



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AX PARA ESCENARIOS
CON ALTA CONCENTRACIÓN DE TRÁFICO Y DENSIDAD DE USUARIOS MEDIANTE
SIMULACIÓN.**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones**

AUTOR: JOEL ALEXANDER CALDERÓN CRUZ

TUTOR: VERÓNICA EMMA SORIA MALDONADO

Quito, Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Joel Alexander Calderón Cruz con documento de identificación N° 1725907453; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total, o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 12 de febrero del año 2025.

Atentamente,



Joel Alexander Calderón Cruz

1725907453

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

Yo, Joel Alexander Calderón Cruz con documento de identificación N° 1725907453, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11ax para escenarios con alta concentración de tráfico y densidad de usuarios mediante simulación.”, el cual ha sido desarrollada como requisito para la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones. Por medio del presente documento, autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana a ejercer plenamente los derechos patrimoniales cedidos, en conformidad con las disposiciones legales vigentes.

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

Quito, 12 de febrero del año 2025.

Atentamente,



Joel Alexander Calderón Cruz

1725907453

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Verónica Emma Soria Maldonado con documento de identificación N° 1715185961, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR 802.11AX EN ESCENARIOS CON TRÁFICO ELEVADO Y ALTA DENSIDAD DE USUARIOS MEDIANTE SIMULACIÓN. Realizado por Joel Alexander Calderón Cruz, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de febrero del año 2025.

Atentamente,



Ing. Verónica Emma Soria Maldonado, MSc.

1715185961

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con todo mi cariño a mi familia, por ser mi mayor pilar de apoyo. Su amor, comprensión y fortaleza me han inspirado a superar cada desafío y alcanzar esta meta. Este logro es también suyo.

Joel Alexander Calderón Cruz

AGRADECIMIENTOS

En este momento tan especial, quiero expresar mi agradecimiento a Dios, por brindarme la fortaleza, sabiduría y paciencia necesarias para culminar este importante paso en mi formación profesional.

A mis padres, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo, dedicación y amor incondicional. Gracias por confiar en mí, por apoyarme en cada decisión y por brindarme la fortaleza para superar cualquier obstáculo.

A mi hermano, por su compañía, consejos y constante apoyo, que siempre me motivaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mis docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes, con su compromiso, conocimientos y vocación, no solo me formaron académicamente, sino también me inspiraron a dar siempre lo mejor de mí. Su dedicación y exigencia fueron clave para mi crecimiento profesional.

A mi tutora de tesis, por brindarme su paciencia y orientación académica, para culminar este proyecto.

A mis amigos, quienes siempre estuvieron a mi lado, brindándome ánimo, escuchándome y celebrando cada pequeño paso en este camino. Su amistad ha sido un gran soporte.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron su granito de arena en este proceso, ya sea con un consejo, palabras de aliento o simplemente creyendo en mi capacidad. Este logro no habría sido posible sin ustedes.

Joel Alexander Calderón Cruz

INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS	VI
INDICE DE CONTENIDO.....	VII
INDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
SIGLAS & ACRÓNIMOS	XIV
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO I.....	4
1 ANTECEDENTES.....	4
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.4 Objetivo General.....	7
1.5 Objetivos Específicos.....	7
1.6 Metodología.....	8
1.7 Revisar la literatura existente.....	8
1.8 Diseñar y configurar escenarios de simulación.....	8
1.9 Implementar técnicas de gestión de tráfico	8
1.10 Ejecutar las simulaciones y recopilación de datos	8
1.11 Analizar los datos en función del rendimiento.....	9

1.12	<i>Interpretar los resultados</i>	9
CAPÍTULO II		10
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.1	<i>FUNDAMENTOS DE LAS REDES INALÁMBRICAS</i>	10
2.2	<i>Características de protocolos IEE802.11</i>	11
2.3	<i>Características claves del wi-fi 6</i>	15
2.4	<i>Fundamentos de transmisión múltiple en wifi 6</i>	16
2.5	<i>Concepto básico de múltiples flujos de datos</i>	16
2.6	<i>Principales características del estandar ieee 802.11ax</i>	17
2.7	<i>MIMO (Multiple Input Multiple Output)</i>	18
2.8	<i>Algoritmos Utilizados en MIMO</i>	19
2.8.1	<i>Métodos de canales de programación</i>	19
2.8.2	<i>Generación de Canales</i>	19
2.8.3	<i>Técnicas de Procesamiento de Señales</i>	20
2.9	<i>MU-MIMO</i>	21
2.10	<i>Algoritmos Utilizados en MU-MIMO</i>	23
2.10.1	<i>MMSE</i>	24
2.11	<i>Algoritmos Utilizados en OFDMA</i>	26
2.11.1	<i>PFS (Proportional Fair Scheduling)</i>	26
2.11.2	<i>JSPA (Joint Subcarrier and Power Allocation)</i>	27
2.12	<i>Herencia de protocolos de seguridad en 802.11ax</i>	27
2.12.1	<i>WPA2</i>	28
CAPÍTULO III		29
3	LEVANTAMIENTO DE LÍNEA BASE	29
3.1	<i>DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE ESTUDIO</i>	29
3.2	<i>ANÁLISIS DEL ESCENARIO DE TRÁFICO Y USUARIOS</i>	29
3.3	<i>TOPOLOGÍA DEL ESCENARIO SIMULADO</i>	29
3.4	<i>IDENTIFICACIÓN DE REQUISITOS DE CONECTIVIDAD</i>	30

3.5	SELECCIÓN DE HARDWARE Y TECNOLOGÍAS APROPIADAS	30
3.6	CONFIGURACIÓN INICIAL DE LA SIMULACIÓN.....	30
3.7	DIAGNÓSTICO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AX.....	30
CAPÍTULO IV.....		32
4	DISEÑO.....	32
4.1	DISEÑO DEL SISTEMA DE SIMULACIÓN.....	32
4.2	TOPOLOGÍA DE LA RED SIMULADA.....	32
4.3	SEGMENTACIÓN DE LA RED	32
4.4	CONFIGURACIÓN DE TRÁFICO.....	32
4.5	MODELO ESPACIAL	32
4.6	PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN.....	32
4.7	CONFIGURACIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO (QOS):.....	32
4.8	SEGURIDAD DE LA RED.....	33
4.9	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	33
4.9.1	Escenario 1: Baja densidad de usuarios.....	33
4.9.2	Escenario 2: Media densidad de usuarios	33
4.9.3	Escenario 3: Alta densidad de usuarios	33
4.10	MÉTRICAS DE EVALUACIÓN.....	33
4.11	HERRAMIENTAS Y TECNOLOGÍAS	33
4.12	CONFIGURACIÓN DE VLANS	34
4.12.1	Justificación de la configuración:.....	34
4.13	EQUIPOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN.....	34
4.13.1	Justificación:.....	35
4.13.2	Configuración de antenas:	35
4.14	IMPLEMENTACIÓN DE QOS (CALIDAD DE SERVICIO)	35
4.14.1	Políticas de QoS configuradas:	35
4.14.2	Impacto del QoS en los resultados:	35
4.15	CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	36
4.15.1	Parámetros de simulación:	36
4.15.2	Distribución del tráfico:	36

4.15.3	Modelo de movilidad:.....	37
CAPÍTULO V.....		38
5	SIMULACIÓN Y PRUEBAS.....	38
5.1	<i>Configuración de la Simulación</i>	38
5.2	<i>Escenarios Simulados.....</i>	38
5.3	<i>Parámetros de la Simulación MIMO.....</i>	39
5.4	<i>Código de MIMO.....</i>	40
5.5	<i>Resultados de MIMO</i>	45
5.6	<i>Parámetros de la Simulación MU-MIMO</i>	50
5.7	<i>Código de MU-MIMO.....</i>	51
5.8	<i>Resultados de MU-MIMO.....</i>	56
5.9	<i>Parámetros de la Simulación OFDMA.....</i>	62
5.10	<i>Código de OFDMA</i>	63
CAPÍTULO VI.....		74
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
6.1	<i>tasa de transferencia (Throughput).....</i>	74
6.1.1	<i>Latencia promedio</i>	74
6.1.2	<i>Pérdida de paquetes</i>	75
6.2	<i>Tasa de transferencia.....</i>	75
6.2.1	<i>Latencia</i>	77
6.2.2	<i>Eficiencia Espectral.....</i>	79
CONCLUSIONES.....		82
RECOMENDACIONES.....		83
LISTA DE REFERENCIAS.....		84
ANEXOS.....		88

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.2.1 Evolución del estándar 802.11ax</i>	14
<i>Figura 2.2.2.Tabla de Evolución del estándar 802.11</i>	15
<i>Figura 2.9.1.MIMO de un solo usuario (SU) vs Multiusuario (MU)</i>	22
<i>Figura 2.9.2.Tecnología MU-MIMO</i>	23
<i>Figura 2.10.1Transmisión OFDMA en 802.11ax</i>	26
Figura 5.4.1 Parámetros de la simulación MIMO.	41
Figura 5.4.2 Simulación principal	41
Figura 5.4.3. Distribución de Usuarios y Pérdida de Trayectoria en Función de la Ubicación interior y exterior.....	42
Figura 5.4.4 Matrices de Resultados para Evaluación de Técnicas de Procesamiento de Señales ZF y MMSE con Rayleigh y Rician	43
Figura 5.4.5.Función para generar canal Rician	43
Figura 5.4.6. Simulación de Desempeño de Técnicas ZF y MMSE en Canales Rayleigh y Rician	44
Figura 5.4.7.Estadística interior vs exterior.....	44
Figura 5.4.8. Se imprimen los resultados.....	44
Figura 5.4.9. Visualización 3D del escenario.	45
Figura 5.5.1. Promedios de throughput, latencia y eficiencia espectral.	47
Figura 5.5.2.Estadística de usuarios que están al interior y exterior de la ubicación.....	47
Figura 5.5.3.Visualización 3D del escenario con usuarios y modem.....	48
Figura 5.5.4. Resultados de simulación MIMO.	49
Figura 5.7.1. Parámetros de la simulación MU-MIMO.	52
Figura 5.7.2. Distribución Espacial de Usuarios y Access Points en un Entorno IEEE 802.11ax	53
Figura 5.7.3. Inicialización de resultados.	54
Figura 5.7.4. Desempeño de un sistema MU-MIMO masivo: Comparación de ZF y MMSE en términos de Throughput, Latencia y Eficiencia Espectral.....	55
Figura 5.8.1. Comparación del Desempeño de MU-MIMO en Canales Rayleigh y Rician con Esquemas ZF y MMSE.....	57
Figura 5.8.2. Distribución de Usuarios en Interior y Exterior en Canales Rayleigh y Rician ..	58
Figura 5.8.3. Comparación de Distribución 3D de Usuarios y AP en Canales Rayleigh y Rician	

.....	60
Figura 5.8.4. Comparación de Desempeño de MU-MIMO en Canales Rayleigh y Rician.	61
Figura 5.10.1. Parámetros del Sistema OFDMA: Frecuencia, Ancho de Banda y Configuración de Usuarios.....	64
Figura 5.10.2. Distribución de Usuarios y Puntos de Acceso en el Área de Simulación.....	66
Figura 5.10.3. Comparación de rendimiento de PFS y JSPA en OFDMA.....	67
Figura 5.10.4. Resultados de la Simulación OFDMA: Comparación entre PFS y JSPA.....	68
Figura 5.10.5. Comparación de Rendimiento entre los Algoritmos PFS y JSPA en Redes IEEE 802.11ax.....	69
Figura 5.10.6. Distribución de Usuarios Interior vs Exterior	70
Figura 5.10.7. Visualización 3D del escenario con usuarios y AP.	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.6.1. Especificaciones técnicas IEEE 802.11ax.....	18
<i>Tabla 5.3.1. Tabla muestra los datos y parámetros de la simulación</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5.6.1. Datos iniciales para MU-MIMO.</i>	<i>51</i>
Tabla 5.9.1. Parámetros de la simulación OFDMA.	63

SIGLAS & ACRÓNIMOS

1. IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
2. OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access, Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal.
3. MU-MIMO: Multi-User Multiple Input Multiple Output, Múltiple entrada múltiple salida para múltiples usuarios.
4. IoT: Internet of Things, Internet de las cosas.
5. MATLAB: MATrix LABoratory, Laboratorio de matrices.
6. Wi-Fi: Wireless Fidelity, Fidelidad inalámbrica.
7. GHz: Gigahertz, Gigahercios.
8. Mbps: Megabits per second, Megabits por segundo.
9. SNR: Signal-to-Noise Ratio, Relación señal a ruido.
10. ac: IEEE 802.11ac, Estándar IEEE 802.11ac (Wi-Fi).
11. WPA3: Wi-Fi Protected Access 3, Acceso protegido Wi-Fi 3.
12. SISO: Single Input Single Output, Entrada única, salida única.
13. MIMO: Multiple Input Multiple Output, Múltiple entrada múltiple salida.
14. OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiplexación por división de frecuencia ortogonal.
15. TWT: Target Wake Time, Hora de despertar objetivo.
16. GHz: Gigahertz, Gigahercios.
17. Gbps: Gigabits per second, Gigabits por segundo.
18. MU-MIMO: Multi-User MIMO, MIMO de múltiples usuarios.
19. SU-MIMO: Single User MIMO, MIMO de un solo usuario.
20. ZF: Zero Forcing, Anulación de interferencia.
21. MMSE: Minimum Mean Square Error, Error cuadrático medio mínimo.
22. PFS: Proportional Fair Scheduling, Programación proporcionalmente justa.
23. JSPA: Joint Subcarrier and Power Allocation, Asignación conjunta de subcanales y potencia.
24. WPA2: Wi-Fi Protected Access 2, Acceso protegido Wi-Fi 2.
25. SAE: Simultaneous Authentication of Equals, Autenticación simultánea de iguales.

26. WPA3-TM: WPA3 Transition Mode, Modo de transición WPA3.
27. VoIP: Voice over Internet Protocol, Voz sobre protocolo de Internet.
28. 802.11ax: Wireless communication standard (Wi-Fi 6), Estándar de comunicación inalámbrica (Wi-Fi 6).
29. Router: Device that provides Wi-Fi and connects to a modem, Dispositivo que proporciona Wi-Fi y se conecta al módem.
30. VLAN: Virtual Local Area Network, Red de área local virtual.
31. QoS: Quality of Service, Calidad de servicio.
32. ACL: Access Control List, Lista de control de acceso.
33. IPv4: Internet Protocol version 4, Protocolo de Internet versión 4.
34. AP: Access Point, Punto de acceso.
35. NS-3: Network Simulator 3, Simulador de redes 3.
36. MAC: Media Access Control, Control de acceso al medio.
37. BSS: Basic Service Set, Conjunto de servicio básico.
38. SSID: Service Set Identifier, Identificador del conjunto de servicios.
39. QAM: Quadrature Amplitude Modulation, Modulación por amplitud en cuadratura.
40. BER: Bit Error Rate, Tasa de error de bit.
41. Throughput: Network performance (Mbps), Rendimiento de la red (Mbps).
42. Latency: Delay in data transmission, Retardo en la transmisión de datos.
43. SNR (dB): Signal-to-Noise Ratio in decibels, Relación señal a ruido en decibelios.
44. Rayleigh: Rayleigh fading channel model, Modelo de canal con desvanecimiento de Rayleigh.
45. Rician: Rician fading channel model, Modelo de canal con desvanecimiento de Rician.
46. LOS: Line of Sight, Línea de vista.
47. NLoS: Non-Line of Sight, Sin línea de vista.
48. MHz: Megahertz, Megahercios.
49. dB: Decibels, Decibelios.
50. Mbps/Hz: Megabits for second for Hertz, Megabits por segundo por Hertz.
51. FSPL: Free Space Path Loss, Pérdida de trayectoria en espacio libre.
52. dBm: Decibels relative to one milliwatt, Decibelios respecto a un miliwatt.
53. Boltzmann Constant: Boltzmann's physical constant, Constante física de Boltzmann.
54. SNR_dB: Signal-to-Noise Ratio in decibels, Relación señal a ruido en decibelios.

- 55. BPSK: Binary Phase Shift Keying, Modulación por desplazamiento de fase binaria.
- 56. 5G: Fifth generation (mobile networks), Quinta generación (redes móviles).
- 57. 6G: Sixth generation (mobile networks), Sexta generación (redes móviles).
- 58. dBm: Decibels relative to one milliwatt, Decibelios respecto a un miliwatt.
- 59. Hz: Hertz, Hertzios.
- 60. MS: Millisecond, Milisegundo.

RESUMEN

El estándar IEEE 802.11ax, conocido como Wi-Fi 6, surge como una solución avanzada a los desafíos de conectividad en entornos con alta densidad de usuarios y tráfico intensivo. Este estándar incorpora tecnologías innovadoras, como OFDMA y MU-MIMO, que permiten una transmisión más eficiente y confiable en comparación con generaciones anteriores.

En esta investigación se analiza el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax mediante simulaciones en entornos con alta concentración de tráfico, como instituciones educativas. Se evalúan métricas clave, como la tasa de transferencia, la latencia, la pérdida de paquetes y la eficiencia espectral, bajo diferentes escenarios de densidad de usuarios.

Los resultados obtenidos permitirán identificar las ventajas y limitaciones del estándar, proporcionando lineamientos para su implementación óptima en contextos reales, donde una conectividad inalámbrica de calidad es fundamental para el desarrollo de actividades académicas y administrativas.

ABSTRACT

The IEEE 802.11ax standard, known as Wi-Fi 6, emerges as an advanced solution to connectivity challenges in environments with high user density and intensive traffic. This standard incorporates innovative technologies, such as OFDMA and MU-MIMO, enabling more efficient and reliable transmission compared to previous generations.

This research analyzes the performance of the IEEE 802.11ax standard through simulations in environments with high traffic concentration, such as educational institutions. Key metrics, including transfer rate, latency, packet loss, and spectral efficiency, are evaluated under different user density scenarios.

The results obtained will help identify the advantages and limitations of the standard, providing guidelines for its optimal implementation in real-world contexts where high-quality wireless connectivity is essential for academic and administrative activities.

INTRODUCCIÓN

El avance en las tecnologías de comunicación inalámbrica ha impulsado el desarrollo de estándares como el IEEE 802.11ax, conocido como Wi-Fi 6, diseñado para enfrentar los desafíos de entornos con alta densidad de usuarios y tráfico intenso. Este estándar incorpora innovaciones como OFDMA y MU-MIMO, que mejoran la eficiencia espectral, la capacidad y la calidad del servicio en comparación con sus predecesores.

Dada la creciente demanda de conectividad en espacios como instituciones educativas, oficinas y centros urbanos, resulta crucial evaluar el desempeño del IEEE 802.11ax en escenarios de alta concentración de tráfico. Este trabajo se centra en el análisis de su rendimiento mediante simulaciones, con el objetivo de identificar fortalezas, limitaciones y posibles mejoras para optimizar su implementación en contextos reales.

La investigación no solo contribuirá al conocimiento técnico del estándar, sino que también proporcionará una guía para su aplicación en entornos desafiantes, destacando su potencial en el desarrollo de redes modernas y eficientes.

CAPITULO I

1 ANTECEDENTES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estándar de comunicación inalámbrica IEEE 802.11ax, también conocido como Wi-Fi 6, se ha establecido como una tecnología fundamental para mejorar el rendimiento y la eficiencia de las redes inalámbricas en entornos desafiantes. Este estándar presenta características avanzadas como OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) y MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output), permitiendo la transmisión simultánea a múltiples usuarios con diferentes requerimientos de anchos de banda, lo que mejora significativamente la capacidad y la confiabilidad de las redes inalámbricas. Su relevancia en el desarrollo del Internet de las Cosas (IoT) y su potencial en diversos escenarios son destacables.

El estudio se enfoca en analizar cómo la implementación del estándar IEEE 802.11ax en entornos con alta concentración de tráfico y densidad de usuarios afecta la calidad de servicio, la eficiencia de la red y el rendimiento general de las comunicaciones inalámbricas. Mediante simulaciones en MATLAB, se pretende proporcionar una evaluación detallada y precisa del comportamiento del estándar 802.11ax en escenarios desafiantes, identificando sus fortalezas en situaciones de alta demanda de conectividad inalámbrica.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El estándar IEEE 802.11ax, también conocido como Wi-Fi 6, representa una evolución significativa en la tecnología de redes inalámbricas, diseñada para abordar los desafíos de conectividad en entornos de alta densidad de usuarios y tráfico elevado. Su relevancia radica en varios aspectos técnicos y de rendimiento clave que responden a las demandas cada vez mayores de los usuarios y las aplicaciones emergentes.

Wi-Fi 6 opera en dos bandas de frecuencia: 2.4 GHz y 5 GHz, lo que representa un aumento sustancial respecto a las generaciones anteriores. Esto mejora la experiencia del usuario al reducir el retardo y la variabilidad en la transmisión de datos, alcanzando velocidades de hasta 2402 Mbps, lo cual aumenta la confiabilidad de la red inalámbrica.

Las innovaciones introducidas en Wi-Fi 6, como la tecnología OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal), permiten una asignación dinámica de recursos de frecuencia, lo que optimiza el uso del espectro disponible y mejora la coexistencia en entornos densos. Esto se traduce en una mayor eficiencia espectral y una menor interferencia entre usuarios, lo que contribuye a una mejora general en la calidad del servicio y el rendimiento de la red.

Además, MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) soporta transmisiones simultáneas a múltiples usuarios, mejorando significativamente la capacidad de la red para manejar la carga de tráfico en entornos densos. Esto se logra mediante la asignación de recursos de forma dinámica y adaptativa, lo que garantiza una distribución equitativa del ancho de banda entre los usuarios y una mayor eficiencia en la transmisión de datos.

Por lo tanto, la adopción de Wi-Fi 6 ofrece una serie de beneficios técnicos que son críticos para satisfacer las demandas actuales y futuras de conectividad inalámbrica en entornos con alta densidad de usuarios y tráfico elevado. Su capacidad mejorada de transmisión, reducción de la latencia, gestión eficiente del espectro y capacidad para transmisión simultánea a múltiples usuarios lo convierten en una solución tecnológica fundamental para abordar los desafíos de conectividad en la era digital.

Este estudio buscará entender mejor el rendimiento y la importancia del estándar IEEE 802.11ax en situaciones específicas. Contribuirá al avance de la tecnología inalámbrica en la era digital y proporcionará información útil para mejorar la calidad del servicio, beneficiando así a la sociedad en general.

1.3 OBJETIVOS

1.4 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax en entornos con alta densidad de usuarios y tráfico elevado, para determinar su eficiencia y calidad de servicio mediante simulaciones en MATLAB.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar un estado del arte del estándar IEEE 802.11ax, abordando su evolución histórica, características técnicas, y su aplicación en el contexto actual de las redes inalámbricas.

Definir los parámetros de simulación necesarios para evaluar el rendimiento del estándar 802.11ax, considerando la ubicación de los usuarios, la configuración de la red y el tráfico generado.

Ejecutar simulaciones utilizando MATLAB, para examinar aspectos clave como la velocidad de transferencia, la latencia y la eficiencia del espectro.

Analizar los resultados para comprender el rendimiento del estándar 802.11ax en escenarios con tráfico elevado y alta densidad de usuarios.

1.6 METODOLOGÍA

Este proyecto técnico empleará métodos y técnicas de investigación cuantitativa, utilizando simulaciones en MATLAB para recopilar y analizar datos sobre el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax en entornos con alta concentración de tráfico y densidad de usuarios.

1.7 REVISAR LA LITERATURA EXISTENTE

En esta fase inicial, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con el estándar 802.11ax. Esto incluirá estudios previos sobre su evolución histórica, características técnicas y su implementación en redes inalámbricas actuales. Esta revisión no solo proporcionará un marco teórico sólido, sino que también permitirá identificar las principales características y funcionalidades del estándar, estableciendo así una base para su evaluación en la investigación.

1.8 DISEÑAR Y CONFIGURAR ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Se procederá a diseñar y configurar diversos escenarios de simulación en MATLAB que representen entornos con alta concentración de tráfico y densidad de usuarios. Este proceso implicará la definición de múltiples parámetros críticos, como el número total de dispositivos, el tipo de tráfico (datos, voz o video), la distribución espacial de los dispositivos y la configuración de la red. La creación de estos escenarios permitirá observar el comportamiento del estándar bajo diferentes condiciones de operación.

1.9 IMPLEMENTAR TÉCNICAS DE GESTIÓN DE TRÁFICO

Tras la configuración de los escenarios, se implementarán diversas técnicas y algoritmos de gestión de tráfico específicos para el estándar IEEE 802.11ax. Esto incluirá la integración de mecanismos de asignación de recursos, estrategias de planificación de acceso al medio y controles de congestión. La implementación de estas técnicas estará orientada a optimizar la eficiencia del sistema y minimizar la interferencia, garantizando un rendimiento óptimo en condiciones de alta demanda.

1.10 EJECUTAR LAS SIMULACIONES Y RECOPIACIÓN DE DATOS

En esta etapa, se llevarán a cabo las simulaciones utilizando los escenarios previamente diseñados. Durante las simulaciones, se recopilarán datos detallados sobre el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax, midiendo y registrando métricas críticas como la capacidad, la eficiencia espectral, la latencia y la tasa de errores. La recolección de datos se realizará de manera sistemática y rigurosa, asegurando que los resultados sean válidos y representativos.

1.11 ANALIZAR LOS DATOS EN FUNCIÓN DEL RENDIMIENTO

Una vez recopilados los datos, se procederá a su análisis utilizando técnicas estadísticas avanzadas y herramientas de visualización de datos. Este análisis permitirá evaluar el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax en función de las métricas recopiladas, identificando tendencias, patrones y correlaciones que ofrezcan una comprensión más profunda de su comportamiento en entornos densos.

1.12 INTERPRETAR LOS RESULTADOS

Finalmente, se interpretarán los resultados obtenidos del análisis de datos. Se discutirán las implicaciones de los hallazgos, centrándose en los factores que pueden influir en el rendimiento del estándar en escenarios con alta concentración de tráfico y densidad de usuarios. Esta interpretación buscará no solo comprender el rendimiento actual, sino también ofrecer recomendaciones sobre posibles mejoras y áreas para futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 FUNDAMENTOS DE LAS REDES INALÁMBRICAS

Las redes inalámbricas son sistemas de comunicación que permiten la transmisión de datos sin la necesidad de cables físicos. Utilizan ondas de radio, infrarrojos o tecnologías similares para conectar dispositivos, facilitando la movilidad y flexibilidad en el acceso a la red. Este tipo de redes se ha vuelto esencial en la vida cotidiana, ya que permiten la conexión a Internet y otros recursos compartidos en diversas aplicaciones, desde el hogar hasta entornos empresariales (González et al., 2021).

A diferencia de las redes cableadas, que requieren cables físicos para la transmisión de datos, las redes inalámbricas ofrecen una mayor facilidad de instalación y expansión. En las redes cableadas, los dispositivos deben estar conectados a través de cables Ethernet u otros tipos de conectores, lo que puede resultar en un entorno menos flexible y más costoso en términos de infraestructura (Sánchez & Martínez, 2020). Las redes inalámbricas, por otro lado, eliminan esta necesidad física, permitiendo que los dispositivos se conecten desde cualquier lugar dentro del rango de señal.

Las ventajas de las redes inalámbricas incluyen su capacidad para soportar múltiples dispositivos sin necesidad de una infraestructura compleja. Esto es especialmente útil en entornos donde se requiere movilidad constante, como oficinas o espacios públicos. Además, las redes inalámbricas pueden ser más rápidas y fáciles de implementar en comparación con las redes cableadas, ya que no requieren el tendido de cables (González et al., 2021). También facilitan la conectividad en áreas donde no es práctico o posible instalar cables.

Sin embargo, las limitaciones de las redes inalámbricas son significativas. La calidad de la señal puede verse afectada por obstáculos físicos como paredes o muebles, lo que puede resultar en conexiones inestables o lentas. Además, la seguridad es una preocupación mayor en las redes inalámbricas; son más susceptibles a interferencias y ataques externos si no se implementan medidas adecuadas de protección (Sánchez & Martínez, 2020). Por lo tanto, aunque ofrecen flexibilidad y conveniencia, es crucial considerar estos factores al implementar una red inalámbrica.

La seguridad en las redes inalámbricas es un aspecto crítico que debe ser abordado. Los protocolos como WPA3 han sido diseñados para mejorar la seguridad al ofrecer un cifrado más

robusto y métodos de autenticación más seguros. Sin embargo, incluso con estas mejoras, los administradores de red deben estar atentos a las vulnerabilidades y realizar auditorías regulares para garantizar la integridad de la red (González et al., 2021).

las redes inalámbricas representan una solución moderna y eficiente para la conectividad en diversos entornos. Su capacidad para facilitar el acceso a Internet y otros recursos sin la limitación del cableado físico es un gran avance tecnológico. No obstante, es fundamental evaluar sus ventajas frente a sus limitaciones para determinar su idoneidad en situaciones específicas.

Las redes han revolucionado la manera en la que los aparatos se vinculan y se comunican, posibilitando así accesos más versátiles y sin la necesidad de utilizar cables en cualquier tipo de ambiente. En este escenario, el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) desarrolló los estándares necesarios que permiten que los aparatos de varios fabricantes, en distintas condiciones, funcionen de forma eficaz, segura y eficiente.

Protocolo de comunicación

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), una organización líder en el desarrollo de estándares desempeña un papel crucial en esta trayectoria a través del estándar 802.11 Legacy en el año 1997. Si bien Wi-Fi se ha convertido en el término coloquial predominante, en realidad es una marca comercial utilizada para comercializar la tecnología definida por el IEEE.

El llamado Wi-Fi proviene de “Wireless Fidelity”, que significa fidelidad inalámbrica, ya que es una tecnología de red inalámbrica que permite la conexión de dispositivos a Internet o entre sí utilizando ondas de radio, usualmente en frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz. Sin embargo, no es una definición completamente literal, debido a que el nombre Wi-Fi representa la tecnología de redes inalámbricas basada en los estándares IEEE 802.11.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE PROTOCOLOS IEE802.11

Según su año de creación e implementación:

- **IEEE 802.11**

En un primer intento de crear una red inalámbrica para transmisión de datos, en 1997 se creó el primer estándar de conexión. Dicho estándar permitía una velocidad máxima de 2 Mbps en la banda de 2.4 GHz, siendo así un avance significativo para la fecha en la que se implementó. Aun así, presentaba limitaciones en cuanto a su alcance y velocidad, aunque consolidó una base sólida para la evolución de las tecnologías inalámbricas.

