



REPÚBLICA DE PANAMÁ.

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA.

**DESEMPEÑO DE TECNOLOGÍAS WI-FI: ANÁLISIS PROYECTIVO DE LOS
ESTÁNDARES 5, 6, 6E, 7 Y MESH.**

**PROYECTO DE TRABAJO PARA OPTAR AL GRADO DE MAESTRÍA EN REDES
DE COMUNICACIONES CON ÉNFASIS EN TELECOMUNICACIONES
INALÁMBRICAS.**

Tutor: José Luis Munive De León.

Autor: Anibal Odin Gonzalez Reid.

Cuidad de Panamá, 31 julio de 2025.



**REPÚBLICA DE PANAMÁ.
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA.**

**DESEMPEÑO DE TECNOLOGÍAS WI-FI: ANÁLISIS PROYECTIVO DE LOS
ESTÁNDARES 5, 6, 6E, 7 Y MESH.**

**PROYECTO DE TRABAJO PARA OPTAR AL GRADO DE MAESTRÍA EN REDES
DE COMUNICACIONES CON ÉNFASIS EN TELECOMUNICACIONES
INALÁMBRICAS.**

Autor: Anibal Odin González Reid.

Cuidad de Panamá, 31 julio de 2025.

CARTA DE APROBACIÓN DEL TUTOR.

Ciudad de Panamá, 31 julio de 2025.

Profesor (a)

Héctor Mazurkiewicz

Coordinador Comité de Titulación de Estudios de Licenciatura.

Presente.

En mi carácter de Tutor del Trabajo de Grado de Maestría presentado por Anibal Odin González Reid, con cedula de identidad personal No. 8-811-501, para optar al grado de, Magister en redes de comunicaciones con énfasis en telecomunicaciones inalámbricas, considero que el trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

Atentamente,



Firma

Profesor José Luis Munive De León, cédula de identidad N°8-804-492

Línea de Investigación: Tecnologías Inalámbricas.



REPÚBLICA DE PANAMÁ.
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA.

**INFORME DE ACTIVIDADES DE TUTORÍA OPCIÓN DE TITULACIÓN DE TRABAJO
DE GRADO DE MAESTRÍA.**

Programa de maestría: en redes de comunicaciones con énfasis en telecomunicaciones inalámbricas.

Estudiante: Anibal Odin González Reid.

Tutor: Prof. José Luis Munive De León.

Título del trabajo de grado: Desempeño De Tecnologías Wi-Fi: Análisis Proyectivo De Los Estándares 5, 6, 6e, 7 Y Mesh.

Línea de Investigación: Telecomunicaciones Inalámbricas.

SESION	FECHA	HORA REUNION	ASPECTO TRATADO	OBSERVACION
1	04/07/2025	16:00 - 17:00	Revision de trabajo	Se orienta en la elección y perfeccion del título del trabajo
2	17/07/2025	20:00 - 21:00	Revision de trabajo	corregir errores, agregar documentación
3	22/07/2025	17:00 -18:00	Revision de trabajo	Trabajo cumple las especificaciones.
4	29/07/2025	21:00 -22:00	Revision de trabajo	Revision Final del trabajo investigativo.
5	01/08/2025	09:00 - 11:00	Revision de trabajo	Revision y Firma
6	20/08/2025	21:00 - 23:00	Revision de trabajo	Correcciones en la documentación final

Título definitivo: Desempeño De Tecnologías Wi-Fi: Análisis Proyectivo De Los Estándares 5, 6, 6e, 7 Y Mesh.

Comentarios finales acerca de la investigación: Declaramos que las especificaciones anteriores representan el proceso de dirección del trabajo de grado arriba mencionado.

Media Firma

Media Firma

DEDICATORIA.

Dedico este logro a mi familia, pilar fundamental en cada etapa de mi vida.

Su amor, apoyo incondicional y confianza han sido la fuerza que me ha impulsado a superar desafíos, a perseverar en los momentos difíciles y a mantenerme firme en la búsqueda de mis metas. Cada palabra de aliento, cada gesto de comprensión y cada sacrificio han sido el motor que me ha permitido avanzar y crecer, tanto personal como profesionalmente.

Este trabajo es testimonio de todo el esfuerzo compartido, del respaldo silencioso y de la fe constante que mi familia ha depositado en mí. Les agradezco profundamente por estar siempre presentes, aun en la distancia o en el silencio, acompañándome con su cariño y fortaleza.

A ellos dedico este nuevo paso en mi camino académico, con la certeza de que su presencia y apoyo seguirán siendo el faro que guíe mis proyectos futuros.

AGRADECIMIENTOS.

Con profundo respeto y gratitud, deseo expresar mi agradecimiento a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada etapa de este camino. Su sabiduría, protección y bendiciones me han sostenido para superar los retos y perseverar hasta alcanzar esta meta.

Agradezco sinceramente al grupo de profesores que me acompañó durante esta etapa de formación académica. Sus conocimientos, dedicación, exigencia y orientación no solo han enriquecido mi desarrollo profesional, sino que también han dejado huellas significativas en mi manera de analizar y comprender el ámbito de las redes de comunicación y las telecomunicaciones inalámbricas.

A mis compañeros de maestría, quienes compartieron largas jornadas de estudio, debates enriquecedores y momentos de aprendizaje conjunto. Gracias por el compañerismo, la solidaridad y el intercambio constante de ideas que hicieron de este recorrido una experiencia más llevadera y gratificante.

A todos los que, de una u otra forma, contribuyeron para que hoy pueda culminar este proceso, muchas gracias por ser parte de este logro.

INDICE GENERAL

PORADA.....	1
PORADA INTERNA	2
CARTA DE APROBACIÓN DEL TUTOR	3
INFORME DE ACTIVIDADES DE TUTORÍA	4
DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTOS.....	6
INDICE DE FIGURAS.....	11
INDICE DE TABLA.....	12
RESUMEN.....	13
SUMMARY.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPÍTULO I.....	16
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	16
1.1 Planteamiento del Problema.....	16
1.2 Formulación del Problema.....	17
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 Justificación.....	18
1.5 Relación del Tema	19
1.6 Alcances y Limitaciones.....	19
CAPÍTULO II.....	21
2. MARCO TEORICO.....	21
2.1 Introducción al Wi-Fi y su evolución histórica.....	21
2.2 Origen y evolución de las tecnologías Wi-Fi.....	21
2.3 Relevancia del Wi-Fi en las telecomunicaciones inalámbricas.....	22
2.4 Importancia del análisis comparativo y prospectivo de estándares.....	22
2.5 Fundamentos técnicos de las tecnologías Wi-Fi.....	23
2.5.1 Arquitectura de redes Wi-Fi	23
2.5.2 Principios de radiofrecuencia aplicados a Wi-Fi	25
2.5.3 Modulación y codificación en redes inalámbricas	26
2.5.4 Bandas de frecuencia (2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz)	27

2.5.5 Canales, ancho de banda y coexistencia espectral	28
2.5.6 Seguridad en redes Wi-Fi: evolución de protocolos.....	29
2.6 Estándares IEEE 802.11: Características técnicas y desempeño.	32
2.6.1 Wi-Fi 5 (802.11ac).	32
2.6.2 Wi-Fi 6 (802.11ax).	33
2.6.3 Wi-Fi 6E.....	34
2.6.4 Wi-Fi 7 (802.11be).	34
2.6.5 Redes Wi-Fi Mesh.	35
2.7 Comparativa de desempeño entre estándares Wi-Fi.....	37
2.7.1 Parámetros clave para la evaluación técnica y práctica.	37
2.7.2 Escenarios típicos de evaluación.....	40
2.8. Tendencias y proyecciones tecnológicas.....	40
2.8.1 Demanda creciente de ancho de banda.	40
2.8.2 Rol de Wi-Fi en redes convergentes.....	41
2.8.3 Avances en seguridad y mitigación de interferencias.	41
2.8.4 Expectativas para Wi-Fi 7 y siguientes generaciones.....	42
2.8.5 Perspectivas de mercado y adopción global.....	44
2.9 Retos y oportunidades en la adopción de nuevas tecnologías Wi-Fi.	44
2.9.1 Costos de implementación y actualización de infraestructura.	44
2.9.2 Compatibilidad con dispositivos legajo.	45
2.9.3 Regulaciones del espectro.....	45
2.9.4 Ciberseguridad y privacidad.	46
2.9.5 Sostenibilidad y eficiencia energética.	46
2.10. Síntesis del marco teórico.	47
2.10.1 Integración de hallazgos.	47
2.10.2 Identificación de brechas de conocimiento.	47
2.10.3 Conexión con el objetivo de la investigación.	48
CAPÍTULO III.	49
3. METODOLOGÍA.	49
3.1 Enfoque Metodológico.	49
3.2 Tipo y Nivel de Investigación.	49
3.3 Diseño de Investigación.	50

3.4 Fuentes y Técnicas de Recolección de Datos.....	50
3.5 Variables de Estudio.....	51
3.6 Procedimiento Metodológico.....	52
3.7 Técnicas e Instrumentos de Análisis.....	53
3.8 Validación de la Información.....	54
3.9 Alcances y Limitaciones.....	54
CAPÍTULO IV.....	55
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	55
4.1 Panorama General del Análisis.....	55
4.2 Matriz Comparativa General de Características Técnicas.....	55
4.3 Matriz Comparativa de Seguridad.....	57
4.4 Matriz Comparativa de Escenarios de Aplicación.....	59
4.5 Análisis General y Proyecciones.....	60
4.6 Propuestas Estratégicas de Implementación.....	60
4.7 Limitaciones de los Resultados.....	61
CAPÍTULO V.....	62
5. CASOS DE ESTUDIO Y APLICACIONES PRÁCTICAS.....	62
5.1 Wi-Fi 5 (802.11ac) – Madurez tecnológica y limitaciones.....	62
5.2 Wi-Fi 6 (802.11ax) – Alta densidad y eficiencia espectral.....	63
5.3 Wi-Fi 6E – Expansión al espectro de 6 GHz.....	64
5.4 Redes Mesh – Expansión de cobertura.....	65
5.5 Wi-Fi 7 (802.11be) – Innovación en desarrollo.....	66
CAPÍTULO VI.....	70
6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y EVALUACIÓN COSTO-BENEFICIO.....	70
6.1 Variables Económicas Consideradas.....	70
6.2 Costos de Dispositivos Cliente.....	71
6.4 Análisis de Retorno de Inversión (ROI).....	72
6.4 Costos en Redes Mesh.....	74
6.5 Consideraciones Regulatorias y Costos.....	74
6.7 Riesgos y Factores que Impactan el Costo-Beneficio.....	75
CAPÍTULO VII.....	77
7. Aspectos Regulatorios de las Tecnologías Wi-Fi en Panamá.....	77

7.1 Marco Legal y Organismos Competentes.....	78
7.2 Regulaciones para Bandas ISM.....	78
7.3 Situación de la Banda de 6 GHz (Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7).....	79
7.4 Normas sobre Equipos y Homologación.....	80
7.5 Aspectos Regulatorios para Redes Mesh.....	80
7.6 Proyecciones y Recomendaciones.....	81
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS.....	88

INDICE DE FIGURAS.

