport == 502

Figura B 3

Gráfica de E/S de Wireshark para 5GHz



Nota. Autoría propia

5. Realizar el Multi-stream en modo descarga (4 flujos) con el comando ***iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -P 4 -t 60 -i 1***

Figura B 4

Multi-stream de 5G en descarga

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-60.00  sec   494 MBytes  69.1 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-60.00  sec   494 MBytes  69.1 Mbits/sec                  receiver
[  6]   0.00-60.00  sec   486 MBytes  68.0 Mbits/sec                  sender
[  6]   0.00-60.00  sec   486 MBytes  68.0 Mbits/sec                  receiver
[  8]   0.00-60.00  sec   480 MBytes  67.1 Mbits/sec                  sender
[  8]   0.00-60.00  sec   480 MBytes  67.1 Mbits/sec                  receiver
[ 10]   0.00-60.00  sec   476 MBytes  66.5 Mbits/sec                  sender
[ 10]   0.00-60.00  sec   476 MBytes  66.5 Mbits/sec                  receiver
[SUM]   0.00-60.00  sec  1.89 GBytes   271 Mbits/sec                  sender
[SUM]   0.00-60.00  sec  1.89 GBytes   271 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

6. Realizar el Multi-stream en modo subida (4 flujos) con el comando ***iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -R -P 4 -t 60 -i 1***

Figura B 5

Multi-stream de 5G en subida

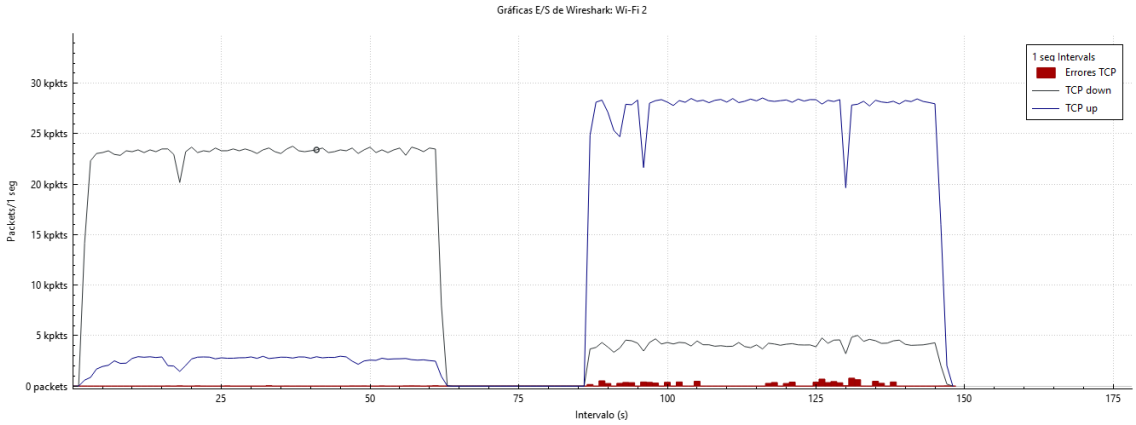
```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-60.00  sec   592 MBytes  82.8 Mbits/sec  562             sender
[  4]   0.00-60.00  sec   591 MBytes  82.7 Mbits/sec                  receiver
[  6]   0.00-60.00  sec   586 MBytes  81.9 Mbits/sec  405             sender
[  6]   0.00-60.00  sec   585 MBytes  81.7 Mbits/sec                  receiver
[  8]   0.00-60.00  sec   568 MBytes  79.5 Mbits/sec  505             sender
[  8]   0.00-60.00  sec   567 MBytes  79.3 Mbits/sec                  receiver
[ 10]   0.00-60.00  sec   588 MBytes  82.2 Mbits/sec  603             sender
[ 10]   0.00-60.00  sec   586 MBytes  82.0 Mbits/sec                  receiver
[SUM]   0.00-60.00  sec  2.28 GBytes   326 Mbits/sec  2075             sender
[SUM]   0.00-60.00  sec  2.28 GBytes   326 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

7. Capture los paquetes en Wireshark y genere las gráficas de E/S para los paquetes de TCP, con los filtros tcp.srcport == 502 y tcp.dstport == 502

Figura B 6

Gráfica de E/S de Wireshark Multi-stream para 6GHz



Nota. Autoría propia

8. Mediciones para 6GHz: Flujo único – 6 GHz (ida y vuelta)

   Descarga: ***iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -R -t 30 -i 1***

Figura B 7

Flujo único de 6G en descarga

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.00  sec   581 MBytes   162 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.00  sec   581 MBytes   162 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

Subida: ***iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -t 30 -i 1***

Figura B 8

Flujo único de 6G en subida

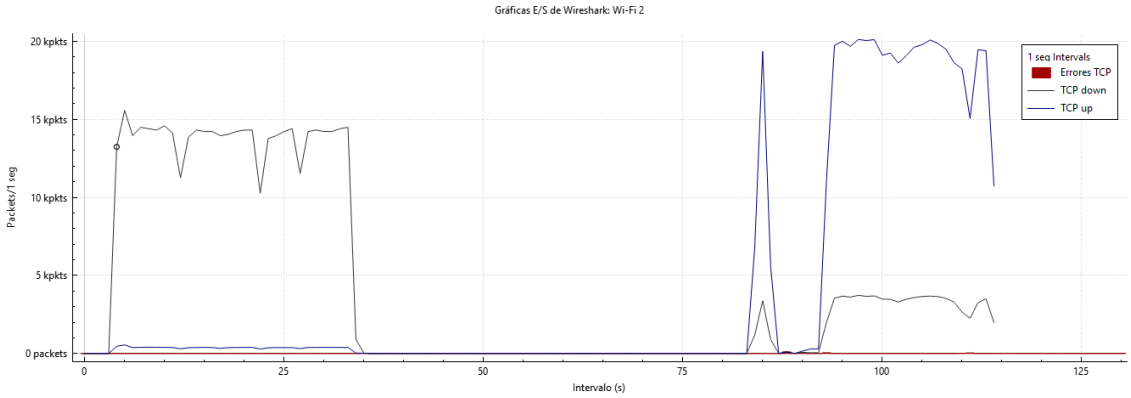
```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.00  sec   614 MBytes   172 Mbits/sec   80             sender
[  4]   0.00-30.00  sec   612 MBytes   171 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

9. Capture los paquetes en Wireshark y genere las gráficas de E/S para los paquetes de TCP, con los filtros tcp.srcport == 502 y tcp.dstport == 502

Figura B 9

Gráfica de E/S de Wireshark para 6GHz



Nota. Autoría propia

10. Realizar el Multi-stream en modo descarga (4 flujos) con el comando ***iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -P 4 -t 60 -i 1***