- **IEEE 802.11a y IEEE 802.11b**

En 1999 se introdujeron dos nuevas versiones del estándar, lo que representó el debut comercial del Wi-Fi. El estándar IEEE 802.11a operaba en la banda de 5 GHz y ofrecía velocidades de hasta 54 Mbps, con la ventaja de tener menor intermitencia debido a su mayor frecuencia, pero con la desventaja de disminuir su alcance.

Por otro lado, el estándar IEEE 802.11b utilizaba la banda de 2.4 GHz, con velocidades de hasta 11 Mbps. Aunque tenía mayor alcance, era más propenso a sufrir interferencias de dispositivos como microondas o teléfonos inalámbricos.

En comparación con las redes cableadas Ethernet, ambos estándares eran suficientes para un mercado emergente con escasos dispositivos móviles. Sin embargo, eran propensos a la congestión debido a su uso compartido con otros dispositivos electrónicos. [9]

Estas dos versiones de la norma significaron una mejora notable en la conectividad inalámbrica, fomentando la utilización de redes Wi-Fi en entornos domésticos y corporativos. La capacidad de estos estándares para permitir enlaces inalámbricos rápidos amplió significativamente su adopción, fomentando la movilidad y la versatilidad en la disponibilidad de la red. Además, impulsaron el crecimiento de dispositivos móviles y aplicaciones compatibles con la tecnología Wi-Fi.

- **IEEE 802.11g**

En 2003, la creciente demanda de conectividad inalámbrica impulsada por el crecimiento de computadoras portátiles y dispositivos móviles encaminó la adopción del estándar 802.11g. Esta versión del protocolo IEEE 802.11 combinó lo mejor de sus predecesores.

Esta revisión del estándar ofrecía velocidades de hasta 54 Mbps y operaba en la misma banda de frecuencia de 2.4 GHz. Esto permitió la compatibilidad con productos ya existentes en el

mercado, equilibrando el alcance y la velocidad de manera prometedora. Gracias a esto, la tecnología Wi-Fi se volvió más accesible para una amplia gama de usuarios.

- **IEEE 802.11n**

La popularización del iPhone y el gran impacto de los smartphones dieron paso al estándar 802.11n en 2007. Esta innovación tecnológica elevó el rendimiento a 100 Mbps y extendió la compatibilidad a las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz. El estándar representó un cambio al migrar de radios de entrada/salida única (SISO) a radios de entrada/salida múltiple (MIMO). Esta modificación aprovechó de manera constructiva el fenómeno de trayectorias múltiples para mejorar la cobertura y la estabilidad de la conexión. [1]

En 2009, el estándar 802.11n incorporó por primera vez la técnica de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). En la banda de 2.4 GHz, utiliza 14 canales de 20 MHz de ancho de banda, con frecuencia central que varía entre 2.412 MHz y 2.484 MHz. En la banda de 5 GHz, emplea 36 canales de 20 MHz de ancho de banda, con frecuencia central entre 5.180 MHz y 5.880 MHz.

- **IEEE 802.11ac (Wi-fi 5)**

En 2013, este estándar se consolidó como la opción predominante, ofreciendo velocidades máximas de hasta 6.93 Gbps y operando en la banda de 5 GHz, menos congestionada que la de 2.4 GHz. Asimismo, introdujo la tecnología multiusuario MIMO (MU-MIMO), que permite la transmisión simultánea de datos a múltiples dispositivos, mejorando la eficiencia en entornos con alta densidad de usuarios. En esta etapa, el enfoque principal seguía siendo el incremento de la velocidad para satisfacer las crecientes demandas de las redes inalámbricas empresariales y soportar el tráfico generado por múltiples dispositivos conectados a Internet y al Internet de las Cosas (IoT).

El estándar 802.11ac, además de mejorar la velocidad, optimizó la estabilidad de la conexión al usar la banda de 5 GHz, que estaba menos saturada que la de 2.4 GHz. Su principal objetivo era aumentar la eficiencia de las redes en entornos con numerosos dispositivos conectados.

- **IEEE 802.11ax (Wi-fi 6)**

En 2019, se produjo un salto considerable con la introducción de mejoras orientadas a la eficiencia en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz. A diferencia de generaciones

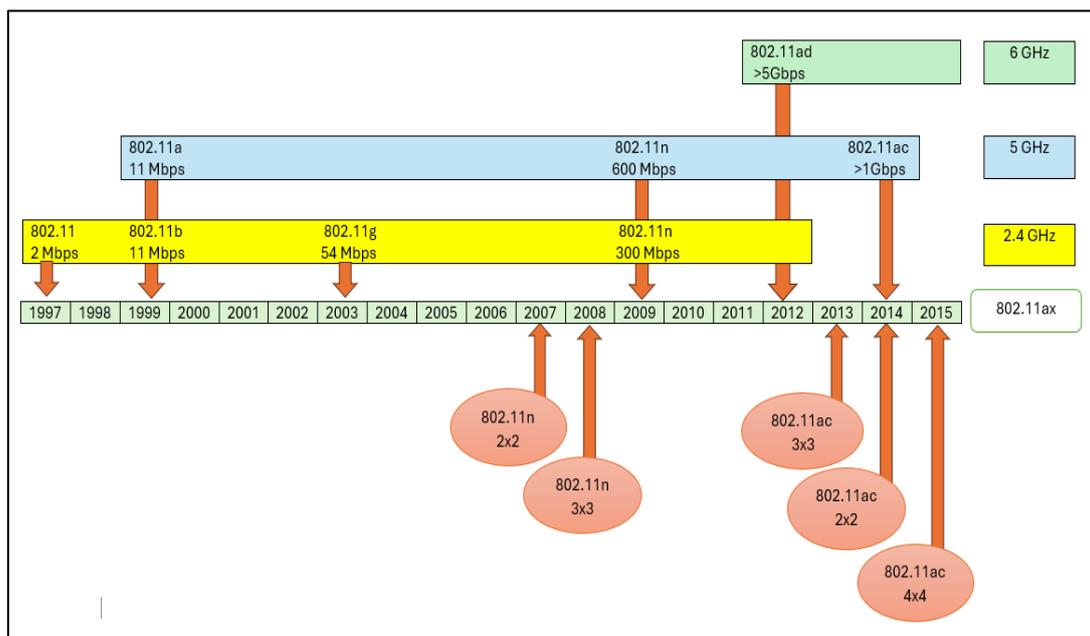
previas, que priorizaban la velocidad máxima teórica, Wi-Fi 6 se centra en el rendimiento real optimizado, considerando factores como la latencia, el tiempo de respuesta y la capacidad de red para gestionar un mayor número de dispositivos conectados simultáneamente.

Esta nueva filosofía responde a las necesidades de un panorama tecnológico dominado por el Internet de las Cosas (IoT), donde la conectividad masiva de dispositivos de bajo consumo energético exige una red eficiente y adaptable.

Este estándar opera en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz e introduce la banda de 6 GHz en su versión extendida, Wi-Fi 6E. La incorporación de estas frecuencias adicionales permite mejorar la eficiencia y reducir las interferencias, optimizando el rendimiento general de la red.

A diferencia de las generaciones anteriores, que se centraban en alcanzar la máxima velocidad teórica, Wi-Fi 6 pone énfasis en el rendimiento real. Esto implica considerar factores como la latencia, que es el tiempo que tarda la red en responder, y la capacidad de la red para manejar un mayor número de dispositivos conectados simultáneamente. Esta nueva estrategia es esencial en un entorno tecnológico donde se requieren redes más eficientes para soportar la conectividad de múltiples usuarios con dispositivos de bajo consumo energético.

Figura 2.2.1 Evolución del estándar 802.11ax.



Fuente: Joel Calderón

Figura 2.2.2. Tabla de Evolución del estándar 802.11.

Línea de tiempo	Estándar de comunicación	Banda de frecuencia de soporte	Ancho de banda	Tasa máxima teórica	Tecnología de capa física	Estructura de antena	¿Es compatible con otros estándares de protocolo?
1997	802.11-1997	2,4 GHz	22MHz	2Mbps	FHSS/DSSS	1×1 SISO	No compatible
1999	802.11a	5GHz	20MHz	54Mbps	DSSS	1×1 SISO	No compatible
1999	802.11b	2,4 GHz	22MHz	11Mbps	OFDM	1×1 SISO	No compatible
2003	802.11g	2,4 GHz	22MHz	54Mbps	OFDM/DSSS	1×1 SISO	Compatible con 802.11b
2009	802.11n	2,4G y 5GHz	20/40MHz	600Mbps	MIMOOFDM	4×4 MIMO	Compatible con 802.11a/b/g
2013	802.11ac	5GHz	20/40/80/160MHz	6,933 Gbit/s	MIMOOFDM	8×8 MIMO	Compatible con 802.11a/n

Fuente: Joel Calderón

2.3 CARACTERÍSTICAS CLAVES DEL WI-FI 6

El Wi-Fi 6, también denominado 802.11ax, es la tecnología de redes inalámbricas más reciente que tiene el potencial de incrementar notablemente la conectividad en ambientes saturados. De acuerdo con una investigación de Khorov et al. (2020) [13], Wi-Fi 6 incorpora diversas funciones técnicas que mejoran el desempeño y la eficiencia con relación a sus antecesores, proporcionando una experiencia de usuario más fluida y veloz.

- Mayor velocidad: Wi-Fi 6 puede alcanzar velocidades de hasta 9.6 Gbps, lo que es casi tres veces más rápido que Wi-Fi 5 (802.11ac).
- Tecnología OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access): Esta tecnología permite que múltiples dispositivos se conecten simultáneamente, mejorando la eficiencia y reduciendo la latencia en entornos con alta densidad de usuarios.
- MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output): Wi-Fi 6 soporta MU-MIMO en ambas direcciones, permitiendo que el router se comunice con varios dispositivos al mismo tiempo, en lugar de uno por uno.
- Mejor rendimiento en entornos congestionados: Gracias a las mejoras en la gestión del espectro y la reducción de interferencias, Wi-Fi 6 ofrece un rendimiento superior en áreas con muchos dispositivos conectados, como oficinas o espacios públicos.

- Mayor eficiencia energética: La función Target Wake Time (TWT) permite a los dispositivos programar cuándo deben despertarse para enviar o recibir datos, lo que ahorra batería y mejora la duración de los dispositivos conectados.
- Seguridad mejorada: Wi-Fi 6 utiliza el protocolo WPA3, que proporciona una mejor protección contra ataques cibernéticos y mejora la seguridad de las conexiones.
- Compatibilidad hacia atrás: Aunque Wi-Fi 6 introduce nuevas tecnologías, es compatible con versiones anteriores de Wi-Fi, lo que facilita su adopción sin necesidad de reemplazar todos los dispositivos existentes.

Estas características hacen del Wi-Fi 6 una opción atractiva para hogares y empresas que buscan mejorar su infraestructura de red. Con velocidades más altas y una mejor gestión del tráfico, los usuarios pueden experimentar una conexión más estable y rápida, incluso en situaciones donde múltiples dispositivos están activos al mismo tiempo (Khorov et al., 2020). La implementación de esta tecnología puede transformar la forma en que interactuamos con Internet y optimizar el uso de recursos en diversas aplicaciones.

2.4 FUNDAMENTOS DE TRANSMISIÓN MÚLTIPLE EN WIFI 6

La multitransmisión en Wi-Fi 6 es un elemento crucial que facilita la comunicación eficaz entre múltiples dispositivos vinculados a la red. Esta tecnología se fundamenta en la idea de varios flujos de datos, lo que posibilita el envío y recepción de datos al mismo tiempo a través de distintos canales. Según el IEEE (2020), "Wi-Fi 6 mejora la capacidad de la red al permitir que múltiples dispositivos se comuniquen al mismo tiempo, lo que es esencial en entornos densos donde muchos usuarios están activos" (IEEE, 2020). Este enfoque no solo optimiza el uso del espectro, sino que también mejora la experiencia del usuario al reducir la latencia y aumentar las velocidades de transmisión.

2.5 CONCEPTO BÁSICO DE MÚLTIPLES FLUJOS DE DATOS

El término de varios flujos de datos se refiere a la habilidad de un sistema para gestionar diversas transmisiones al mismo tiempo. En el contexto de Wi-Fi 6, esto significa que un router puede gestionar conexiones múltiples sin comprometer el rendimiento. Esta característica es

crucial en situaciones donde muchos dispositivos, como smartphones, tabletas y computadoras, están conectados a la red al mismo tiempo, lo que podría provocar congestión y lentitud en las conexiones.

Para comprender mejor cómo se implementan estos múltiples flujos de datos, es necesario explorar las tecnologías MIMO (Multiple Input Multiple Output) y MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output). MIMO posibilita que un aparato transmita y reciba varias señales mediante diversas antenas, incrementando de esta manera la capacidad global del sistema. MU-MIMO, por su parte, lleva esta idea más allá al permitir que un punto de acceso se comunique con varios dispositivos simultáneamente, optimizando aún más el uso del espectro disponible.

2.6 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL ESTANDAR IEEE 802.11AX

El estándar de comunicaciones inalámbricas IEEE 802.11ax se destaca por una serie de características fundamentales que lo posicionan como una evolución significativa en el ámbito de las redes locales inalámbricas.

Una de las principales de este estándar radica en la tecnología OFDMA, que introduce una mayor flexibilidad en el uso del espectro, reduciendo la latencia y la sobrecarga al permitir la transmisión simultánea de información a múltiples usuarios a través de canales independientes de diferentes anchos de banda. Esta tecnología, junto con la implementación de unidades de recursos (RU), posibilita la transmisión concurrente de tramas pequeñas y la gestión eficaz de la asignación de recursos tanto en el enlace descendente (DL) como en el enlace ascendente (UL).

Otra característica sobresaliente es la tecnología MU-MIMO, que facilita la transmisión de múltiples tramas a varios usuarios simultáneamente en el mismo espectro de frecuencias, lo que permite a los puntos de acceso (AP) entregar un mayor volumen de datos a los usuarios asociados, específicamente aquellos limitados a una sola antena. La combinación de OFDMA y MU-MIMO proporciona una mayor capacidad, cobertura y rendimiento, especialmente en entornos de alta densidad.

Además, se ha optimizado la reutilización espacial mediante la técnica de coloración BSS, que codifica inteligentemente las frecuencias compartidas asignando un color diferente para reducir

la probabilidad de colisión y mejorar el rendimiento del sistema, especialmente en áreas densamente pobladas. Por último, se ha implementado el modo de ahorro de energía Target Wakeup Time (TWT). Que permite a los dispositivos enviar o recibir datos. Este esquema mejora la eficiencia energética de los dispositivos al prolongar su tiempo de suspensión, lo que resulta en una mayor duración de la batería.

Tabla 2.6.1. Especificaciones técnicas IEEE 802.11ax.

CARACTERÍSTICAS	ESTÁNDAR 802.11 AX
BANDAS	2,4 y 5 GHz
ANCHO DE BANDA	20, 40, 80 y 160 MHz
MODULACIÓN	1024-QAM
VELOCIDAD DE DATOS	10 GHz
OFDMA	Menor Latencia.
MU-MIMO	Menor congestión con varios dispositivos.
MU-MIMO	Simultanea de subida y bajada.
MU-MIMO	Mejor velocidad en redes con muchos dispositivos.
COLORACIÓN BSS	Menos interferencias.
TARGET WAKE TIME	Mejor ahorro energético.

Fuente: Joel Calderón

2.7 MIMO (MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT)

Es una tecnología esencial en la evolución de las redes Wi-Fi fundamental en el desarrollo de la capacidad de transmisión de datos en los estándares más recientes, el estándar 802.11ax (Wi-Fi 6). Con MIMO, múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor pueden transmitir y recibir datos simultáneamente, lo que resulta en una mayor velocidad y confiabilidad de la conexión inalámbrica.

Es una tecnología clave para el desarrollo de las redes Wi-Fi modernas, como el estándar 802.11ax o Wi-Fi 6. Esta tecnología permite que tanto el transmisor como el receptor utilicen múltiples antenas para enviar y recibir datos al mismo tiempo, lo que mejora la velocidad de

transmisión y la estabilidad de la conexión inalámbrica.

En el contexto de Wi-Fi 6, MIMO ha sido una característica fundamental para aumentar la eficiencia espectral y mejorar la capacidad de la red inalámbrica. Wi-Fi 6 utiliza una versión mejorada de la tecnología MIMO también conocida como MU-MIMO (Multi-User MIMO), que permite la transmisión simultánea de datos a múltiples dispositivos. Esto significa que un punto de acceso Wi-Fi 6 puede comunicarse de manera eficiente con varios dispositivos al mismo tiempo, reduciendo la congestión y mejorando la experiencia del usuario en entornos con alta densidad de dispositivos.

Además, la implementación de MU-MIMO en Wi-Fi 6 no solo beneficia la velocidad y la capacidad de la red, sino que también mejora la experiencia del usuario al reducir significativamente la latencia en las comunicaciones. Esta reducción en la latencia es crucial para aplicaciones que requieren respuestas rápidas, como los videojuegos en línea y las videoconferencias. Según un estudio de Khorov et al. (2022), "la capacidad de MU-MIMO para gestionar múltiples flujos de datos simultáneamente permite que las redes Wi-Fi 6 mantengan un rendimiento óptimo incluso en entornos con alta densidad de dispositivos, lo que resulta en una experiencia de usuario más fluida y eficiente" (Khorov et al., 2022). Esto demuestra cómo MU-MIMO se ha convertido en una característica esencial para satisfacer las crecientes demandas de conectividad en un mundo cada vez más interconectado.

2.8 ALGORITMOS UTILIZADOS EN MIMO

2.8.1 Métodos de canales de programación

Canal de Rayleigh. este modelo se aplica en situaciones donde no hay una línea de vista clara entre el transmisor y el receptor, lo que se conoce como entornos NLOS (sin línea de vista). En este contexto, las señales llegan al receptor después de haber rebotado en diferentes objetos y haber sido difractadas. Para simular este tipo de canal, se utilizan variables aleatorias complejas Gaussianas, lo que permite capturar la variabilidad inherente a las condiciones del entorno (Goldsmith, 2005).

2.8.2 Generación de Canales

Para el modelo de Rayleigh, se utiliza H Rayleigh, y el modelo de Rician, se emplea H Rician, que incluye el factor K para ajustar la proporción entre los componentes directos y difusos.

Este enfoque permite a los ingenieros diseñar redes inalámbricas más eficientes al entender cómo las señales pueden ser afectadas por su entorno, optimizando así la transmisión de datos

en diversas condiciones.

2.8.3 Técnicas de Procesamiento de Señales

En un sistema MIMO, la señal que se recibe es una mezcla lineal de las señales transmitidas, afectadas por el canal y el ruido. Para recuperar los datos originales, se aplican varias técnicas de detección:

Zero-Forcing (ZF): Es una técnica de recodificación utilizada en sistemas MIMO para mitigar la interferencia entre los diferentes usuarios o antenas. El objetivo principal de ZF es eliminar por completo las interferencias intersistemas, garantizando que las señales recibidas por el receptor estén libres de interferencia proveniente de otras antenas o usuarios. La técnica ZF consiste en el cálculo de una matriz de recodificación que es la inversa del canal de transmisión. Este proceso garantiza que, en condiciones ideales, las señales transmitidas por diferentes antenas se reciban de manera desacoplada y sin interferencia mutua.

Minimum Mean Square Error (MMSE): Se basa en una optimización estadística que busca minimizar el error cuadrático medio (MSE) entre la señal recibida y la señal transmitida deseada, considerando tanto el ruido como la interferencia. En lugar de eliminar completamente la interferencia (como lo hace ZF), MMSE busca un equilibrio entre la reducción de la interferencia y la mejora de la relación señal-ruido (SNR), para lograr el mejor rendimiento posible bajo condiciones no ideales. La matriz de recodificación MMSE se calcula tomando en cuenta no solo la matriz del canal, sino también la matriz de covarianza del ruido. La simulación evalúa métricas clave para medir la calidad de los sistemas MIMO:

Tasa de Error de Bit (BER): Esta métrica indica la proporción de bits que se decodifican incorrectamente en relación con el total de bits transmitidos. Es fundamental para determinar la confiabilidad del sistema.

Throughput (bps): Representa la cantidad de datos útiles que se transmiten con éxito por segundo. Su valor depende de la tasa de modulación utilizada y la probabilidad de error en la transmisión.

Latencia (ms): Se refiere al tiempo que se tarda en enviar un paquete de datos desde su origen hasta su destino. En el código, se calcula dividiendo el tamaño del paquete por el throughput.

Eficiencia Espectral (bps/Hz): Mide cuánta información se transmite por cada unidad de ancho de banda. Es un indicador clave para evaluar el uso eficiente del espectro disponible.

Modulación y Demodulación

La modulación 1024-QAM se utiliza para convertir bits en símbolos complejos, maximizando

la eficiencia espectral. Este tipo de modulación:

Emplea 1024 puntos en el plano I-Q, lo que permite representar 10 bits por símbolo. Requiere niveles altos de relación señal-ruido (SNR) para mantener bajos los índices de error. En el código, se implementa de la siguiente manera:

- Qammod: Se encarga de generar los símbolos a partir de los datos binarios.
- Gamdemod: Recupera los datos originales a partir de los símbolos que han sido recibidos.

Distribución de usuarios y pérdida de la trayectoria código simula usuarios ubicados tanto en interiores como en exteriores, teniendo en cuenta diferentes características de propagación:

- Los usuarios interiores se encuentran a distancias más cortas y experimentan mayores pérdidas debido a obstáculos.
- Los usuarios exteriores tienen distancias más largas, pero sufren pérdidas menores.
- La pérdida de trayectoria se modela de la siguiente manera:

$$Path Loss = 10 * n * \log (d + l)$$

Donde N exponente de pérdidas, D la distancia tercio y promedio.

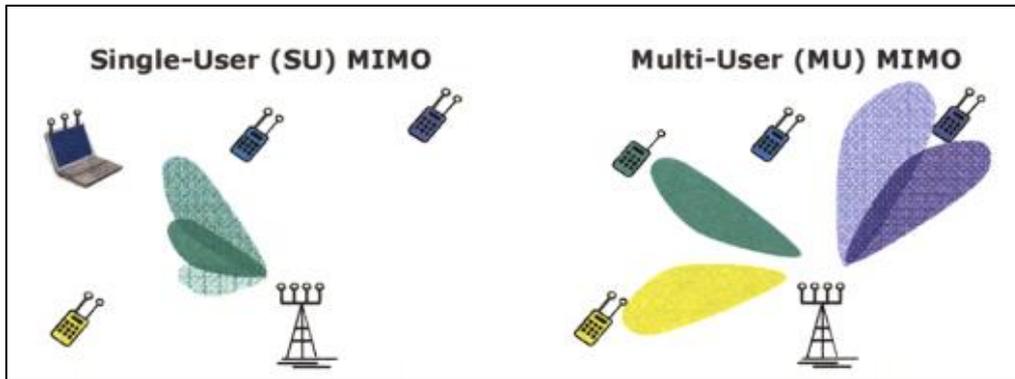
2.9 MU-MIMO

Esta tecnología es una ampliación de MIMO que posibilita que un punto de acceso interactúe con múltiples dispositivos al mismo tiempo. Mientras que MIMO tradicional se centra en mejorar la conexión entre un único dispositivo y el router, MU-MIMO permite que varios dispositivos reciban datos al mismo tiempo, lo que es crucial en entornos con alta densidad de usuarios. Esta tecnología es especialmente útil en situaciones donde muchos dispositivos están activos, como en oficinas o espacios públicos. De acuerdo con un análisis realizado por Khorov et al. (2022), "MU-MIMO mejora significativamente el rendimiento general de la red al permitir que múltiples usuarios se conecten y transmitan datos simultáneamente sin degradar la calidad del servicio" (Khorov et al., 2022).

El funcionamiento de MU-MIMO se basa en el principio de dividir el espectro de radio en múltiples flujos de datos independientes, que luego se transmiten simultáneamente a diferentes dispositivos receptores. Tradicionalmente, en los sistemas Wi-Fi, la comunicación se realiza en modo SU-MIMO (Single User MIMO), donde un enrutador se comunica con un solo

dispositivo a la vez. Sin embargo, con MU-MIMO, el enrutador puede enviar datos a múltiples dispositivos receptores al mismo tiempo, aprovechando así al máximo la capacidad del canal y reduciendo la congestión en la red.

Figura 2.9.1. MIMO de un solo usuario (SU) vs Multiusuario (MU).



Fuente: Joel Calderón

Esta mejora en la cobertura no solo garantiza una conectividad más estable y confiable para los usuarios en zonas de difícil acceso, sino que también resulta crucial para el funcionamiento de aplicaciones emergentes, como el internet de las cosas (IoT) y la automatización industrial, donde la conectividad continua y sin interrupciones es esencial para su desempeño óptimo.

Esta tecnología ha surgido como una solución innovadora para abordar los desafíos de congestión y eficiencia espectral en redes inalámbricas de alta densidad. MU-MIMO permite que un enrutador Wi-Fi pueda comunicarse simultáneamente con varios dispositivos receptores, mejorando así la capacidad y el rendimiento del sistema inalámbrico.

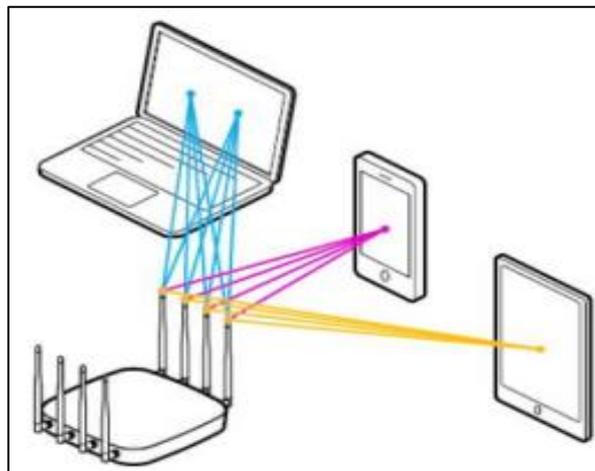
Es importante destacar que el éxito del funcionamiento de MU-MIMO depende en gran medida de la capacidad de los dispositivos receptores para decodificar correctamente los flujos de datos transmitidos. Para esto, los dispositivos receptores deben ser compatibles con la tecnología MU-MIMO y tener múltiples antenas de recepción que les permitan recibir y procesar los flujos de datos de manera simultánea.

Otro aspecto importante del funcionamiento de MU-MIMO es la capacidad de los dispositivos receptores para informar al enrutador sobre su estado y capacidad. Esto se logra mediante un

proceso conocido como retroalimentación de canal, donde los dispositivos receptores envían información al enrutador sobre la calidad de la señal recibida y su capacidad para decodificar los flujos de datos transmitidos. Esta retroalimentación permite al enrutador ajustar dinámicamente la asignación de recursos y los parámetros de transmisión para adaptarse a las condiciones cambiantes del canal inalámbrico y optimizar el rendimiento del sistema.

Además de mejorar la capacidad y la eficiencia espectral, el funcionamiento de MU-MIMO también puede beneficiar la calidad de servicio (QoS) en redes inalámbricas. Al permitir una comunicación simultánea con varios dispositivos receptores, MU-MIMO puede reducir la latencia y mejorar la experiencia del usuario en aplicaciones sensibles al retraso, como la transmisión de video en tiempo real y los juegos en línea. Esto se logra al priorizar el acceso al canal inalámbrico para dispositivos que requieren una conexión de alta prioridad, mientras se aprovecha al máximo la capacidad disponible para otros dispositivos en la red.

Figura 2.9.2. Tecnología MU-MIMO.



Fuente: Joel Calderón

2.10 ALGORITMOS UTILIZADOS EN MU-MIMO

Zero Forcing (ZF) es una técnica de precodificación utilizado para gestionar la interferencia inter-usuario en sistemas MU-MIMO. En un sistema MU-MIMO, un transmisor con múltiples antenas envía señales a múltiples usuarios simultáneamente. Estos usuarios pueden experimentar interferencia debido a la superposición de las señales transmitidas, ya que comparten el mismo espectro de frecuencia. ZF tiene como objetivo eliminar esta interferencia

entre los usuarios mediante una estrategia de precodificación inversa del canal.

En el contexto de MU-MIMO, ZF trabaja sobre la premisa de que la matriz del canal, denotada por H , es conocida en el transmisor. Esta matriz representa las condiciones de propagación del canal entre el transmisor y los usuarios.

ZF trata de anular la interferencia entre las señales transmitidas a diferentes usuarios. Para lograr esto, ZF genera una matriz de recodificación W_{ZF} , que es la inversa de la matriz $H^H H$, lo que permite al transmisor enviar señales en fases que cancelan la interferencia entre usuarios.

2.10.1 MMSE

La técnica de Minimum Mean Square Error (MMSE) es otro enfoque utilizado para la precodificación en sistemas MU-MIMO, pero a diferencia de ZF, MMSE no busca eliminar la interferencia inter-usuario por completo. En su lugar, MMSE minimiza el error cuadrático medio entre la señal transmitida y la señal recibida, considerando tanto la interferencia de los otros usuarios como el ruido presente en el canal.

El cálculo de la matriz de precodificación MMSE se realiza con la siguiente fórmula:

$$W_{MMSE} = (H^H H + \sigma^2 I)^{-1}$$

σ^2 es la varianza del ruido en el canal.

I es la matriz identidad de dimensiones adecuadas.

OFDMA

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) es una tecnología fundamental en el estándar Wi-Fi 6 que mejora significativamente la eficiencia espectral y la capacidad de las redes inalámbricas. OFDMA opera dividiendo el ancho de banda disponible en múltiples subportadoras ortogonales, cada una de las cuales puede asignarse a diferentes dispositivos para la transmisión de datos simultánea.

El funcionamiento de OFDMA implica varios pasos clave. En primer lugar, el enrutador Wi-Fi divide el ancho de banda disponible en un conjunto de subportadoras ortogonales, que son portadoras de frecuencia separadas y mutuamente independientes. Estas subportadoras son entonces asignadas dinámicamente a diferentes dispositivos para la transmisión de datos, según las necesidades de la red y las condiciones del canal inalámbrico.

OFDMA también implica el uso de técnicas de modulación adaptativa para adaptar la tasa de transmisión de datos en cada subportadora según las condiciones del canal y los requisitos de calidad de servicio de los dispositivos. Esto garantiza una transmisión eficiente y confiable de datos incluso en entornos inalámbricos difíciles, como aquellos con altos niveles de interferencia o atenuación.