Ilustración 1. Diagrama de la evolución del Wi-Fi	17
Ilustración 2. Comparativa de estándares Wi-Fi.....	20
Ilustración 3. Logo asociado.....	21
Ilustración 4. Arquitectura Wi-Fi	24
Ilustración 5. Modo Ad-Hoc	24
Ilustración 6. Ejemplo de diseño de red Wi-Fi Mesh	25
Ilustración 7. La radiofrecuencia	26
Ilustración 8. símbolos OFDM agrupados	27
Ilustración 9. Bandas, Frecuencias y Canales	29
Ilustración 10. Evolución del cifrado.....	32
Ilustración 11. Evolución del estándar y certificaciones de WiFi	36
Ilustración 12. Cobertura de la red Wi-Fi Mesh	36
Ilustración 13. Certificación Wi-Fi 7	43
Ilustración 14. Levi's Stadium en California.....	63
Ilustración 15. Campus Universidad Purdue EEUU	64
Ilustración 16. Redes Mesh Residencial	66
Ilustración 17. Wi-Fi 7 - Casos de Uso	68
Ilustración 18. Características Wi-Fi 7	69
Ilustración 19. La Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP)	77
Ilustración 20. Eficiencia y confiabilidad de Wi-Fi.....	87

INDICE DE TABLA

Tabla 1. Características Técnicas.	55
Tabla 2. Comparativa de Seguridad.	57
Tabla 3. Comparativa de Escenarios de Aplicación.	59
Tabla 4. Comparativa técnica.	65
Tabla 5. Visión Integrada de los Casos de Estudio.	67
Tabla 6. Costos de Infraestructura y Dispositivos Cliente.	71
Tabla 7. Tabla de Ejemplo.	72
Tabla 8. Estimación de consumo energético por AP.	72
Tabla 9. Análisis económico	73
Tabla 10. Comparativa.	74
Tabla 11. Análisis Comparativo de Restricciones y Oportunidades.	81



**REPÚBLICA DE PANAMÁ.
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA.**

**DESEMPEÑO DE TECNOLOGÍAS WI-FI: ANÁLISIS PROYECTIVO DE LOS
ESTÁNDARES 5, 6, 6E, 7 Y MESH.**

Autor (a): Anibal Odin González Reid.

Tutor (a): José Munive.

Año: 2025.

RESUMEN.

La investigación analiza de forma comparativa y proyectiva el desempeño de las tecnologías Wi-Fi 5 (802.11ac), 6 (802.11ax), 6E, 7 (802.11be) y las arquitecturas Mesh, identificando sus capacidades técnicas, ventajas operativas y perspectivas de adopción. Se empleó una metodología proyectiva con enfoque cuantitativo y comparativo, basada en análisis documental y técnico de fuentes especializadas y normativas, sin experimentación práctica, para evaluar parámetros como velocidad, latencia, eficiencia espectral, capacidad de dispositivos, seguridad y cobertura. Los resultados evidencian diferencias claras entre los estándares, mostrando la evolución de Wi-Fi frente a las crecientes demandas de tráfico y su alineación con aplicaciones emergentes como IoT masivo, realidad aumentada y entornos de alta densidad. Asimismo, se reconocen oportunidades y desafíos técnicos, económicos y regulatorios, ofreciendo una base estratégica para el diseño e implementación de redes inalámbricas y una visión sobre el futuro de las telecomunicaciones en el corto y mediano plazo.

Palabras clave: Wi-Fi 5, Wi-Fi 6, Wi-Fi 6E, Wi-Fi 7, Redes Mesh, Desempeño inalámbrico, Proyección tecnológica, Telecomunicaciones.

Línea de investigación: Telecomunicaciones Inalámbricas.



REPUBLIC OF PANAMA.
INTERNATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY.
FACULTY OF COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY.

**WI-FI TECHNOLOGY PERFORMANCE: PROJECTIVE ANALYSIS OF STANDARDS
5, 6, 6E, 7, AND MESH.**

Author: Anibal Odin González Reid.

Tutor (a): José Munive.

Year: 2025.

SUMMARY.

This study comparatively and prospectively analyzes Wi-Fi 5 (802.11ac), 6 (802.11ax), 6E, 7 (802.11be), and Mesh networks, identifying technical capabilities, operational advantages, and adoption perspectives. A projective, quantitative, and comparative methodology was applied, based on documentary and technical analysis of specialized sources and standards, without experimental execution, to assess parameters such as speed, latency, spectral efficiency, device capacity, security, and coverage. Results show clear contrasts among standards, highlighting Wi-Fi's evolution, its suitability for growing traffic demands, and alignment with emerging applications such as massive IoT, augmented reality, and high-density environments. Opportunities and challenges of technical, economic, and regulatory nature are outlined, providing a strategic basis for network design and deployment, as well as insights into the short- and medium-term future of wireless telecommunications.

Keywords: Wi-Fi 5, Wi-Fi 6, Wi-Fi 6E, Wi-Fi 7, Mesh networks, Wireless performance, Technological projection, Telecommunications.

Research line: Wireless Telecommunications.

INTRODUCCIÓN.

El crecimiento sostenido de la demanda por conectividad inalámbrica ha consolidado al Wi-Fi como un componente esencial de las redes modernas, tanto en entornos residenciales como empresariales e industriales. La constante evolución de este estándar busca satisfacer necesidades cada vez más exigentes, incluyendo mayores velocidades, menor latencia, eficiencia espectral y capacidad para soportar una alta densidad de dispositivos, impulsada por fenómenos como el Internet de las Cosas, la movilidad laboral y el streaming de alta definición.

Ante este panorama, resulta crucial analizar y proyectar el desempeño de las tecnologías Wi-Fi incluidas en los estándares Wi-Fi 5, Wi-Fi 6, Wi-Fi 6E, Wi-Fi 7 y las soluciones Mesh. Estas innovaciones representan no solo un avance técnico significativo, sino también desafíos regulatorios, económicos y estratégicos para su adopción en contextos específicos, como el caso de Panamá, donde las condiciones de mercado y la normativa imponen consideraciones particulares.

El presente estudio tiene como propósito ofrecer un análisis integral de estas tecnologías, abordando sus características técnicas, desempeño comparativo, aspectos regulatorios, implicaciones económicas y proyecciones futuras. La investigación busca proporcionar información útil y fundamentada para que los distintos actores del ecosistema de redes inalámbricas empresas, operadores, reguladores, fabricantes y la academia puedan tomar decisiones estratégicas que respondan a los desafíos actuales y futuros de las telecomunicaciones inalámbricas.

CAPÍTULO I.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

1.1 Planteamiento del Problema.

La evolución de las redes inalámbricas ha transformado la forma en que las personas acceden a la información, se comunican y utilizan servicios digitales. Entre estas redes, las tecnologías Wi-Fi han tenido un papel protagónico debido a su accesibilidad, bajo costo y continua actualización. Desde su aparición, el estándar IEEE 802.11 ha sido actualizado constantemente para responder a las nuevas demandas de conectividad, dando lugar a distintas generaciones como Wi-Fi 5 (802.11ac), Wi-Fi 6 (802.11ax), Wi-Fi 6E y, más recientemente, Wi-Fi 7 (802.11be). A esto se suma el enfoque de redes Mesh, que busca mejorar la cobertura y estabilidad mediante topologías distribuidas.

Cada nuevo estándar promete mejoras significativas en velocidad, eficiencia espectral, capacidad de usuarios y calidad de servicio. Sin embargo, en la práctica, estas mejoras pueden verse afectadas por diversos factores como la densidad del entorno, la compatibilidad entre dispositivos, la infraestructura existente y las condiciones físicas de transmisión. Además, la incorporación de nuevas tecnologías conlleva desafíos técnicos, económicos y operativos que deben ser evaluados cuidadosamente.

Existe una necesidad creciente de comprender cómo se comportan realmente estos estándares, no solo desde una perspectiva técnica, sino también proyectando su impacto futuro. Esto incluye identificar en qué escenarios son más eficientes, qué limitaciones presentan, y cuáles son las tendencias más relevantes en cuanto a su adopción en entornos reales.

Por tanto, el problema central de esta investigación gira en torno a la evaluación comparativa y proyectiva del desempeño de los estándares Wi-Fi más recientes, con el

objetivo de generar conocimiento que permita tomar decisiones técnicas y estratégicas más acertadas en el diseño y operación de redes inalámbricas.