Figura B 10

Multi-stream de 6G en descarga

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-60.00  sec   477 MBytes  66.7 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-60.00  sec   477 MBytes  66.7 Mbits/sec                  receiver
[  6]   0.00-60.00  sec   452 MBytes  63.1 Mbits/sec                  sender
[  6]   0.00-60.00  sec   452 MBytes  63.1 Mbits/sec                  receiver
[  8]   0.00-60.00  sec   433 MBytes  60.6 Mbits/sec                  sender
[  8]   0.00-60.00  sec   433 MBytes  60.5 Mbits/sec                  receiver
[ 10]   0.00-60.00  sec   413 MBytes  57.7 Mbits/sec                  sender
[ 10]   0.00-60.00  sec   412 MBytes  57.7 Mbits/sec                  receiver
[SUM]   0.00-60.00  sec  1.73 GBytes   248 Mbits/sec                  sender
[SUM]   0.00-60.00  sec  1.73 GBytes   248 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

11. Realizar el Multi-stream en modo subida (4 flujos) con el comando ***iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -R -P 4 -t 60 -i 1***

Figura B 11

Multi-stream de 6G en subida

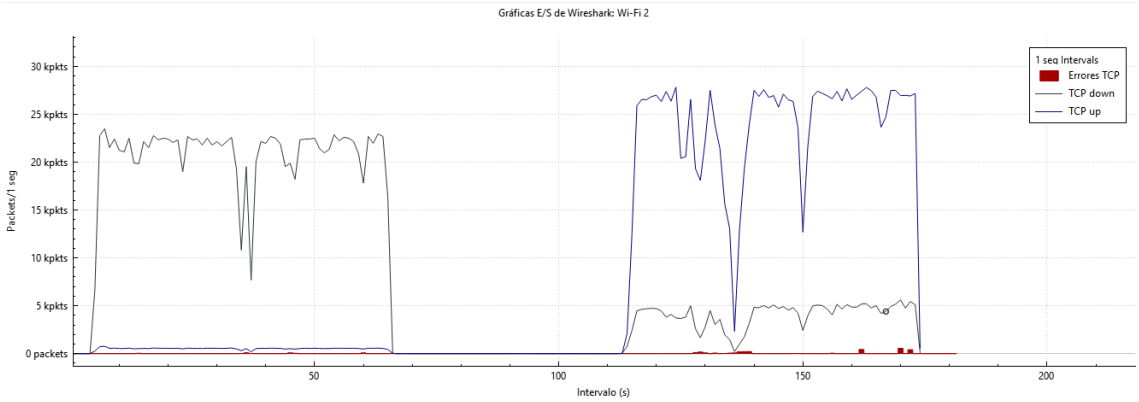
```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-60.00  sec   520 MBytes  72.7 Mbits/sec   95             sender
[  4]   0.00-60.00  sec   519 MBytes  72.6 Mbits/sec                  receiver
[  6]   0.00-60.00  sec   516 MBytes  72.2 Mbits/sec   46             sender
[  6]   0.00-60.00  sec   515 MBytes  72.1 Mbits/sec                  receiver
[  8]   0.00-60.00  sec   522 MBytes  73.1 Mbits/sec  124             sender
[  8]   0.00-60.00  sec   521 MBytes  72.8 Mbits/sec                  receiver
[ 10]   0.00-60.00  sec   518 MBytes  72.4 Mbits/sec   17             sender
[ 10]   0.00-60.00  sec   516 MBytes  72.2 Mbits/sec                  receiver
[SUM]   0.00-60.00  sec  2.03 GBytes   290 Mbits/sec  282             sender
[SUM]   0.00-60.00  sec  2.02 GBytes   290 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

12. Capture los paquetes en Wireshark y genere las gráficas de E/S para los paquetes de TCP, con los filtros tcp.srcport == 502 y tcp.dstport == 502

Figura B 12

Gráfica de E/S de Wireshark Multi-stream para 6GHz



Nota. Autoría propia

Anexo C: Guía de laboratorio 3

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS** **CARRERA DE TELECOMUNICACIONES** **COMUNICACIÓN INALÁMBRICA**		
Guía de laboratorio			
Nombre y Apellido:		Guía #:	3
Docentes:			
Fecha:			
Nivel:			
Tema:	**Rendimiento UDP**		

Objetivo general:	Cuantificar la relación entre carga ofrecida UDP y las métricas de pérdida y jitter en bandas 5 GHz y 6 GHz bajo IEEE 802.11ax, utilizando pruebas de medición reproducibles y formatos de registro homogéneos.
Objetivos específicos:	• Calcular las tasas objetivo UDP por banda de acuerdo con el goodput TCP medido previamente (Práctica 2). • Calcular la pérdida (%) y el jitter (ms) para tres niveles relativos de carga por banda. • Utilizar cuadros y gráficos normalizados para comparar 5 GHz con 6 GHz.
Marco teórico:	Temas para investigar: • Tráfico UDP en 802.11ax: falta de colas, congestión, pérdida y fuera de orden. • Indicadores: pérdida de datagramas, jitter (fluctuación del retardo), relación con SNR/MCS y ancho de canal. • Método de medición con iperf3 (UDP): duración, parámetros -u, intervalo y ancho de banda. • Buenas prácticas: condiciones similares entre bandas (canalización, duración, distancia, potencia).
Materiales y equipos:	• Plataforma fundamental con Linux (funcionando los controladores 802.11ax). • Adaptador de cliente compatible con Wi-Fi 6E. • iperf3 (cliente y servidor), shell para la automatización de llamadas.
Procedimiento:	1. Condiciones equivalentes: establecer la misma longitud, potencia, amplitud de canal y tiempo para las frecuencias de 5 GHz y 6 GHz. 2. Servidor iperf3: Comenzar iperf3 -s y anotar la dirección IP/puerto. 3. Cálculo de las tasas UDP objetivo por banda: basándose en el goodput TCP (Práctica 2), se deben establecer tres niveles relativos para el mismo goodput TCP de la banda: 0.3×, 0.6× y 0.9×. 4. Mediciones en 5 GHz: Para cada nivel, realizar tres corridas de 30 segundos con iperf3 -u -b {tasa}; registrar ping de manera simultánea y (opcionalmente) un PCAP corto. 5. Mediciones en 6 GHz: Realizar el paso previo utilizando las tasas relativas que se calcularon para 6 GHz. 6. Control: llevar un registro de las órdenes utilizadas, los parámetros y las observaciones en la bitácora, así como de la hora de comienzo y de fin.
Resultados:	• ¿Cuál fue el throughput real obtenido para cada tasa configurada (150, 300, 450 Mb/s o equivalente en 6 GHz)? • ¿Qué porcentaje de pérdida de datagramas se registró y cómo afecta la calidad del enlace?

	• ¿El jitter se mantuvo estable durante la prueba? Explicar brevemente. • ¿La carga ofrecida saturó el enlace en algún punto? Indicar en qué intervalo ocurrió. • ¿Qué diferencias clave se observaron entre el comportamiento en 5 GHz y en 6 GHz?
Conclusiones:	Escribir 5 conclusiones sobre la práctica
Recomendaciones:	Escribir 5 recomendaciones sobre la práctica
Bibliografía:	Indicar la bibliografía utilizada para la práctica.

Desarrollo guía de laboratorio 3

Tema: Rendimiento UDP

Desarrollo de la practica

1. Lanzar en el extremo servidor: iperf3 -s

2. Mediciones en 5 GHz: para cada nivel, ejecutar 3 corridas × 30 s con iperf3 -u -b {tasa}
iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 300M -t 30 -i 1

Figura C 1

Punto de carga con tasa 300Mbps para 5GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec   947 MBytes   265 Mbits/sec  0.164 ms  2/121199 (0.0017%)
[  4] Sent 121199 datagrams
```