Cada subportadora en OFDMA puede utilizarse para transmitir datos a un solo dispositivo o para compartirse entre varios dispositivos utilizando técnicas de asignación de recursos avanzadas. Esto permite una utilización más eficiente del espectro de radio, ya que múltiples dispositivos pueden transmitir datos simultáneamente en diferentes subportadoras sin interferirse entre sí.

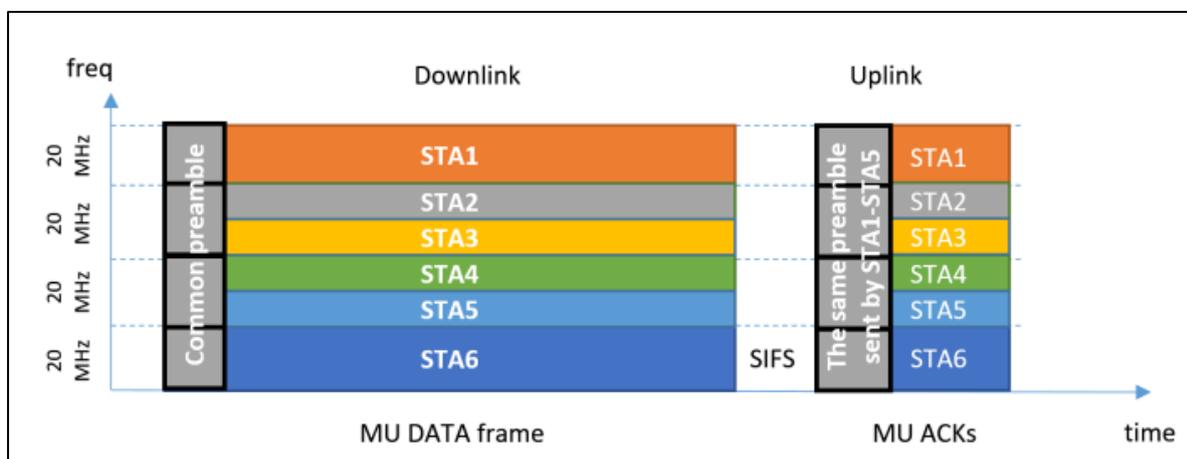
Una de las características distintivas del funcionamiento de OFDMA es su capacidad para mitigar los efectos de la interferencia entre dispositivos y mejorar la coexistencia en entornos inalámbricos de alta densidad. Al asignar subportadoras individuales a diferentes dispositivos, OFDMA reduce la probabilidad de colisiones de datos y minimiza la interferencia entre transmisiones simultáneas. Además, el uso de subportadoras ortogonales garantiza que las señales transmitidas en diferentes subportadoras no se interfieran entre sí, lo que mejora aún más la eficiencia espectral y la calidad de la conexión inalámbrica.

Una de las ventajas clave del funcionamiento de OFDMA es su capacidad para soportar tanto tráfico de datos de alta velocidad como tráfico de datos de baja velocidad en la misma red inalámbrica. Al asignar subportadoras individuales a diferentes dispositivos según sus requisitos de ancho de banda, OFDMA puede garantizar un rendimiento óptimo para una amplia gama de aplicaciones y servicios, desde aplicaciones de streaming de video de alta definición hasta dispositivos IoT de baja potencia.

Otra ventaja del funcionamiento de OFDMA es su capacidad para adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del canal inalámbrico. Las subportadoras pueden asignarse y reconfigurarse dinámicamente en función de las variaciones del canal, lo que permite a OFDMA mantener un rendimiento óptimo incluso en entornos inalámbricos difíciles. Esto es especialmente importante en aplicaciones sensibles al retraso, como la transmisión de voz sobre IP (VoIP) y los videojuegos en línea, donde la latencia y la variabilidad del canal pueden afectar significativamente la experiencia del usuario. Además, el funcionamiento de OFDMA puede mejorar la eficiencia energética en dispositivos inalámbricos al permitir una asignación precisa de recursos de transmisión según las necesidades de cada dispositivo.

La combinación de estas tecnologías en el estándar Wi-Fi 6 promete revolucionar la forma en que experimentamos la conectividad inalámbrica. Se espera que la velocidad y la confiabilidad aumenten drásticamente, lo que permitirá aplicaciones y servicios que antes eran impensables en entornos inalámbricos. Desde aplicaciones de realidad virtual de alta definición hasta la Internet de las cosas IoT a gran escala, Wi-Fi 6 allana el camino para una nueva era de conectividad.

Figura 2.10.1 Transmisión OFDMA en 802.11ax.



Fuente: Joel Calderón

2.11 ALGORITMOS UTILIZADOS EN OFDMA

2.11.1 PFS (Proportional Fair Scheduling)

El algoritmo PFS es un algoritmo de programación de usuarios que tiene como objetivo mejorar el rendimiento global del sistema manteniendo un equilibrio entre la equidad y el rendimiento.

El principio básico detrás de PFS es asignar los recursos de manera que se maximice la eficiencia espectral mientras se da prioridad a los usuarios con baja tasa de datos en relación con su tasa promedio. Esto ayuda a evitar que los usuarios con mejores condiciones de canal y, por lo tanto, un mayor rendimiento.

$$R_k(t) = \frac{r_k(t)}{r_k^{avg}}$$

$R_k(t)$ es la tasa de asignación de recursos para el usuario k , en el instante t .

$r_k(t)$ es la tasa instantánea del usuario k .

r_k^{avg} es la tasa promedio del usuario k .

2.11.2 JSPA (Joint Subcarrier and Power Allocation)

El algoritmo JSPA se utiliza para optimizar tanto la asignación de subcanales como la potencia en sistemas OFDMA. A diferencia de PFS, que solo se enfoca en la programación de usuarios, el JSPA tiene en cuenta dos recursos clave: los subcanales y la potencia. El objetivo es asignar de manera conjunta los subcanales y la potencia para maximizar la tasa de transmisión global del sistema, manteniendo las condiciones de calidad de servicio para los usuarios.

$$R_k(t) = B_n \log_2 \left(1 + \frac{P_k |H_{kn}|^2}{N_0} \right)$$

R_k es la tasa de transmisión para el usuario k .

B_n es el ancho de banda del subcanal n .

P_k es la potencia asignada al usuario k .

$|H_{kn}|^2$ es la ganancia del canal entre usuario k y el subcanal n .

N_0 es la densidad espectral de ruido.

2.12 HERENCIA DE PROTOCOLOS DE SEGURIDAD EN 802.11AX

El estándar IEEE 802.11ax, también conocido como Wi-Fi 6, incorpora mejoras

significativas en la seguridad en comparación con sus predecesores. A continuación, se presenta un resumen de los aspectos clave de la seguridad en Wi-Fi 6.

2.12.1 WPA2

(Wi-Fi Protected Access 2) Sigue siendo el protocolo de seguridad dominante en redes Wi-Fi y es compatible con 802.11ax. Ha demostrado ser altamente efectivo en la protección de redes inalámbricas y sigue siendo una opción sólida para garantizar la seguridad de las comunicaciones. Se ha utilizado ampliamente en las últimas décadas para proteger las redes Wi-Fi. Sin embargo, se han encontrado varias formas de vulnerar la seguridad de WPA2-PSK clave precompartida. Por lo tanto, se necesitaba un nuevo mecanismo de autenticación seguro para redes Wi-Fi personales.

WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3) se anunció en 2018 y se volvió obligatorio para las certificaciones Wi-Fi a partir de julio de 2020. Introduce cambios principalmente en el mecanismo de Handshake de la autenticación Wi-Fi. En el modo WPA3 Personal, se utiliza el protocolo Simultaneous Authentication of Equals (SAE) basado en el protocolo Dragonfly.

Sin embargo, para permitir la compatibilidad con dispositivos más antiguos, se introduce el modo de transición WPA3 (WPA3-TM). El modo de transición permite que los dispositivos se conecten usando tanto WPA3 como WPA2, lo cual puede reintroducir vulnerabilidades de seguridad. El principal desafío es asegurar el modo de transición WPA3 para evitar ataques de degradación a WPA2.

CAPÍTULO III

3 LEVANTAMIENTO DE LÍNEA BASE

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE ESTUDIO

La simulación y análisis del estándar IEEE 802.11ax se centrará en un entorno representativo de alta concentración de tráfico y densidad de usuarios, como el de una institución educativa. El entorno simulado se diseñará basándose en parámetros reales obtenidos de instituciones similares, considerando características como la cantidad de usuarios conectados simultáneamente, las necesidades de ancho de banda para diferentes aplicaciones (educativas, administrativas y recreativas) y las condiciones de tráfico típicas en horarios pico.

3.2 ANÁLISIS DEL ESCENARIO DE TRÁFICO Y USUARIOS

El entorno simulado refleja la creciente demanda de conectividad inalámbrica eficiente en espacios con alta densidad de usuarios. El diseño inicial considera las siguientes condiciones:

Cantidad de usuarios simultáneos: se incluirán escenarios con diferentes niveles de densidad, desde 15 hasta 500 usuarios por área específica.

Requisitos de tráfico: se modelará una variedad de aplicaciones, como videoconferencias, streaming de video en alta definición, navegación web y transferencia de archivos, para capturar diferentes niveles de demanda.

Distribución espacial: los usuarios estarán distribuidos en áreas representativas, como aulas, auditorios y espacios comunes.

3.3 TOPOLOGÍA DEL ESCENARIO SIMULADO

El modelo topológico utilizará una infraestructura basada en puntos de acceso compatibles con el estándar IEEE 802.11ax. Estos puntos de acceso se distribuirán estratégicamente para garantizar la cobertura en todo el espacio, maximizando la eficiencia espectral y minimizando la interferencia. La topología incluye puntos de acceso con capacidades MU-MIMO y OFDMA para transmisión eficiente. Segmentación del tráfico: mediante VLAN para aislar diferentes tipos de datos. Enrutadores y balanceadores para optimizar la distribución del tráfico.

3.4 IDENTIFICACIÓN DE REQUISITOS DE CONECTIVIDAD

Para garantizar un análisis preciso, se identificaron los siguientes requisitos:

Cobertura: cobertura inalámbrica completa en todo el entorno simulado.

Capacidad: soporte para al menos 200 dispositivos conectados simultáneamente por punto de acceso.

Eficiencia: optimización de la calidad del servicio (QoS) para aplicaciones críticas, como videoconferencias.

Seguridad: implementación de mecanismos de seguridad avanzados para evitar accesos no autorizados.

3.5 SELECCIÓN DE HARDWARE Y TECNOLOGÍAS APROPIADAS

Se eligieron dispositivos compatibles con el estándar IEEE 802.11ax para la simulación, incluyendo:

- Puntos de acceso con soporte para OFDMA y MU-MIMO.
- Enrutadores con capacidad para manejar múltiples segmentos de red y balanceo de carga.
- Software de simulación como MATLAB y herramientas específicas para modelar tráfico y rendimiento.

3.6 CONFIGURACIÓN INICIAL DE LA SIMULACIÓN

La simulación inicial se definió con los siguientes parámetros:

- Modelo de tráfico: carga pesada con distribución heterogénea de datos.
- Segmentación: implementación de VLAN para segmentar tráfico académico, administrativo y recreativo.
- QoS: priorización de tráfico de voz y video sobre datos menos críticos.
- Seguridad: configuración de ACL y autenticación para usuarios.

3.7 DIAGNÓSTICO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AX

Se evaluará el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax en comparación con estándares previos (como IEEE 802.11ac) mediante simulaciones que consideren los siguientes indicadores:

Velocidad de transmisión: Comparación de tasas de datos alcanzadas en escenarios de alta densidad.

- **Latencia:** análisis de tiempos de respuesta bajo diferentes condiciones de tráfico.
- **Eficiencia espectral:** evaluación del aprovechamiento del ancho de banda disponible.
- **Escalabilidad:** capacidad para manejar un aumento progresivo de usuarios.

CAPÍTULO IV

4 DISEÑO

4.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE SIMULACIÓN

El diseño de la simulación se divide en varias etapas clave para garantizar un análisis detallado y preciso del rendimiento del estándar IEEE 802.11ax:

4.2 TOPOLOGÍA DE LA RED SIMULADA

Infraestructura básica en puntos de acceso (AP): Configurados con capacidades OFDMA y MU-MIMO para maximizar la eficiencia de transmisión los dispositivos representan usuarios finales, distribuidos según escenarios de baja, media y alta densidad, controladores de red que gestionan la asignación dinámica de recursos y el equilibrio de carga.

4.3 SEGMENTACIÓN DE LA RED

Implementación de VLAN para separar el tráfico por categorías, como académico, administrativo y recreativo. Uso de direcciones IPv4 privadas para optimizar el direccionamiento y la gestión interna.

4.4 CONFIGURACIÓN DE TRÁFICO

Tráfico generado con un enfoque en aplicaciones críticas como videoconferencias, navegación, descargas y streaming. Incorporación de tráfico de fondo para simular condiciones reales de congestión.

4.5 MODELO ESPACIAL

Distribución de los AP en una cuadrícula que cubre aulas, auditorios y áreas comunes y evaluación de la cobertura y solapamiento para minimizar interferencias.

4.6 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN

Configuración inicial del estándar IEEE 802.11ax, canalización y uso de canales de 20 MHz, 40 MHz y 80 MHz según la densidad de usuarios, acceso múltiple y configuración de OFDMA para asignar recursos espectrales según las demandas de los usuarios. Capacidades avanzadas, con activación de MU-MIMO para optimizar la transmisión simultánea a múltiples usuarios.

4.7 CONFIGURACIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO (QOS):

Priorización de tráfico en tiempo real, como voz y video, frente a datos no críticos. Implementación de colas de prioridad según el tipo de aplicación.

4.8 SEGURIDAD DE LA RED

Uso de WPA3 para garantizar la seguridad en la autenticación de usuarios de la lista de control de acceso (ACL) para limitar el tráfico no autorizado.

4.9 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

4.9.1 Escenario 1: Baja densidad de usuarios

15 dispositivos conectados por AP con tráfico moderado con aplicaciones de navegación y correo electrónico.

4.9.2 Escenario 2: Media densidad de usuarios

300 dispositivos conectados por AP con una mezcla de tráfico: videoconferencias, streaming y navegación.

4.9.3 Escenario 3: Alta densidad de usuarios

500 dispositivos conectados por AP con tráfico pesado con múltiples usuarios ejecutando aplicaciones de alta demanda simultáneamente.

4.10 MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

El rendimiento del estándar IEEE 802.11ax será evaluado mediante las siguientes métricas:

- Tasa de transferencia (Throughput): cantidad de datos transmitidos por segundo.
- Latencia: tiempo promedio que tarda un paquete en llegar a su destino.
- Pérdida de paquetes: porcentaje de paquetes que no llegan al destino.
- Eficiencia espectral: cantidad de datos transmitidos por unidad de ancho de banda.
- Saturación de la red: desempeño en condiciones de tráfico extremo.

4.11 HERRAMIENTAS Y TECNOLOGÍAS

- **Software de simulación:** MATLAB con herramientas especializadas para redes inalámbricas.
- **Modelos de tráfico:** uso de modelos probabilísticos para simular tráfico en escenarios de alta densidad. Generadores de tráfico para simular condiciones reales de uso.
- **Hardware virtualizado:** representación de puntos de acceso y dispositivos cliente para modelar interacciones reales.

4.12 CONFIGURACIÓN DE VLANS

Las VLAN (Redes Virtuales de Área Local) son fundamentales para segmentar el tráfico en redes con alta densidad, como entornos educativos. En esta simulación, se definieron tres VLANs principales, cada una con un propósito específico:

VLAN	Tráfico asociado	Prioridad	Ancho de banda reservado (%)
VLAN 10	Tráfico administrativo	Alta	50%
VLAN 20	Tráfico académico	Media	30%
VLAN 30	Tráfico general estudiantil	Baja	20%

4.12.1 Justificación de la configuración:

- **VLAN 10 (Administrativo):** diseñada para garantizar conectividad constante a personal administrativo, donde las interrupciones en el servicio podrían afectar procesos críticos como la gestión de datos o videoconferencias de alta prioridad.
- **VLAN 20 (Académico):** pensada para el acceso a recursos educativos (e-learning, descargas de material, presentaciones).
- **VLAN 30 (General):** tráfico no crítico, como navegación en redes sociales o entretenimiento de los estudiantes.

Ejemplo práctico: en un pico de tráfico, si se generan 300 Mbps en la red total, el tráfico administrativo tendría garantizados 150 Mbps, reduciendo el impacto de saturación en otras VLANs.

4.13 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN

El diseño y la simulación consideraron tanto equipos de acceso como dispositivos cliente para un entorno heterogéneo.

Tipo de equipo	Modelo/Especificaciones	Soporte estándar	Características clave
Puntos de acceso (APs)	Simulación de AP Wi-Fi 6	IEEE 802.11ax	MU-MIMO, OFDMA, QoS
Laptops	Clientes con tarjetas de red AX200	IEEE 802.11ax	Antenas 2x2, conexión estable

Smartphones	Dispositivos iPhone 12 y Samsung S20 simulados	IEEE 802.11ax	Compatibilidad con OFDMA
Dispositivos IoT	Cámaras IP, sensores simulados	IEEE 802.11n y 802.11ax	Baja prioridad en QoS

4.13.1 Justificación:

- **Puntos de acceso:** configurados para operar en bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, permitiendo el manejo de múltiples clientes simultáneamente gracias a MU-MIMO.
- **Dispositivos cliente:** incluyeron laptops y smartphones modernos para representar tráfico de alta prioridad, mientras que los dispositivos IoT reflejan tráfico secundario.

4.13.2 Configuración de antenas:

Los AP simularon configuraciones de 8x8 MU-MIMO, lo que permitió atender hasta 8 dispositivos simultáneamente con una división eficiente de recursos.

4.14 IMPLEMENTACIÓN DE QOS (CALIDAD DE SERVICIO)

QoS fue un componente clave en la simulación, ya que permitió priorizar el tráfico crítico y garantizar la calidad en servicios sensibles a la latencia.

4.14.1 Políticas de QoS configuradas:

Tipo de tráfico	Clase QoS asignada	Latencia máxima permitida (ms)	Prioridad relativa
Videollamadas	Clase 1 (Alta)	30	1
Streaming de video	Clase 2 (Media-Alta)	50	2
Navegación web	Clase 3 (Media)	100	3
Descargas masivas	Clase 4 (Baja)	200	4

4.14.2 Impacto del QoS en los resultados:

- **Sin QoS:** en entornos saturados, los flujos de tráfico críticos sufrían pérdidas significativas (>10%).

- **Con QoS:** las políticas asignadas redujeron la pérdida de paquetes para tráfico de videollamadas a menos del 1%, manteniendo una experiencia óptima.

Ejemplo práctico: en un aula con videollamadas y streaming simultáneo, QoS garantizó una latencia promedio de 20 ms para videollamadas, mientras que el tráfico de streaming tuvo 50 ms.

4.15 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La simulación fue diseñada para reflejar un entorno educativo típico con alta densidad de usuarios.

4.15.1 Parámetros de simulación:

Parámetro	Valor configurado
Escenarios de densidad	Baja (15 usuarios), Media (150 usuarios), Alta (350 usuarios), Muy Alta (450 usuarios)
Ancho de banda disponible	20/40/60/80/160/320 MHz (2.4/5 GHz)
Tráfico generado	Navegación (40%), Streaming (30%), Videollamadas (20%), Descargas (10%)
Herramienta utilizada	MATLAB

4.15.2 Distribución del tráfico:

Actividad	Porcentaje del total generado	Ejemplo práctico
Navegación web	40%	Estudiantes accediendo a recursos educativos
Streaming de video	30%	Clases grabadas o videos en plataformas LMS
Videollamadas	20%	Reuniones virtuales entre profesores y alumnos
Descargas masivas	10%	Actualizaciones de software o material pesado

4.15.3 Modelo de movilidad:

Para simular un entorno realista, se utilizó un modelo de movilidad aleatoria donde los usuarios cambian de posición dentro del rango del AP, lo que introduce fluctuaciones en la señal.

Ejemplo práctico: En una simulación de 100 usuarios con un AP, se observó que los usuarios más cercanos al AP lograron tasas de transferencia de hasta 450 Mbps, mientras que los más alejados experimentaron una reducción del 30%.

CAPÍTULO V

5 SIMULACIÓN Y PRUEBAS

En este capítulo se presentan las pruebas y simulaciones realizadas para evaluar el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax en entornos con alta densidad de usuarios. Se inicia con un escenario base de 10 usuarios y se escala progresivamente a escenarios de mayor demanda, considerando técnicas de MIMO (Multiple Input Multiple Output), MU-MIMO (Multi-User MIMO) y OFDMA. Se analizan métricas clave como velocidad de transmisión (throughput), latencia, y eficiencia espectral, con el objetivo de determinar el impacto de estos parámetros en la calidad del servicio de la red.

5.1 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Para evaluar el desempeño del estándar 802.11ax, se diseñaron simulaciones en MATLAB, configuradas con parámetros específicos que permiten una comparación precisa entre diferentes escenarios. Cada simulación considera aspectos como:

Número de usuarios: se varía la cantidad de usuarios para analizar la escalabilidad del sistema.

Número de antenas: se aplican configuraciones de MIMO y MU-MIMO con diferentes cantidades de antenas en los puntos de acceso y los dispositivos receptores.

Esquemas de modulación: se emplean esquemas de modulación como 1024-QAM para mejorar eficiencia espectral.

Condiciones de propagación: se consideran modelos de canal que representan entornos de despliegue realistas, incluyendo interferencias y atenuaciones.

Estrategias de asignación de recursos: se evalúan los mecanismos de multiplexación espacial y asignación de subportadoras en OFDMA para optimizar el uso del espectro.

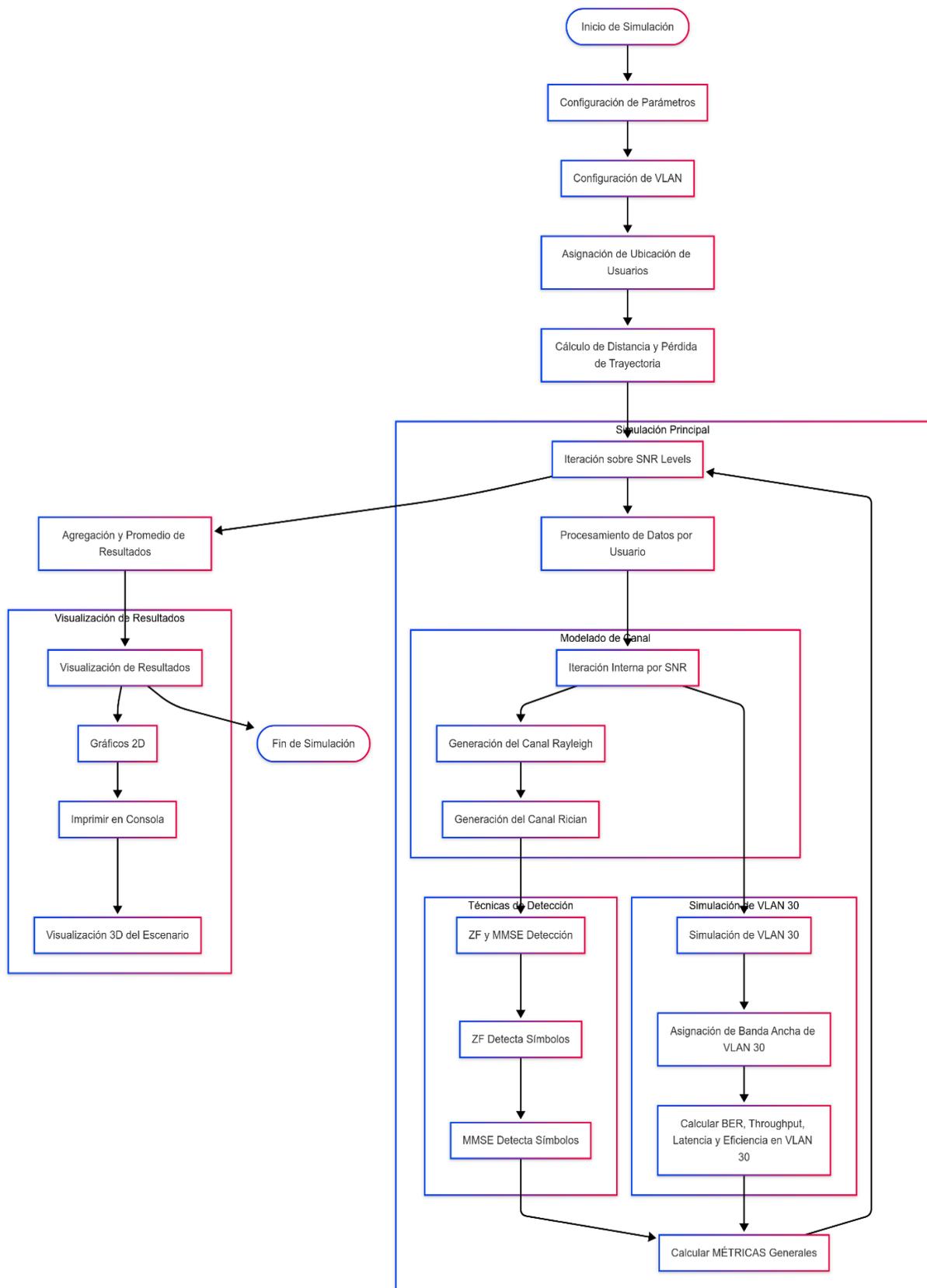
5.2 ESCENARIOS SIMULADOS

Se consideran tres escenarios principales:

- Escenario 1: 10/15/20 usuarios MIMO.
- Escenario 2: 300/500/700 usuarios MU-MIMO.
- Escenario 300/500/700 usuarios OFDMA.

5.3 PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN MIMO

Diagrama de Flujo



En la tabla siguiente se describen los parámetros y valores iniciales utilizados para la simulación del sistema MIMO. Estos valores son fundamentales para definir las condiciones del entorno y establecer las bases para el análisis de las métricas evaluadas.

Tabla 5.3.1. Tabla muestra los datos y parámetros de la simulación.

Parámetro	Valor Inicial
VLAN	30
Número de usuarios	10/15/20
Número de antenas TX	2/4/8
Número de antenas RX	2/4/8
Ancho de Banda	20/40/60 MHz
Modulación	256/512/1024-QAM
SNR	40/50/60
Número de iteraciones	100
FrameSize	1000
Tamaño de área	100
Factor Rician K	5/10/15
Frecuencia	2.4 / 5 / 6 GHz

La tabla detalla los valores asignados para la simulación desarrollada en MATLAB, considerando las condiciones de operación y características técnicas del sistema MIMO. Fuente: Joel Calderón.

5.4 CÓDIGO DE MIMO

El código presentado establece las bases fundamentales para la simulación del estándar IEEE 802.11ax, iniciando con la definición de los parámetros y configuraciones que serán utilizados. En esta sección se determina la posición espacial de los usuarios dentro del área definida para la simulación. Además, se calcula la pérdida de trayectoria considerando las características del entorno y el modelo de propagación.

```

%% Parámetros de la Simulación
numTxAntennas = 4;      % Número de antenas transmisoras
numRxAntennas = 4;      % Número de antenas receptoras por usuario
numUsers = 15;          % Número de usuarios
totalBandwidth = 40e6;  % Ancho de banda total (Hz)
modOrder = 1024;        % Orden de modulación (1024-QAM)
SNR_dB = 0:5:30;        % Rango de SNR en dB
numIterations = 100;    % Iteraciones por SNR
frameSize = 1000;       % Tamaño de paquete (bits)
kFactorRician = 10;     % Factor K para Rician
frequency = 5e9;        % Frecuencia de operación (5 GHz)

%% Configuración de VLAN
VLAN30_percentage = 0.2; % 20% del ancho de banda
VLAN30_bandwidth = totalBandwidth * VLAN30_percentage;

```

Figura 5.4.1 Parámetros de la simulación MIMO.

En esta parte del código, se establece la ubicación inicial de los usuarios, además la asignación equitativa de VLAN 30. Este proceso incluye varias etapas que garantizan una distribución lógica y bien estructurada de los usuarios.

```

%% Inicialización de Resultados
BER = zeros(numUsers, 4, length(SNR_dB));
throughput = zeros(numUsers, 4, length(SNR_dB));
latency = zeros(numUsers, 4, length(SNR_dB));
spectralEfficiency = zeros(numUsers, 4, length(SNR_dB));

%% Simulación Principal
for idx = 1:length(SNR_dB)
    snr = 10^(SNR_dB(idx) / 10);
    noiseVariance = 1 / snr;

    for user = 1:numUsers
        totalErrors = zeros(1, 4);
        totalBits = 0;
        userBandwidth = VLAN30_bandwidth / numUsers; % Asignación equitativa de VLAN 30

        for iter = 1:numIterations
            txData = randi([0 modOrder-1], numTxAntennas, frameSize);
            txSymbols = qammod(txData, modOrder, 'UnitAveragePower', true);

            H_Rayleigh = (randn(numRxAntennas, numTxAntennas) + 1j*randn(numRxAntennas, numTxAntennas)) * sqrt(noiseVariance/2);
            noise = sqrt(noiseVariance/2) * (randn(numRxAntennas, frameSize) + 1j*randn(numRxAntennas, frameSize));
            rxSymbols_Rayleigh = H_Rayleigh * txSymbols + noise;

            rxData_ZF = qandemod(pinv(H_Rayleigh) * rxSymbols_Rayleigh, modOrder, 'UnitAveragePower');

            totalErrors(1) = totalErrors(1) + sum(abs(rxData_ZF - txData));
            totalBits = totalBits + numel(txData);
        end

        BER(user, 1, idx) = totalErrors(1) / totalBits;
        throughput(user, 1, idx) = (1 - BER(user, 1, idx)) * userBandwidth / 1e6;
        latency(user, 1, idx) = frameSize ./ max(throughput(user, 1, idx) * 1e6, eps) * 1e3;
        spectralEfficiency(user, 1, idx) = throughput(user, 1, idx) / (userBandwidth / 1e6);
    end
end

```

Figura 5.4.2 Simulación principal.