Ilustración 1. Diagrama de la evolución del Wi-Fi



Fuente: Eurotronix. (2023, junio 20). *Celebramos el día mundial del WiFi*. Eurotronix.

<https://eurotronix.com/es/noticias/celebramos-el-dia-mundial-del-wi-fi/>

1.2 Formulación del Problema.

¿Cómo se proyecta el desempeño de las tecnologías Wi-Fi correspondientes a los estándares 5, 6, 6E, 7 y Mesh, en términos de sus características técnicas, eficiencia operativa y aplicación en escenarios reales de telecomunicaciones inalámbricas, y cuáles son los principales retos y oportunidades que presenta su implementación en el corto y mediano plazo?

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

Analizar de forma proyectiva el desempeño de las tecnologías Wi-Fi correspondientes a los estándares 5, 6, 6E, 7 y Mesh, evaluando sus características técnicas, eficiencia y potencial de aplicación en entornos de telecomunicaciones inalámbricas.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Describir las características técnicas y funcionales de los estándares Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y Mesh.
- Comparar los parámetros de desempeño clave de cada estándar, como velocidad de transmisión, latencia, eficiencia espectral y capacidad de usuarios simultáneos.
- Evaluar las tendencias y proyecciones tecnológicas para cada estándar, considerando escenarios de aplicación futuros como hogares inteligentes, oficinas, entornos industriales y espacios públicos.
- Identificar los principales retos y oportunidades asociados con la adopción e implementación de estas tecnologías, tanto desde el punto de vista técnico como operativo.

1.4 Justificación.

Las redes Wi-Fi representan un componente esencial de la infraestructura de telecomunicaciones moderna. Su evolución ha permitido el crecimiento de aplicaciones en sectores tan diversos como la educación, la salud, el comercio, la industria y el entretenimiento. Actualmente, con el aumento sostenido del número de dispositivos conectados, la demanda por mejores prestaciones en redes inalámbricas se ha incrementado notablemente.

Este estudio se justifica por la necesidad de contar con una visión comparativa y prospectiva sobre los estándares Wi-Fi más recientes. La información técnica disponible a menudo se encuentra dispersa o enfocada a casos específicos, lo cual dificulta la toma de decisiones en proyectos de implementación. Analizar estos estándares desde una perspectiva integral permitirá identificar sus ventajas reales, limitaciones operativas y condiciones óptimas de uso.

Asimismo, el estudio permitirá conocer qué mejoras representan cada nueva generación en términos de desempeño, y cómo se alinean estas mejoras con las necesidades reales

de los usuarios y organizaciones. Esta información será útil para ingenieros, operadores de red, diseñadores de soluciones tecnológicas y responsables de planificación en telecomunicaciones.

Además, la investigación contribuye al ámbito académico, ya que fortalece el conocimiento aplicado sobre tecnologías inalámbricas y sus implicaciones prácticas. Al mismo tiempo, ofrece una base para estudios posteriores que aborden aspectos como seguridad, interoperabilidad, gestión de tráfico o impacto económico.

1.5 Relación del Tema con las Líneas de Investigación de la Maestría.

Este trabajo se relaciona directamente con la línea de investigación de Redes de Comunicación Inalámbricas y Tecnologías Emergentes, correspondiente a la Maestría en Redes de Comunicación con Énfasis en Telecomunicaciones Inalámbricas.

La evaluación técnica y proyectiva de los estándares Wi-Fi forma parte del estudio de redes de acceso, optimización de espectro, gestión eficiente de tráfico y análisis de soluciones de conectividad. Estas áreas son clave dentro del enfoque del programa, que busca formar profesionales capaces de desarrollar, evaluar y liderar proyectos de alto impacto en el campo de las telecomunicaciones.

Además, la investigación contribuye a los objetivos formativos del programa al fomentar el análisis crítico, la aplicación de conocimientos técnicos y el desarrollo de competencias orientadas a la solución de problemas en contextos reales, utilizando tecnologías de última generación.

1.6 Alcances y Limitaciones.

Alcances:

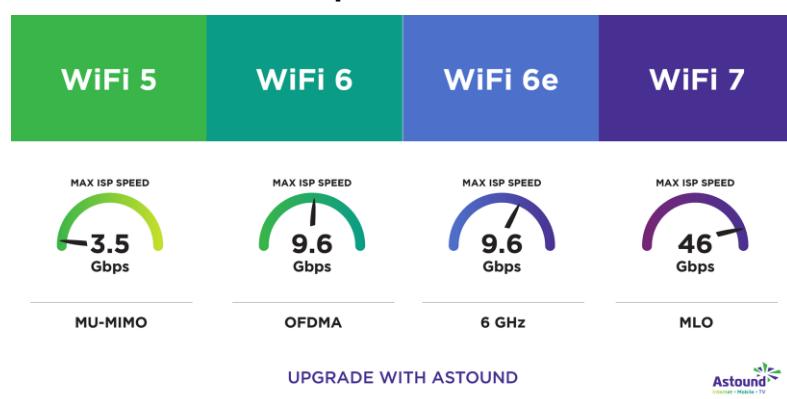
- El estudio cubre los estándares Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y el modelo de redes Mesh.

- Se analizarán sus características técnicas, ventajas operativas y proyecciones de desempeño en distintos escenarios de uso.
- Se presentará un análisis comparativo entre los estándares, así como una visión proyectiva de su posible evolución e impacto.
- Se considerarán datos técnicos, resultados de pruebas documentadas, informes de fabricantes y estudios académicos.

Limitaciones:

- El estándar Wi-Fi 7 aún está en fase temprana de despliegue, por lo que parte del análisis se basará en datos preliminares y proyecciones teóricas.
- No se incluirán pruebas de campo extensas en todos los escenarios posibles, por limitaciones de tiempo y recursos.
- El estudio se enfocará en desempeño técnico, sin abordar de manera detallada aspectos como costos económicos o políticas de mercado.

Ilustración 2. Comparativa de estándares Wi-Fi



Fuente: Astound. (s. f.). *Wi-Fi 7 vs. Wi-Fi 6 vs. Wi-Fi 5 differences*. Astound.
<https://www.astound.com/learn/internet/wifi-7-wifi-6-wifi-5-differences/>

CAPÍTULO II.

2. MARCO TEORICO.

2.1 Introducción al Wi-Fi y su evolución histórica.

Ilustración 3. Logo asociado



Fuente: Computer Hoy. (2016, abril 1). *Historia del WiFi: así empezó todo en los años ochenta*. ComputerHoy. <https://computerhoy.20minutos.es/noticias/internet/historia-del-wifi-asi-empezo-todo-anos-ochenta-79475>

2.2 Origen y evolución de las tecnologías Wi-Fi.

El Wi-Fi, acrónimo de Wireless Fidelity, representa una de las tecnologías más disruptivas en la historia de las telecomunicaciones. Su origen se remonta a la década de 1990, cuando el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) estableció el estándar IEEE 802.11, sentando las bases para la transmisión de datos sin cables en redes de área local (WLAN). Sin embargo, los antecedentes tecnológicos pueden rastrearse incluso a los años 70, cuando investigadores del laboratorio ALOHAnet de la Universidad de Hawái desarrollaron los primeros esquemas de acceso aleatorio que luego inspirarían los protocolos de comunicación inalámbrica.

El estándar IEEE 802.11 fue aprobado en 1997, ofreciendo inicialmente velocidades modestas de hasta 2 Mbps en la banda de 2.4 GHz. Posteriormente, su evolución ha

estado marcada por el desarrollo de múltiples enmiendas (como 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, y más recientemente 802.11ax, conocido como Wi-Fi 6, y 802.11be o Wi-Fi 7), que han permitido mejoras sustanciales en velocidad, eficiencia espectral, cobertura, capacidad de conexión simultánea y robustez ante interferencias.

Este progreso ha sido impulsado por la necesidad creciente de mayor ancho de banda, la proliferación de dispositivos móviles y el auge de aplicaciones exigentes en términos de calidad de servicio, como el streaming en alta definición, la realidad aumentada y el Internet de las Cosas (IoT).

2.3 Relevancia del Wi-Fi en las telecomunicaciones inalámbricas.

En el contexto de las telecomunicaciones inalámbricas, el Wi-Fi se ha consolidado como una tecnología esencial para el acceso ubicuo a Internet, particularmente en entornos residenciales, corporativos, académicos y de servicios públicos. Su impacto ha sido doble: por un lado, ha democratizado el acceso a la información, permitiendo una conectividad flexible y asequible; por otro, ha sido un catalizador para la transformación digital de múltiples sectores productivos.

A diferencia de otras tecnologías inalámbricas como las redes celulares (3G, 4G, 5G), el Wi-Fi opera en bandas sin licencia, lo que facilita su implementación sin necesidad de grandes inversiones en infraestructura ni permisos regulatorios complejos. Esta accesibilidad técnica y económica ha sido fundamental para su masificación, fomentando un ecosistema tecnológico en constante innovación. Asimismo, el Wi-Fi ha jugado un rol estratégico en la convergencia de redes fijas e inalámbricas, permitiendo la descarga de tráfico celular (offloading) y aliviando la congestión de las redes móviles, lo que refuerza su rol complementario dentro del paradigma de conectividad integral.

2.4 Importancia del análisis comparativo y prospectivo de estándares.

El análisis comparativo y prospectivo de los estándares Wi-Fi no solo permite evaluar el desempeño técnico de cada generación, sino que también ofrece una visión estratégica para la toma de decisiones en planificación, despliegue y evolución de infraestructuras de red. A medida que los entornos digitales se tornan más complejos y las demandas de los usuarios más exigentes, comprender las diferencias entre los estándares en términos de velocidad, latencia, eficiencia energética, seguridad y escalabilidad resulta crucial para asegurar una experiencia de conectividad óptima.