Nota. Autoría propia

iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 600M -t 30 -i 1

Figura C 2

Punto de carga con tasa 600Mbps para 5GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec   961 MBytes   269 Mbits/sec  0.148 ms  5/123001 (0.0041%)
[  4] Sent 123001 datagrams
```

Nota. Autoría propia

iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 900M -t 30 -i 1

Figura C 3

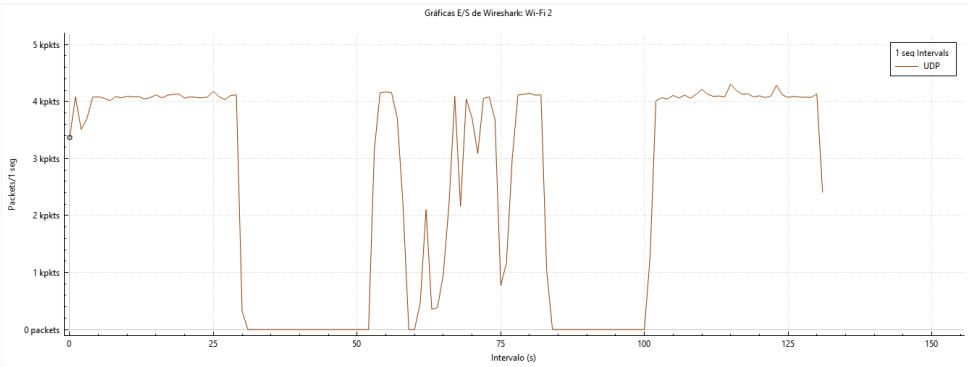
Punto de carga con tasa 900Mbps para 5GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec   960 MBytes   268 Mbits/sec  0.185 ms  0/122900 (0%)
[  4] Sent 122900 datagrams
```

Nota. Autoría propia

Figura C 4

Gráfica de E/S de Wireshark para 5GHz



Nota. Autoría propia

3. Mediciones en 6 GHz: repetir el paso anterior con las tasas relativas calculadas para 6 GHz.

iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 300M -t 30 -i 1

Figura C 5

Punto de carga con tasa 300Mbps para 6GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec  1003 MBytes   281 Mbits/sec  0.235 ms  230/128417 (0.18%)
[  4] Sent 128417 datagrams
```

Nota. Autoría propia

iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 600M -t 30 -i 1

Figura C 6

Punto de carga con tasa 600Mbps para 6GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec  1003 MBytes   280 Mbits/sec  0.224 ms  386/128339 (0.3%)
[  4] Sent 128339 datagrams
```