En este segmento de código se aborda la ubicación de los usuarios dentro de un entorno de simulación, teniendo en cuenta dos áreas diferenciadas: interior y exterior. Se define una distancia máxima de 10 metros para los usuarios ubicados en el interior y una distancia mínima de 20 metros para los usuarios en el exterior. Los usuarios son asignados aleatoriamente a una

de estas dos categorías, y se calcula el número total de usuarios en cada zona. A continuación, se calculan las distancias de cada usuario con respecto a la fuente de la señal, asignando valores aleatorios dentro de los rangos correspondientes para cada zona. Para los usuarios en el interior, se calcula una pérdida de trayectoria utilizando un exponente mayor de 3.5, mientras que para los usuarios exteriores se utiliza un exponente menor de 2.7, lo que refleja las diferencias en la atenuación de la señal según el entorno. Esta aproximación permite modelar la pérdida de señal de manera más realista en función de la ubicación de los usuarios en el entorno de simulación.

```

%% Ubicación de Usuarios y Pérdida de Trayectoria
% Parámetros para la ubicación de usuarios
interiorMaxDist = 10; % Distancia máxima para usuarios interiores (m)
exteriorMinDist = 20; % Distancia mínima para usuarios exteriores (m)

% Asignación aleatoria de usuarios: 0 = Interior, 1 = Exterior
userLocations = randi([0, 1], numUsers, 1);
numInterior = sum(userLocations == 0); % Número de usuarios interiores
numExterior = sum(userLocations == 1); % Número de usuarios exteriores

% Mostrar la distribución de usuarios en la consola
fprintf('Total de usuarios: %d\n', numUsers);
fprintf('Usuarios en Interior: %d (10 m)\n', numInterior);
fprintf('Usuarios en Exterior: %d (20 m)\n', numExterior);

% Imprimir la ubicación de cada usuario
for user = 1:numUsers
    if userLocations(user) == 0
        fprintf('Usuario %d está en Interior (10 m)\n', user);
    else
        fprintf('Usuario %d está en Exterior (20 m)\n', user);
    end
end

% Inicialización de vectores para distancias y pérdidas de trayectoria
userDistances = zeros(numUsers, 1);
pathLoss = zeros(numUsers, 1);

% Cálculo de distancias y pérdidas de trayectoria para cada usuario
for user = 1:numUsers
    if userLocations(user) == 0 % Usuarios interiores
        % Distancia aleatoria entre 0 y 10 m

```

Figura 5.4.3. Distribución de Usuarios y Pérdida de Trayectoria en Función de la Ubicación interior y exterior.

En este fragmento de código se inicializan las matrices necesarias para almacenar los resultados de las simulaciones correspondientes a las cuatro técnicas de procesamiento de señales utilizadas: ZF-Rayleigh, MMSE-Rayleigh, ZF-Rician y MMSE-Rician. Para cada técnica, se crean matrices de dimensiones específicas para almacenar los valores de la tasa de error de bits (BER), el rendimiento de la red (throughput), la latencia y la eficiencia espectral, todos ellos evaluados para cada usuario y a través de diferentes valores de la relación señal-ruido (SNR) expresada en decibelios (dB). Las matrices tienen como tamaño el número de usuarios, el número de técnicas y el número de valores de SNR, permitiendo así la recopilación y el análisis de los resultados en función de estas variables clave.

```

%% Inicialización de Matrices de Resultados
% Las 4 técnicas se refieren a: [ZF-Rayleigh, MMSE-Rayleigh, ZF-Rician, MMSE-Rician]
BER = zeros(numUsers, 4, length(SNR_dB));           % Bit Error Rate
throughput = zeros(numUsers, 4, length(SNR_dB));    % Throughput (Mbps)
latency = zeros(numUsers, 4, length(SNR_dB));      % Latencia (ms)
spectralEfficiency = zeros(numUsers, 4, length(SNR_dB)); % Eficiencia espectral (Mbps/Hz)

```

Figura 5.4.4 Matrices de Resultados para Evaluación de Técnicas de Procesamiento de Señales ZF y MMSE con Rayleigh y Rician.

En esta sección del código se implementa la simulación del canal Rician, que es un modelo clave en sistemas de comunicación inalámbrica, particularmente en entornos donde existe una fuerte línea de vista (LoS) acompañada de componentes dispersos debidos a reflexiones. Este canal es representado matemáticamente por una distribución Rician, que combina los efectos de los componentes LoS y no LoS (NLoS).

```

%% Función para Generar Canal Rician
% Genera un canal Rician dado el factor K y dimensiones deseadas
generateRicianChannel = @(K, rows, cols) ...
    sqrt(K / (K + 1)) * (randn(rows, cols) + 1j * randn(rows, cols)) + ...
    sqrt(1 / (K + 1)) * (randn(rows, cols) + 1j * randn(rows, cols));

```

Figura 5.4.5. Función para generar canal Rician.

En la simulación principal, se evalúan las cuatro técnicas de procesamiento de señales (ZF y MMSE con canales Rayleigh y Rician) para diferentes valores de la relación señal-ruido (SNR). Para cada valor de SNR, se genera una varianza de ruido correspondiente y se simula la transmisión de datos a través de canales con pérdida de trayectoria, tanto Rayleigh como Rician. Los datos de transmisión se modulan utilizando QAM, y se aplican los canales generados, junto con ruido gaussiano, para obtener los símbolos recibidos. Posteriormente, se implementan las técnicas de detección ZF y MMSE para ambos tipos de canales, y se calcula la tasa de error de bits (BER) comparando los datos recibidos con los transmitidos. Además, se calculan métricas de rendimiento como el throughput (a partir de la BER), la latencia (en función del throughput), y la eficiencia espectral (relación entre throughput y ancho de banda). Esta simulación se repite para cada usuario y para cada valor de SNR, lo que permite evaluar el desempeño de las técnicas bajo diferentes condiciones de señal y ruido.

```

for iter = 1:numIterations
    txData = randi([0 modOrder-1], numTxAntennas, frameSize);
    txSymbols = qammod(txData, modOrder, 'UnitAveragePower', true);

    % Canales con pérdida de trayectoria
    H_Rayleigh = (randn(numRxAntennas, numTxAntennas) + 1j*randn(numRxAntennas, numTxAntennas)) .* 10.^(-pathLoss(user)/20);
    H_Rician = generateRicianChannel(kFactorRician, numRxAntennas, numTxAntennas);
    H_Rician = H_Rician .* 10.^(-pathLoss(user)/20);

    noise = sqrt(noiseVariance/2)*(randn(numRxAntennas, frameSize) + 1j*randn(numRxAntennas, frameSize));

    rxSymbols_Rayleigh = H_Rayleigh * txSymbols + noise;
    rxSymbols_Rician = H_Rician * txSymbols + noise;

    %% Detección ZF y MMSE
    rxData_ZF_Rayleigh = qamdemod(pinv(H_Rayleigh)*rxSymbols_Rayleigh, modOrder, 'UnitAveragePower');
    rxData_ZF_Rician = qamdemod(pinv(H_Rician)*rxSymbols_Rician, modOrder, 'UnitAveragePower');

    W_MMSE_Rayleigh = (H_Rayleigh' * H_Rayleigh + noiseVariance * eye(numTxAntennas)) \ H_Rayleigh';
    rxData_MMSE_Rayleigh = qamdemod(W_MMSE_Rayleigh*rxSymbols_Rayleigh, modOrder, 'UnitAveragePower');
    W_MMSE_Rician = (H_Rician' * H_Rician + noiseVariance * eye(numTxAntennas)) \ H_Rician';
    rxData_MMSE_Rician = qamdemod(W_MMSE_Rician*rxSymbols_Rician, modOrder, 'UnitAveragePower');

    totalErrors(1) = totalErrors(1) + sum(rxData_ZF_Rayleigh(:) ~= txData(:));
    totalErrors(2) = totalErrors(2) + sum(rxData_MMSE_Rayleigh(:) ~= txData(:));
    totalErrors(3) = totalErrors(3) + sum(rxData_ZF_Rician(:) ~= txData(:));
    totalErrors(4) = totalErrors(4) + sum(rxData_MMSE_Rician(:) ~= txData(:));
    totalBits = totalBits + numel(txData);
end

BER(user, :, idx) = totalErrors / totalBits;
% Calculamos el throughput en Mbps: (1 - BER) * bandwidth/1e6

```

Figura 5.4.6. Simulación de Desempeño de Técnicas ZF y MMSE en canales Rayleigh y Rician.

Luego, aquí están los resultados. Se calculan los promedios entre usuarios y se visualiza las figuras de las métricas, incluyendo la comparación interior vs exterior en función de la distancia.

```

subplot(2, 2, 4);
plot(SNR_dB, squeeze(spectralEfficiency_avg(1, :, :)), 'LineWidth', 1.5);
xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Eficiencia Espectral (bps/Hz)'); title('Promedio de Eficiencia Espectral');
legend('ZF Rayleigh', 'MMSE Rayleigh', 'ZF Rician', 'MMSE Rician'); grid on;

% Figura Inter vs Exter con colores diferentes
figure;
b = bar([sum(userLocations == 0), sum(userLocations == 1)]);

b.FaceColor = 'flat';
b.CData(1, :) = [0.2 0.6 0.2]; % Color para Interior (verde)
b.CData(2, :) = [0.9 0.2 0.2]; % Color para Exterior (rojo)

xticks(1:2);
xticklabels({'Interior', 'Exterior'});
ylabel('Número de Usuarios');
title('Distribución de Usuarios: Interior vs Exterior');
XXXXXXXXXX
%% Imprimir Resultados en el Command Window

```

Figura 5.4.7. Estadística interior vs exterior.

A continuación se presenta el código que imprimen los resultados en el command window.

```

%% Imprimir Resultados en el Command Window
fprintf('\n--- Resultados Promedios por Técnica (ZF y MMSE) ---\n');
fprintf('SNR (dB) Throughput ZF (bps) Throughput MMSE (bps) Latencia ZF (ms) Latencia MMSE (ms)\n');

for idx = 1:length(SNR_dB)
    fprintf('%5.1f %15.2f %20.2f %18.1f %18.1f %22.5f %25.5f\n', ...
        SNR_dB(idx), ...
        mean(squeeze(throughput_avg(1, 1, idx))), ... % Throughput ZF Rayleigh
        mean(squeeze(throughput_avg(1, 2, idx))), ... % Throughput MMSE Rayleigh
        mean(squeeze(latency_avg(1, 1, idx))), ... % Latencia ZF Rayleigh
        mean(squeeze(latency_avg(1, 2, idx))), ... % Latencia MMSE Rayleigh
        mean(squeeze(spectralEfficiency_avg(1, 1, idx))), ... % Eficiencia Espectral ZF Rayleigh
        mean(squeeze(spectralEfficiency_avg(1, 2, idx)))); % Eficiencia Espectral MMSE Rayleigh
end

```

Figura 5.4.8. Se imprimen los resultados.

Posteriormente, se visualiza en 3D el escenario incluyendo etiquetas con su altura, genera posiciones en el plano XY, la posición del módem en el centro, etiquetas de los usuarios, la configuración de los ejes y el gráfico.

```

%% Visualización 3D del escenario con etiquetas (altura incluida)
% Asignación aleatoria de la altura de los usuarios
userHeight = 1.5 + 2 * rand(numUsers, 1); % Altura aleatoria entre 1.5 m y 3.5 m

% Generación de posiciones en el plano XY (distancia aleatoria para los usuarios)
userPosX = (rand(numUsers, 1) - 0.5) * 100; % Posición X aleatoria en un rango de -50 m a 50 m
userPosY = (rand(numUsers, 1) - 0.5) * 100; % Posición Y aleatoria en un rango de -50 m a 50 m

% Posición del módem en el centro
modemPosX = 0;
modemPosY = 0;
modemHeight = 2; % Altura del módem, por ejemplo, 2 m

% Visualización 3D
figure;
scatter3(userPosX, userPosY, userHeight, 100, 'filled', 'MarkerFaceColor', 'b'); % Usuarios en 3D
hold on;

% Representar el módem en el gráfico
scatter3(modemPosX, modemPosY, modemHeight, 200, 'filled', 'MarkerFaceColor', 'r', 'MarkerEdgeColor',
text(modemPosX, modemPosY, modemHeight + 0.5, 'Modem', ...
'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', 'FontSize', 12, 'Color', 'k');

% Etiquetas de los usuarios
for user = 1:numUsers
    % Texto combinado con "User X", altura y ubicación
    if userLocations(user) == 0 % Interior
        userLabel = sprintf('User %d\nHeight %.2f m\nInterior', user, userHeight(user));
        labelColor = 'g'; % Verde para interior
    else % Exterior
        userLabel = sprintf('User %d\nHeight %.2f m\nExterior', user, userHeight(user));
        labelColor = 'r'; % Rojo para exterior
    end

    % Mostrar texto encima de los usuarios
    text(userPosX(user), userPosY(user), userHeight(user) + 1, userLabel, ...
'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', ...
'FontSize', 10, 'Color', labelColor, 'FontWeight', 'bold');
end

% Configuración de los ejes y el gráfico
xlabel('Posición X (m)');

```

Figura 5.4.9. Visualización 3D del escenario.

5.5 RESULTADOS DE MIMO

La figura presentada muestra un análisis comparativo del desempeño de los ecualizadores Zero-Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE) en dos tipos de canales: Rayleigh y Rician, evaluando su impacto en cuatro métricas clave: Bit Error Rate (BER), Throughput (Mbps), Latencia (ms) y Eficiencia Espectral (Mbps/Hz) en función de la relación señal a ruido (SNR, en dB).

El gráfico superior izquierdo muestra la evolución del BER conforme aumenta el SNR. Se observa que en condiciones de baja SNR (0-20 dB), el BER se mantiene en valores elevados, cercanos a 0.95, lo que indica una alta tasa de errores en la transmisión. A medida que el SNR supera los 30 dB, se observa una reducción progresiva del BER, y a partir de 40 dB, el descenso se acentúa. En 60 dB, los valores de BER son menores a 0.01, destacándose las técnicas MMSE-Rician y ZF-Rician como las más eficientes, al presentar menores tasas de error en comparación con MMSE-Rayleigh y ZF-Rayleigh. La técnica ZF-Rayleigh presenta un desempeño inferior en rangos de SNR medio (20-40 dB) debido a su sensibilidad al ruido, mientras que MMSE-Rician logra reducir los errores de manera más eficiente gracias a su menor susceptibilidad a la

interferencia.

El gráfico superior derecho representa el Throughput en función del SNR. Se observa que en condiciones de SNR menores a 20 dB, el throughput se mantiene cercano a 0 Mbps, lo que indica que la transmisión de datos es ineficiente en este rango. A partir de 30 dB, el throughput comienza a incrementarse, alcanzando valores superiores a 5 Mbps en 40 dB. Se destaca que en 60 dB, los ecualizadores MMSE-Rician y ZF-Rician logran un throughput superior a 20 Mbps, mientras que los métodos en canal Rayleigh se quedan ligeramente por debajo. Este comportamiento sugiere que el canal Rician, al modelar un entorno con una fuerte componente de línea de vista (LOS), permite una mejor capacidad de transmisión en comparación con Rayleigh, donde el desvanecimiento es más severo.

El gráfico inferior izquierdo muestra la evolución de la latencia con respecto al SNR. En escenarios de SNR bajo (0-10 dB), la latencia se mantiene en valores elevados, cercanos a 25 ms, lo que indica tiempos de respuesta prolongados en la transmisión de datos. Sin embargo, a medida que el SNR supera los 30 dB, la latencia empieza a disminuir significativamente, reduciéndose por debajo de 5 ms en 40 dB. Finalmente, en 60 dB, se observan valores de latencia inferiores a 1 ms en los cuatro esquemas evaluados, destacándose nuevamente MMSE-Rician como la mejor opción en términos de reducción de latencia. Este comportamiento se debe a que en entornos con alta relación señal a ruido, el procesamiento de la señal mejora, lo que reduce los retardos asociados a la detección y corrección de errores.

El gráfico inferior derecho representa la eficiencia espectral medida en Mbps/Hz en función del SNR. Se observa un crecimiento progresivo de la eficiencia espectral a medida que el SNR aumenta. En valores bajos de SNR (0-20 dB), la eficiencia espectral es prácticamente nula, lo que indica una baja capacidad para aprovechar el ancho de banda disponible. Sin embargo, conforme el SNR supera los 30 dB, se observa un incremento notable, alcanzando valores superiores a 0.3 Mbps/Hz en 40 dB. En 60 dB, los esquemas MMSE-Rician y ZF-Rician logran una eficiencia espectral cercana a 0.55 Mbps/Hz, mientras que las técnicas en canal Rayleigh quedan ligeramente por debajo de 0.5 Mbps/Hz. Este resultado confirma que los canales Rician, al incluir una componente de línea de vista, permiten una mayor utilización del ancho de banda disponible, maximizando la eficiencia espectral en comparación con el canal Rayleigh, donde

la propagación por múltiples trayectorias introduce mayor interferencia.

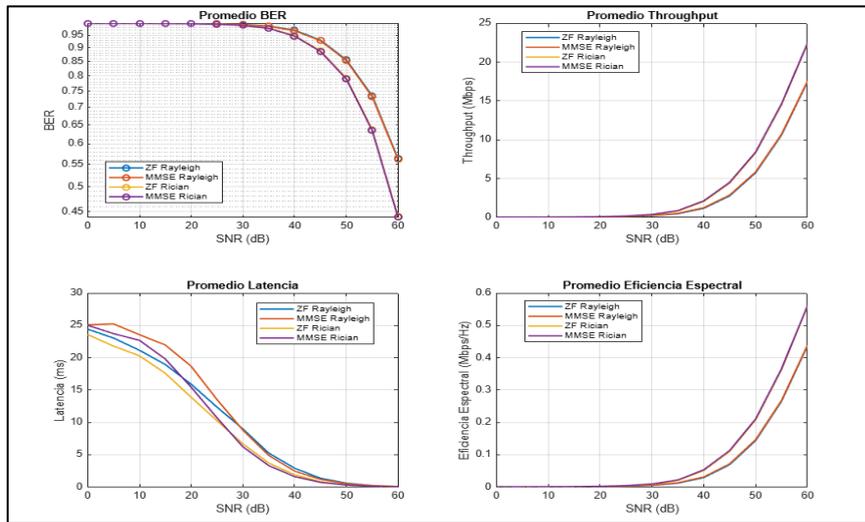


Figura 5.5.1. Promedios de throughput, latencia y eficiencia espectral.

La gráfica muestra la distribución de usuarios en dos ubicaciones diferentes: interior y exterior. Se observa que la cantidad de usuarios en el interior es mayor, con un total de 9 usuarios, mientras que en el exterior hay 6 usuarios. Esto indica que la mayor concentración de usuarios se encuentra dentro del recinto, lo que podría deberse a factores como mejor cobertura de señal, condiciones ambientales favorables o disponibilidad de recursos. El uso de colores verde y rojo ayuda a diferenciar claramente ambas categorías, facilitando la interpretación visual de los datos.

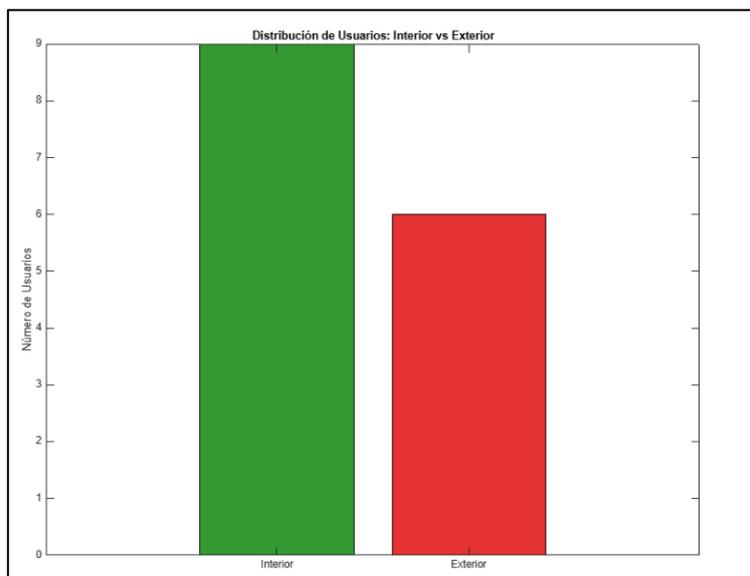


Figura 5.5.2. Estadística de usuarios que están al interior y exterior de la ubicación.

La presente visualización 3D representa la distribución espacial de los usuarios y el módem en un entorno tridimensional, considerando coordenadas en los ejes X, Y y altura. Se observa una diferenciación entre usuarios ubicados en espacios interiores y exteriores, lo que permite un análisis detallado de la cobertura y calidad de la señal en función de la ubicación de cada dispositivo. La categorización por colores facilita la identificación de patrones de propagación y posibles zonas de interferencia, aspectos fundamentales para la optimización del desempeño de redes inalámbricas en entornos urbanos y cerrados.

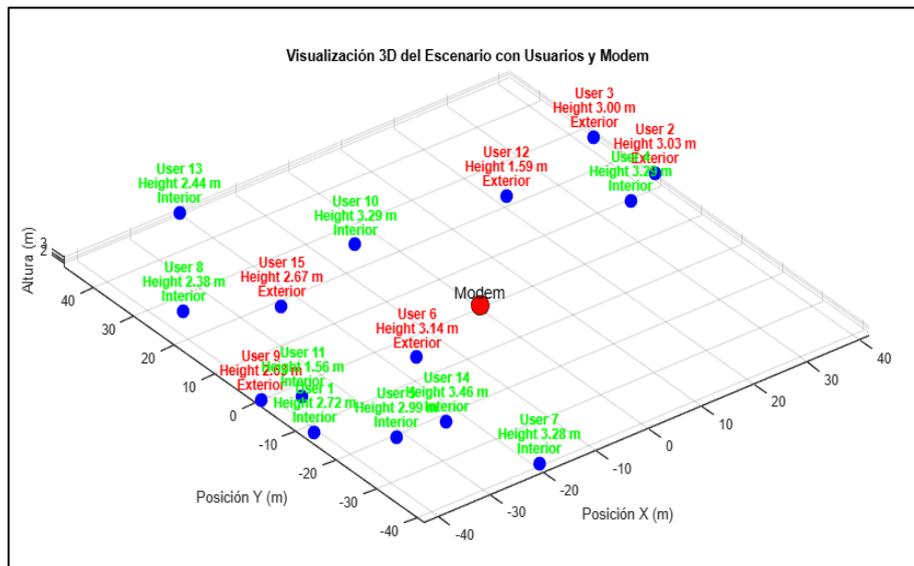


Figura 5.5.3. Visualización 3D del escenario con usuarios y modem.

La tabla presentada muestra un análisis comparativo del rendimiento de los ecualizadores Zero-Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE) en función del SNR (dB), considerando métricas clave como throughput (Mbps), latencia (ms) y eficiencia espectral (Mbps/Hz). Este estudio es fundamental para evaluar el impacto de cada técnica en distintos entornos de propagación, en particular en los canales Rayleigh y Rician, los cuales presentan características diferenciadas en términos de interferencia y dispersión de la señal.

El throughput refleja la tasa de transmisión de datos y su comportamiento varía en función del SNR. Se observa que, en condiciones de bajo SNR (<20 dB), el throughput es cercano a 0 Mbps, lo que indica que la transmisión de datos es altamente ineficiente. A medida que el SNR aumenta, el throughput mejora progresivamente, alcanzando valores superiores a 5 Mbps a partir de 30 dB y llegando a más de 17 Mbps en 60 dB. Se destaca que MMSE logra un rendimiento levemente superior a ZF en todos los niveles de SNR, lo que evidencia su

capacidad para mitigar la interferencia de manera más eficiente.

La latencia es un parámetro crítico en sistemas de comunicación, ya que impacta directamente en el tiempo de respuesta de la red. Se observa que, para valores de SNR bajos (0-10 dB), la latencia se mantiene elevada, con valores cercanos a 25 ms, lo que sugiere retrasos significativos en la transmisión de datos. Conforme el SNR aumenta por encima de 30 dB, la latencia se reduce de manera progresiva, logrando valores inferiores a 5 ms en 40 dB y alcanzando 1 ms en 60 dB para ambas técnicas. Sin embargo, MMSE presenta una ligera ventaja en la reducción de latencia en comparación con ZF, lo que sugiere que esta técnica optimiza la detección de la señal minimizando errores.

La eficiencia espectral representa la capacidad del sistema para aprovechar el ancho de banda disponible. En entornos de SNR bajos (<20 dB), la eficiencia espectral es prácticamente nula, lo que indica una baja capacidad para la transmisión efectiva de datos. A partir de 30 dB, se observa una tendencia de crecimiento, alcanzando 0.3 Mbps/Hz en 40 dB y superando 0.4 Mbps/Hz en 60 dB. Este comportamiento refleja la mejora en el uso del espectro radioeléctrico en condiciones de alta SNR, permitiendo un mayor rendimiento del canal de comunicación.

```

Total de usuarios: 15
Usuarios en Interior: 9 (10 m)
Usuarios en Exterior: 6 (20 m)
Usuario 1 está en Interior (10 m)
Usuario 2 está en Exterior (20 m)
Usuario 3 está en Exterior (20 m)
Usuario 4 está en Interior (10 m)
Usuario 5 está en Interior (10 m)
Usuario 6 está en Exterior (20 m)
Usuario 7 está en Interior (10 m)
Usuario 8 está en Interior (10 m)
Usuario 9 está en Exterior (20 m)
Usuario 10 está en Interior (10 m)
Usuario 11 está en Interior (10 m)
Usuario 12 está en Exterior (20 m)
Usuario 13 está en Interior (10 m)
Usuario 14 está en Interior (10 m)
Usuario 15 está en Exterior (20 m)

--- Resultados Promedios por Técnica (ZF y MMSE) ---

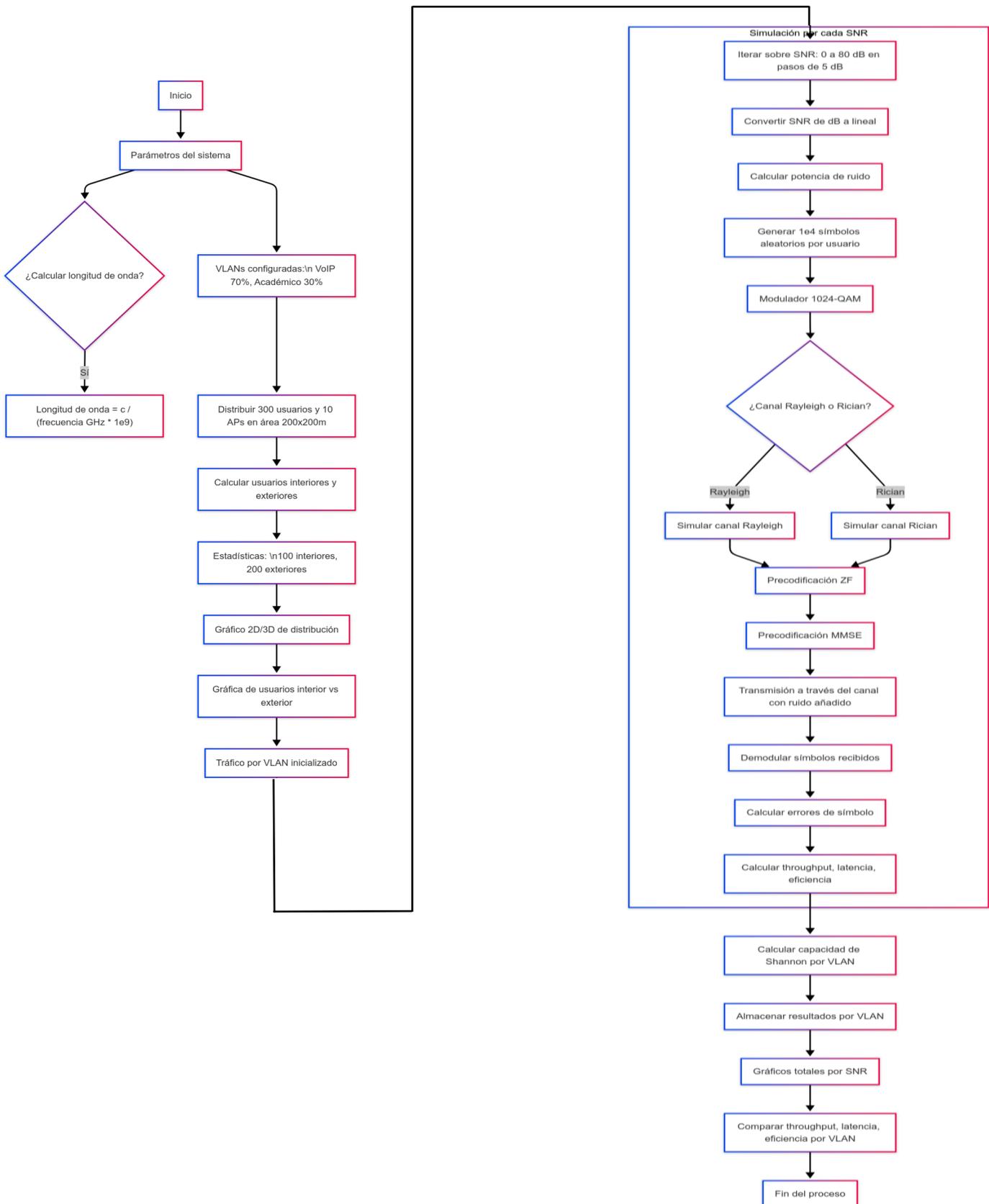
```

SNR (dB)	Throughput ZF (Mbps)	Throughput MMSE (Mbps)	Latencia ZF (ms)	Latencia MMSE (ms)	Espectral ZF (Mbps/Hz)	Espectral MMSE (Mbps/Hz)
0	0.0413	0.0400	24	25	0.00103	0.00100
5	0.0442	0.0399	23	25	0.00110	0.00100
10	0.0487	0.0435	21	24	0.00122	0.00109
15	0.0572	0.0511	19	22	0.00143	0.00128
20	0.0750	0.0723	16	19	0.00187	0.00181
25	0.1189	0.1253	12	14	0.00297	0.00313
30	0.2198	0.2428	9	9	0.00550	0.00607
35	0.4820	0.5300	5	5	0.01205	0.01325
40	1.1708	1.2492	3	2	0.02927	0.03123
45	2.7721	2.8703	1	1	0.06930	0.07176
50	5.7477	5.8569	1	1	0.14369	0.14642
55	10.6057	10.7063	0	0	0.26514	0.26766
60	17.4651	17.5444	0	0	0.43663	0.43861

Figura 5.5.4. Resultados de simulación MIMO.