Además, un enfoque prospectivo permite anticipar tendencias tecnológicas emergentes, como el uso de bandas milimétricas, la incorporación de inteligencia artificial para gestión de redes, o la integración con tecnologías de redes definidas por software (SDN) y virtualización de funciones de red (NFV).

Evaluar estos elementos dentro de una perspectiva crítica y basada en evidencia fortalece la capacidad analítica y técnica del profesional en telecomunicaciones, al tiempo que orienta las decisiones hacia soluciones sostenibles, resilientes y alineadas con los desafíos del futuro digital.

2.5 Fundamentos técnicos de las tecnologías Wi-Fi.

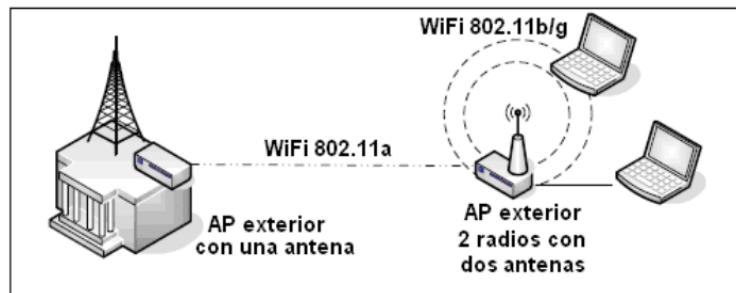
2.5.1 Arquitectura de redes Wi-Fi.

Las redes Wi-Fi pueden estructurarse según diferentes arquitecturas, cada una con características y aplicaciones específicas que impactan directamente en su desempeño y cobertura.

- **Infraestructura:** Esta arquitectura es la más común, basada en la existencia de un punto de acceso (AP) que actúa como intermediario entre los dispositivos clientes (estaciones o STA) y la red cableada o Internet. El AP coordina la comunicación, maneja la autenticación y controla el acceso al medio, formando un Basic Service Set (BSS). Cuando múltiples APs están interconectados a través

de una distribución system (DS), se configura un Extended Service Set (ESS), ampliando la cobertura y facilitando la movilidad del usuario sin interrupciones.

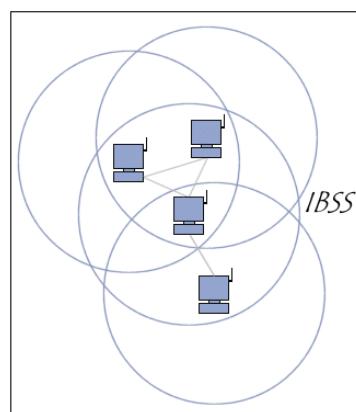
Ilustración 4. Arquitectura Wi-Fi



Fuente: ResearchGate. (2008). *Figura 121: Arquitectura WiFi 802.11* [Ilustración]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-121-Arquitectura-WiFi-80211-48_fig4_48227749

- **Ad-hoc:** En esta topología, también llamada Independent Basic Service Set (IBSS), los dispositivos se comunican directamente entre sí sin necesidad de un punto de acceso central. Esta modalidad es útil para redes temporales o escenarios donde la infraestructura es limitada. Sin embargo, su escalabilidad y gestión son reducidas, afectando la estabilidad y eficiencia en redes extensas.

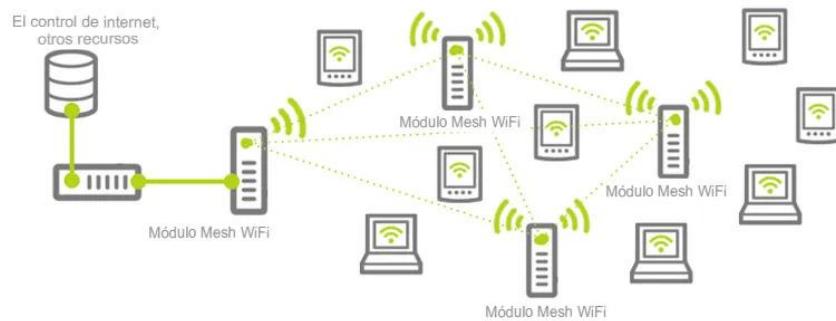
Ilustración 5. Modo Ad-Hoc



Fuente: ResearchGate. (2008). *Figura 123: Modo Ad Hoc* [Ilustración]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-123-Modo-Ad-Hoc-44_fig5_48227749

- **Mesh:** La arquitectura mesh representa un avance significativo en la expansión y resiliencia de las redes Wi-Fi. Se basa en una red autoorganizada donde cada nodo (AP o estación) puede transmitir datos hacia otros nodos, creando rutas dinámicas y múltiples caminos hacia el destino. Esto optimiza la cobertura, reduce puntos muertos y mejora la tolerancia a fallos. Las tecnologías Wi-Fi mesh, en particular con estándares recientes como Wi-Fi 6 y 7, integran algoritmos inteligentes de encaminamiento y balanceo de carga, potenciando el rendimiento global en ambientes complejos.

Ilustración 6. Ejemplo de diseño de red Wi-Fi Mesh



Fuente: CCNA desde Cero. (s. f.). *¿Qué es una red WiFi Mesh?*. CCNA desde Cero.

<https://ccnadesdecero.es/que-es-red-wifi-mesh/>

2.5.2 Principios de radiofrecuencia aplicados a Wi-Fi.

El funcionamiento de Wi-Fi se fundamenta en la propagación de ondas electromagnéticas dentro de las bandas de frecuencia asignadas. La radiofrecuencia (RF) aplicada a Wi-Fi implica comprender fenómenos como la reflexión, refracción, difracción y atenuación, que condicionan la calidad y alcance de la señal. La propagación en entornos interiores presenta retos particulares debido a obstáculos físicos (paredes, muebles) y fuentes de interferencia electromagnética.

El diseño de antenas, la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor son variables críticas que influyen en la eficiencia del enlace. Asimismo, el fenómeno de multi-trayectoria (multipath) puede provocar interferencias constructivas o destructivas, afectando la integridad de la señal. Las tecnologías modernas implementan técnicas de diversidad espacial, como MIMO (Multiple Input Multiple Output), para mitigar estos efectos y mejorar la capacidad de la red.

Ilustración 7. La radiofrecuencia



Fuente: KeepCoding. (2022, octubre 14). La radiofrecuencia: cómo funciona y aplicaciones. KeepCoding Blog. <https://keepcoding.io/blog/la-radiofrecuencia-como-funciona-y-aplicaciones/>

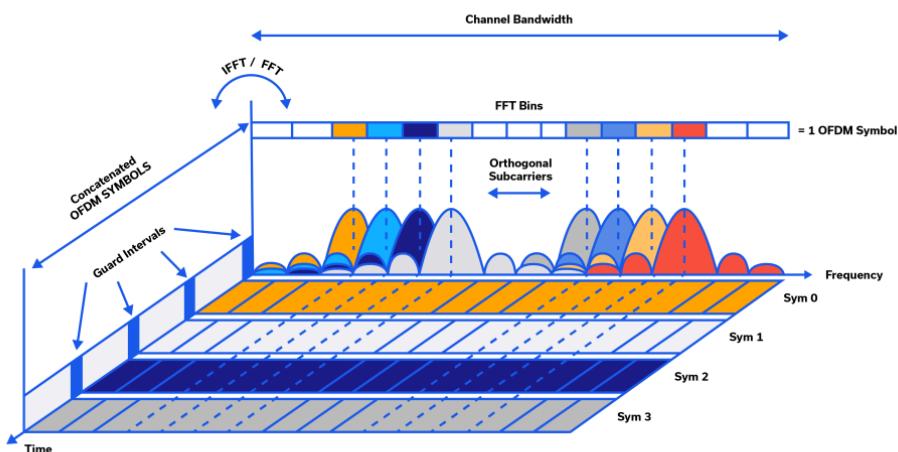
2.5.3 Modulación y codificación en redes inalámbricas.

La modulación es el proceso mediante el cual la información digital se transforma en señales analógicas aptas para la transmisión por RF. En Wi-Fi, se emplean esquemas avanzados como OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) que dividen el canal en múltiples subportadoras ortogonales, aumentando la resistencia a interferencias y la eficiencia espectral.

Cada estándar Wi-Fi ha evolucionado en la complejidad de sus modulaciones, desde BPSK y QPSK en sus primeras versiones hasta 1024-QAM en Wi-Fi 6 y Wi-Fi 7, incrementando significativamente la tasa de bits por símbolo transmitido.

La codificación, mediante técnicas de corrección de errores (FEC, Forward Error Correction), permite detectar y corregir errores introducidos por el canal, mejorando la confiabilidad del enlace sin necesidad de retransmisión constante. El uso de códigos convolucionales y LDPC (Low-Density Parity-Check) representa un avance fundamental en la robustez de la comunicación inalámbrica.

Ilustración 8. símbolos OFDM agrupados



Fuente: Mini-Circuits. (2021, mayo 19). *The basics of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)*. Mini-Circuits. <https://blog.minicircuits.com/the-basics-of-orthogonal-frequency-division-multiplexing-ofdm/>

2.5.4 Bandas de frecuencia (2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz).

Wi-Fi opera principalmente en tres bandas de frecuencia, cada una con características particulares que impactan en el rendimiento y la aplicación.

- **2.4 GHz:** Es la banda histórica y más utilizada, debido a su mayor capacidad de penetración y alcance. Sin embargo, está saturada por múltiples dispositivos

(microondas, Bluetooth, teléfonos inalámbricos) y ofrece menor ancho de banda, lo que limita las velocidades máximas y puede provocar interferencias.