Nota. Autoría propia

iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 900M -t 30 -i 1

Figura C 7

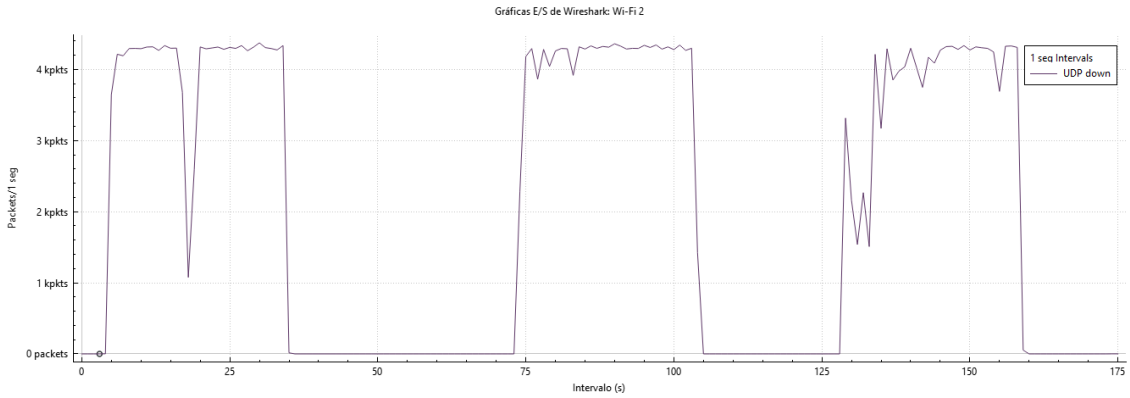
Punto de carga con tasa 900Mbps para 6GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec   986 MBytes   276 Mbits/sec  0.415 ms  4021/126164 (3.2%)
[  4] Sent 126164 datagrams
```

Nota. Autoría propia

Figura C 8

Gráfica de E/S de Wireshark para 6GHz



Nota. Autoría propia

4. Control: registrar comandos usados, hora de inicio/fin, parámetros y observaciones en bitácora.

Anexo D: Guía de laboratorio 4

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS** **CARRERA DE TELECOMUNICACIONES** **COMUNICACIÓN INALÁMBRICA**

Guía de laboratorio			
Nombre y Apellido:		Guía #:	4
Docentes:			
Fecha:			
Nivel:			

Tema:	**Estabilidad temporal**
Objetivo general:	Evaluar la estabilidad temporal del enlace inalámbrico punto-a-punto durante 10 minutos en 5 GHz y 6 GHz, verificando continuidad del enlace (sin desconexiones ni reasociaciones), consistencia del throughput TCP, latencia ICMP estable y ausencia de eventos críticos de energía/temperatura en la plataforma.
Objetivos específicos:	• Verificar continuidad del enlace (sin cortes, sin reasociaciones inesperadas). • Medir throughput por segundo (TCP) y latencia ICMP concurrente. • Comprobar ausencia de eventos eléctricos/térmicos durante la sesión prolongada. • Consolidar resultados
Marco teórico:	Temas para investigar: • Estabilidad en 802.11ax: control de MCS/NSS por SNR, reintentos y robustez del enlace. • Comportamiento de TCP en sesiones sostenidas (slow-start, congestión, variabilidad temporal). • ICMP como una sonda de latencia y pérdida, y su relación con la carga del medio. • Eventos del sistema: subvoltaje, estrangulación térmica, registros del SO y cómo afectan a las medidas. • Prácticas adecuadas de medición prolongada: supervisión de interferencias, temperatura y condiciones similares entre bandas.
Materiales y equipos:	• Plataforma fundamental con Linux (funcionando los controladores 802.11ax). • Adaptador de cliente que es compatible con Wi-Fi 6E. • Iperf3 (cliente y servidor), shell para automatizar las llamadas.
Procedimiento:	1. Condiciones equivalentes: establecer distancia, potencia, canalización y duración iguales para las frecuencias de 5 GHz y 6 GHz. 2. Pre-chequeo: Comprobar la topología P2P, el estado del enlace y realizar un breve registro (aproximadamente 30 segundos). 3. Sesión mantenida (5 GHz): realizar TCP con iperf3 durante 10 minutos (informe de 1 s) y, al mismo tiempo, lanzar ping.

	4. Monitoreo: Documentar el estado del enlace de manera regular y capturar fotos de los sensores/logs antes y después. 5. Captura final: tomar otra captura corta (de aproximadamente 30 segundos) al finalizar la sesión. Repetición en 6 GHz: repetir pasos 2–5 modificando solo parámetros de banda.
Resultados:	• ¿El throughput se mantuvo estable a lo largo de los 600 segundos o presentó variaciones significativas? • ¿En qué intervalos se observaron caídas, picos o fluctuaciones del rendimiento y cuál podría ser la causa técnica? • ¿El enlace mostró interrupciones, pausas o pérdidas de conectividad durante la ejecución de los dos flujos TCP simultáneos? • ¿El comportamiento temporal fue diferente entre 5 GHz y 6 GHz? Explicar brevemente usando la gráfica de throughput por intervalo. • ¿Los resultados obtenidos coinciden con el comportamiento esperado para WiFi 6/6E según el nivel de interferencia y la limpieza del espectro?
Conclusiones:	Escribir 5 conclusiones sobre la práctica
Recomendaciones:	Escribir 5 recomendaciones sobre la práctica
Bibliografía:	Indicar la bibliografía utilizada para la práctica.

Desarrollo guía de laboratorio 4

Tema: Rendimiento UDP

Desarrollo de la practica

1. Verificaciones:

2. iw dev <iface> link → **SSID**, **banda**, **bitrate**, **RSSI/SNR** coherentes.

3. traceroute <IP_par> → **1 salto** (topología P2P).

4. Iniciar servidor: iperf3 -s

5. Mediciones en 5 GHz: ejecutar TCP con iperf3 con dos flujos paralelos de 600 segundos ***iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -P 2 -t 600 -i 1***

Figura D 1

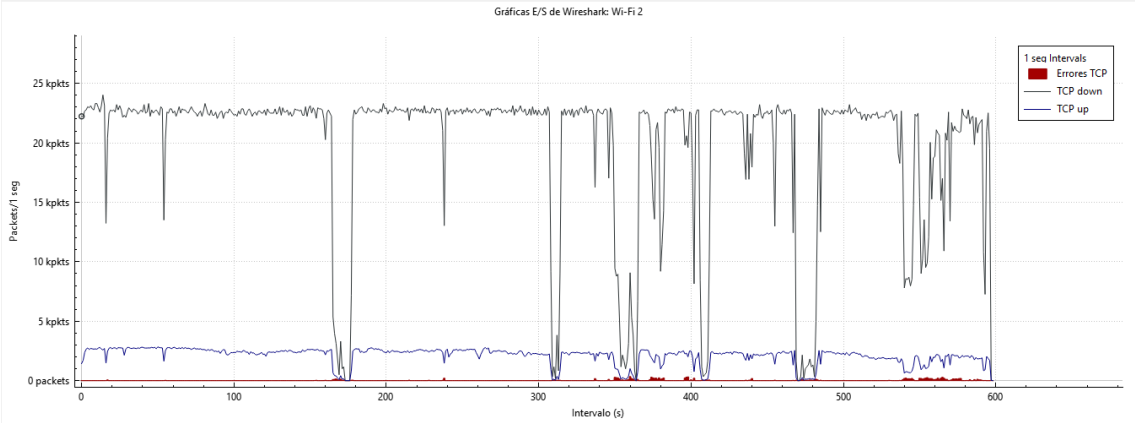
TCP multistream para evaluación de estabilidad del enlace en 5GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-600.00 sec  9.28 GBytes   133 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-600.00 sec  9.28 GBytes   133 Mbits/sec                  receiver
[  6]   0.00-600.00 sec  9.04 GBytes   129 Mbits/sec                  sender
[  6]   0.00-600.00 sec  9.04 GBytes   129 Mbits/sec                  receiver
[SUM]   0.00-600.00 sec  18.3 GBytes   262 Mbits/sec                  sender
[SUM]   0.00-600.00 sec  18.3 GBytes   262 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

Figura D 2

Gráfica de E/S de Wireshark para 5GHz TCP multistream



Nota. Autoría propia

6. Mediciones en 6 GHz: repetir el paso anterior para 6 GHz.

iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -P 2 -t 600 -i 1

Figura D 3

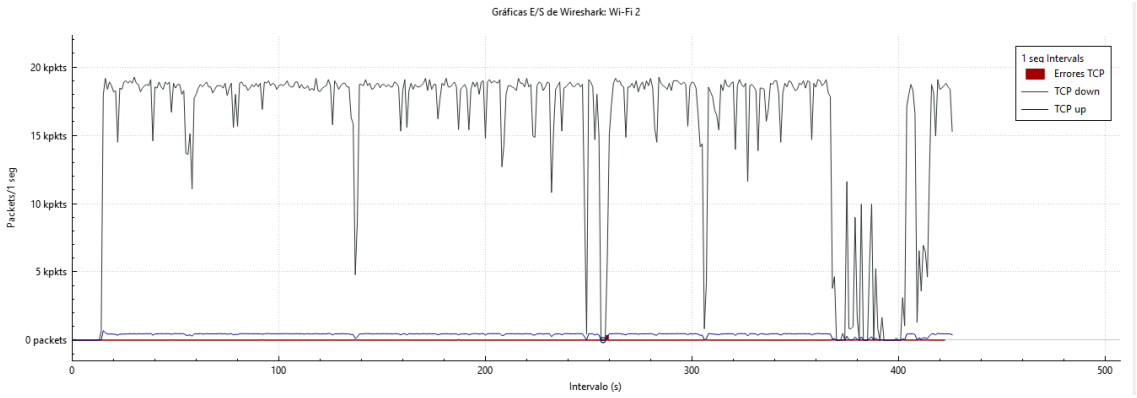
TCP multistream para evaluación de estabilidad del enlace en 6GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-600.00 sec  7.62 GBytes   109 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-600.00 sec  7.62 GBytes   109 Mbits/sec                  receiver
[  6]   0.00-600.00 sec  7.06 GBytes   101 Mbits/sec                  sender
[  6]   0.00-600.00 sec  7.06 GBytes   101 Mbits/sec                  receiver
[SUM]   0.00-600.00 sec  14.7 GBytes   210 Mbits/sec                  sender
[SUM]   0.00-600.00 sec  14.7 GBytes   210 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

Figura D 4

Gráfica de E/S de Wireshark para 6GHz TCP multistream



Nota. Autoría propia

Anexo E: Guía de laboratorio 5

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS** **CARRERA DE TELECOMUNICACIONES** **COMUNICACIÓN INALÁMBRICA**		
Guía de laboratorio			
Nombre y Apellido:		Guía #:	4
Docentes:			
Fecha:			
Nivel:			
Tema:	**Comparativa de desempeño 5 GHz vs 6 GHz**		
Objetivo general:	Comparar el rendimiento del enlace inalámbrico en las bandas de 5 GHz y 6 GHz bajo el estándar IEEE 802.11ax, evaluando las métricas de *throughput*, *jitter*, latencia y porcentaje de pérdida de paquetes, en condiciones de configuración equivalentes		
Objetivos específicos:	• Emplear iperf3 para calcular el promedio de la tasa de transferencia en las dos bandas. • Determinar la estabilidad y latencia del enlace a través de pruebas ICMP (ping). • Examinar el jitter y la pérdida de paquetes cuando se utiliza una carga controlada UDP. • Evaluar los resultados logrados y establecer cuál es la banda más eficaz en el contexto de experimentación.		
Marco teórico:	Temas para investigar: • Estándar IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E): propiedades, modulación OFDMA y MU-MIMO. • Distinciones entre las bandas de 5 GHz y 6 GHz: interferencia, propagación y distribución espectral.		

	• Fundamentos del tráfico TCP y UDP: confiabilidad, control de flujo y pérdidas. • Herramientas para la evaluación de redes: iperf3, Wireshark y el análisis de métricas como jitter, RTT y throughput.
Materiales y equipos:	• Plataforma fundamental con Linux (funcionando los controladores 802.11ax). • Adaptador de cliente compatible con Wi-Fi 6E. • iperf3 (cliente y servidor), shell para la automatización de llamadas.
Procedimiento:	1. Comprobar que el AP 1 funcione en 5 GHz (SSID 1) y el AP 2, en cambio, lo haga en 6 GHz (SSID 2). 2. Conectarse a la red del SSID de 5 GHz y verificar la conexión: ping 192.168.50.1 -n 20 3. Realizar las pruebas TCP: Cuatro.Realizar una prueba UDP (de pérdida y de jitter): 4. Conectando al AP de 6 GHz, repita los pasos dos a cuatro. 5. Anotar los valores que aparecen en la consola (jitter, pérdida, RTT, throughput). 6. Crear una tabla de comparación entre bandas y un gráfico de barras que muestre los resultados.
Resultados:	• ¿Qué banda presentó mayor estabilidad temporal en las mediciones de throughput y cuál fue la posible causa técnica? • ¿Cuál banda registró menores niveles de pérdida de paquetes y jitter en UDP, y cómo se relaciona esto con la interferencia presente en cada entorno? • ¿El rendimiento TCP fue superior en 5 GHz o en 6 GHz y qué factores influyeron en esta diferencia (RSSI, interferencia, ancho de canal)? • ¿Cómo se comportó el enlace bajo condiciones de sobrecarga en ambas bandas y qué conclusiones se pueden derivar sobre su capacidad real? • ¿Qué evidencias experimentales confirman que 6 GHz opera más cerca de las capacidades teóricas del estándar IEEE 802?11ax?
Conclusiones:	Escribir 5 conclusiones sobre la práctica
Recomendaciones:	Escribir 5 recomendaciones sobre la práctica
Bibliografía:	Indicar la bibliografía utilizada para la práctica.

Desarrollo guía de laboratorio 5

1. Abrir consola en el cliente y comprobar conectividad hacia el AP 5 GHz: ***ping <IP_SERVIDOR>-n 20***

Figura E 1

Conectividad de 5GHz