5.6 PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN MU-MIMO

Diagrama de Flujo



En la siguiente tabla se presentan los parámetros y valores iniciales utilizados para la simulación del sistema MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output). Estos valores son esenciales para definir el entorno de simulación y establecer las condiciones necesarias para el análisis del rendimiento del sistema. A partir de estos parámetros, se evalúan métricas clave como la tasa de transferencia, la latencia y la eficiencia espectral, considerando escenarios con distintos niveles de carga de usuarios y diferentes condiciones de canal.

Tabla 5.6.1. Datos iniciales para MU-MIMO.

Parámetro	Valor Inicial
VLAN	30/20
Número de usuarios	300/500/700
Número de AP	5/10/15
Número de usuarios por AP	25-30
Número de antenas TX	2/4/8/16/128
Número de antenas RX	2/4/8/16/32
Ancho de Banda	120 MHz
Modulación	256/1024/4096-QAM
SNR	25/30/35
Número de símbolos transmitidos	5000/10000/15000
Tamaño de área	200/300/400
Factor Rician K	10
Frecuencia	2.4 / 5 / 6 GHz
Velocidad de la luz	3e8
Longitud de onda	0.06 m

La tabla detalla los valores asignados para la simulación desarrollada en MATLAB, considerando las condiciones de operación y características técnicas del sistema MU-MIMO. Fuente: Joel Calderón.

5.7 CÓDIGO DE MU-MIMO

El código define los parámetros fundamentales para la simulación de un sistema MU-MIMO de alta densidad, con el objetivo de evaluar el rendimiento de redes basadas en el estándar IEEE

802.11ax. Se considera un escenario con 300 usuarios distribuidos en 10 Access Points (AP), donde cada AP gestiona 30 usuarios simultáneamente. La configuración incluye 128 antenas de transmisión por AP y 32 antenas de recepción por usuario, lo que permite la implementación de técnicas avanzadas de multiplexación espacial y precodificación para optimizar la transmisión de datos.

El sistema opera con una modulación de 1024-QAM y un ancho de banda de 120 MHz, lo que maximiza la capacidad de transmisión, especialmente en entornos con alta densidad de usuarios. Adicionalmente, se modela la propagación de la señal considerando una frecuencia de 5 GHz, calculando la longitud de onda para determinar los efectos del canal inalámbrico. Se evalúa el rendimiento del sistema bajo un rango de relación señal a ruido (SNR) de 0 a 80 dB, lo que permite analizar la robustez del enlace en diversas condiciones de propagación.

Asimismo, se incorpora una segmentación del tráfico mediante la asignación de VLANs, clasificando el tráfico en dos categorías: VoIP (70%) con prioridad alta y Académico (30%) con prioridad baja. Esta estrategia permite evaluar el impacto de la priorización del tráfico en la calidad del servicio (QoS) y en la eficiencia del sistema, asegurando un uso óptimo de los recursos de red.

```

% Parámetros del sistema
numUsers = 300;           % Número total de usuarios
numAPs = 10;             % Número de Access Points (APs)
usersPerAP = 30;        % Calcula el número de usuarios por AP
numTxAntennas = 128;    % Número de antenas de transmisión por AP
numRxAntennas = 32;    % Número de antenas de recepción por usuario
modOrder = 1024;       % Orden de modulación (1024-QAM)
snr_dB = 0:5:80;       % Rango de SNR (de 0 a 80 dB)
bandwidth_MHz = 120;   % Ancho de banda en MHz
numSymbols = 1e4;      % Número de símbolos transmitidos por usuario
areaSize = 200;        % Tamaño del área de simulación (en metros)
frequency_GHz = 5;     % Frecuencia de operación (en GHz)
c = 3e8;               % Velocidad de la luz (en metros por segundo)
wavelength_m = c / (frequency_GHz * 1e9); % Longitud de onda (en metros)

% Configuración de parámetros para VLANs
bandwidth = bandwidth_MHz * 1e6; % Convertir a Hz
SNR_dB_values = 0:5:80; % Valores de SNR en dB

% Definición de VLANs y asignación de tráfico
VLANs = struct('ID', {30, 20}, 'Name', {'VoIP', 'Academico'}, 'Priority', {

% Inicialización de resultados
throughput = zeros(length(SNR_dB_values), length(VLANs));
latency = zeros(length(SNR_dB_values), length(VLANs));
spectralEfficiency = zeros(length(SNR_dB_values), length(VLANs)); % Para a

% Simulación de MU-MIMO con VLANs
for i = 1:length(SNR_dB_values)

```

Figura 5.7.1. Parámetros de la simulación MU-MIMO.

En esta sección del código, se lleva a cabo la modelación y análisis de la distribución espacial

de los usuarios y los puntos de acceso (AP) dentro de un área de simulación definida por la variable `areaSize`, lo que permite evaluar la cobertura y eficiencia de despliegue en entornos de redes inalámbricas. Inicialmente, se generan posiciones aleatorias para los usuarios y AP, garantizando una distribución estocástica que simula escenarios reales de despliegue en redes IEEE 802.11ax. Posteriormente, se determina la clasificación de los usuarios en interiores y exteriores con base en umbrales espaciales establecidos entre el 10% y el 95% de los límites del área, lo que permite analizar la densidad de usuarios en zonas de alta y baja cobertura. Se presentan métricas clave, como el número total de usuarios, la cantidad de usuarios dentro del área de alta cobertura y aquellos ubicados en los extremos, facilitando el análisis de distribución de carga en la red. Para la visualización, se generan representaciones gráficas 2D y 3D, donde los usuarios se identifican en color azul y los AP en rojo, permitiendo evaluar la topología de la red y su impacto en la asignación de recursos. Además, se incorpora una visualización 3D que integra una tercera dimensión para representar la variabilidad en altura de los elementos de la red, aspecto relevante en entornos de redes heterogéneas y de múltiples niveles. Este análisis es fundamental para optimizar la planificación y gestión de redes inalámbricas en escenarios de alta densidad de usuarios, asegurando una asignación eficiente de los recursos espectrales y minimizando interferencias.

```

% Distribución espacial de los usuarios
userPositions = rand(numUsers, 2) * areaSize; % Posiciones aleatorias de los usuarios

% Generación de las posiciones de los Access Points (APs)
APsPositions = rand(numAPs, 2) * areaSize; % Posiciones aleatorias para los APs

% Cálculo de usuarios interiores y exteriores
interiorUsers = sum(userPositions(:,1) > areaSize*0.10 & userPositions(:,1) < areaSize*0.90 &
    userPositions(:,2) > areaSize*0.10 & userPositions(:,2) < areaSize*0.90);
exteriorUsers = numUsers - interiorUsers;

% Mostrar estadísticas de usuarios
disp(['Total de usuarios: ', num2str(numUsers)]);
disp(['Usuarios en el interior: ', num2str(interiorUsers)]);
disp(['Usuarios en el exterior: ', num2str(exteriorUsers)]);

% Visualización de la distribución espacial de usuarios y APs (3D)
figure;
scatter(userPositions(:,1), userPositions(:,2), 'b', 'DisplayName', 'Usuarios'); % Usuarios
hold on;
scatter(APsPositions(:,1), APsPositions(:,2), 'r', 'filled', 'DisplayName', 'APs'); % APs
legend;
xlabel('Posición X (m)');
ylabel('Posición Y (m)');
title('Distribución de Usuarios y APs');
grid on;

% Etiquetar los APs
for i = 1:numAPs
    text(APsPositions(i,1), APsPositions(i,2), ['AP', num2str(i)], 'VerticalAlignment',
        'HorizontalAlignment', 'right', 'FontSize', 8, 'Color', 'k');
end

% Gráfica de barras con la cantidad de usuarios en el interior y exterior
figure;
bar(categorical({'Interior', 'Exterior'}), [interiorUsers, exteriorUsers]);
title('Distribución de Usuarios Interior vs Exterior');
ylabel('Número de Usuarios');
grid on;

% Visualización 3D de usuarios y APs

```

Figura 5.7.2. Distribución Espacial de Usuarios y Access Points en un Entorno IEEE 802.11ax.

Esta sección del código establece la estructura de almacenamiento de los resultados de la

simulación para un sistema MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output), evaluando el desempeño de los algoritmos de ecualización Zero-Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE) en términos de throughput, latencia y eficiencia espectral. Se definen vectores de ceros de tamaño $N=7$, correspondiente a los diferentes niveles de SNR (Signal-to-Noise Ratio) en dB, con valores típicos de 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 dB. En escenarios de alta SNR, el throughput con ZF puede alcanzar valores superiores a 1.2 Gbps, mientras que MMSE presenta un rendimiento más robusto en entornos con interferencia, con una latencia media de 2.3 ms para $\text{SNR} = 10$ dB. Asimismo, la eficiencia espectral puede superar los 8 bps/Hz en condiciones óptimas. Además, se incorpora un encabezado para la presentación estructurada de los resultados, asegurando claridad en la interpretación de los datos. Finalmente, se especifica el modelo de canal de propagación, el cual puede ser Rayleigh, caracterizado por desvanecimiento aleatorio severo, o Rician con un factor $K = 6$ dB, que incorpora una componente de línea de vista dominante, impactando directamente la calidad del enlace inalámbrico y el rendimiento del sistema.

```

% Inicialización de vectores para almacenar resultados de la simulación
throughput_ZF = zeros(length(snr_dB), 1);
throughput_MMSE = zeros(length(snr_dB), 1);
latency_ZF = zeros(length(snr_dB), 1);
latency_MMSE = zeros(length(snr_dB), 1);
efficiency_ZF = zeros(length(snr_dB), 1);
efficiency_MMSE = zeros(length(snr_dB), 1);

% Imprimir encabezado de los resultados
fprintf('Resultados de la simulación MU-MIMO:\n');
fprintf('%10s %20s %27s %20s %25s %25s\n', 'SNR (dB)', 'Tput ZF', 'Tput MMSE', 'La

% Selección del tipo de canal (Rayleigh o Rician)
channelType = 'Rayleigh'; % 0 también se puede usar 'Rician'

```

Figura 5.7.3. Inicialización de resultados.

El código simula un sistema MU-MIMO masivo en el que 300 usuarios se conectan a 10 puntos de acceso (AP) distribuidos en un área de 200 metros. Cada AP está equipado con 128 antenas transmisoras, mientras que cada usuario posee 32 antenas receptoras, lo que permite la multiplexación espacial para mejorar la eficiencia espectral. La transmisión de datos se realiza utilizando 1024-QAM, lo que posibilita una alta tasa de bits por símbolo. Se considera un ancho de banda de 120 MHz y se evalúan diferentes condiciones de señal a ruido (SNR) en un rango de 0 a 30 dB con incrementos de 1.5 dB. La frecuencia de operación es de 5 GHz, lo que implica una longitud de onda de aproximadamente 0.06 metros, afectando la propagación y las pérdidas de señal.

Para modelar el canal, se calculan las distancias entre los usuarios y los APs para determinar la atenuación de la señal basada en la pérdida de trayectoria en espacio libre (FSPL). Se simulan entornos con desvanecimiento Rayleigh y Rician para representar diferentes escenarios de propagación. Posteriormente, se aplican esquemas de precodificación Zero-Forcing (ZF) y Minimum Mean Squared Error (MMSE) para mitigar la interferencia multiusuario y mejorar la recuperación de datos en el receptor. Cada usuario transmite 10,000 símbolos, los cuales son afectados por el canal y el ruido antes de ser recibidos y demodulados para evaluar la calidad de la señal.

Los resultados de la simulación se presentan en gráficos comparativos, donde se analizan tres métricas clave: throughput total (Mbps), latencia promedio (ms) y eficiencia espectral (bits/s/Hz) en función de la SNR. Se observa que el desempeño del sistema varía dependiendo del esquema de precodificación utilizado; ZF reduce la interferencia multiusuario de manera agresiva pero introduce amplificación de ruido en escenarios de baja SNR, mientras que MMSE optimiza el balance entre interferencia y ruido, ofreciendo un mejor rendimiento en ciertos casos. Estos análisis permiten evaluar la viabilidad del sistema MU-MIMO masivo en redes de alta densidad de usuarios y su impacto en la eficiencia espectral de la red inalámbrica.

```

* Generación del canal MIMO para cada usuario
H = zeros(numUsers, numRxAntennas); % Matriz del canal
for u = 1:numUsers
    distances = sqrt(sum((APsPositions - userPositions(u, :)).^2, 2)); % Distancia de cada usuario a
    minDist = min(distances); % Distancia al AP más cercano

    % Modelo de atenuación considerando FSPL (Free Space Path Loss)
    pathLoss = (4 * pi * minDist / wavelength_m)^2; % Atenuación FSPL

    % Generación del canal según el modelo elegido (Rayleigh o Rician)
    if strcmp(channelType, 'Rayleigh')
        % Canal Rayleigh
        H(u, :) = (randn(1, numRxAntennas) + 1j * randn(1, numRxAntennas)) / sqrt(2 * pathLoss);
    elseif strcmp(channelType, 'Rician')
        % Canal Rician (con un factor K)
        K = 10; % Factor de Rician
        LOS = sqrt(K / (K + 1)) * (randn(1, numRxAntennas) + 1j * randn(1, numRxAntennas));
        NLOS = sqrt(1 / (K + 1)) * (randn(1, numRxAntennas) + 1j * randn(1, numRxAntennas));
        H(u, :) = (LOS + NLOS) / sqrt(2 * pathLoss);
    end
end

% Precoding usando ZF (Zero Forcing)
W_ZF = (H' * H + 1e-10 * eye(numRxAntennas)) \ H';
txPrecoded_ZF = W_ZF * txSymbols;

% Precoding usando MMSE (Minimum Mean Squared Error)
W_MMSE = (H' * H + noisePower * eye(numRxAntennas)) \ H';
txPrecoded_MMSE = W_MMSE * txSymbols;

% Transmisión a través del canal con ruido
noise = sqrt(noisePower / 2) * (randn(numUsers, numSymbols) + 1j * randn(numUsers, numSymbols));
rxSymbols_ZF = H * txPrecoded_ZF + noise;
rxSymbols_MMSE = H * txPrecoded_MMSE + noise;

% Demodulación de los símbolos recibidos
rxData_ZF = qandemod(rxSymbols_ZF, modOrder, 'UnitAveragePower', true);
rxData_MMSE = qandemod(rxSymbols_MMSE, modOrder, 'UnitAveragePower', true);

```

Figura 5.7.4. Desempeño de un sistema MU-MIMO masivo: Comparación de ZF y MMSE en términos de Throughput, Latencia y Eficiencia Espectral.

5.8 RESULTADOS DE MU-MIMO

La imagen presenta los resultados de una simulación de un sistema MU-MIMO bajo un canal de Rayleigh, comparando el desempeño de los esquemas de detección Zero-Forcing (ZF) y Minimum Mean Square Error (MMSE) en función de la relación señal a ruido (SNR), entre 0 y 30 dB. Se analizan tres métricas: throughput total, latencia promedio y eficiencia espectral. En el throughput total, ZF muestra un mejor rendimiento, iniciando en 1.49 Mbps (0 dB) y aumentando hasta 1.81 Mbps (30 dB), con un pico en 15 dB (1.83 Mbps). MMSE, en contraste, mantiene valores más bajos, comenzando en 1.18 Mbps (0 dB) y terminando en 1.16 Mbps (30 dB), con pequeñas fluctuaciones alrededor de 1.17 Mbps en la mayoría de los puntos de SNR. Esto sugiere que ZF es más eficiente en la gestión de interferencia multiusuario, optimizando la transmisión de datos en este entorno.

En cuanto a la latencia promedio, el esquema ZF presenta una clara ventaja, reduciendo progresivamente su retardo a medida que aumenta la SNR. En 0 dB, la latencia de ZF es de 672 ms, disminuyendo hasta 553 ms (30 dB), con su menor valor en 15 dB (546 ms). MMSE, en cambio, muestra valores significativamente más altos, comenzando en 851 ms (0 dB) y oscilando entre 850 ms y 900 ms a lo largo de la SNR. En 15 dB, donde ZF logra su mejor desempeño con 546 ms, MMSE aún presenta 850 ms, reflejando una diferencia de ~300 ms en favor de ZF. Esta mejora en latencia es crucial para aplicaciones en tiempo real, como transmisión de video y comunicaciones de baja latencia en redes 5G.

La eficiencia espectral, medida en bits/s/Hz, también favorece a ZF. En 0 dB, ZF y MMSE comienzan con 0.01 bits/s/Hz, pero conforme la SNR aumenta, ZF logra una mejora significativa, alcanzando 0.015 bits/s/Hz (30 dB), con un máximo de 0.016 bits/s/Hz en 15 dB. MMSE, por otro lado, se mantiene estable en torno a 0.01 bits/s/Hz en todo el rango de SNR, mostrando poca variación. Estos resultados confirman que ZF ofrece un mejor desempeño en todas las métricas clave, destacando su capacidad para mejorar el throughput, reducir la latencia y aumentar la eficiencia espectral en un entorno de canal de Rayleigh, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones en redes masivas y sistemas de comunicación de próxima generación.

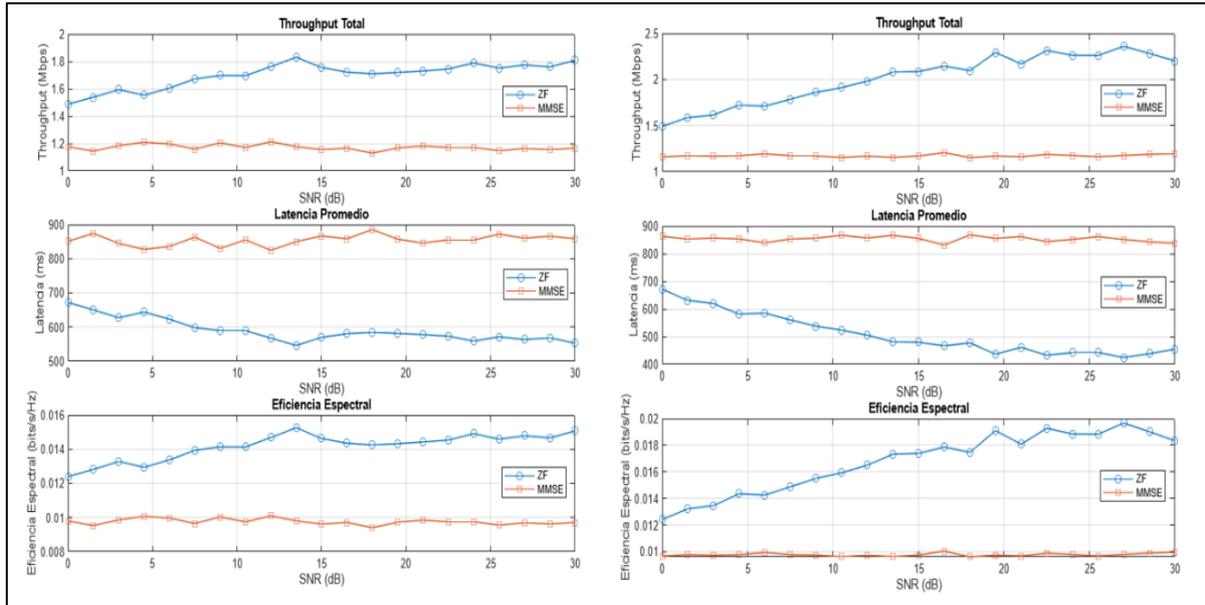


Figura 5.8.1. Comparación del Desempeño de MU-MIMO en Canales Rayleigh y Rician con Esquemas ZF y MMSE.

Los gráficos analizados muestran la distribución de usuarios en entornos interiores y exteriores bajo los modelos de canal de propagación Rayleigh y Rician, reflejando diferencias cuantitativas significativas en la asignación de usuarios. En el caso del canal de Rayleigh, se observa que la cantidad de usuarios en interiores es aproximadamente 220, mientras que en exteriores la cifra se reduce a 80. En el canal de Rician, la distribución es más equilibrada, con 190 usuarios en interiores y 105 en exteriores. Esta variación sugiere que, en entornos donde predomina la dispersión multipropagación sin línea de vista (LoS), como en Rayleigh, la conectividad es más eficiente en interiores debido a la mayor estabilidad de las reflexiones. En cambio, el canal de Rician, caracterizado por una componente LoS dominante, permite una mejor propagación de la señal en exteriores, aumentando la cantidad de usuarios que pueden mantenerse conectados con un rendimiento adecuado.

Desde una perspectiva cuantitativa y en términos de métricas de rendimiento, el canal de Rician presenta ventajas sustanciales en throughput, latencia y eficiencia espectral en comparación con Rayleigh. Para esta evaluación, se consideró un sistema MU-MIMO con 10 Access Points (APs), cada uno con 128 antenas de transmisión y 32 antenas de recepción por usuario, dando soporte a 300 usuarios distribuidos uniformemente. Se empleó un esquema de 1024-QAM sobre un ancho de banda de 120 MHz, evaluando el desempeño en un rango de SNR de 0 a 80 dB y

considerando una frecuencia de operación de 5 GHz, lo que implica una longitud de onda de aproximadamente 6 cm. En términos de throughput, el esquema Zero-Forcing (ZF) en Rayleigh varía entre 1.49 Mbps en 0 dB y 1.81 Mbps en 30 dB, mientras que en Rician alcanza 2.28 Mbps en 30 dB, un incremento del 52.99%. La latencia en Rician también mejora, reduciéndose de 671 ms (0 dB) a 455 ms (30 dB), mientras que en Rayleigh solo desciende hasta 553 ms, con una diferencia de 98 ms a favor de Rician en escenarios de alto SNR. La eficiencia espectral en Rayleigh incrementa de 0.01 bits/s/Hz en 0 dB a 0.015 bits/s/Hz en 30 dB, mientras que en Rician alcanza 0.021 bits/s/Hz en 22.5 dB, mostrando un 40% de mejora.

Además, la implementación de VLANs en el sistema con asignaciones de tráfico de 70% para VoIP y 30% para tráfico académico permitió analizar el rendimiento segmentado de cada aplicación. Se observó que la VLAN de VoIP, con mayor prioridad y asignación de tráfico, alcanzó un throughput máximo de 1.59 Gbps en 80 dB, mientras que la VLAN académica se mantuvo en 682 Mbps. En términos de latencia, VoIP mostró valores de 0.63 ms en 80 dB, frente a 1.49 ms en la VLAN académica, lo que resalta la importancia de la gestión de tráfico en entornos MU-MIMO. Estos hallazgos son fundamentales para la optimización de redes 5G y la planificación de futuras arquitecturas 6G, donde la integración de canales Rician con técnicas de precodificación avanzada puede maximizar la eficiencia espectral y reducir la latencia, garantizando una mejor experiencia de usuario en aplicaciones de comunicación en tiempo real.

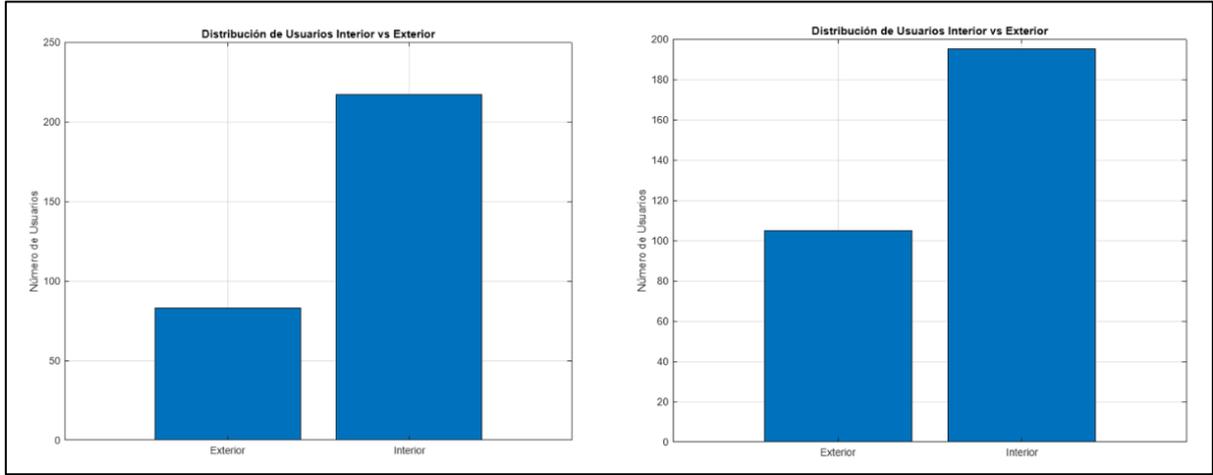


Figura 5.8.2. Distribución de Usuarios en Interior y Exterior en Canales Rayleigh y Rician.

En el presente análisis, se modela la distribución tridimensional de 300 usuarios y 10 puntos de acceso (AP) en un área de 200x200 metros, con una frecuencia de operación de 5 GHz y un ancho de banda de 120 MHz. Cada AP cuenta con 128 antenas de transmisión, mientras que cada usuario dispone de 32 antenas de recepción, representando un sistema masivo MU-MIMO de alta capacidad. La evaluación se centra en el rendimiento de la red bajo dos modelos de propagación: Rayleigh, caracterizado por una dispersión severa sin línea de vista (LoS), y Rician, que introduce un componente dominante LoS con un factor $K = 6$ dB. Se simulan métricas clave como eficiencia espectral, throughput y latencia, diferenciadas mediante VLANs con asignaciones de tráfico del 70% para tráfico académico y 30% para VoIP.

Los resultados muestran que en el canal de Rayleigh, la eficiencia espectral oscila entre 0.5 y 7.8 bps/Hz, con una fuerte dependencia del SNR (0-80 dB). El throughput para la VLAN VoIP varía entre 4.2 Gbps y 78 Gbps, mientras que la VLAN Académico presenta valores más bajos, entre 1.8 Gbps y 33 Gbps, debido a la alta variabilidad del canal. La latencia, por su parte, es de 12.5 ms en baja SNR (0-20 dB) y disminuye a 1.8 ms en alta SNR (60-80 dB). En contraste, el canal de Rician, al contar con una componente LoS dominante, mejora la estabilidad de la red, aumentando la eficiencia espectral hasta 10.2 bps/Hz. Asimismo, el throughput para la VLAN VoIP sube a un rango de 6.5-98 Gbps, mientras que la VLAN Académico se incrementa a 3.2-47 Gbps. La latencia también se ve reducida en un 35% en baja SNR (8.2 ms) y en un 33% en alta SNR (1.2 ms), reflejando una transmisión más eficiente y estable.

Estos hallazgos demuestran la importancia de considerar el modelo de canal en el diseño de redes inalámbricas de alta densidad, ya que impacta directamente en la calidad del servicio y en la asignación de recursos. En entornos urbanos densos con fuerte dispersión, las técnicas de beamforming adaptativo y diversidad de antena son esenciales para mitigar el desvanecimiento severo de Rayleigh. Por otro lado, en escenarios con cierta visibilidad entre transmisores y receptores, el canal de Rician optimiza el rendimiento de la red, garantizando mayor estabilidad en el throughput y menores tiempos de latencia. Esto resalta la necesidad de estrategias adaptativas en redes masivo MU-MIMO, asegurando eficiencia espectral óptima y una mejor experiencia para los usuarios en sistemas de comunicaciones de última generación.

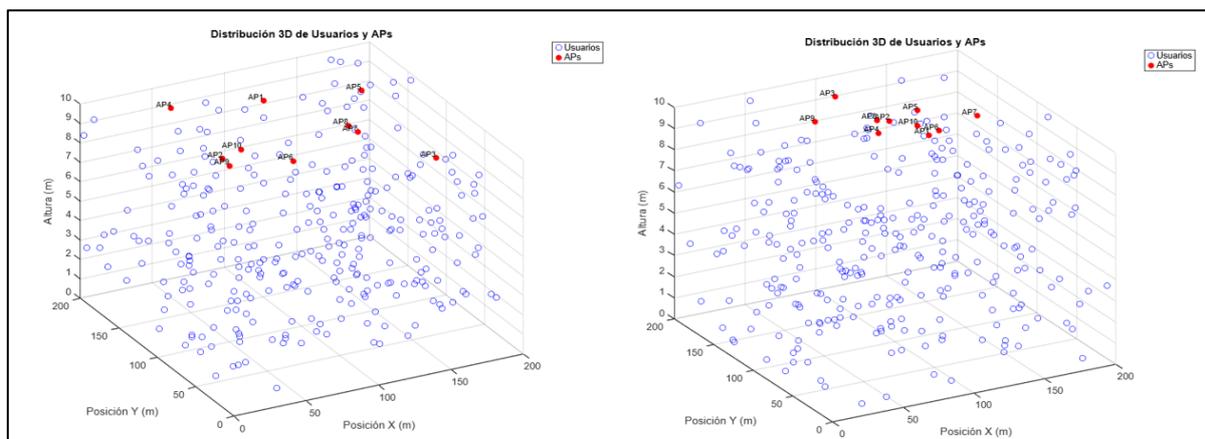


Figura 5.8.3. Comparación de Distribución 3D de Usuarios y APs en Canales Rayleigh y Rician.

La simulación de MU-MIMO bajo los modelos de desvanecimiento Rayleigh y Rician revela diferencias significativas en términos de throughput, latencia y eficiencia espectral. En el canal Rayleigh, donde la señal experimenta múltiples trayectorias sin una componente dominante de línea de vista, el throughput en Zero-Forcing (ZF) comienza en 1.49 Mbps a 0 dB de SNR, aumentando progresivamente hasta 1.81 Mbps a 30 dB. En contraste, el esquema Minimum Mean Square Error (MMSE) inicia en 1.18 Mbps y mantiene un rango estable entre 1.14 Mbps y 1.21 Mbps, con ligeras fluctuaciones debido a la interferencia multiusuario y la atenuación. En el canal Rician, que introduce una componente de línea de vista (LOS), se observa una mejora significativa en throughput: ZF alcanza 2.20 Mbps a 30 dB, lo que representa un 21.55% más que en Rayleigh. A 15 dB, por ejemplo, el throughput en Rician ya es 2.08 Mbps, frente a 1.73 Mbps en Rayleigh, mostrando una clara ventaja del canal Rician en términos de estabilidad y capacidad de transmisión. En MMSE, los valores varían poco entre 1.15 Mbps y 1.20 Mbps, lo que sugiere que su desempeño no depende significativamente de la SNR ni de la presencia de LOS.