- **5 GHz:** Introducida para superar las limitaciones de congestión, esta banda ofrece mayor cantidad de canales no solapados y mayores anchos de banda, lo que se traduce en velocidades superiores y menor interferencia. Sin embargo, presenta menor alcance y penetración comparado con 2.4 GHz.
- **6 GHz:** Incorporada con los estándares Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7, esta banda ofrece un espectro más amplio y limpio, permitiendo canales de hasta 160 MHz o más. Su uso promueve un salto cualitativo en capacidad y latencia, facilitando aplicaciones exigentes como realidad virtual y transmisión en tiempo real. La banda de 6 GHz está regulada con restricciones más estrictas para minimizar interferencias con servicios existentes.

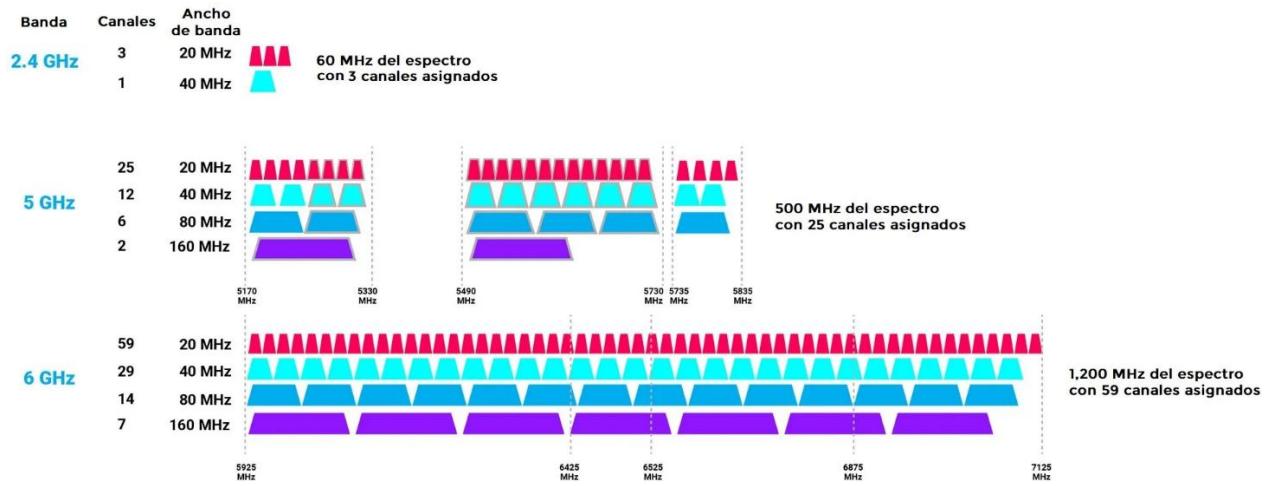
2.5.5 Canales, ancho de banda y coexistencia espectral.

La asignación de canales y el ancho de banda disponible son variables determinantes en el desempeño de las redes Wi-Fi. El número y tamaño de los canales disponibles dependen de la banda de frecuencia y del estándar utilizado.

Canales más anchos (40, 80, 160 MHz) permiten mayor tasa de datos pero aumentan la probabilidad de interferencia y reducción del número de canales disponibles, lo que puede generar conflictos y degradación del servicio en entornos densos.

La coexistencia espectral con otras tecnologías, especialmente en bandas no licenciadas, demanda protocolos sofisticados para la detección de portadora (CSMA/CA), evitación de colisiones y coordinación entre dispositivos heterogéneos. Además, la coexistencia con redes celulares de nueva generación (5G NR-U) y dispositivos IoT incrementa la complejidad del manejo del espectro, motivando el desarrollo de soluciones avanzadas como la asignación dinámica de canales y mecanismos de acceso adaptativos.

Ilustración 9. Bandas, Frecuencias y Canales



Fuente: RedesZone. (2021, enero 30). *Bandas y frecuencias del WiFi: Guía completa*. RedesZone. <https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-wifi/bandas-frecuencias-wi-fi/>

2.5.6 Seguridad en redes Wi-Fi: evolución de protocolos.

Desde sus inicios, la tecnología Wi-Fi ha enfrentado el desafío de mantener comunicaciones seguras en entornos inalámbricos, donde la información viaja por el aire y es, por tanto, susceptible de ser interceptada o manipulada. La evolución de los protocolos de seguridad Wi-Fi ha estado guiada por la necesidad de responder a vulnerabilidades detectadas, avances en la criptografía y la creciente sofisticación de las amenazas ciberneticas.

➤ WEP (Wired Equivalent Privacy) – Inseguridad fundacional

WEP fue el primer protocolo de seguridad diseñado para redes Wi-Fi bajo el estándar IEEE 802.11. Su objetivo era proporcionar un nivel de protección equivalente al de las redes cableadas. Utilizaba el algoritmo de cifrado RC4 y una clave estática de 40 o 104 bits, combinada con un vector de inicialización (IV).

Sin embargo, WEP adolecía de múltiples fallas estructurales:

- Uso repetido de IVs, que debilitaba la aleatoriedad del cifrado.
- Facilidad para la obtención de claves mediante ataques de recolección de paquetes.

- Ausencia de un mecanismo de renovación dinámica de claves.

Estas vulnerabilidades hacían que un atacante con herramientas básicas pudiera romper la clave WEP en cuestión de minutos. Para 2004, su uso fue declarado inseguro por organismos internacionales.

➤ **WPA (Wi-Fi Protected Access) – Solución transitoria con mejoras**

Ante la urgencia de una solución más segura, se introdujo WPA como respuesta temporal mientras se desarrollaba un estándar más robusto. WPA introdujo importantes mejoras sobre WEP:

- Implementación del TKIP, que asigna claves temporales únicas para cada paquete transmitido.
- Inclusión de un mecanismo de verificación de integridad (MIC - Message Integrity Check) para evitar alteraciones maliciosas.
- Compatibilidad retroactiva con hardware que no soportaba WPA2.

Aunque WPA fue un avance significativo, heredaba limitaciones del hardware previo y del uso de RC4, lo que permitió que, con el tiempo, también se encontraran formas de vulnerarlo.

➤ **WPA2 – Un nuevo estándar de seguridad duradero**

WPA2 se convirtió en el estándar obligatorio para dispositivos certificados desde 2006. Basado en el estándar IEEE 802.11i, incorporó el uso del cifrado AES, uno de los algoritmos más seguros y confiables de la criptografía moderna, junto con el protocolo CCMP (Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol).

Sus mejoras clave incluyen:

- Cifrado robusto con claves dinámicas.
- Mejor control de integridad de los mensajes.
- Seguridad superior tanto en redes personales como empresariales (WPA2-Personal vs WPA2-Enterprise).

Durante más de una década, WPA2 fue el bastión de la seguridad Wi-Fi. No obstante, con el tiempo, se descubrieron ataques como KRACK (Key Reinstallation Attacks), que aprovechaban vulnerabilidades en el proceso de renegociación de claves, evidenciando la necesidad de evolucionar nuevamente.

➤ **WPA3 – La nueva generación de seguridad Wi-Fi**

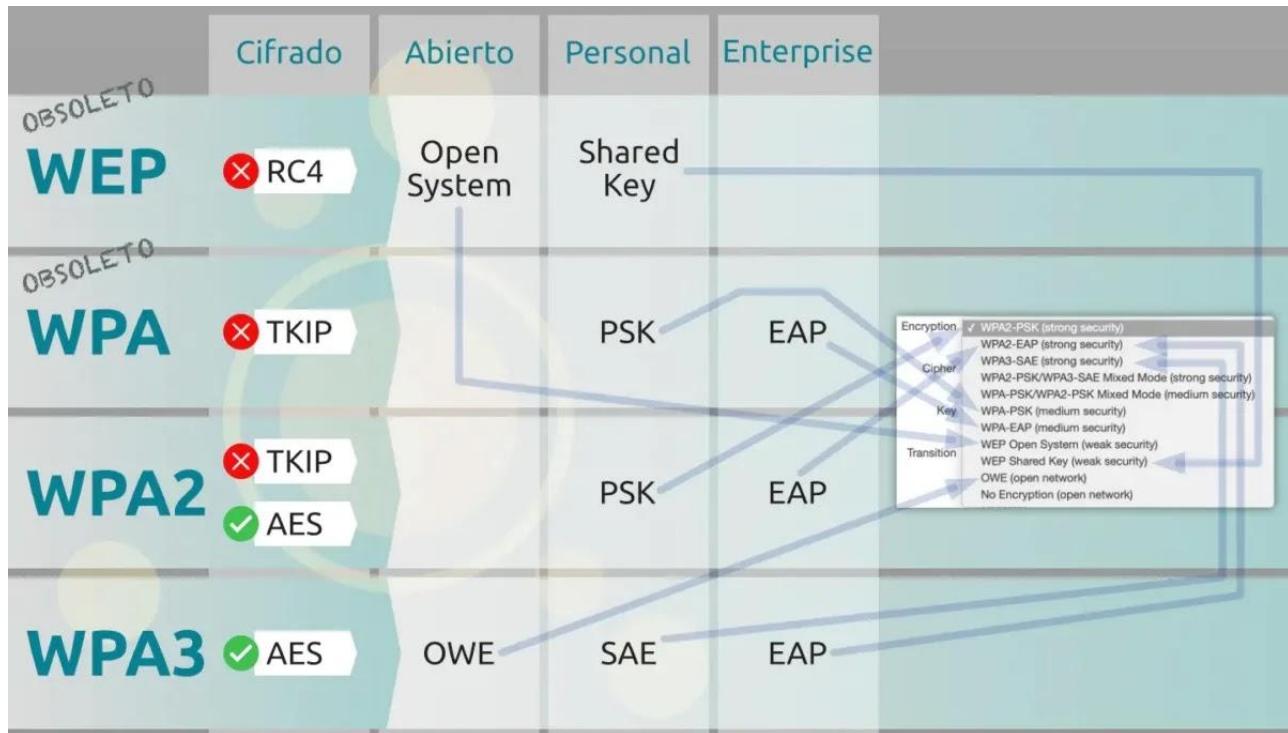
WPA3 fue lanzado en 2018 con el objetivo de ofrecer un modelo de seguridad preparado para el presente y el futuro digital. Algunas de sus principales características son:

- SAE (Simultaneous Authentication of Equals): Reemplaza el intercambio de claves precompartidas por un protocolo de autenticación más seguro basado en intercambio de claves tipo Dragonfly. Este método impide ataques de diccionario offline y refuerza la seguridad incluso con contraseñas débiles.
- Cifrado individualizado: En redes abiertas (como cafés, aeropuertos), cada usuario obtiene una clave de cifrado única, dificultando la interceptación del tráfico por parte de otros usuarios.
- Protección robusta para redes IoT: WPA3 facilita configuraciones seguras sin interfaces complejas, ideal para dispositivos de bajo poder computacional o sin pantallas.
- Modo WPA3-Enterprise: Ofrece seguridad de nivel gubernamental con cifrado de 192 bits y requisitos criptográficos más estrictos, ideal para entornos empresariales de alta sensibilidad.