```
Estadísticas de ping para 192.168.50.1:
    Paquetes: enviados = 20, recibidos = 20, perdidos = 0
    (0% perdidos),
Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 1ms, Máximo = 2ms, Media = 1ms
```

Nota. Autoría propia

2. Ejecutar prueba TCP de descarga en 5 GHz:
   iperf3 -c <IP_SERVIDOR>-R -t 30 -i 1

Figura E 2

Prueba TCP descarga 5GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.00  sec   906 MBytes   253 Mbits/sec   59             sender
[  4]   0.00-30.00  sec   905 MBytes   253 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

3. Ejecutar prueba TCP de subida en 5 GHz:
   iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -t 30 -i 1

Figura E 3

Prueba TCP subida 5GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.00  sec   756 MBytes   211 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.00  sec   756 MBytes   211 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

4. Ejecutar prueba UDP en 5 GHz para evaluar *jitter* y pérdidas:
   iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 300M -t 30 -i 1

Figura E 4

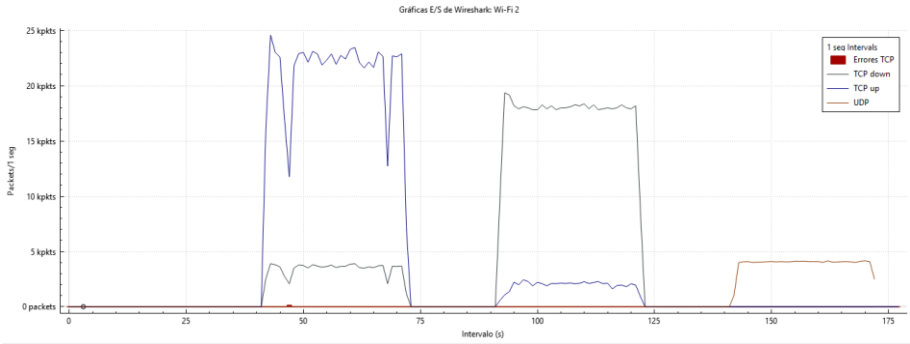
Prueba UDP en 5GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec   950 MBytes   266 Mbits/sec  0.212 ms  6/121655 (0.0049%)
[  4] Sent 121655 datagrams
```

Nota. Autoría propia

Figura E 5

Gráfica de E/S de Wireshark de la variación del flujo TCP y UDP para 5GHz



Nota. Autoría propia

5. Anotar de las salidas en consola las métricas de 5 GHz:
6. Comprobar conectividad hacia el AP 6 GHz:

ping <IP_SERVIDOR> -n 20

Figura E 6

Conectividad de 6GHz

```
Estadísticas de ping para 192.168.120.14:
    Paquetes: enviados = 20, recibidos = 19, perdidos = 1
    (5% perdidos),
Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 21ms, Máximo = 118ms, Media = 67ms
```

Nota. Autoría propia

7. Ejecutar prueba TCP de descarga en 6 GHz:

iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -R -t 30 -i 1

Figura E 7

Prueba TCP descarga 6GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Retr
[  4]   0.00-30.00  sec   764 MBytes   214 Mbits/sec    7             sender
[  4]   0.00-30.00  sec   762 MBytes   213 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