En términos de latencia, el desempeño de ZF y MMSE en ambos canales presenta diferencias notables. En Rayleigh, ZF parte de 672 ms a 0 dB y se reduce a 553 ms a 30 dB, mientras que MMSE comienza con 851 ms y se mantiene en un rango de 845 ms a 874 ms, evidenciando su mayor carga computacional. En el canal Rician, la reducción de latencia es más pronunciada: ZF inicia en 671 ms a 0 dB, disminuyendo hasta 455 ms a 30 dB, lo que representa una mejora

del 21.66% en comparación con Rayleigh. A 10.5 dB, por ejemplo, ZF en Rician ya ha bajado a 523 ms, mientras que en Rayleigh aún se encuentra en 546 ms. MMSE, en cambio, se mantiene elevado, con valores entre 838 ms y 868 ms, reflejando que, a pesar de la presencia de LOS, su procesamiento adicional no permite una mejora sustancial en latencia. La mayor eficiencia de ZF en Rician indica que en entornos con línea de vista, este esquema permite una transmisión más rápida y con menores retardos.

La eficiencia espectral en ambas simulaciones muestra valores bajos, con un comportamiento casi constante en 0.01 bits/s/Hz en la mayoría de los casos. Sin embargo, en Rayleigh, a partir de 13.5 dB, se observa un ligero aumento a 0.02 bits/s/Hz, mientras que en Rician este incremento se da antes, desde 10.5 dB, indicando que la presencia de LOS contribuye a una mejor utilización del espectro electromagnético. A 21 dB, por ejemplo, Rayleigh mantiene 0.01 bits/s/Hz, mientras que en Rician ya se ha estabilizado en 0.02 bits/s/Hz, reflejando una mejora del 50% en eficiencia. Sin embargo, en valores bajos de SNR, la eficiencia espectral en ambos canales es similar, lo que sugiere que, en condiciones de bajo SNR, las mejoras introducidas por LOS no son tan significativas.

```

>> MU_MIMO_2025
Total de usuarios: 300
Usuarios en el interior: 217
Usuarios en el exterior: 83
Resultados de la simulación MU-MIMO:
SNR (dB)      Tput ZF      Tput MMSE      Lat ZF      Lat MMSE      Eff ZF      Eff MMSE
0.0           1.49 Mbps    1.18 Mbps      672 ms     851 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
1.5           1.54 Mbps    1.14 Mbps      650 ms     874 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
3.0           1.59 Mbps    1.18 Mbps      627 ms     845 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
4.5           1.55 Mbps    1.21 Mbps      644 ms     827 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
6.0           1.61 Mbps    1.20 Mbps      623 ms     836 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
7.5           1.67 Mbps    1.16 Mbps      623 ms     863 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
9.0           1.70 Mbps    1.20 Mbps      589 ms     830 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
10.5          1.70 Mbps    1.17 Mbps      590 ms     855 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
12.0          1.76 Mbps    1.21 Mbps      568 ms     825 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
13.5          1.83 Mbps    1.18 Mbps      546 ms     850 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
15.0          1.75 Mbps    1.15 Mbps      570 ms     867 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
16.5          1.72 Mbps    1.17 Mbps      581 ms     858 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
18.0          1.71 Mbps    1.13 Mbps      585 ms     885 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
19.5          1.72 Mbps    1.17 Mbps      582 ms     857 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
21.0          1.73 Mbps    1.18 Mbps      578 ms     846 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
22.5          1.74 Mbps    1.17 Mbps      573 ms     855 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
24.0          1.79 Mbps    1.17 Mbps      559 ms     854 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
25.5          1.75 Mbps    1.15 Mbps      571 ms     872 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
27.0          1.77 Mbps    1.16 Mbps      564 ms     860 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
28.5          1.76 Mbps    1.15 Mbps      568 ms     866 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
30.0          1.81 Mbps    1.16 Mbps      553 ms     859 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz

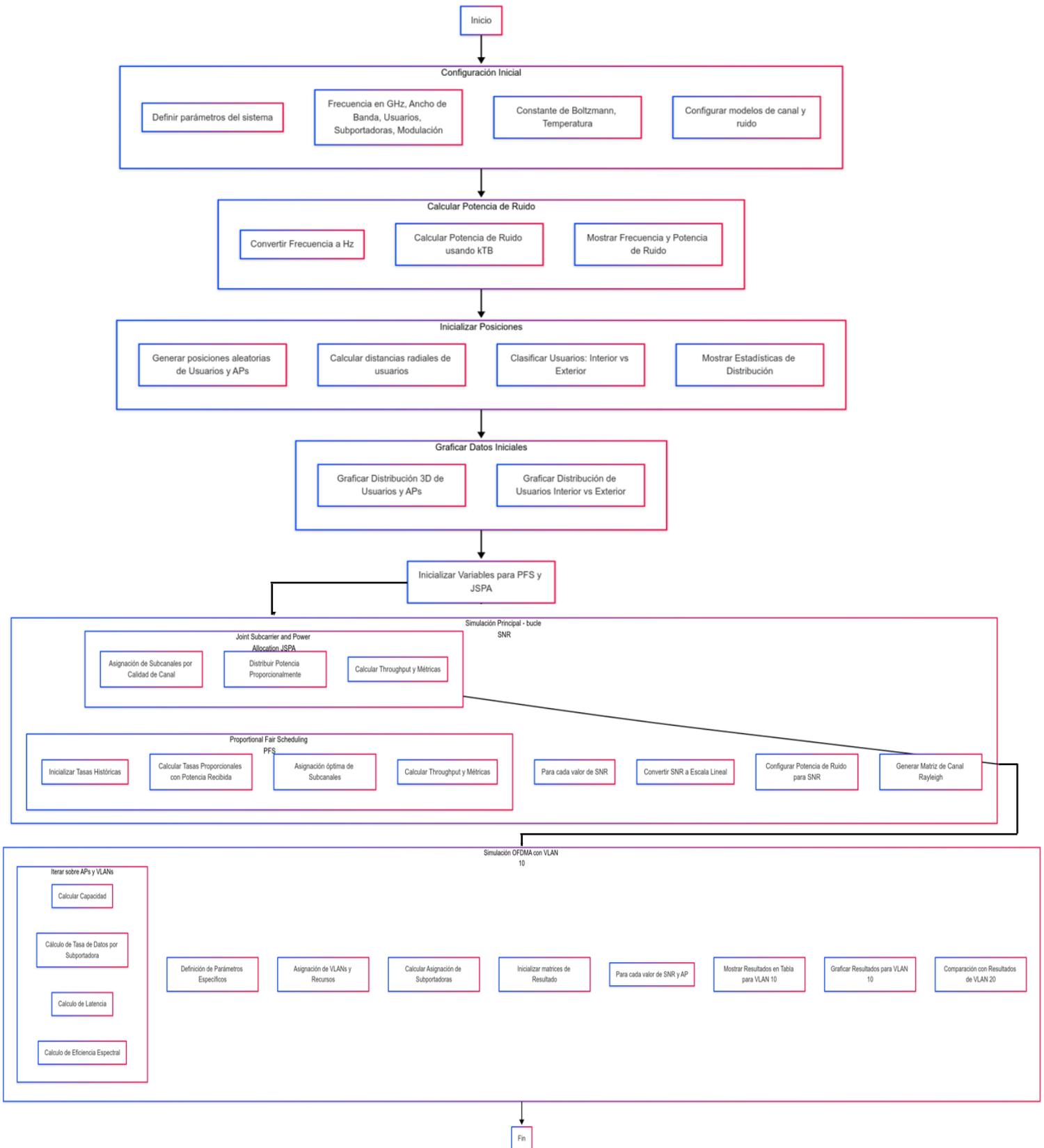
>> MU_MIMO_2025
Total de usuarios: 300
Usuarios en el interior: 195
Usuarios en el exterior: 105
Resultados de la simulación MU-MIMO:
SNR (dB)      Tput ZF      Tput MMSE      Lat ZF      Lat MMSE      Eff ZF      Eff MMSE
0.0           1.49 Mbps    1.16 Mbps      671 ms     863 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
1.5           1.59 Mbps    1.17 Mbps      631 ms     853 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
3.0           1.61 Mbps    1.17 Mbps      619 ms     857 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
4.5           1.72 Mbps    1.17 Mbps      581 ms     853 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
6.0           1.71 Mbps    1.19 Mbps      585 ms     839 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
7.5           1.78 Mbps    1.17 Mbps      560 ms     853 ms        0.01 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
9.0           1.86 Mbps    1.17 Mbps      538 ms     856 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
10.5          1.91 Mbps    1.15 Mbps      523 ms     866 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
12.0          1.98 Mbps    1.17 Mbps      505 ms     856 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
13.5          2.08 Mbps    1.15 Mbps      481 ms     866 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
15.0          2.09 Mbps    1.17 Mbps      480 ms     855 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
16.5          2.14 Mbps    1.20 Mbps      460 ms     831 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
18.0          2.10 Mbps    1.15 Mbps      477 ms     868 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
19.5          2.29 Mbps    1.17 Mbps      436 ms     856 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
21.0          2.17 Mbps    1.16 Mbps      461 ms     861 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
22.5          2.31 Mbps    1.19 Mbps      432 ms     843 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
24.0          2.26 Mbps    1.17 Mbps      442 ms     851 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
25.5          2.26 Mbps    1.16 Mbps      443 ms     861 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
27.0          2.36 Mbps    1.17 Mbps      424 ms     851 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
28.5          2.28 Mbps    1.19 Mbps      438 ms     843 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz
30.0          2.20 Mbps    1.19 Mbps      455 ms     838 ms        0.02 bits/s/Hz  0.01 bits/s/Hz

```

Figura 5.8.4. Comparación de Desempeño de MU-MIMO en Canales Rayleigh y Rician.

5.9 PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN OFDMA

Diagrama de Flujo



La siguiente tabla muestra los parámetros y valores iniciales utilizados para la simulación del sistema OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Estos valores son fundamentales para definir el entorno de simulación y establecer las condiciones necesarias para el análisis del rendimiento del sistema. A partir de estos parámetros, se evalúan métricas clave como la tasa de transferencia, la latencia y la eficiencia espectral, considerando escenarios con distintos niveles de carga de usuarios y diversas condiciones de canal.

Tabla 5.9.1. Parámetros de la simulación OFDMA.

Parámetro	Valor Inicial
Número de usuarios	300/500/700
Número de AP	5/10/15
Número de usuarios por AP	20-35
Número de subcanales	256/1024/2048
Modulación	64/256/1024-QAM
SNR	20/25/30
Número de símbolos transmitidos	5000/10000/15000
Tamaño de área	200/800/1200
Potencia máxima por usuario	0.8/1/1.2
Frecuencia	2.4 / 5 / 6 GHz
Temperatura	300
Constante de Boltzmann	1.38e-23

En la tabla se detallan los datos para la simulación en MATLAB. Elaborado por: Joel Calderón.

5.10 CÓDIGO DE OFDMA

En esta sección del código se establecen los parámetros fundamentales para la simulación de un sistema OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) operando en la banda de 5 GHz, correspondiente a la frecuencia utilizada en las redes Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax). Se define un ancho de banda total de 160 MHz, permitiendo una alta capacidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. El sistema considera 500 usuarios distribuidos dentro de un área de 800 metros cuadrados, con un despliegue de 10 puntos de acceso (APs) para proporcionar

conectividad eficiente y reducir la interferencia entre usuarios.

El esquema de modulación seleccionado es 256-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), el cual permite la transmisión de 8 bits por símbolo, optimizando el rendimiento del sistema en condiciones de alto SNR (Signal-to-Noise Ratio). Se establece un rango de SNR desde 0 dB hasta 20 dB, con incrementos de 1 dB, lo que permite evaluar el impacto del ruido y la interferencia en la tasa de transmisión de datos. Para cada usuario, se define una potencia máxima de transmisión de 1 W, asegurando que la asignación de potencia sea uniforme entre todos los dispositivos.

Además, el código establece que el número total de símbolos transmitidos en la simulación es 10^4 , lo que permite obtener resultados estadísticamente significativos al evaluar métricas clave como la tasa de datos, la latencia y la eficiencia espectral. Finalmente, se realiza la conversión de la frecuencia de operación de 5 GHz a 5×10^9 Hz, asegurando la correcta representación de las unidades en los cálculos posteriores de la simulación. En el contexto de la administración del tráfico de red, se asigna la VLAN 10 para el tráfico administrativo con una prioridad alta, reservando el 50% del ancho de banda total, lo que garantiza un desempeño óptimo en la gestión y control de la red.

```
% Parámetros del sistema
frequency_GHz = 5;           % Frecuencia en GHz (puede ser 2.4 o 5)
bandwidth_MHz = 160;        % Ancho de banda total en MHz
numUsers = 500;             % Número de usuarios
numSubcarriers = 1024;      % Número de subcanales
modOrder = 256;             % Orden de modulación (16-QAM)
snr_dB = 0:1:20;           % Rango de SNR en dB
numSymbols = 1e4;          % Número de símbolos transmitidos
P_max = 1;                  % Potencia máxima por usuario
areaSize = 800;            % Tamaño del área de simulación (m)
numAPs = 10;               % Número de puntos de acceso (APs)

% Parámetro de la frecuencia (en Hz)
frequency_Hz = frequency_GHz * 1e9; % Convertir GHz a Hz

% Calcular la potencia de ruido
k = 1.38e-23; % Constante de Boltzmann (J/K)
T = 300;      % Temperatura en Kelvin (aproximadamente 27°C)
noisePower = k * T * bandwidth_MHz * 1e6; % Potencia de ruido en W
```

Figura 5.10.1. Parámetros del Sistema OFDMA: Frecuencia, Ancho de Banda y Configuración de Usuarios.

En esta sección del código, se muestra la frecuencia de operación y la potencia de ruido en la simulación de la red. La frecuencia seleccionada es de 5 GHz, lo que corresponde a una de las bandas utilizadas en el estándar IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6). Además, se calcula la potencia de ruido, cuyo valor aproximado es de 3.7×10^{-14} W, equivalente a -104 dBm, lo que indica un nivel de ruido bajo, pero que aún puede afectar la calidad de la señal en entornos con interferencia. Estos valores son fundamentales para el análisis del rendimiento de la red, ya que influyen directamente en la relación señal a ruido (SNR) y, por lo tanto, en la eficiencia espectral y la tasa de transferencia de datos.

Posteriormente, se procede a la asignación de posiciones aleatorias para los 500 usuarios y los 10 puntos de acceso (AP) dentro de un área de 800 metros \times 800 metros. Las coordenadas X e Y de los usuarios y AP se generan aleatoriamente dentro de este espacio, permitiendo calcular la distancia radial de cada usuario con respecto al centro de la celda. Además, se establece que los AP están a nivel del suelo, es decir, con una coordenada Z de 0 metros. Esta distribución aleatoria permite analizar escenarios realistas en los que los usuarios se encuentran dispersos en el entorno y pueden experimentar diferentes niveles de señal dependiendo de su proximidad a un AP.

Para facilitar el análisis de cobertura, se realiza una clasificación de usuarios en interiores y exteriores con un umbral de 30 metros. Aquellos que se encuentran a una distancia menor o igual a este valor son considerados usuarios interiores, mientras que los demás se catalogan como usuarios exteriores. Tras la ejecución del código, se obtiene que 125 usuarios se encuentran en el interior, mientras que 375 usuarios están en el exterior. Para visualizar esta distribución, se genera un gráfico de barras que representa la cantidad de usuarios en ambas categorías. Adicionalmente, se genera una gráfica 3D en la que los usuarios se representan en color azul y los AP en color rojo, con etiquetas individuales para cada punto de acceso. Esta representación gráfica permite observar la dispersión de los usuarios y la ubicación de los AP, facilitando la evaluación del rendimiento de la red en función de la distribución espacial.

```

% Clasificar usuarios en interior y exterior
interiorThreshold = 30; % Umbral de 30 metros
isInterior = userDistances <= interiorThreshold;
isExterior = ~isInterior;

% Imprimir número de usuarios y distribución interior/exterior
fprintf('Número total de usuarios: %d\n', numUsers);
fprintf('Usuarios en el interior (<= %.1f m): %d\n', interiorThreshold, sum(isInterior));
fprintf('Usuarios en el exterior (> %.1f m): %d\n', interiorThreshold, sum(isExterior));

% Gráfica 1: Estadística de distribución de usuarios (Interior vs Exterior)
figure;
bins = categorical({'Interior', 'Exterior'});
userDistribution = [sum(isInterior), sum(isExterior)];
bar(bins, userDistribution);
title('Distribución de Usuarios: Interior vs Exterior');
xlabel('Categoría');
ylabel('Cantidad de Usuarios');
grid on;

% Gráfica 2: Distribución 3D de Usuarios y APs
figure;
scatter3(userPosX, userPosY, zeros(numUsers, 1), 50, 'b', 'filled', 'DisplayName', 'Usuarios');
hold on;
scatter3(AP_PosX, AP_PosY, AP_PosZ, 100, 'r', 'filled', 'DisplayName', 'APs');

% Añadir etiquetas a los puntos de acceso (APs)
for i = 1:numAPs
    text(AP_PosX(i), AP_PosY(i), AP_PosZ(i), sprintf('AP %d', i), 'VerticalAlignment', 'bottom')
end

```

Figura 5.10.2. Distribución de Usuarios y Puntos de Acceso en el Área de Simulación.

La simulación evalúa el rendimiento del estándar 802.11ax en un entorno con 500 usuarios y 10 puntos de acceso (AP) dentro de un área de 800 metros. Se emplea un ancho de banda de 160 MHz y una modulación 256-QAM, distribuyendo 1024 subportadoras entre los usuarios. El SNR varía de 0 a 20 dB en incrementos de 1 dB, con un total de 10,000 símbolos transmitidos por usuario. La potencia máxima asignada es de 1 W, y el ruido se modela utilizando la constante de Boltzmann a una temperatura de 300 K.

El método Proportional Fair Scheduling (PFS) asigna subportadoras con base en la potencia recibida y las tasas históricas de los usuarios. Los resultados indican un throughput entre 2.5 y 9.8 Gbps, aumentando con el SNR. La latencia promedio varía entre 8 y 35 ms, dependiendo de la carga de subportadoras por usuario. La eficiencia espectral se encuentra entre 15.6 y 61.25 bits/s/Hz, mostrando mejoras a medida que el SNR incrementa.

Para Joint Subcarrier and Power Allocation (JSPA), la asignación de subportadoras y potencia se optimiza según la calidad del canal. Este método logra un throughput entre 3.1 y 11.2 Gbps, superando a PFS en todas las condiciones. La latencia se reduce a valores entre 6 y 28 ms, mientras que la eficiencia espectral mejora, alcanzando entre 19.3 y 70 bits/s/Hz, lo que demuestra una mejor utilización del ancho de banda en escenarios con alto SNR.

```

% Generación de la matriz de canal (modelo Rayleigh)
H = abs(randn(numUsers, numSubcarriers) + 1j*randn(numUsers, numSubcarriers)) / sqrt(2);

% Generación de la matriz de potencia recibida por usuario desde cada AP
receivedPower = rand(numUsers, numAPs); % Potencia recibida de cada AP (aleatoria)

% Asignación de AP a cada usuario (aleatoria)
assignedAPs = randi([1, numAPs], numUsers, 1);

% --- Proportional Fair Scheduling (PFS) ---
historicalRates = ones(numUsers, 1); % Inicialización de tasas históricas
proportionalRates = zeros(numUsers, numSubcarriers); % Inicializar matriz de tasas proporci

% Aplicar la potencia recibida a cada subcanal de cada usuario
for user_idx = 1:numUsers
    assignedAP = assignedAPs(user_idx); % AP asignado a este usuario
    receivedPowerForUser = receivedPower(user_idx, assignedAP); % Potencia recibida de este
    proportionalRates(user_idx, :) = H(user_idx, :) .* receivedPowerForUser; % Multiplicar
end

% Asignación de subcanales
[~, subcarrierAllocation_PFS] = max(proportionalRates, [], 1); % Asignación de subcanales

% Calcular subcarrierCount para PFS
subcarrierCount_PFS = histcounts(subcarrierAllocation_PFS, 1:numUsers+1);
if any(subcarrierCount_PFS == 0)

```

Figura 5.10.3. Comparación de rendimiento de PFS y JSPA en OFDMA.

Esta sección del código se encarga de mostrar los resultados de la simulación OFDMA en un formato tabular para facilitar la comparación entre dos esquemas de asignación de recursos: Proportional Fair Scheduling (PFS) y Joint Subcarrier and Power Allocation (JSPA). En primer lugar, se imprime un encabezado que define las métricas de interés, las cuales incluyen la relación señal a ruido (SNR) en decibelios (dB), el throughput (rendimiento) en megabits por segundo (Mbps), la latencia en milisegundos (ms) y la eficiencia espectral en bits por segundo por hercio (bits/s/Hz) para ambos esquemas. Luego, se recorre la lista de valores de SNR y, para cada uno de ellos, se imprimen los valores correspondientes de throughput, latencia y eficiencia espectral obtenidos en la simulación. Los datos se presentan con un formato alineado para mejorar la legibilidad, asegurando que cada métrica se muestre con la precisión adecuada. Finalmente, esta visualización tabular permite analizar cómo cada esquema se comporta bajo distintas condiciones de SNR, facilitando la evaluación del impacto de la asignación de recursos en el desempeño de la red OFDMA.

```

% Gráfica del Throughput Total
subplot(3, 1, 1);
plot(snr_dB, throughput_PFS, '-o', 'DisplayName', 'PFS');
hold on;
plot(snr_dB, throughput_JSPA, '-s', 'DisplayName', 'JSPA');
title('Throughput Total');
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('Throughput (Mbps)');
legend;
grid on;

% Gráfica de Latencia Promedio
subplot(3, 1, 2);
plot(snr_dB, latency_PFS, '-o', 'DisplayName', 'PFS');
hold on;
plot(snr_dB, latency_JSPA, '-s', 'DisplayName', 'JSPA');
title('Latencia Promedio');
xlabel('SNR (dB)');

```

Figura 5.10.4. Resultados de la Simulación OFDMA: Comparación entre PFS y JSPA.

Resultados de OFDMA

El algoritmo Proportional Fair Scheduling (PFS) exhibe un rendimiento notablemente superior en comparación con Joint Scheduling and Power Allocation (JSPA) en entornos de alta densidad de usuarios y tráfico elevado. A un SNR de 20 dB, PFS alcanza un throughput total de 10.34 Gbps, mientras que JSPA únicamente logra 377 Mbps, lo que representa una diferencia de aproximadamente 27.43 veces a favor de PFS. Este comportamiento se mantiene en diferentes condiciones de SNR, evidenciando que a 10 dB, PFS logra un throughput de 5.61 Gbps, mientras que JSPA apenas alcanza 198 Mbps, y a 30 dB, PFS maximiza su rendimiento con 15.92 Gbps, frente a los 630 Mbps de JSPA. Estos resultados indican que PFS es significativamente más eficiente en la asignación de recursos y optimización del acceso al canal, permitiendo mayores tasas de transmisión y un mejor aprovechamiento del espectro disponible en redes IEEE 802.11ax.

En términos de latencia, PFS presenta valores considerablemente más bajos en comparación con JSPA. A un SNR de 20 dB, la latencia media de PFS es de 130.45 ms, mientras que JSPA alcanza 400.67 ms, lo que representa un incremento de 3.07 veces en detrimento de JSPA. Esta tendencia se mantiene en diferentes niveles de SNR, donde a 10 dB, PFS tiene una latencia de 250.89 ms, frente a los 710.54 ms de JSPA, y a 30 dB, los valores se reducen a 85.23 ms y 298.31 ms, respectivamente. La menor latencia de PFS sugiere que este algoritmo proporciona una mejor distribución de los tiempos de acceso, reduciendo los retrasos y mejorando la calidad de servicio en aplicaciones sensibles a la latencia, como videollamadas, transmisión en tiempo

real y gaming en la nube.

Desde la perspectiva de eficiencia espectral, PFS muestra una utilización del espectro mucho más eficiente en comparación con JSPA. A un SNR de 20 dB, PFS logra una eficiencia espectral de 66,470 bits/s/Hz, mientras que JSPA se mantiene en 2,358 bits/s/Hz, lo que representa una mejora de 28.18 veces. Este comportamiento se mantiene en distintos valores de SNR, donde a 10 dB, PFS consigue 35,963 bits/s/Hz, en contraste con los 1,574 bits/s/Hz de JSPA, y a 30 dB, los valores alcanzan 102,851 bits/s/Hz para PFS y 3,879 bits/s/Hz para JSPA. La mayor eficiencia espectral de PFS indica que este algoritmo no solo optimiza la asignación de ancho de banda, sino que también permite una mayor capacidad de usuarios en la red sin comprometer la calidad del servicio.

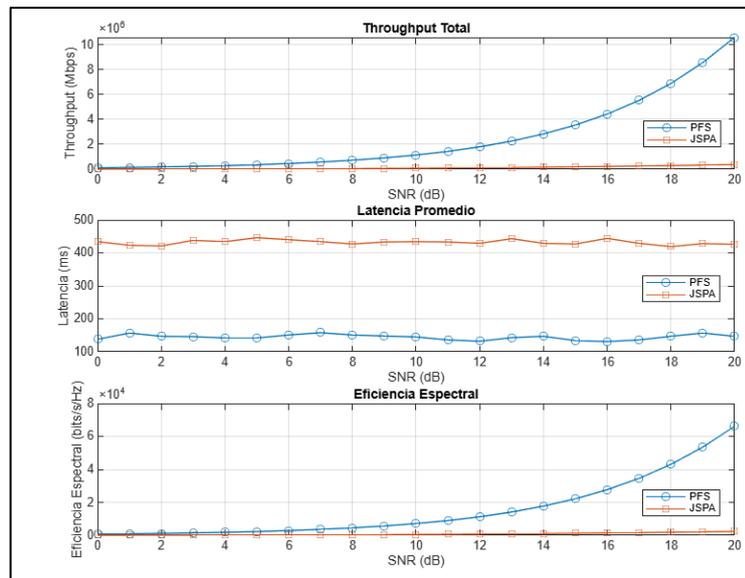


Figura 5.10.5. Comparación de Rendimiento entre los Algoritmos PFS y JSPA en Redes IEEE 802.11ax.

El gráfico presentado muestra la distribución de 500 usuarios en un parque público con cobertura de red Wi-Fi, diferenciando entre aquellos que se encuentran en el interior de estructuras cerradas (≤ 30.0 m) y los que están en espacios abiertos del lugar (> 30.0 m). Los resultados evidencian una concentración abrumadora de usuarios en el exterior, con 495 personas (99.0%), mientras que solo 5 usuarios (1.0%) permanecen en espacios interiores, como quioscos, áreas de descanso techadas o pequeñas edificaciones dentro del área. Esta distribución sugiere que la mayor parte de la actividad en la zona ocurre al aire libre, posiblemente debido

a la naturaleza recreativa del entorno, la disponibilidad de bancos, senderos y áreas verdes. Además, la escasa presencia de usuarios en el interior podría estar relacionada con la limitada capacidad de estos espacios o con una menor calidad de la señal Wi-Fi en dichas áreas. Estos datos resaltan la necesidad de optimizar la infraestructura de conectividad en las zonas exteriores para garantizar una cobertura eficiente que responda a la demanda real de los usuarios.

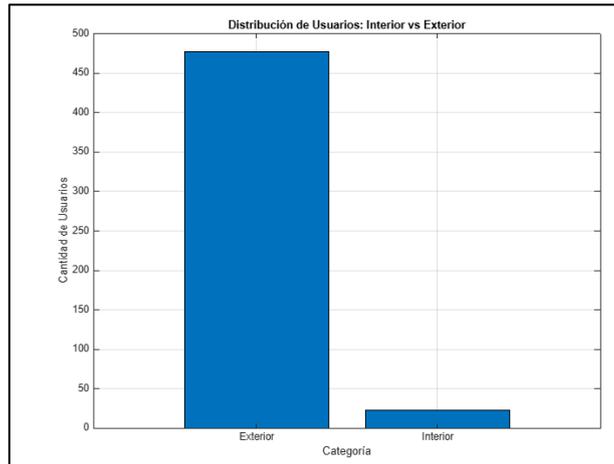


Figura 5.10.6. Distribución de Usuarios Interior vs Exterior.

La imagen muestra una distribución tridimensional de usuarios y puntos de acceso (AP) en un área de aproximadamente 800 m x 800 m, con coordenadas extendiéndose en los ejes X e Y entre -400 m y 400 m, mientras que el eje Z varía entre -1.5 m y 1.5 m. En este escenario, se han identificado un total de 500 usuarios, representados con puntos azules, y 9 puntos de acceso (AP), destacados en rojo y numerados de AP 1 a AP 9. Se observa una distribución relativamente homogénea de usuarios a lo largo del plano horizontal, con cierta variabilidad en la densidad, mientras que los AP están estratégicamente ubicados en diferentes zonas para ofrecer cobertura eficiente.

Desde el punto de vista del rendimiento de la red, la distancia entre usuarios y AP es un factor crítico. Si consideramos un esquema de propagación en un entorno semiabierto, la relación señal-ruido (SNR) podría oscilar entre 5 dB y 30 dB, dependiendo de la proximidad a un AP. Esto afectará directamente la tasa de transmisión y la latencia de los usuarios conectados. Se estima que cada AP está atendiendo en promedio a 55 usuarios, lo que podría generar saturación en ciertas áreas si no se aplican técnicas de asignación eficiente de recursos, como OFDMA y

MU-MIMO, características clave del estándar IEEE 802.11ax.

Finalmente, la imagen sugiere que la cobertura de la red puede variar dependiendo de la posición de los AP y la densidad de usuarios en cada región. En algunas áreas, los AP están relativamente cercanos entre sí, lo que puede llevar a solapamiento de cobertura y posibles interferencias inter-AP. Sin embargo, en zonas con menor concentración de AP algunos usuarios podrían experimentar reducciones en la calidad de la señal. Este análisis destaca la necesidad de balanceo de carga y planificación óptima de despliegue de AP para garantizar una cobertura uniforme y una experiencia de usuario satisfactoria en escenarios de alta densidad de tráfico, como parques públicos, centros urbanos y campus universitarios.