La evolución de los protocolos de seguridad en redes Wi-Fi no solo refleja avances técnicos, sino también una respuesta dinámica ante un ecosistema digital en constante cambio. A medida que los dispositivos conectados proliferan y las amenazas se vuelven más sofisticadas, la seguridad no puede ser un accesorio, sino un componente esencial del diseño de redes.

Por ello, la implementación de estándares modernos como WPA3, junto con prácticas de seguridad complementarias (segmentación de redes, autenticación multifactor, monitoreo continuo), es vital para preservar la integridad, privacidad y disponibilidad de los datos en las redes inalámbricas del presente y del futuro.

Ilustración 10. Evolución del cifrado.



Fuente: CICESE. (2018, septiembre 5). *WPA3: El protocolo de seguridad más seguro para tu red WiFi*. Seguridad CICESE. <https://seguridad.cicese.mx/noticia/2195/WPA3:-el-protocolo-de-seguridad-m%C3%A1s-seguro-para-tu-red-Wifi>

2.6 Estándares IEEE 802.11: Características técnicas y desempeño.

2.6.1 Wi-Fi 5 (802.11ac).

Wi-Fi 5, formalmente conocido como IEEE 802.11ac, representó un salto significativo en la capacidad y eficiencia de las redes inalámbricas al operar exclusivamente en la banda de 5 GHz. Entre sus principales características técnicas destacan la adopción masiva de

MIMO (Multiple Input Multiple Output) y la introducción de MU-MIMO (Multi-User MIMO), que permiten transmitir datos simultáneamente a múltiples dispositivos, optimizando el uso del espectro y mejorando el rendimiento en escenarios con varios usuarios.

Además, Wi-Fi 5 amplió el ancho de banda de canal a 80 MHz y 160 MHz, facilitando tasas de datos teóricas máximas que superan los 1 Gbps bajo condiciones ideales. Estas mejoras hicieron viable la proliferación de aplicaciones demandantes en ancho de banda, como el streaming en alta definición y videoconferencias de baja latencia.

Sin embargo, Wi-Fi 5 presenta limitaciones en entornos de alta densidad y congestión, ya que su mecanismo de acceso y gestión de tráfico no está optimizado para múltiples dispositivos simultáneos, lo que puede provocar interferencias y caídas en la calidad del servicio.

2.6.2 Wi-Fi 6 (802.11ax).

Wi-Fi 6, o IEEE 802.11ax, incorpora tecnologías revolucionarias para mejorar la eficiencia espectral y la experiencia del usuario en ambientes congestionados. Uno de sus avances más significativos es la adopción de OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), que permite subdividir un canal en múltiples subcanales para atender simultáneamente a diversos dispositivos con diferentes demandas, reduciendo la latencia y maximizando la utilización del espectro.

El estándar también mejora el MU-MIMO, extendiendo la capacidad de transmisión simultánea tanto en el enlace descendente como ascendente. Otra innovación destacada es el Target Wake Time (TWT), que optimiza el consumo energético en dispositivos IoT y móviles, programando sus períodos de activación para minimizar interferencias y prolongar la duración de la batería.

Wi-Fi 6 está diseñado para soportar una alta densidad de dispositivos, característica esencial en escenarios urbanos, campus universitarios y oficinas inteligentes.

Comparado con Wi-Fi 5, ofrece un rendimiento superior en throughput agregado, eficiencia en el uso del espectro y gestión avanzada de tráfico, posicionándose como una solución más robusta y escalable para la conectividad moderna.

2.6.3 Wi-Fi 6E.

Wi-Fi 6E extiende las capacidades del estándar 802.11ax hacia la banda de 6 GHz, disponible recientemente para uso no licenciado en diversas regiones. Esta extensión proporciona un espectro adicional considerablemente amplio, permitiendo canales más anchos y reduciendo la interferencia por saturación que afecta las bandas tradicionales. La regulación y disponibilidad regional del espectro de 6 GHz varía globalmente, presentando desafíos para la estandarización y despliegue masivo, dado que coexistirá con servicios incumbentes y normativas específicas en cada país.

Los beneficios técnicos de Wi-Fi 6E incluyen un aumento en la capacidad de conexión y una reducción significativa en la latencia, lo que es crítico para aplicaciones en tiempo real y experiencias inmersivas. Sin embargo, los retos de implementación involucran la actualización de hardware compatible, la gestión del espectro y la adaptación a entornos mixtos con dispositivos antiguos.

2.6.4 Wi-Fi 7 (802.11be).

Wi-Fi 7, aún en fase de desarrollo, promete revolucionar el panorama de las redes inalámbricas con innovaciones tecnológicas como el CMU-MIMO (Coordinated Multi-User MIMO), que incrementa la cantidad de flujos simultáneos; canales de hasta 320 MHz, duplicando el ancho disponible respecto a Wi-Fi 6; y la Multi-Link Operation (MLO), que permite a los dispositivos utilizar múltiples bandas y canales simultáneamente para optimizar la transferencia de datos y reducir la latencia.

Las proyecciones para Wi-Fi 7 incluyen velocidades de hasta 30 Gbps, latencias inferiores a 2 ms y una eficiencia espectral sin precedentes, posicionándolo como la

opción ideal para escenarios exigentes como realidad virtual y aumentada (VR/AR), aplicaciones industriales dentro del marco de Industria 4.0, y gaming competitivo en línea.

Su estandarización está prevista para finales de esta década, con expectativas altas en cuanto a su impacto disruptivo y su rol en la evolución de la conectividad inalámbrica.

2.6.5 Redes Wi-Fi Mesh.

Las redes Wi-Fi mesh representan una arquitectura alternativa y complementaria para expandir la cobertura y mejorar la resiliencia en entornos complejos. En este esquema, múltiples nodos o puntos de acceso interconectados forman una red distribuida donde los datos pueden tomar rutas dinámicas hacia su destino, aumentando la robustez y eliminando puntos únicos de falla.

Los protocolos de backhaul empleados en redes mesh, que pueden ser inalámbricos o híbridos (inalámbricos y cableados), son fundamentales para garantizar una comunicación eficiente y baja latencia entre nodos. Protocolos como IEEE 802.11s y soluciones propietarias integran mecanismos para el enrutamiento, gestión de interferencias y optimización del rendimiento.

Las ventajas de Wi-Fi mesh incluyen mayor cobertura en áreas extensas o con obstáculos, facilidad de escalabilidad y mejora en la calidad de la experiencia del usuario. Sin embargo, presenta limitaciones como mayor complejidad en la gestión, posibles cuellos de botella en el backhaul inalámbrico y un costo superior en infraestructura comparado con redes tradicionales.

El impacto de las redes mesh es particularmente relevante en espacios residenciales, empresariales y públicos donde la topografía o la disposición física dificultan la cobertura uniforme con APs convencionales.

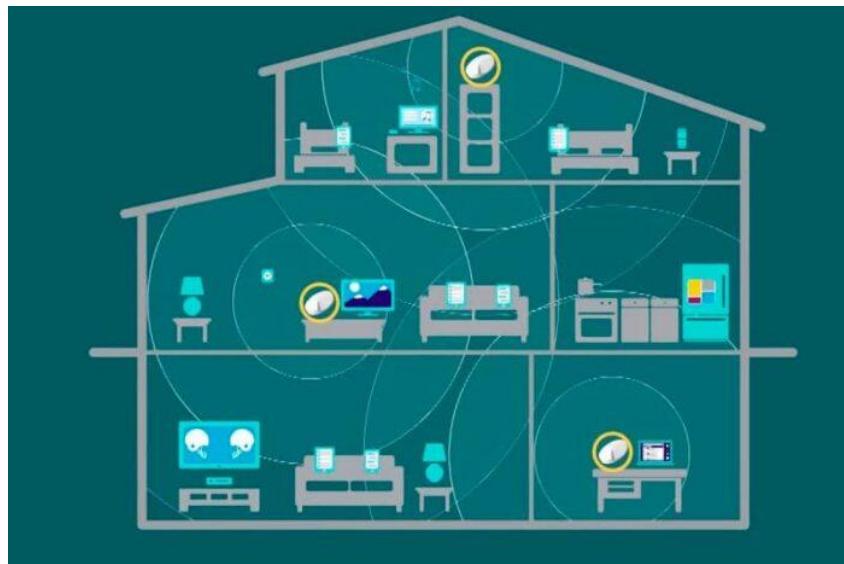
Ilustración 11. Evolución del estándar y certificaciones de WiFi



Fuente: BandaAncha. (2023, febrero 22). *Guía para entender las versiones de WiFi: dónde usarlas y qué ventajas tienen*. BandaAncha.