8. Ejecutar prueba TCP de subida en 6 GHz:

iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -t 30 -i 1

Figura E 8

Prueba TCP subida 6GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[  4]   0.00-30.00  sec   574 MBytes   161 Mbits/sec                  sender
[  4]   0.00-30.00  sec   574 MBytes   160 Mbits/sec                  receiver
```

Nota. Autoría propia

9. Ejecutar prueba UDP en 6 GHz con la misma tasa:

   iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 300M -t 30 -i 1

Figura E 9

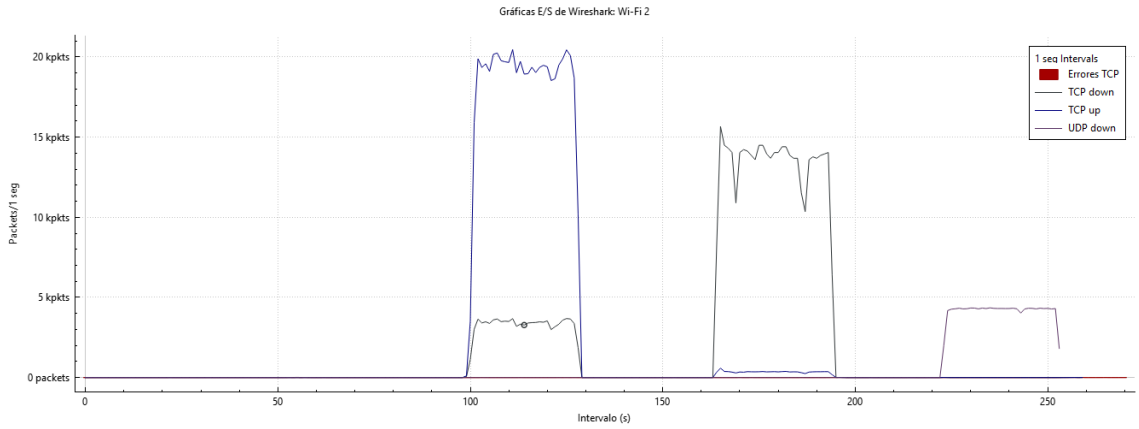
Prueba UDP en 6GHz

```
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter    Lost/Total Datagrams
[  4]   0.00-30.00  sec  1002 MBytes   280 Mbits/sec  0.178 ms  1487/128044 (1.2%)
[  4] Sent 128044 datagrams
```

Nota. Autoría propia

Figura E 10

Gráfica de E/S de Wireshark de la variación del flujo TCP y UDP para 6GHz



Nota. Autoría propia

10. Anotar las mismas métricas para 6 GHz y completar una tabla comparativa con: banda, RTT promedio, *throughput* TCP up/down, *jitter* UDP y pérdida UDP.

Anexo F: Pruebas de señalización SIP con SIPp

Para complementar el análisis experimental del desempeño de red en escenarios de tráfico en tiempo real, se realizaron pruebas de generación de llamadas SIP utilizando la herramienta **SIPp** en modo cliente-servidor. Estas pruebas permitieron simular múltiples sesiones VoIP sobre la infraestructura configurada, evaluando el comportamiento de la señalización bajo carga.

Figura F 1

Ejecución de SIPp en modo servidor

```
------------------------------ Scenario Screen -------- [1-9]: Change Screen --
  Port   Total-time  Total-calls  Transport
  5060     295.11 s         1255  UDP

  20 new calls during 1.004 s period      1 ms scheduler resolution
  81 calls                                Peak was 85 calls, after 285 s
  0 Running, 745 Paused, 42 Woken up
  59 dead call msg (discarded)
  3 open sockets                          0/0/0 UDP errors (send/recv/cong)
  0 Total RTP pckts sent                  0.000 last period RTP rate (kB/s)

                                 Messages  Retrans   Timeout   Unexpected-Msg
  ----------> INVITE            1255      0         0         0

  <---------- 180               1255      0
  <---------- 200               1255      4         0
  ----------> ACK         E-RTD1 1248     0         0         7