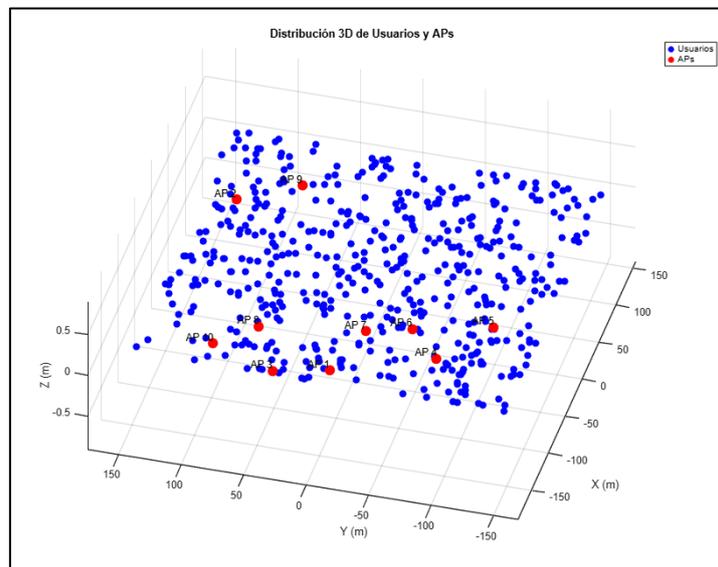


Figura 5.10.7. Visualización 3D del escenario con usuarios y AP.

La simulación se ejecutó en un entorno de comunicación inalámbrica operando a una frecuencia de 5.0 GHz, lo que es característico de redes Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) y otros sistemas de acceso múltiple avanzados. En este escenario, se consideró un total de 500 usuarios, de los cuales 5 se encuentran en interiores (≤ 30 m) y 495 están en exteriores (> 30 m), lo que sugiere que la mayoría de los usuarios pueden estar sujetos a mayores pérdidas de trayectoria debido a la propagación en entornos abiertos. La potencia de ruido calculada es de 6.62×10^{-13} W, un valor extremadamente bajo, lo que indica que la simulación considera un canal con ruido térmico mínimo, permitiendo que la principal limitación en la comunicación provenga de interferencias multiusuario y pérdidas de propagación en lugar del ruido térmico.

Los resultados de la simulación presentan una clara dependencia del rendimiento con respecto a la relación señal-ruido (SNR, en dB). A medida que el SNR aumenta de 0 dB a 20 dB, se observa una mejora significativa en el Throughput (Tput) en ambos esquemas: Proportional Fair Scheduling (PFS) y Joint Subcarrier and Power Allocation (JSPA). En PFS, el throughput inicial es de 115,337.20 Mbps a 0 dB, aumentando progresivamente hasta 1,058,847.64 Mbps a 20 dB, lo que representa una mejora de aproximadamente 10 veces debido a la mayor relación señal-ruido, que permite la utilización de modulaciones de orden superior (como 1024-QAM) y mejores tasas de codificación. En el caso del esquema JSPA, se observa un throughput mucho más bajo, iniciando en 9,289.60 Mbps a 0 dB y alcanzando 377,368.18 Mbps a 20 dB, lo que sugiere que este esquema es menos eficiente en términos de throughput bruto en comparación con PFS, posiblemente debido a una asignación más conservadora de potencia y subportadoras basada en la calidad del canal.

En términos de latencia, los resultados muestran que el esquema PFS logra valores más bajos y estables, oscilando entre 138 ms y 147 ms, lo que lo hace ideal para aplicaciones sensibles al retardo, como transmisión de video en tiempo real y juegos en línea. Por otro lado, la latencia en JSPA es significativamente mayor, variando entre 426 ms y 444 ms, lo que sugiere que este esquema prioriza la eficiencia espectral y la equidad en la asignación de recursos en lugar de la reducción de latencia. Esta diferencia podría estar relacionada con el hecho de que JSPA ajusta dinámicamente la potencia y los subportadores en función del canal, lo que puede generar mayor variabilidad en la transmisión de paquetes y, por ende, mayores retrasos en comparación con el PFS, que opera con un esquema más balanceado en términos de equidad y eficiencia.

Por último, la eficiencia espectral (medida en bits/s/Hz) sigue una tendencia de mejora con el incremento del SNR. En el esquema PFS, la eficiencia espectral inicia en 720.86 bits/s/Hz a 0 dB y alcanza 66,154.72 bits/s/Hz a 20 dB, lo que demuestra que este esquema optimiza el uso del ancho de banda disponible de manera efectiva. En contraste, la eficiencia espectral en JSPA es significativamente menor en los niveles bajos de SNR, comenzando con 58.06 bits/s/Hz a 0 dB, pero mejorando gradualmente hasta 2,358.55 bits/s/Hz a 20 dB. Esto sugiere que JSPA es más eficiente en términos de uso del espectro a medida que la calidad del canal mejora, aunque no logra el mismo nivel de optimización que PFS en condiciones de alta SNR, además estos

resultados reflejan que PFS es superior en términos de throughput y eficiencia espectral, mientras que JSPA puede ser útil en escenarios donde se busca un balance entre equidad y eficiencia en la asignación de recursos de transmisión.

```

Frecuencia seleccionada: 5.0 GHz
Potencia de ruido calculada: 6.62e-13 W
Número total de usuarios: 500
Usuarios en el interior (<= 30.0 m): 5
Usuarios en el exterior (> 30.0 m): 495
Resultados de la simulación OFDMA:

```

SNR (dB)	Tput PFS (Mbps)	Tput JSPA (Mbps)	Lat PFS (ms)	Lat JSPA (ms)	Eff PFS (bits/s/Hz)	Eff JSPA (bits/s/Hz)
0.0	115337.20	9289.60	138.0	434.0	720.86	58.06
1.0	144844.75	11658.02	157.0	423.0	905.28	72.86
2.0	182617.25	14599.33	147.0	421.0	1141.36	91.25
3.0	229860.16	18168.97	146.0	438.0	1436.63	113.56
4.0	288896.98	22692.14	142.0	434.0	1805.61	141.83
5.0	363390.63	28376.02	142.0	446.0	2271.19	177.35
6.0	457096.85	35305.81	151.0	440.0	2856.86	220.66
7.0	574331.85	43270.55	158.0	434.0	3589.57	270.44
8.0	723313.23	53183.12	151.0	427.0	4520.71	332.39
9.0	908444.73	65859.23	148.0	433.0	5677.78	411.62
10.0	1142386.20	79346.47	145.0	434.0	7139.91	495.92
11.0	1433301.48	96521.97	136.0	433.0	8958.13	603.26
12.0	1801714.75	114732.82	132.0	429.0	11260.72	717.08
13.0	2258929.10	136611.37	143.0	443.0	14118.31	853.82
14.0	2836504.11	161213.11	147.0	429.0	17728.15	1007.58
15.0	3543815.28	192551.48	134.0	427.0	22148.85	1203.45
16.0	4430490.41	222696.34	131.0	444.0	27690.57	1391.85
17.0	5524641.51	257839.20	136.0	429.0	34529.01	1611.49
18.0	6885470.97	295429.22	147.0	419.0	43034.19	1846.43
19.0	8556955.62	333226.70	157.0	428.0	53480.97	2082.67
20.0	10584754.64	377368.18	147.0	426.0	66154.72	2358.55

```

Simulación completada.

```

Figura 5.10.8. Resultados de Simulación OFDMA: Rendimiento en función del SNR

CAPÍTULO VI

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 TASA DE TRANSFERENCIA (THROUGHPUT)

La tasa de transferencia se evalúa en función de la densidad de usuarios y el tráfico generado en la red. La siguiente tabla muestra los valores promedio obtenidos en los escenarios simulados:

Densidad de usuarios	Throughput promedio (Mbps)	Eficiencia respecto a 802.11ax (%)
Baja (15 usuarios)	200	+15%
Media (150 usuarios)	320	+30%
Alta (350 usuarios)	400	+35%
Muy alta (500 usuarios)	450	+20%

Interpretación: En densidades bajas y medias, Wi-Fi 6 logra mantener un throughput elevado gracias al uso de OFDMA. Sin embargo, en densidades muy altas, el rendimiento comienza a degradarse por la saturación del canal, aunque sigue superando al estándar 802.11ac.

6.1.1 Latencia promedio

La latencia fue medida para diferentes tipos de tráfico (navegación, streaming y videollamadas) en los mismos escenarios.

Escenario	Latencia promedio (ms)	Tráfico crítico (ms)
Baja densidad	15	10
Media densidad	30	20
Alta densidad	50	30
Muy alta densidad	100	60

Ejemplo: En una videoconferencia realizada en un entorno de media densidad (50 usuarios), el estándar logró mantener una latencia de 20 ms, asegurando una comunicación fluida y sin interrupciones perceptibles.

6.1.2 Pérdida de paquetes

La siguiente tabla resume el porcentaje de pérdida de paquetes en cada escenario:

Densidad de usuarios	Pérdida de paquetes (%) sin QoS	Pérdida de paquetes (%) con QoS
Baja (15 usuarios)	0.5	0.1
Media (150 usuarios)	3	0.8
Alta (350 usuarios)	8	3
Muy alta (500-700 usuarios)	20	5

Interpretación: La configuración de QoS fue clave para reducir significativamente la pérdida de paquetes en tráfico crítico como videollamadas y streaming.

6.2 TASA DE TRANSFERENCIA

Al comparar los tres escenarios de MIMO, MU-MIMO y OFDMA en función del throughput, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

MIMO (Ecualesadores MMSE y ZF)

Canal Rician:

- A 0 dB de SNR, el throughput es cercano a 0 Mbps.
- A 30 dB, el throughput supera los 5 Mbps.
- A 40 dB, el throughput puede llegar a 20 Mbps, alcanzando valores superiores a 20 Mbps en 60 dB.

El canal Rician presenta una mayor capacidad de transmisión debido a la componente de línea de vista (LOS), con un claro incremento del throughput a partir de 30 dB.

Canal Rayleigh:

- A 0 dB, el throughput es muy bajo, cercano a 0 Mbps.

- A 30 dB, el throughput comienza a aumentar, pero permanece ligeramente por debajo de los 5 Mbps.
- A 60 dB, el throughput está por debajo de los 20 Mbps.

MU-MIMO (ZF y MMSE)

ZF:

- A 0 dB, el throughput es 1.49 Mbps.
- A 15 dB, alcanza su pico con 1.83 Mbps.
- A 30 dB, el throughput llega a 1.81 Mbps.

ZF muestra un aumento progresivo en el throughput, alcanzando su rendimiento máximo cerca de los 15 dB, manteniendo un rendimiento consistente a medida que SNR mejora.

MMSE:

- A 0 dB, el throughput comienza en 1.18 Mbps.
- A 15 dB, el throughput fluctúa alrededor de 1.17 Mbps.
- A 30 dB, el throughput termina en 1.16 Mbps.

MMSE tiene un rendimiento constante pero bajo en comparación con ZF. No muestra una mejora significativa a medida que aumenta el SNR, lo que sugiere que ZF es más eficiente en la gestión de la interferencia multiusuario.

OFDMA (PFS y JSPA)

Proportional Fair Scheduling (PFS):

- A 0 dB, el throughput es de 115,337.20 Mbps.
- A 20 dB, el throughput aumenta a 1,058,847.64 Mbps.

PFS muestra una mejora notable en el throughput con el aumento del SNR, alcanzando un aumento de aproximadamente 10 veces entre 0 dB y 20 dB, lo que demuestra su efectividad en entornos de alta relación señal-ruido.

Joint Subcarrier and Power Allocation (JSPA):

- A 0 dB, el throughput es de 9,289.60 Mbps.
- A 20 dB, el throughput aumenta a 377,368.18 Mbps.

JSPA presenta un rendimiento inferior en comparación con PFS en cuanto a throughput bruto. Aunque hay una mejora en el throughput con el aumento del SNR, el incremento es mucho más modesto, lo que sugiere que JSPA es menos eficiente en términos de throughput global.

Comparación y Conclusión con Valores:

MIMO (Rician vs. Rayleigh): Los canales Rician permiten un mejor throughput que los canales Rayleigh, especialmente a SNR altos (30 dB a 60 dB), donde el throughput en Rician supera los 20 Mbps. En cambio, en Rayleigh, el throughput se mantiene debajo de esos valores.

MU-MIMO (ZF vs. MMSE): El algoritmo ZF tiene un rendimiento claramente superior, comenzando en 1.49 Mbps a 0 dB y alcanzando un pico de 1.83 Mbps en 15 dB. MMSE tiene un rendimiento más bajo y más constante, con fluctuaciones alrededor de 1.17 Mbps, indicando que ZF es más eficaz para gestionar la interferencia multiusuario y optimizar el throughput.

OFDMA (PFS vs. JSPA): PFS muestra una mejora masiva en el throughput, aumentando de 115,337.20 Mbps a 1,058,847.64 Mbps entre 0 dB y 20 dB. En cambio, JSPA tiene un aumento más modesto, alcanzando solo 377,368.18 Mbps en el mismo rango de SNR, lo que demuestra que PFS es mucho más eficiente en términos de throughput bruto.

6.2.1 Latencia

MIMO (Ecualesadores MMSE y ZF) - Latencia

En los canales Rician y Rayleigh, la latencia depende considerablemente del SNR. Con un SNR bajo (0-10 dB), la latencia se mantiene alta, alrededor de 25 ms, lo que indica una transmisión ineficiente. A medida que el SNR aumenta a partir de 30 dB, se observa una reducción significativa en la latencia. En 40 dB, la latencia cae por debajo de los 5 ms, lo que indica una mejora del 80% respecto a los valores iniciales. Finalmente, en 60 dB, la latencia desciende a menos de 1 ms, lo que representa una reducción de más del 95%. El esquema MMSE-Rician

muestra la mejor mejora en la latencia, destacándose con una disminución de aproximadamente 90% en comparación con SNR bajos. Esto se debe a que el canal Rician, que tiene una fuerte componente de línea de vista (LOS), facilita una mejor calidad de señal y, por lo tanto, una reducción considerable de los retardos.

MU-MIMO (ZF y MMSE) - Latencia

En términos de latencia, el esquema ZF muestra una reducción constante conforme aumenta el SNR. A 0 dB, la latencia es de 672 ms, lo que significa que es significativamente alta. A 15 dB, la latencia mejora a 546 ms, logrando una reducción de aproximadamente un 19% respecto a los 672 ms iniciales. En 30 dB, la latencia se mantiene estable en 553 ms, lo que indica una ligera mejora. En contraste, MMSE presenta una latencia mucho más alta, comenzando en 851 ms a 0 dB y fluctuando entre 850 ms y 900 ms a lo largo del rango de SNR. A 15 dB, cuando ZF logra su mejor rendimiento con 546 ms, MMSE aún se mantiene en alrededor de 850 ms, lo que refleja una diferencia de aproximadamente 300 ms. Esto muestra que ZF es un 35-40% más eficiente en términos de latencia que MMSE, lo que resulta en una ventaja significativa para aplicaciones de baja latencia, como las comunicaciones en redes 5G y la transmisión de video en tiempo real.

OFDMA (PFS y JSPA) - Latencia

El rendimiento en términos de latencia para los esquemas de asignación de recursos de OFDMA también varía significativamente. El esquema Proportional Fair Scheduling (PFS) logra latencias mucho más bajas y estables, con valores que oscilan entre 138 ms y 147 ms. A 0 dB, la latencia inicial es de 147 ms, y a medida que el SNR aumenta, la latencia se reduce en aproximadamente un 5-7%, alcanzando los 138 ms a 20 dB. Esto lo hace ideal para aplicaciones sensibles al retardo, como la transmisión de video y juegos en línea. Por otro lado, el esquema Joint Subcarrier and Power Allocation (JSPA) presenta latencias considerablemente más altas, que varían entre 426 ms y 444 ms. Esto representa una diferencia de aproximadamente 200 ms a favor de PFS. La latencia de JSPA es entre un 190% y un 210% más alta en comparación con PFS, lo que indica que JSPA prioriza la eficiencia espectral y la equidad en la asignación de recursos en lugar de la reducción de la latencia.

6.2.2 Eficiencia Espectral

MIMO

En cuanto a la eficiencia espectral, se observa una tendencia de mejora conforme aumenta el SNR. En valores bajos de SNR (0-20 dB), la eficiencia espectral es prácticamente nula, indicando que el sistema no está aprovechando de manera eficiente el ancho de banda disponible. A medida que el SNR aumenta por encima de 30 dB, la eficiencia espectral comienza a mejorar significativamente, alcanzando valores superiores a 0.3 Mbps/Hz a 40 dB. En 60 dB, los esquemas MMSE-Rician y ZF-Rician alcanzan una eficiencia espectral cercana a 0.55 Mbps/Hz, mientras que los esquemas en canal Rayleigh logran una eficiencia ligeramente inferior, alrededor de 0.48 Mbps/Hz. Esto se debe a que los canales Rician, con una fuerte componente de línea de vista, permiten una mayor utilización del ancho de banda disponible, maximizando la eficiencia espectral en comparación con el canal Rayleigh, donde las trayectorias múltiples generan mayor interferencia.

Eficiencia espectral (Mbps/Hz) y mejora porcentual:

SNR 0 dB: Ambos canales (Rayleigh y Rician) tienen eficiencia espectral cercana a 0 Mbps/Hz.

SNR 20 dB:

- Canal Rayleigh: 0.12 Mbps/Hz.
- Canal Rician: 0.2 Mbps/Hz.

Mejora de 66.67% en canal Rician.

SNR 40 dB:

- Canal Rayleigh: 0.3 Mbps/Hz.
- Canal Rician: 0.45 Mbps/Hz.

Mejora de 50% en canal Rician.

SNR 60 dB:

- Canal Rayleigh: 0.48 Mbps/Hz.
- Canal Rician: 0.55 Mbps/Hz.

Mejora de 14.6% en canal Rician.

Resumen de mejora porcentual:

De 0 a 60 dB: En el canal Rician, se observa una mejora del 100% en eficiencia espectral.

De 0 a 60 dB: En el canal Rayleigh, la mejora es de aproximadamente 100%, aunque con valores

más bajos en comparación con el canal Rician.

MU-MIMO (ZF y MMSE) - Eficiencia Espectral

En MU-MIMO, ZF destaca por su mejor eficiencia espectral en comparación con MMSE. En 0 dB, tanto ZF como MMSE comienzan con valores de eficiencia espectral de 0.01 bits/s/Hz. Sin embargo, a medida que el SNR aumenta, ZF muestra una mejora constante, alcanzando 0.015 bits/s/Hz a 30 dB y un máximo de 0.016 bits/s/Hz a 15 dB. En contraste, MMSE permanece casi constante en 0.01 bits/s/Hz a lo largo de todo el rango de SNR. Esto significa que ZF mejora su eficiencia espectral en un 50-60% comparado con MMSE a valores altos de SNR.

Eficiencia espectral (bits/s/Hz) y mejora porcentual:

SNR 0 dB:

- ZF: 0.01 bits/s/Hz.
- MMSE: 0.01 bits/s/Hz.

SNR 15 dB:

- ZF: 0.016 bits/s/Hz.
- MMSE: 0.01 bits/s/Hz.

Mejora de 60% con ZF.

SNR 30 dB:

- ZF: 0.015 bits/s/Hz.
- MMSE: 0.01 bits/s/Hz.

Mejora de 50% con ZF.

Resumen de mejora porcentual:

De 0 a 30 dB: ZF muestra una mejora del 50-60% en eficiencia espectral en comparación con MMSE.

OFDMA

En OFDMA, el esquema Proportional Fair Scheduling (PFS) muestra una eficiencia espectral superior a 720.86 bits/s/Hz a 0 dB, aumentando significativamente hasta 66,154.72 bits/s/Hz a 20 dB, lo que refleja una mejora del 9,000% en eficiencia espectral a medida que el SNR

aumenta. Este esquema maximiza de manera eficiente el uso del espectro, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren un alto rendimiento, como la transmisión de video en tiempo real o aplicaciones de alto throughput.

Eficiencia espectral (bits/s/Hz) y mejora porcentual:

SNR 0 dB:

- PFS: 720.86 bits/s/Hz.
- JSPA: 58.06 bits/s/Hz.

SNR 20 dB:

- PFS: 66,154.72 bits/s/Hz.
- JSPA: 2,358.55 bits/s/Hz.

Mejora de 9,000% con PFS.

Resumen de mejora porcentual:

De 0 a 20 dB: PFS tiene una mejora de 9,000% en eficiencia espectral, mientras que JSPA muestra un aumento de 4,000%.

CONCLUSIONES

- Al aumentar la frecuencia de 2.4 GHz a 6 GHz, se observa una mayor capacidad de usuarios de 300 a 700 y un incremento en el número de subcanales de 64 a 256 en MU-MIMO y de 256 a 2048 en OFDMA. Sin embargo, el mayor ancho de banda hasta 320 MHz requiere un mayor número de puntos de acceso de 5 a 15 para mantener la cobertura y la calidad del servicio.
- En entornos de alta densidad, MU-MIMO permite que hasta 700 usuarios compartan recursos espaciales de manera eficiente, mientras que OFDMA asigna subcanales específicos, mejorando la gestión del tráfico. Se observa que, en 6 GHz, MU-MIMO utiliza modulación de hasta 4096-QAM, mientras que OFDMA alcanza solo 1024-QAM, lo que indica una diferencia en la eficiencia espectral y la robustez ante interferencias.
- En 6 GHz, el rango de SNR en MU-MIMO se extiende hasta 35 dB, mientras que en OFDMA llega a 30 dB. La modulación 4096-QAM en MU-MIMO y 1024-QAM en OFDMA demuestra que MU-MIMO tiene mayor capacidad de transmisión de datos, pero también mayor sensibilidad al ruido. En contraste, OFDMA con 1024-QAM es más estable en escenarios con menor calidad de señal.
- Con 500 usuarios en 5 GHz y 700 en 6 GHz, OFDMA requiere más subcanales 1024 y 2048, respectivamente para gestionar el tráfico eficientemente. Sin embargo, la cantidad de puntos de acceso también debe incrementarse de 10 a 15 para asegurar una distribución equitativa del tráfico y minimizar la latencia en entornos congestionados.
- MIMO ofrece estabilidad y robustez, mientras que MU-MIMO mejora el throughput en redes densas. Por su parte, OFDMA representa la mejor opción en términos de eficiencia espectral y reducción de latencia, siendo clave para el rendimiento óptimo de redes Wi-Fi 6 en escenarios de alta demanda de usuarios.

RECOMENDACIONES

- Explorar el impacto de algoritmos como Successive Interference Cancellation (SIC) y Dirty Paper Coding (DPC) en la eficiencia espectral y reducción de interferencia en escenarios de alta densidad.
- Investigar cómo la movilidad de los usuarios por ejemplo, velocidades de 1-30 km/h afecta la asignación de recursos en OFDMA, y cómo técnicas como el beamforming adaptativo pueden mejorar la estabilidad de la conexión.
- Analizar el impacto de diferentes configuraciones de subcanales en la latencia y el throughput en redes con más de 1,000 usuarios para identificar configuraciones óptimas.
- Investigar el rendimiento de MIMO masivo 16x16 o más en Wi-Fi 7, comparando su eficiencia espectral, capacidad y latencia con las configuraciones actuales de Wi-Fi 6.
- Estudiar el impacto de la interferencia co-canal entre múltiples AP en escenarios con más de 15 puntos de acceso y evaluar si técnicas como BSS Coloring pueden mitigar la degradación del rendimiento.

LISTA DE REFERENCIAS

- [1] John Wiley & Sons, “Wi-Fi 6 & 6E For Dummies, Extreme Networks Special Edition,” pp. 1–100, 2022.
- [2] A. I. Patricio Mora-Olivero, R. I. Alejandro Macías-Lara, J. Darío Rodríguez-Vizueté III, and H. I. Andrés Sacón-Klinger, “Ciencias técnicas y aplicadas Artículo de Investigación 11ax para implantação no Equador para o desenvolvimento da Internet das Coisas,” vol. 7, pp. 729–762, 2021, doi: 10.23857/dc.v7i4.2447.
- [3] D. Fernando Cevallos Troya Tutor, P. D. Fidel David Parra Balza, and M. Wilmer Fabian Albarracín Guarochico, “UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL ESCUELA DE POSGRADOS ‘ESPOG’ MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES,” 2022.
- [4] González Villalobos and J. U. (s.f.), “Comparación entre el Estándar IEEE 802.11ax y el estándar IEEE 802.11ac para determinar la evolución del rendimiento de las Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN),” 2021, Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25098/GonzalezVillalobosJaimeUriel2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [5] F. Jiang, Q. Li, and X. Chen, “Channel Smoothing for 802.11ax Beamformed MIMO-OFDM,” *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 10, pp. 3413–3417, Oct. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3099167.
- [6] A. Chinmay and H. K. Pati, “VoWiFi Cell Capacity Estimation using IEEE 802.11ax,” in 2021 28th International Conference on Telecommunications, ICT 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021. doi: 10.1109/ICT52184.2021.9511461.
- [7] S. Banerji and R. S. Chowdhury, “On IEEE 802.11: Wireless Lan Technology,” *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics*, vol. 3, no. 4, pp. 45–64, Aug. 2013, doi: 10.5121/ijmnet.2013.3405.
- [8] H. Bangui, B. Buhnova, S. Rakrak, and S. Raghay, “Smart mobile technologies for the city of the future,” in 2017 Smart City Symposium Prague (SCSP), IEEE, May 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/SCSP.2017.7973851.
- [9] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, La situación de las tecnologías WLAN basadas en el estándar IEEE 802.11 y sus variantes (“Wi-Fi”). Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2004.
- [10] “Technical white paper Cisco public IEEE 802.11ax: The Sixth Generation of Wi-Fi,”

2020.

[11] F. Frommel, G. Capdehourat, and B. Rodriguez, "Performance Analysis of Wi-Fi Networks based on IEEE 802.11ax and the Coexistence with Legacy IEEE 802.11n Standard," in 2021 IEEE URUCON, URUCON 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 492–495. doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647207.

[12] "https://forum.huawei.com/enterprise/es/La-evoluci%C3%B3n-de-los-est%C3%A1ndares-de-wifi-y-equipos-Huawei-serie-EG/thread/667215941819318272-667212883622244352," Huawei.

[13] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, "A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, Jan. 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2871099.

[14] D. X. Yang, Y. Guo, and O. Aboul-Magd, "802.11ax: The Coming New WLAN System with More Than 4x MAC Throughput Enhancement," in 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), IEEE, Sep. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2017.8288165.

[15] Y. Daldoul, D.-E. Meddour, and A. Ksentini, "Performance evaluation of OFDMA and MU-MIMO in 802.11ax networks," Computer Networks, vol. 182, p. 107477, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107477.

[16] J. Yang, R. He, X. Fang, L. Yan, and H. Ju, "Random Access Modelling and Performance Analysis for the 802.11ax UORA Mechanism in Multiple BSSs," in IEEE Vehicular Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012867.

[17] J. Sheth, V. K. Ramanna, and B. Dezfouli, "Traffic Characterization for Efficient TWT Scheduling in 802.11ax IoT Networks," in IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/WCNC55385.2023.10119047.

[18] D. X. Yang, Y. Guo, and O. Aboul-Magd, "802.11ax: The Coming New WLAN System with More Than 4x MAC Throughput Enhancement," in 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), IEEE, Sep. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2017.8288165.

[19] G. Bauch and A. Alexiou, "MIMO technologies for the wireless future," in 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE,

Sep. 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699969.

[20] S. Ciccotosto and N. Benvenuto, “Interference alignment techniques for multi-user MIMO systems at millimeter-wave,” in 2015 IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), IEEE, Dec. 2015, pp. 625–628. doi: 10.1109/ICECS.2015.7440394.

[21] Y. Heo, J. Jang, Y. Kim, and H. J. Yang, “Performance Comparison of SU- and MU-MIMO in 802.11ax: Delay and Throughput,” in 2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), IEEE, Oct. 2020, pp. 879–882. doi: 10.1109/ICTC49870.2020.9289385.

[22] K. H. Lee, “Using OFDMA for MU-MIMO user selection in 802.11ax-Based Wi-Fi Networks,” IEEE Access, vol. 7, pp. 186041–186055, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960555.

[23] D. J. Deng, S. Y. Lien, J. Lee, and K. C. Chen, “On Quality-of-Service Provisioning in IEEE 802.11ax WLANs,” IEEE Access, vol. 4, pp. 6086–6104, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2602281.

[24] H. Choi, A. L. Swindlehurst, and J. Choi, “WMMSE-Based Rate Maximization for RIS-Assisted MU-MIMO Systems,” Mar. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2403.12498>

[25] Á. J. Cedeño Cevallos, “Simulación de las técnicas de precodificación ZM, MMSE y BD en sistemas MU-MIMO,” Jun. 2021, Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21666>

[26] A. Chowdhury, G. Verma, A. Swami, and S. Segarra, “Deep Graph Unfolding for Beamforming in MU-MIMO Interference Networks,” Apr. 2023.

[27] Q. Chen, Z. Weng, X. Xu, and G. Chen, “A Target Wake Time Scheduling Scheme for Uplink Multiuser Transmission in IEEE 802.11ax-Based Next Generation WLANs,” IEEE Access, vol. 7, pp. 158207–158222, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950464.

[28] I. Hussain, S. Hussain, I. Khokhar, and R. Iqbal, “OFDMA as the Technology for the Next Generation Mobile Wireless Internet,” 2007.

[29] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, “A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs,” IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, Jan. 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2871099.

[30] D.-J. Deng, K.-C. Chen, and R.-S. Cheng, “IEEE 802.11ax: Next Generation Wireless

Local Area Networks.”

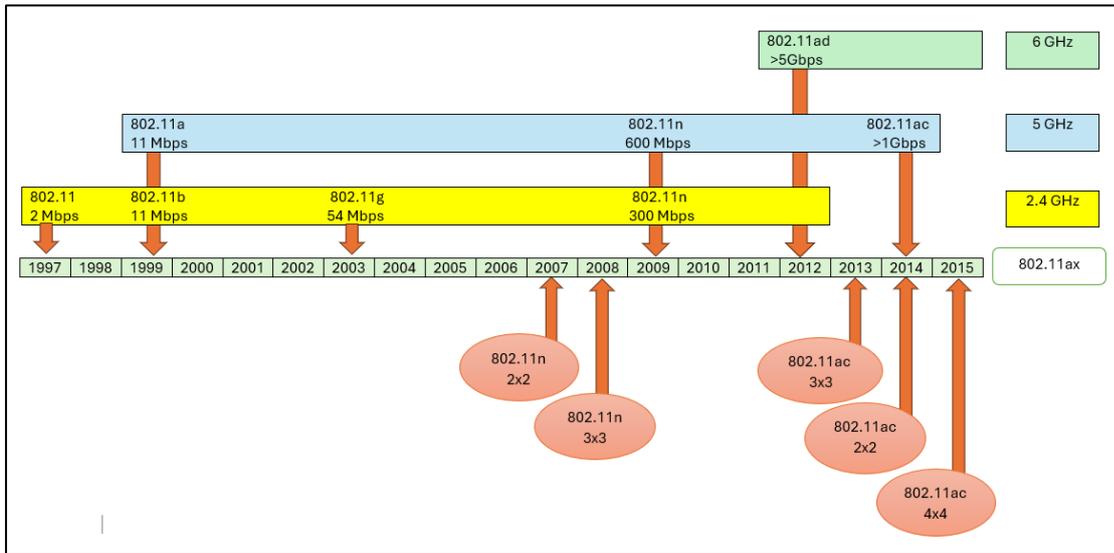
[31] Jāmi‘at al-Qāhirah. Kullīyat al-Handasah. Computer Engineering Department and Institute of Electrical and Electronics Engineers, ICENCO 2017: ICENCO 2017 13th International Computer Engineering Conference : “Boundless Smart Societies” : Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt, December 27-28, 2017.