<https://bandaancha.eu/articulos/guia-entender-versiones-wifi-donde-10139>

Ilustración 12. Cobertura de la red Wi-Fi Mesh



Fuente: CCNA desde Cero. (s. f.). *¿Qué es una red WiFi Mesh?*. CCNA desde Cero.

<https://ccnadesdecero.es/que-es-red-wifi-mesh/>

2.7 Comparativa de desempeño entre estándares Wi-Fi.

2.7.1 Parámetros clave para la evaluación técnica y práctica.

La evaluación comparativa entre los diferentes estándares Wi-Fi es esencial para comprender sus capacidades reales y su idoneidad en diversos entornos de aplicación. Esta comparación se fundamenta en parámetros técnicos clave que determinan el desempeño global y la experiencia del usuario final.

- **Velocidad máxima teórica:** La velocidad máxima teórica representa la tasa máxima de transferencia de datos que un estándar puede alcanzar bajo condiciones ideales de laboratorio. Por ejemplo, Wi-Fi 5 (802.11ac) ofrece hasta 3.5 Gbps utilizando canales de 160 MHz y múltiples flujos MIMO, mientras que Wi-Fi 6 (802.11ax) incrementa este valor superando los 9.6 Gbps gracias a OFDMA y mejoras en MU-MIMO. Wi-Fi 7, en su proyección, apunta a velocidades que pueden llegar o incluso superar los 30 Gbps con canales de hasta 320 MHz y multi-link operation.

Aunque estas cifras son indicativas del potencial tecnológico, no siempre reflejan el desempeño en escenarios reales, donde factores externos inciden en la calidad del enlace.

- **Velocidad real en escenarios prácticos:** En entornos reales, la velocidad experimentada suele ser significativamente menor que la teórica debido a interferencias, obstáculos físicos, congestión y limitaciones del hardware de los dispositivos. Por ejemplo, en hogares y oficinas, Wi-Fi 6 puede entregar velocidades sostenidas del orden de 1 a 2 Gbps bajo condiciones óptimas, mientras que Wi-Fi 5 puede estar limitado a 500 Mbps o menos en entornos densos.

Las técnicas avanzadas como OFDMA y Target Wake Time en Wi-Fi 6 contribuyen a mantener un desempeño más estable frente a múltiples usuarios, en contraste con Wi-Fi 5, que sufre mayor degradación. La llegada de Wi-Fi 6E con acceso a la banda de 6 GHz también mejora significativamente la velocidad real al reducir interferencias externas.

- **Latencia:** o el retardo en la transmisión de paquetes, es un parámetro crítico para aplicaciones en tiempo real como videoconferencias, juegos en línea o realidad aumentada. Wi-Fi 6 reduce considerablemente la latencia respecto a Wi-Fi 5 mediante el uso de OFDMA, que permite la multiplexación eficiente de usuarios, y Target Wake Time, que reduce la competencia por el canal.

Wi-Fi 7 aspira a latencias sub-2 ms, habilitando aplicaciones ultrasensibles al retardo. En contraste, estándares anteriores como Wi-Fi 5 presentan latencias que pueden superar los 10 ms, lo que limita su uso en escenarios de alta demanda temporal.

- **Capacidad de usuarios simultáneos:** La capacidad para manejar múltiples dispositivos simultáneamente es una de las grandes fortalezas de Wi-Fi 6 y sus sucesores. Mientras Wi-Fi 5 soporta MU-MIMO en el enlace descendente para un número limitado de usuarios, Wi-Fi 6 amplía esta capacidad a enlaces ascendentes y descendentes con mayor eficiencia, gracias a OFDMA y mejoras en MU-MIMO.

Esto es fundamental en ambientes densos como oficinas, estadios o espacios públicos, donde la cantidad de dispositivos conectados puede saturar redes tradicionales. Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7 continúan esta tendencia con una capacidad aún mayor, habilitando la coexistencia armónica de cientos o miles de dispositivos.

- **Eficiencia espectral:** La eficiencia espectral se refiere a la cantidad de datos que pueden transmitirse por unidad de ancho de banda. Wi-Fi 6 mejora

sustancialmente este parámetro mediante la segmentación de canales y acceso múltiple OFDMA, que optimiza el uso del espectro comparado con la transmisión tradicional por portadora única en Wi-Fi 5.

Wi-Fi 7, con tecnologías como CMU-MIMO y multi-link operation, promete multiplicar la eficiencia espectral, maximizando la transmisión simultánea y reduciendo el desperdicio de recursos en canales ociosos.

- **Consumo energético:** El consumo energético es un factor relevante especialmente en dispositivos móviles e IoT. Wi-Fi 6 introduce el mecanismo Target Wake Time (TWT), que permite a los dispositivos programar períodos específicos para activar la radio, reduciendo el tiempo en estado activo y, por tanto, el consumo energético.

Esta mejora impacta positivamente en la duración de baterías y la sostenibilidad energética de las redes, un aspecto que Wi-Fi 7 busca optimizar aún más. En contraste, Wi-Fi 5 carece de estas funcionalidades avanzadas, resultando en un consumo mayor en dispositivos con conexiones prolongadas.

- **Alcance y penetración de señal:** El alcance y la penetración de señal dependen en gran medida de la banda de frecuencia utilizada. Wi-Fi 5 y Wi-Fi 6 operan principalmente en la banda de 5 GHz, que ofrece menor penetración en comparación con la banda de 2.4 GHz usada tradicionalmente, pero con mayor capacidad y menor interferencia.

Wi-Fi 6E, al operar en la banda de 6 GHz, enfrenta un alcance más limitado por su mayor frecuencia, aunque gana en capacidad y reducción de interferencias. Wi-Fi 7, con multi-link operation, puede mitigar parcialmente estas limitaciones al combinar varias bandas para extender alcance y estabilidad.

2.7.2 Escenarios típicos de evaluación.

- **Hogar:** En ambientes domésticos, la mezcla de dispositivos inteligentes, streaming y teletrabajo demanda redes estables y de alta velocidad. Wi-Fi 6 y 6E ofrecen mejoras evidentes, aunque Wi-Fi mesh es frecuente para cubrir áreas extensas.
- **Oficina:** La alta densidad de usuarios y dispositivos requiere eficiencia en la gestión del espectro y baja latencia. Wi-Fi 6 es actualmente el estándar más adecuado, con Wi-Fi 7 proyectado para transformar la conectividad empresarial.
- **Industria:** Escenarios industriales demandan robustez, baja latencia y alta fiabilidad para automatización y control. Wi-Fi 7 y redes mesh con protocolos especializados serán claves en la evolución de Industria 4.0.
- **Espacios públicos:** La coexistencia de numerosos usuarios obliga a maximizar la capacidad y gestionar interferencias. Wi-Fi 6E y mesh son soluciones comunes, con Wi-Fi 7 en desarrollo para optimizar aún más estos ambientes.

2.8. Tendencias y proyecciones tecnológicas.

2.8.1 Demanda creciente de ancho de banda.

La explosión de dispositivos conectados y el crecimiento exponencial del tráfico de datos han impulsado una demanda sin precedentes de ancho de banda en redes inalámbricas.

El Internet de las Cosas (IoT) contribuye con miles de millones de dispositivos que, aunque individualmente pueden requerir poca capacidad, colectivamente generan una carga sustancial sobre las infraestructuras.

Simultáneamente, la proliferación de contenido en formatos de alta definición, tales como video 4K y 8K, y la consolidación del teletrabajo como modalidad predominante, exigen conexiones robustas, estables y de alta velocidad para garantizar calidad y continuidad en la experiencia del usuario.

Estas tendencias obligan a los estándares Wi-Fi a evolucionar no solo en términos de velocidad bruta, sino en eficiencia espectral, gestión inteligente del tráfico y reducción de latencia, para sostener la complejidad creciente de los ecosistemas digitales.

2.8.2 Rol de Wi-Fi en redes convergentes.

En el contexto de las redes convergentes, Wi-Fi desempeña un papel estratégico complementario a las redes celulares 5G, facilitando el offloading del tráfico de datos para aliviar la congestión en las bandas licenciadas y mejorar la experiencia de conectividad.

La integración sinérgica entre 5G y Wi-Fi se está consolidando mediante arquitecturas híbridas que permiten una gestión dinámica del acceso, garantizando continuidad y optimización según las condiciones del entorno. Esta convergencia favorece la flexibilidad y escalabilidad de las redes, soportando aplicaciones críticas en sectores como salud, transporte inteligente y ciudades conectadas.

Wi-Fi, con su espectro no licenciado y rápida capacidad de despliegue, sigue siendo indispensable para proporcionar conectividad de última milla en espacios cerrados y abiertos, reforzando el ecosistema 5G con una oferta complementaria y eficiente.

2.8.3 Avances en seguridad y mitigación de interferencias.

La seguridad en redes Wi-Fi continúa evolucionando para enfrentar un panorama de amenazas cada vez más sofisticadas y persistentes. El desarrollo e implementación de

protocolos avanzados como WPA3, junto con técnicas criptográficas robustas y autenticación multifactor, fortalecen la protección de datos y la privacidad del usuario.

Paralelamente, la mitigación de interferencias se beneficia de técnicas adaptativas que optimizan la asignación dinámica de canales, el uso de algoritmos de aprendizaje automático para detección de interferencias, y la implementación de tecnologías como OFDMA y MU-MIMO, que distribuyen eficientemente los recursos espectrales.

Estas innovaciones garantizan no solo un desempeño superior, sino también la resiliencia y confiabilidad necesarias en redes críticas y entornos con alta densidad de dispositivos.