  ----------> BYE               1248      7         0         0
  <---------- 200               1248      7
  [   4000ms] Pause              1248                          0
Last Error: Dead call 672-2445@127.0.1.1 (aborted at index 3), received ...
------------------------------ SIPp Server Mode ------------------------------
```

Nota. Autoría propia

La Figura F 1 presenta la pantalla de ejecución de SIPp en modo servidor, donde se observa el resumen estadístico de las llamadas procesadas durante el periodo de prueba.

Durante la ejecución se utilizaron los siguientes parámetros relevantes:

- Puerto de escucha: 5060 (UDP)
- Total de llamadas generadas: 1255
- Tiempo total de prueba: 295.11 segundos

- Transporte: UDP
- Resolución del scheduler: 1 ms

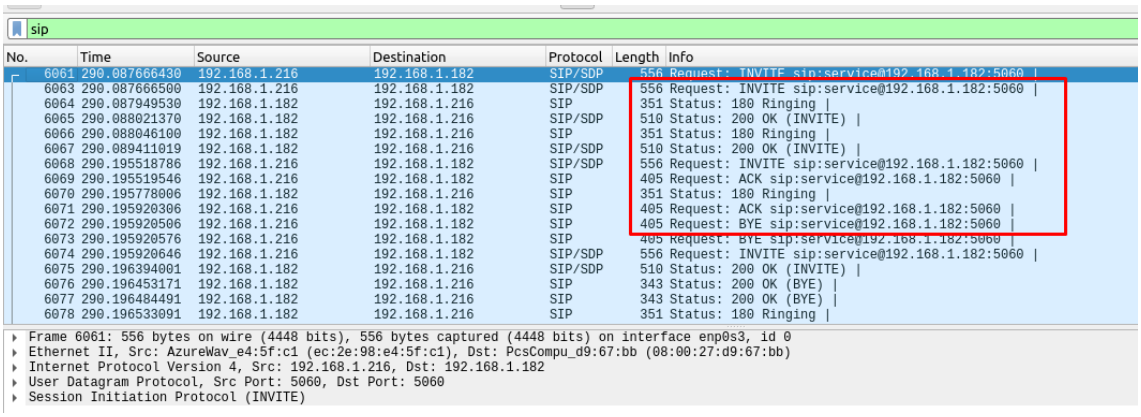
Se registró un pico máximo de 85 llamadas concurrentes, evidenciando la capacidad del sistema para manejar múltiples sesiones simultáneas. Asimismo, se observó la correcta secuencia de señalización SIP compuesta por los mensajes:

- INVITE
- 180 Ringing
- 200 OK
- ACK
- BYE
- 200 OK (final)

Los contadores de retransmisiones y errores UDP indicaron valores mínimos, lo que evidenció estabilidad en la transmisión de señalización durante la prueba.

Figura F 2

Captura de Wireshark durante la llamada SIPp



sip

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
6061	290.087666430	192.168.1.216	192.168.1.182	SIP/SDP	556	Request: INVITE sip:service@192.168.1.182:5060 |
6063	290.087666500	192.168.1.216	192.168.1.182	SIP/SDP	556	Request: INVITE sip:service@192.168.1.182:5060 |
6064	290.087949530	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP	351	Status: 180 Ringing |
6065	290.088021370	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP/SDP	510	Status: 200 OK (INVITE) |
6066	290.088046100	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP	351	Status: 180 Ringing |
6067	290.089411019	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP/SDP	510	Status: 200 OK (INVITE) |
6068	290.195518786	192.168.1.216	192.168.1.182	SIP/SDP	556	Request: INVITE sip:service@192.168.1.182:5060 |
6069	290.195519546	192.168.1.216	192.168.1.182	SIP	405	Request: ACK sip:service@192.168.1.182:5060 |
6070	290.195778006	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP	351	Status: 180 Ringing |
6071	290.195920306	192.168.1.216	192.168.1.182	SIP	405	Request: ACK sip:service@192.168.1.182:5060 |
6072	290.195920506	192.168.1.216	192.168.1.182	SIP	405	Request: BYE sip:service@192.168.1.182:5060 |
6073	290.195920576	192.168.1.216	192.168.1.182	SIP	405	Request: BYE sip:service@192.168.1.182:5060 |
6074	290.195920646	192.168.1.216	192.168.1.182	SIP/SDP	556	Request: INVITE sip:service@192.168.1.182:5060 |
6075	290.196394001	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP/SDP	510	Status: 200 OK (INVITE) |
6076	290.196453171	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP	343	Status: 200 OK (BYE) |
6077	290.196484491	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP	343	Status: 200 OK (BYE) |
6078	290.196533091	192.168.1.182	192.168.1.216	SIP	351	Status: 180 Ringing |

Frame 6061: 556 bytes on wire (4448 bits), 556 bytes captured (4448 bits) on interface enp0s3, id 0
Ethernet II, Src: AzureWav_e4:5f:c1 (ec:2e:98:e4:5f:c1), Dst: PcsCompu_d9:67:bb (08:00:27:d9:67:bb)
Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.216, Dst: 192.168.1.182
User Datagram Protocol, Src Port: 5060, Dst Port: 5060
Session Initiation Protocol (INVITE)

Nota. Autoría propia

La Figura F 2 muestra la captura de tráfico realizada con Wireshark durante la ejecución de las llamadas SIP. En la captura se puede verificar la secuencia completa del establecimiento y finalización de sesión entre el cliente y el servidor.

En la traza se identificaron claramente los siguientes eventos:

1. Envío del mensaje **INVITE** desde el cliente hacia el servidor.
2. Respuesta provisional **180 Ringing**.
3. Respuesta final **200 OK**.
4. Confirmación mediante **ACK**.
5. Terminación de llamada con **BYE**.
6. Confirmación final **200 OK**.

La captura permitió validar que el establecimiento de sesión SIP se realizó conforme al procedimiento estándar definido en el protocolo SIP (RFC 3261), confirmando la correcta interoperabilidad entre los nodos de prueba.

Adicionalmente, se verificó que el transporte utilizado fue UDP sobre el puerto 5060, sin presencia de errores de congestión ni pérdidas significativas durante el intervalo analizado.

Anexo G: Limitaciones del equipo Intel AX210

Durante la etapa de configuración de los equipos se llevó a cabo la preparación del nodo emisor, en el cual se instaló una tarjeta Intel Wi-Fi 6E AX210 en una Raspberry Pi CM4. El objetivo fue habilitar el modo Access Point (AP) en las bandas de 5 GHz y 6 GHz con el fin de realizar pruebas de rendimiento.

En la banda de 5 GHz se logró habilitar el AP sin inconvenientes, lo que validó la compatibilidad del sistema con el hardware y los controladores. Sin embargo, en la banda de 6 GHz, a pesar de que la interfaz se identificó adecuadamente, todos los canales mostraron el indicador "no IR" (No Initiate Radiation), lo que imposibilitó una transmisión activa. Esta

limitación se evidenció en el servicio de gestión inalámbrica hostapd, que notificó la interfaz con el estado "AP-Disabled", lo cual impidió que comenzaran las pruebas en esa banda.

Según la documentación oficial de Intel, el módulo AX210 fue creado para permitir Wi-Fi 6E. Asimismo, incluye la función Dynamic Regulatory Solution, que se ocupa de modificar los parámetros de operación de manera dinámica según las regulaciones que estén en vigor en la región identificada. En cuanto al hardware, la tarjeta cumplía con todos los requisitos necesarios para habilitar un AP en 6 GHz; no obstante, las restricciones aparecieron en las capas de software y regulación que se comunicaban con el controlador iwlwifi en Linux.

Intel desarrolló el controlador oficial iwlwifi para Linux, que incluye la función LAR (Location Aware Regulatory). Este mecanismo impone limitaciones regulatorias en función del lugar donde se encuentra el dispositivo. En términos prácticos, LAR fortaleció las limitaciones que ya existían en la base regulatoria: al determinar que los canales de 6 GHz estaban en estado de "no IR", impidió cualquier intento de comenzar la transmisión.