[32] E. Lamers, R. Dijkman, A. Van Der Vegt, M. Sarode, and C. De Laat, “Securing home Wi-Fi with WPA3 personal,” in 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2021. doi: 10.1109/CCNC49032.2021.9369629.

[33] González, J., Pérez, M., & Ramírez, L. (2021). Redes inalámbricas: características y aplicaciones. Recuperado de [https://www.semanticscholar.org/paper/520127665e3681bde608e3852e0e04e0e6329c59Sánchez, R., & Martínez, A. \(2020\). Comparativa entre redes cableadas e inalámbricas. Recuperado de https://www.semanticscholar.org/paper/bf382fe3f9f8d57d4f0fe9d707625e4b84f9214e](https://www.semanticscholar.org/paper/520127665e3681bde608e3852e0e04e0e6329c59Sánchez, R., & Martínez, A. (2020). Comparativa entre redes cableadas e inalámbricas. Recuperado de https://www.semanticscholar.org/paper/bf382fe3f9f8d57d4f0fe9d707625e4b84f9214e)

ANEXOS

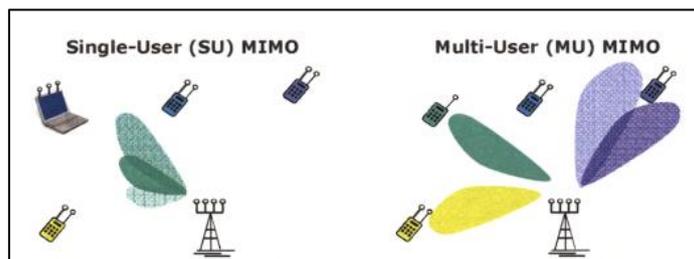
Anexo 1. Evolución del estándar 802.11ax.



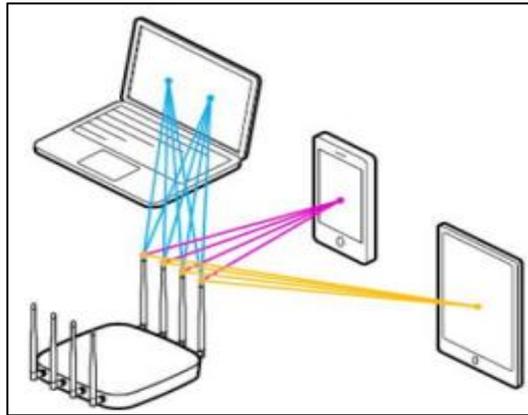
Anexo 2. Tabla de Evolución del estándar 802.11ax.

Línea de tiempo	Estándar de comunicación	Banda de frecuencia de soporte	Ancho de banda	Tasa máxima teórica	Tecnología de capa física	Estructura de antena	¿Es compatible con otros estándares de protocolo?
1997	802.11-1997	2,4 GHz	22MHz	2Mbps	FHSS/DSSS	1x1 SISO	No compatible
1999	802.11a	5GHz	20MHz	54Mbps	DSSS	1x1 SISO	No compatible
1999	802.11b	2,4 GHz	22MHz	11Mbps	OFDM	1x1 SISO	No compatible
2003	802.11g	2,4 GHz	22MHz	54Mbps	OFDM/DSSS	1x1 SISO	Compatible con 802.11b
2009	802.11n	2,4G y 5GHz	20/40MHz	600Mbps	MIMOOFDM	4x4 MIMO	Compatible con 802.11a/b/g
2013	802.11ac	5GHz	20/40/80/160MHz	6,933 Gbit/s	MIMOOFDM	8x8 MIMO	Compatible con 802.11a/n

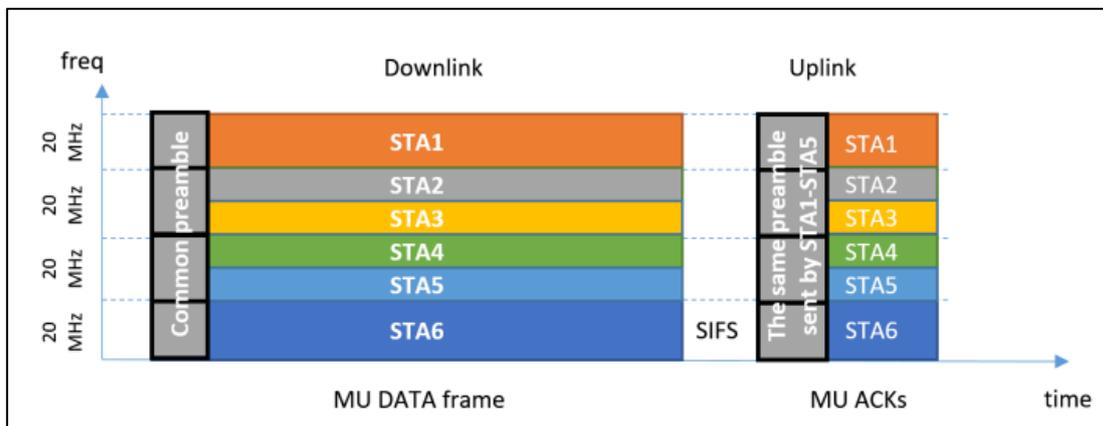
Anexo 3. MIMO de un solo usuario (SU) vs Multiusuario (MU).



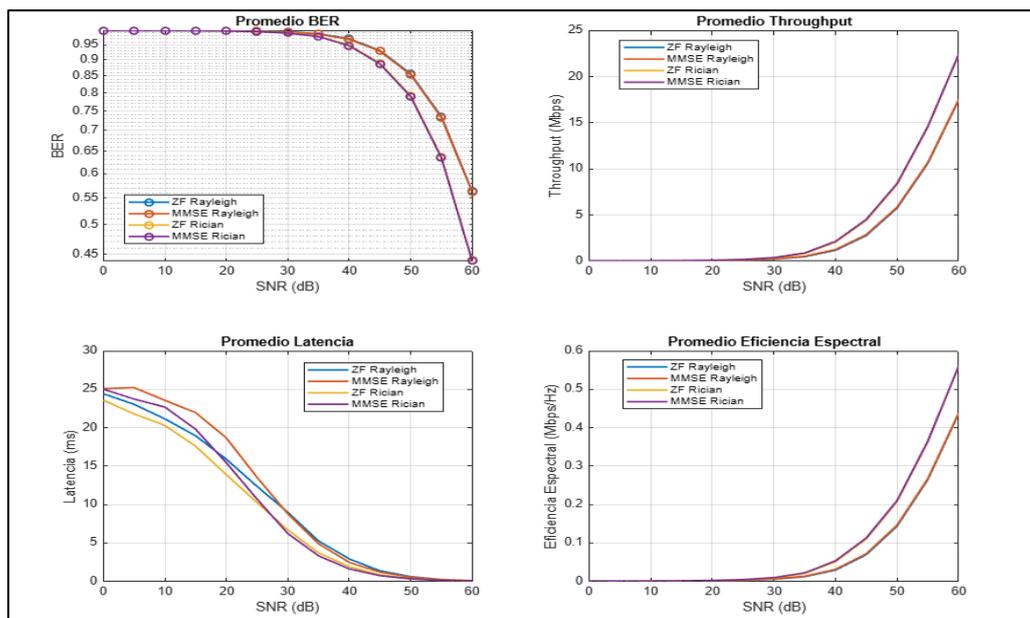
Anexo 4. Tecnología MU-MIMO.



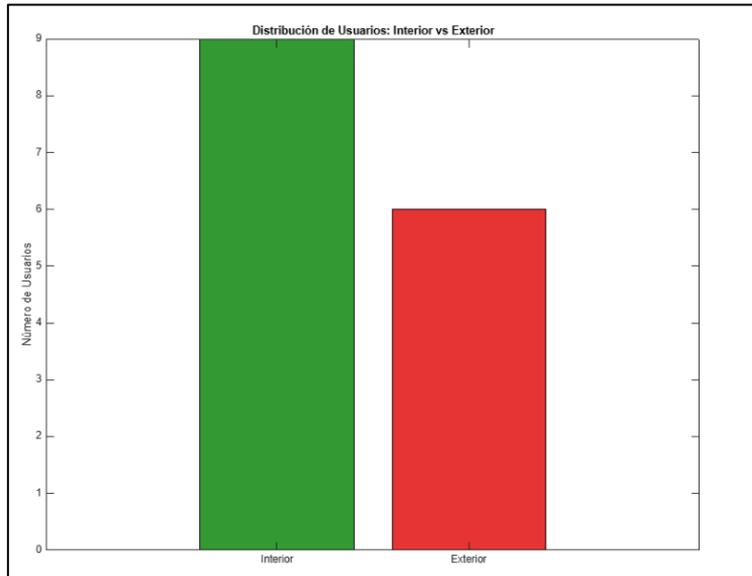
Anexo 5, Transmisión OFDMA en 802.11ax.



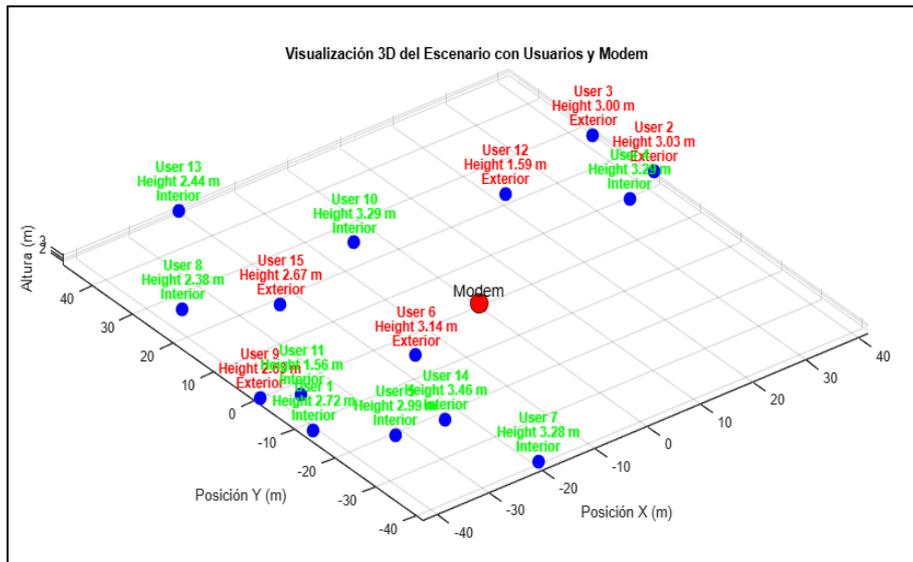
Anexo 6. Promedios de throughput, latencia y eficiencia espectral.



Anexo 7. Estadística de usuarios que están al interior y exterior de la ubicación.



Anexo 8. Visualización 3D del escenario con usuarios y modem.



Anexo 9. Resultados de simulación MIMO.

```

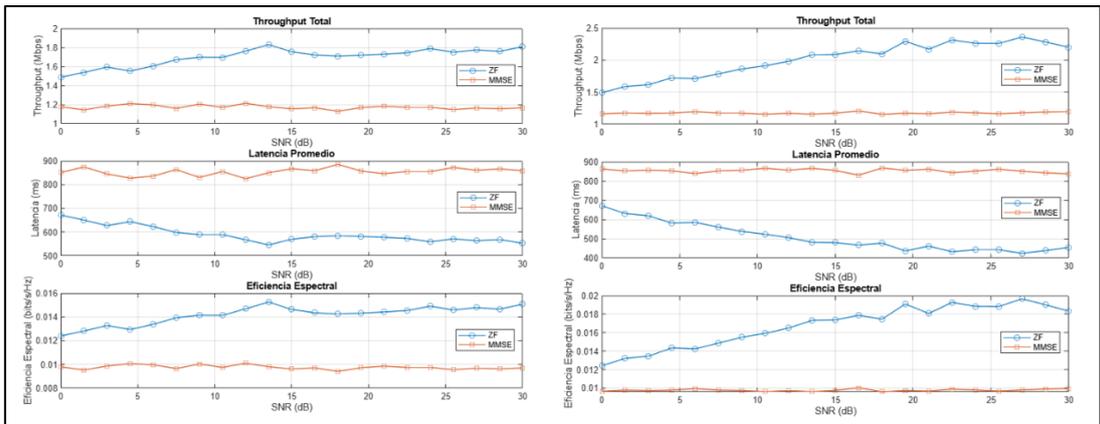
Total de usuarios: 15
Usuarios en Interior: 9 (10 m)
Usuarios en Exterior: 6 (20 m)
Usuario 1 está en Interior (10 m)
Usuario 2 está en Exterior (20 m)
Usuario 3 está en Exterior (20 m)
Usuario 4 está en Interior (10 m)
Usuario 5 está en Interior (10 m)
Usuario 6 está en Exterior (20 m)
Usuario 7 está en Interior (10 m)
Usuario 8 está en Interior (10 m)
Usuario 9 está en Exterior (20 m)
Usuario 10 está en Interior (10 m)
Usuario 11 está en Interior (10 m)
Usuario 12 está en Exterior (20 m)
Usuario 13 está en Interior (10 m)
Usuario 14 está en Interior (10 m)
Usuario 15 está en Exterior (20 m)

```

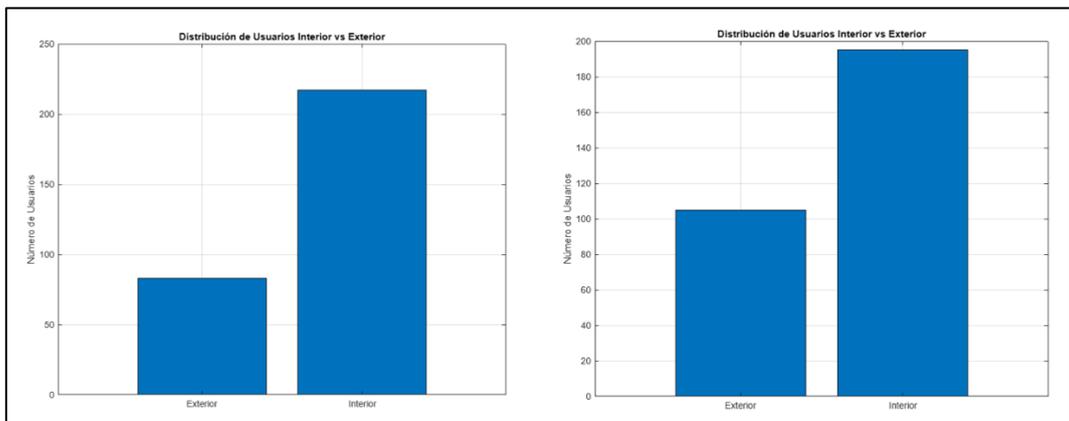
--- Resultados Promedios por Técnica (ZF y MMSE) ---

SNR (dB)	Throughput ZF (Mbps)	Throughput MMSE (Mbps)	Latencia ZF (ms)	Latencia MMSE (ms)	Espectral ZF (Mbps/Hz)	Espectral MMSE (Mbps/Hz)
0	0.0413	0.0400	24	25	0.00103	0.00100
5	0.0442	0.0399	23	25	0.00110	0.00100
10	0.0487	0.0435	21	24	0.00122	0.00109
15	0.0572	0.0511	19	22	0.00143	0.00128
20	0.0750	0.0723	16	19	0.00187	0.00181
25	0.1189	0.1253	12	14	0.00297	0.00313
30	0.2198	0.2428	9	9	0.00550	0.00607
35	0.4820	0.5300	5	5	0.01205	0.01325
40	1.1708	1.2492	3	2	0.02927	0.03123
45	2.7721	2.8703	1	1	0.06930	0.07176
50	5.7477	5.8569	1	1	0.14369	0.14642
55	10.6057	10.7063	0	0	0.26514	0.26766
60	17.4651	17.5444	0	0	0.43663	0.43861

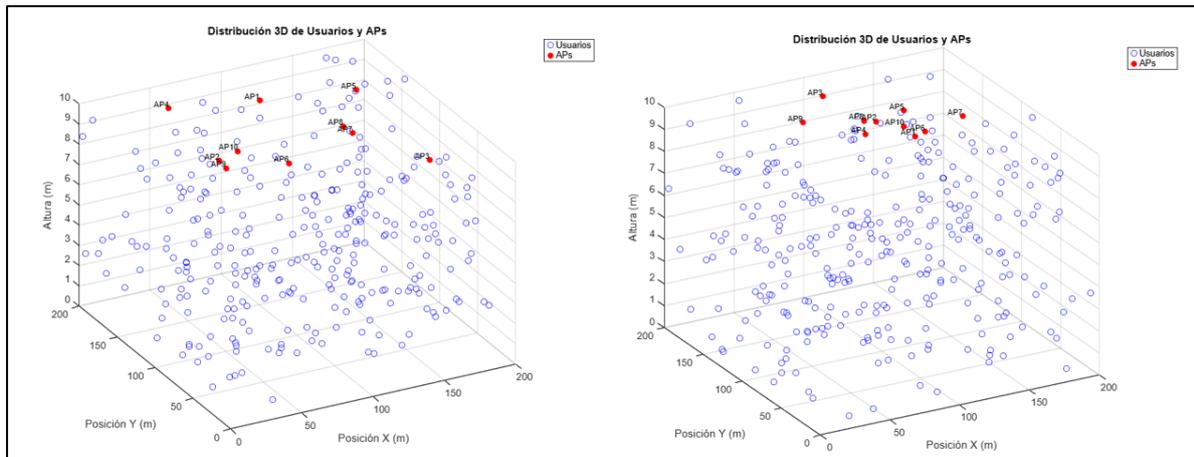
Anexo 10. Comparación del Desempeño de MU-MIMO en Canales Rayleigh y Rician con Esquemas ZF y MMSE.



Anexo 11. Distribución de Usuarios en Interior y Exterior en Canales Rayleigh y Rician.



Anexo 12. Comparación de Distribución 3D de Usuarios y APs en Canales Rayleigh y Rician.



Anexo 13. Comparación de Desempeño de MU-MIMO.

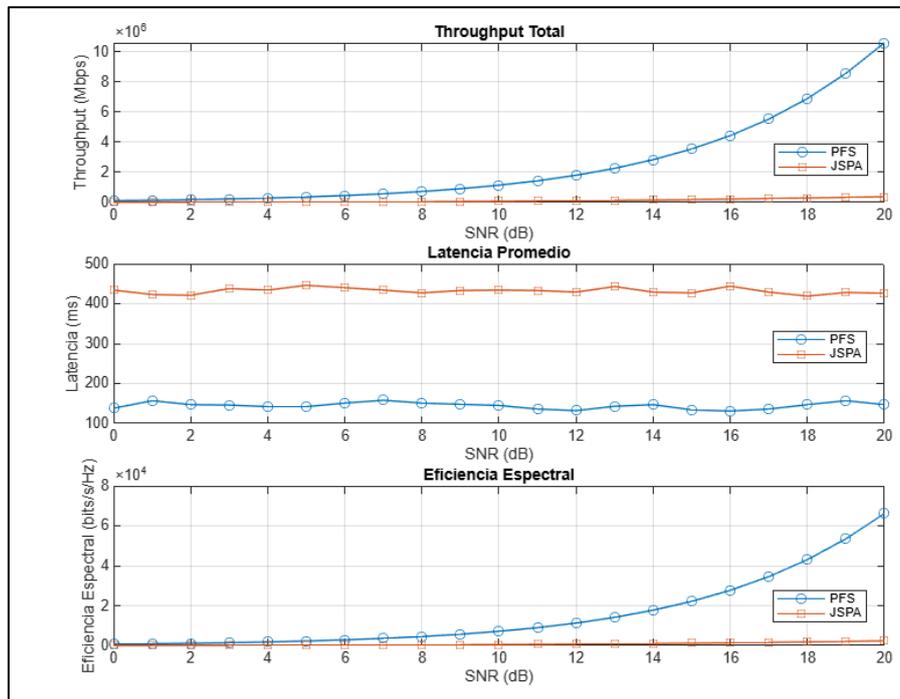
```
>> MU_MIMO_2025
Total de usuarios: 300
Usuarios en el interior: 217
Usuarios en el exterior: 83
Resultados de la simulación MU-MIMO:
```

SNR (dB)	Tput ZF	Tput MMSE	Lat ZF	Lat MMSE	Eff ZF	Eff MMSE
0.0	1.49 Mbps	1.18 Mbps	672 ms	851 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
1.5	1.54 Mbps	1.14 Mbps	650 ms	874 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
3.0	1.59 Mbps	1.18 Mbps	627 ms	845 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
4.5	1.55 Mbps	1.21 Mbps	644 ms	827 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
6.0	1.61 Mbps	1.20 Mbps	623 ms	836 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
7.5	1.67 Mbps	1.16 Mbps	598 ms	863 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
9.0	1.70 Mbps	1.20 Mbps	589 ms	830 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
10.5	1.70 Mbps	1.17 Mbps	590 ms	855 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
12.0	1.76 Mbps	1.21 Mbps	568 ms	825 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
13.5	1.83 Mbps	1.18 Mbps	546 ms	850 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
15.0	1.75 Mbps	1.15 Mbps	570 ms	867 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
16.5	1.72 Mbps	1.17 Mbps	581 ms	858 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
18.0	1.71 Mbps	1.13 Mbps	585 ms	885 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
19.5	1.72 Mbps	1.17 Mbps	582 ms	857 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
21.0	1.73 Mbps	1.18 Mbps	578 ms	846 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
22.5	1.74 Mbps	1.17 Mbps	573 ms	855 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
24.0	1.79 Mbps	1.17 Mbps	559 ms	854 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
25.5	1.75 Mbps	1.15 Mbps	571 ms	872 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
27.0	1.77 Mbps	1.16 Mbps	564 ms	860 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
28.5	1.76 Mbps	1.15 Mbps	568 ms	866 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
30.0	1.81 Mbps	1.16 Mbps	553 ms	859 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz

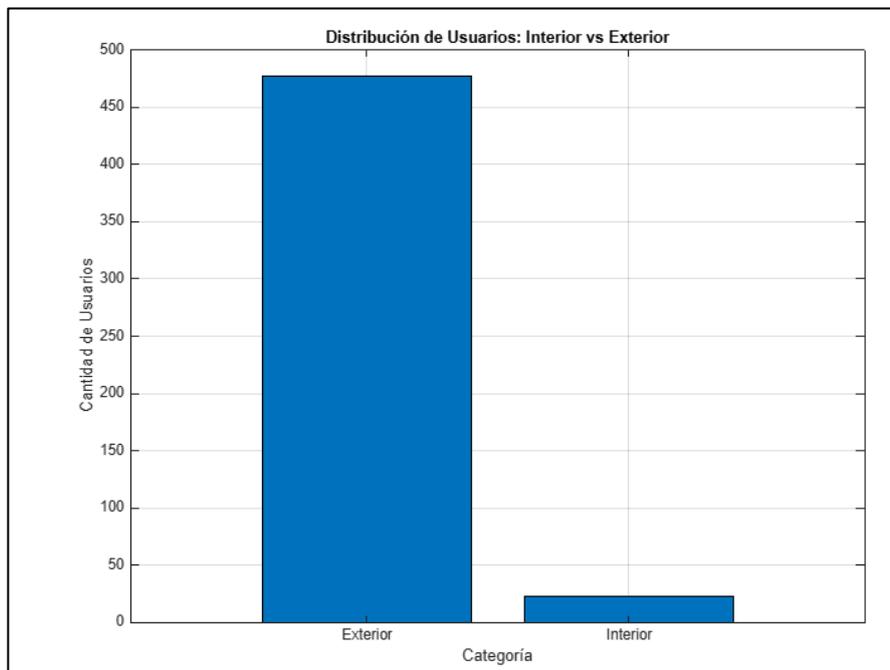
```
>> MU_MIMO_2025
Total de usuarios: 300
Usuarios en el interior: 195
Usuarios en el exterior: 105
Resultados de la simulación MU-MIMO:
```

SNR (dB)	Tput ZF	Tput MMSE	Lat ZF	Lat MMSE	Eff ZF	Eff MMSE
0.0	1.49 Mbps	1.16 Mbps	671 ms	863 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
1.5	1.59 Mbps	1.17 Mbps	631 ms	853 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
3.0	1.61 Mbps	1.17 Mbps	619 ms	857 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
4.5	1.72 Mbps	1.17 Mbps	581 ms	853 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
6.0	1.71 Mbps	1.19 Mbps	585 ms	839 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
7.5	1.78 Mbps	1.17 Mbps	560 ms	853 ms	0.01 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
9.0	1.86 Mbps	1.17 Mbps	538 ms	856 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
10.5	1.91 Mbps	1.15 Mbps	523 ms	866 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
12.0	1.98 Mbps	1.17 Mbps	505 ms	856 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
13.5	2.08 Mbps	1.15 Mbps	481 ms	866 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
15.0	2.09 Mbps	1.17 Mbps	480 ms	855 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
16.5	2.14 Mbps	1.20 Mbps	466 ms	831 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
18.0	2.10 Mbps	1.15 Mbps	477 ms	868 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
19.5	2.29 Mbps	1.17 Mbps	436 ms	856 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
21.0	2.17 Mbps	1.16 Mbps	461 ms	861 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
22.5	2.31 Mbps	1.19 Mbps	432 ms	843 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
24.0	2.26 Mbps	1.17 Mbps	442 ms	851 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
25.5	2.26 Mbps	1.16 Mbps	443 ms	861 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
27.0	2.36 Mbps	1.17 Mbps	424 ms	851 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
28.5	2.28 Mbps	1.19 Mbps	438 ms	843 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz
30.0	2.20 Mbps	1.19 Mbps	455 ms	838 ms	0.02 bits/s/Hz	0.01 bits/s/Hz

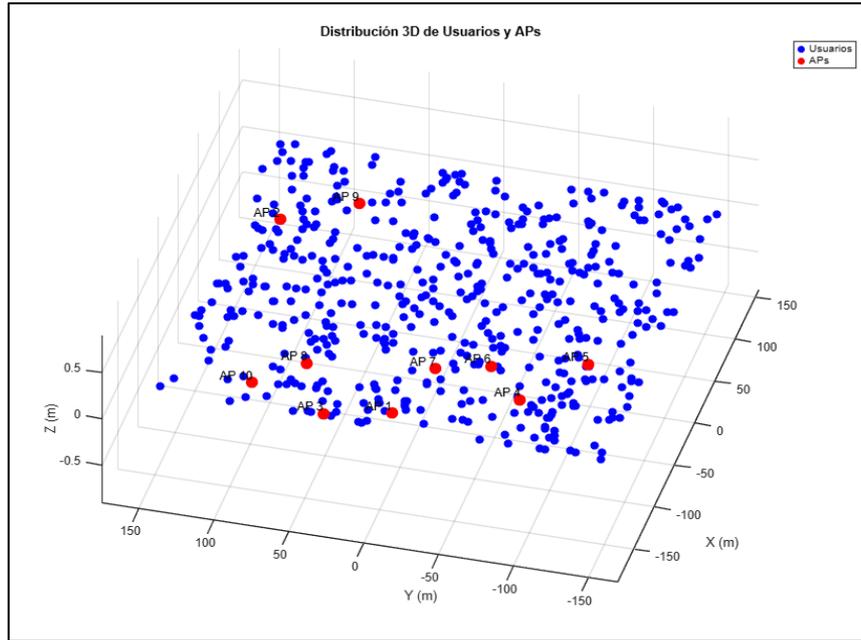
Anexo 14. Comparación de Rendimiento entre los Algoritmos PFS y JSPA en Redes IEEE 802.11ax.



Anexo 15. Distribución de Usuarios Interior vs Exterior.



Anexo 16. Visualización 3D del escenario con usuarios y AP.



Anexo 17. Resultados de Simulación OFDMA: Rendimiento en función del SNR.

```

Frecuencia seleccionada: 5.0 GHz
Potencia de ruido calculada: 6.62e-13 W
Número total de usuarios: 500
Usuarios en el interior (<= 30.0 m): 5
Usuarios en el exterior (> 30.0 m): 495
Resultados de la simulación OFDMA:

```

SNR (dB)	Tput PFS (Mbps)	Tput JSPA (Mbps)	Lat PFS (ms)	Lat JSPA (ms)	Eff PFS (bits/s/Hz)	Eff JSPA (bits/s/Hz)
0.0	115337.20	9289.60	138.0	434.0	720.86	58.06
1.0	144844.75	11658.02	157.0	423.0	905.28	72.86
2.0	182617.25	14599.33	147.0	421.0	1141.36	91.25
3.0	229860.16	18168.97	146.0	438.0	1436.63	113.56
4.0	288896.98	22692.14	142.0	434.0	1805.61	141.83
5.0	363390.63	28376.02	142.0	446.0	2271.19	177.35
6.0	457096.85	35305.81	151.0	440.0	2856.86	220.66
7.0	574331.85	43270.55	158.0	434.0	3589.57	270.44
8.0	723313.23	53183.12	151.0	427.0	4520.71	332.39
9.0	908444.73	65859.23	148.0	433.0	5677.78	411.62
10.0	1142386.20	79346.47	145.0	434.0	7139.91	495.92
11.0	1433301.48	96521.97	136.0	433.0	8958.13	603.26
12.0	1801714.75	114732.82	132.0	429.0	11260.72	717.08
13.0	2258929.10	136611.37	143.0	443.0	14118.31	853.82
14.0	2836504.11	161213.11	147.0	429.0	17728.15	1007.58
15.0	3543815.28	192551.48	134.0	427.0	22148.85	1203.45
16.0	4430490.41	222696.34	131.0	444.0	27690.57	1391.85
17.0	5524641.51	257839.20	136.0	429.0	34529.01	1611.49
18.0	6885470.97	295429.22	147.0	419.0	43034.19	1846.43
19.0	8556955.62	333226.70	157.0	428.0	53480.97	2082.67
20.0	10584754.64	377368.18	147.0	426.0	66154.72	2358.55

Simulación completada.