Linux Wireless señala que un canal declarado como "no IR" no tiene autorización para comenzar la radiación hasta que lo permita la base regulatoria. En esta condición, el dispositivo está restringido a escaneo pasivo, sin la capacidad de transmitir balizas o tráfico de AP. Por esta razón, aunque la interfaz soportara el modo AP, hostapd la deshabilitaba automáticamente, impidiendo su uso activo en 6 GHz.

En abril de 2020, la FCC aprobó la apertura de 1200 MHz en la banda de 6 GHz para uso sin licencia en Estados Unidos. No obstante, la base regulatoria de Linux (regdb) no siempre incorporó estas actualizaciones de forma inmediata. Como consecuencia, incluso configurando el dominio regulatorio en “US”, el sistema continuaba reportando los canales con la bandera “no IR”.

El hostapd que es el servicio encargado de habilitar y gestionar el modo AP en Linux, controlando la seguridad, la asignación de canales y la transmisión de balizas. En las versiones

estándar incluidas en distribuciones como Ubuntu y Debian, hostapd valida estrictamente los estados regulatorios: si todos los canales disponibles aparecen con la restricción “no IR”, el servicio marca la interfaz como “AP-Disabled” y cancela su inicialización.

En conclusión, aunque el Intel AX210 estuviera técnicamente preparado para operar en 6 GHz, la combinación del regdb, el controlador iwlwifi y el servicio hostapd actuó de forma conjunta para impedir la transmisión, garantizando que el sistema cumpliera con las restricciones regulatorias vigentes en Linux.

Anexo H: Encuesta para obtención de requerimientos de los stakeholders

Encuesta para obtención de requerimientos de los stakeholders

Objetivo:
Recolectar información de docentes, técnicos y estudiantes con experiencia en redes inalámbricas, a fin de identificar requerimientos relevantes para el diseño de un sistema de evaluación comparativa entre **WiFi 6** y **WiFi 6E**.

* Obligatoria

* Este formulario registrará su nombre, escriba su nombre.

1. ¿Considera importante que un sistema de evaluación permita medir y comparar el rendimiento de diferentes tecnologías inalámbricas como WiFi 6 (5Ghz) y WiFi 6E (6GHz)? *

   ◯ En desacuerdo

   ◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo

   ◯ De acuerdo

2. ¿Considera importante que el sistema permita evaluar las bandas de 5GHz y 6GHz utilizando un mismo dispositivo configurable? *

- ◯ En desacuerdo
- ◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo
- ◯ De acuerdo

3. ¿Cree necesario que el sistema registre datos en diferentes condiciones de prueba (por ejemplo, velocidad, latencia o pérdida de paquetes)? *

- ◯ En desacuerdo
- ◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo
- ◯ De acuerdo

4. Desde su experiencia, ¿cree que es viable realizar estas pruebas utilizando equipos comerciales de acceso general, disponibles en el mercado? *

- ◯ En desacuerdo
- ◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo
- ◯ De acuerdo

5. ¿Considera útil que el sistema sirva como apoyo para futuras prácticas relacionadas con tecnologías WiFi? *

- ◯ En desacuerdo
- ◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo
- ◯ De acuerdo

6. ¿Está de acuerdo con que el sistema funcione con equipos que realmente soporten WiFi 6E en la banda de 6 GHz? *

◯ En desacuerdo

◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo

◯ De acuerdo

7. ¿Cree importante que la configuración del sistema sea accesible y esté adecuadamente documentada? *

◯ En desacuerdo

◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo

◯ De acuerdo

8. ¿Considera adecuado que el sistema utilice herramientas como iPerf y Wireshark para realizar las pruebas? *

◯ En desacuerdo

◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo

◯ De acuerdo

9. ¿Está de acuerdo con que el sistema se base en una arquitectura abierta que utilice software libre? *

◯ En desacuerdo

◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo De

◯ acuerdo

10. ¿Cree usted que es prioritario garantizar estabilidad de conexión durante las pruebas? *

◯ En desacuerdo

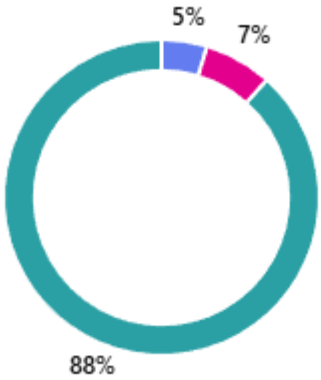
◯ Ni de acuerdo ni en desacuerdo

◯ De acuerdo

Información general sobre respuestas Activo

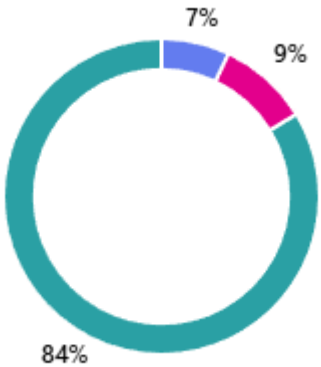
1. ¿Considera importante que un sistema de evaluación permita medir y comparar el rendimiento de diferentes tecnologías inalámbricas como WiFi 6 (5Ghz) y WiFi 6E (6GHz)?

En desacuerdo	2
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3
De acuerdo	38



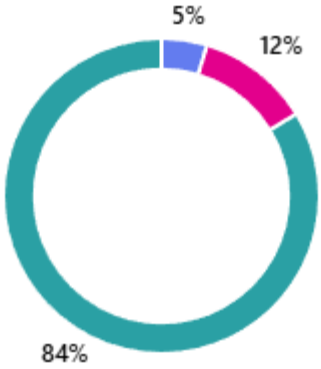
2. ¿Considera importante que el sistema permita evaluar las bandas de 5GHz y 6GHz utilizando un mismo dispositivo configurable?

En desacuerdo	3
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	4
De acuerdo	36



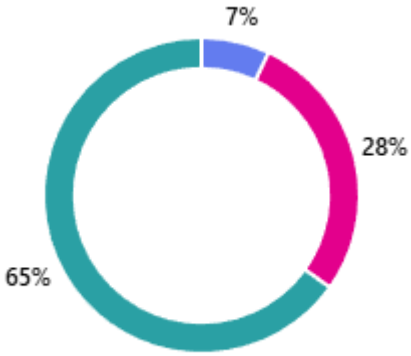
3. ¿Cree necesario que el sistema registre datos en diferentes condiciones de prueba (por ejemplo, velocidad, latencia o pérdida de paquetes)?

En desacuerdo	2
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	5
De acuerdo	36



4. Desde su experiencia, ¿cree que es viable realizar estas pruebas utilizando equipos comerciales de acceso general, disponibles en el mercado?

En desacuerdo	3
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	12
De acuerdo	28

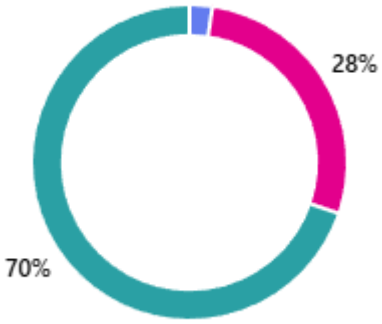


5. ¿Considera útil que el sistema sirva como apoyo para futuras prácticas relacionadas con tecnología WiFi?

En desacuerdo	1
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	4
De acuerdo	38

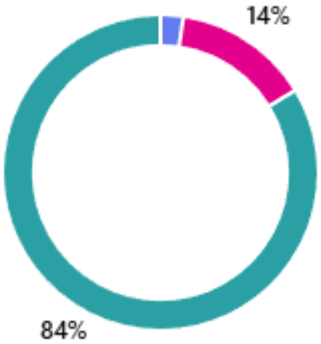
6. ¿Está de acuerdo con que el sistema funcione con equipos que realmente soporten WiFi 6E en la banda de 6 GHz?

En desacuerdo	1
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	12
De acuerdo	30



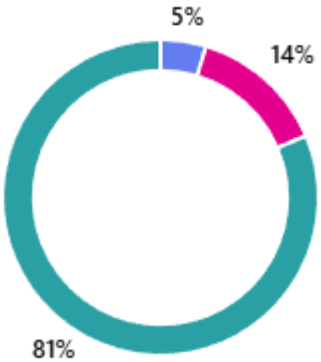
7. ¿Cree importante que la configuración del sistema sea accesible y esté adecuadamente documentada?

En desacuerdo	1
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	6
De acuerdo	36



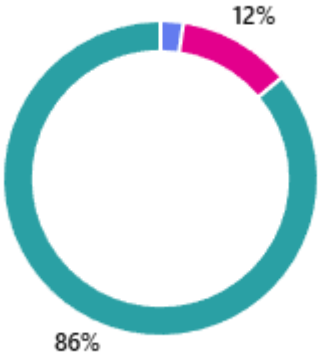
8. ¿Considera adecuado que el sistema utilice herramientas como iPerf y Wireshark para realizar las pruebas?

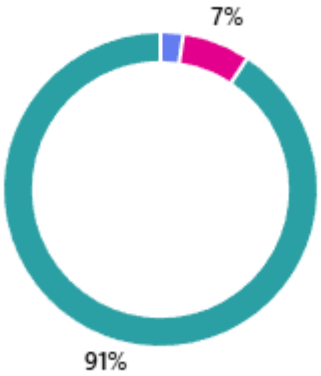
En desacuerdo	2
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	6
De acuerdo	35



9. ¿Está de acuerdo con que el sistema se base en una arquitectura abierta que utilice software libre?

En desacuerdo	1
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	5
De acuerdo	37



10. ¿Cree usted que es prioritario garantizar estabilidad de conexión durante las pruebas?

En desacuerdo	1
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3
De acuerdo	39