2.8.4 Expectativas para Wi-Fi 7 y siguientes generaciones.

Wi-Fi 7, basado en el borrador del estándar IEEE 802.11be, se posiciona como la próxima gran evolución en conectividad inalámbrica. Este nuevo estándar busca superar las limitaciones de sus predecesores mediante avances significativos como el soporte para canales de hasta 320 MHz, operación multi-enlace (MLO), modulación 4K-QAM y un uso mejorado de CMU-MIMO (Coordinated Multi-User MIMO). Estas mejoras permitirán alcanzar velocidades de transmisión superiores a 30 Gbps, una latencia significativamente reducida y una eficiencia espectral más robusta, aspectos fundamentales para satisfacer las exigencias de los escenarios actuales y emergentes.

Entre las aplicaciones que se beneficiarán directamente del potencial de Wi-Fi 7 se encuentran la realidad aumentada (AR) y la realidad virtual (VR) de alta fidelidad, el gaming en la nube con baja latencia, la automatización industrial avanzada, el teletrabajo inmersivo, y las plataformas de streaming en resolución 8K o superior. De este modo, el nuevo estándar no solo responde a la creciente demanda de ancho de banda, sino que también habilita modelos de interacción y productividad más inmersivos y complejos.

Mirando hacia el futuro, más allá de Wi-Fi 7, se proyecta una transición hacia redes inalámbricas más inteligentes, dinámicas y adaptativas. Esta evolución contempla la integración profunda con arquitecturas de red definidas por software (SDN), que permitirán una gestión centralizada y programable de los recursos de red, facilitando una administración más eficiente del tráfico y una respuesta ágil a eventos críticos.

Asimismo, la incorporación de inteligencia artificial (IA) en la gestión de redes promete introducir capacidades de autodiagnóstico, auto optimización y autocuración, reduciendo la necesidad de intervención humana y mejorando la resiliencia del sistema. Por otro lado, el uso de nuevas bandas espectrales, incluidas las frecuencias milimétricas (mmWave), será crucial para habilitar niveles de densidad de dispositivos y capacidad que hoy en día son inalcanzables, especialmente en contextos urbanos y de alta concurrencia.

Estas expectativas delinean un camino de innovación que no solo transformará la experiencia del usuario final, sino que redefinirá el diseño y la operación de las infraestructuras de conectividad inalámbrica a escala global. La convergencia entre Wi-Fi, 5G, SDN e IA configura un entorno donde la red no será solo un canal de transmisión, sino una plataforma inteligente de servicios, adaptada en tiempo real a las necesidades cambiantes del entorno y sus usuarios.

Ilustración 13. Certificación Wi-Fi 7



Fuente: Cetecom Advanced. (2023, abril 18). *Wi-Fi 7: The new standard for wireless communications*. Cetecom Advanced. <https://cetecomadvanced.com/en/news/wifi-7/>

2.8.5 Perspectivas de mercado y adopción global.

El mercado global de Wi-Fi continúa en expansión, impulsado por la digitalización acelerada y la creciente necesidad de conectividad ubicua. La adopción de estándares avanzados como Wi-Fi 6, 6E y próximamente Wi-Fi 7, está siendo impulsada por sectores tan variados como la educación, la salud, la industria manufacturera y el entretenimiento.

El acceso a nuevas bandas como la de 6 GHz y la popularización de soluciones mesh están democratizando la conectividad en zonas urbanas y rurales, fomentando la inclusión digital y la innovación.

No obstante, la adopción global enfrenta desafíos relacionados con la regulación espectral heterogénea, la actualización tecnológica en economías emergentes y la necesidad de formación especializada para la gestión eficiente de redes modernas.

En suma, las perspectivas son optimistas, con un crecimiento sostenido y un impacto profundo en la transformación digital a nivel mundial, donde Wi-Fi seguirá siendo un pilar fundamental.

2.9 Retos y oportunidades en la adopción de nuevas tecnologías Wi-Fi.

2.9.1 Costos de implementación y actualización de infraestructura.

La adopción de las tecnologías Wi-Fi más avanzadas implica inversiones significativas en infraestructura, incluyendo la adquisición de puntos de acceso compatibles, switches, routers y dispositivos finales que soporten los nuevos estándares. La modernización de redes existentes conlleva costos asociados no solo al hardware, sino también a la planificación, instalación y capacitación técnica.

Este factor representa un reto importante para organizaciones con presupuestos limitados o despliegues a gran escala, donde la actualización debe ser gradual y estratégicamente planificada para maximizar la relación costo-beneficio sin interrumpir el servicio. Sin embargo, la oportunidad radica en la mejora sustancial del desempeño y la reducción de costos operativos a largo plazo, gracias a una mayor eficiencia y automatización.

2.9.2 Compatibilidad con dispositivos legajo.

La coexistencia con dispositivos heredados que utilizan estándares anteriores es un desafío crucial para garantizar la continuidad operativa y evitar la obsolescencia prematura. La retrocompatibilidad debe ser gestionada cuidadosamente para evitar degradaciones en el desempeño general de la red, ya que dispositivos antiguos pueden limitar la velocidad y eficiencia del sistema.

Este aspecto exige la implementación de mecanismos inteligentes de gestión de tráfico y selección dinámica de bandas, para optimizar la experiencia del usuario sin sacrificar la inversión en equipos existentes. Paralelamente, promueve la transición paulatina hacia nuevas tecnologías, incentivando la renovación tecnológica de manera sostenible.

2.9.3 Regulaciones del espectro.

La asignación y regulación del espectro radioeléctrico constituye un pilar fundamental en la adopción de nuevas tecnologías Wi-Fi. La disponibilidad de bandas libres y su uso eficiente están sujetos a normativas nacionales e internacionales, que pueden variar considerablemente según la región.

El despliegue de Wi-Fi 6E y futuros estándares en la banda de 6 GHz, por ejemplo, enfrenta desafíos regulatorios relacionados con la coexistencia con servicios incumbentes y restricciones operativas para minimizar interferencias. La coordinación entre organismos reguladores, industria y usuarios es clave para garantizar un marco

legal y técnico que facilite la innovación sin comprometer la equidad y seguridad del espectro.

2.9.4 Ciberseguridad y privacidad.

La evolución tecnológica va de la mano con un incremento en la superficie de ataque y la sofisticación de las amenazas. Las nuevas tecnologías Wi-Fi deben incorporar mecanismos robustos de seguridad para proteger la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información transmitida.

Los protocolos modernos como WPA3 ofrecen mejoras significativas, pero requieren una adopción amplia y una gestión adecuada para ser efectivos. Asimismo, la privacidad de los usuarios debe ser garantizada mediante políticas claras y tecnologías de anonimización y control de acceso.

Este reto es, al mismo tiempo, una oportunidad para desarrollar soluciones innovadoras que fortalezcan la confianza en el ecosistema inalámbrico y promuevan su adopción masiva.

2.9.5 Sostenibilidad y eficiencia energética.

En un mundo cada vez más consciente de la necesidad de sostenibilidad, la eficiencia energética de las tecnologías Wi-Fi cobra relevancia. La reducción del consumo energético no solo prolonga la vida útil de dispositivos móviles e IoT, sino que también contribuye a la disminución de la huella ambiental del sector tecnológico.

Mecanismos como el Target Wake Time (TWT) en Wi-Fi 6 y las optimizaciones proyectadas para Wi-Fi 7 reflejan un compromiso con la eficiencia energética sin sacrificar el desempeño. Esta tendencia abre oportunidades para el desarrollo de redes inteligentes que equilibren demanda, rendimiento y sostenibilidad, alineándose con objetivos globales de responsabilidad ambiental y reducción de costos operativos.

2.10. Síntesis del marco teórico.

2.10.1 Integración de hallazgos.

El recorrido a través del marco teórico ha permitido consolidar una visión profunda y estructurada de las tecnologías Wi-Fi, sus fundamentos técnicos, evolución normativa y desempeño en contextos prácticos. Se ha evidenciado cómo cada estándar desde Wi-Fi 5 hasta la emergente Wi-Fi 7 y las arquitecturas mesh representan un eslabón en la cadena evolutiva que responde a demandas crecientes de capacidad, eficiencia y conectividad ubicua.

Los avances en modulación, gestión del espectro y seguridad configuran un panorama tecnológico en constante innovación, donde la convergencia con redes celulares y la incorporación de inteligencia en la gestión de recursos redefinen el papel del Wi-Fi como columna vertebral de la comunicación inalámbrica moderna.

2.10.2 Identificación de brechas de conocimiento.

A pesar de la riqueza del conocimiento existente, emergen brechas importantes que requieren atención académica y técnica. En particular, la comprensión profunda del desempeño real y la interacción dinámica entre estándares en ambientes diversos, especialmente bajo condiciones de alta densidad y movilidad, aún presenta desafíos metodológicos y empíricos.

Asimismo, la integración efectiva de tecnologías mesh con nuevos estándares como Wi-Fi 7 demanda mayor investigación sobre protocolos de backhaul, escalabilidad y optimización de rutas para garantizar desempeño óptimo y resiliencia.

La seguridad, aunque robustecida, necesita una evaluación continua frente a nuevas amenazas y mecanismos emergentes, así como la exploración de estrategias para garantizar la privacidad en ecosistemas heterogéneos y de gran escala.

2.10.3 Conexión con el objetivo de la investigación.

Este marco teórico sienta las bases para el análisis prospectivo del desempeño de los estándares Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y las redes mesh, proporcionando un contexto técnico y conceptual sólido. Al identificar las fortalezas, limitaciones y tendencias de cada tecnología, la investigación se orienta a evaluar su comportamiento en escenarios actuales y futuros, anticipando desafíos y oportunidades.

La síntesis integra conocimientos que permiten una evaluación crítica y prospectiva, alineada con la necesidad de diseñar redes inalámbricas eficientes, seguras y adaptables, esenciales para el desarrollo de infraestructuras de telecomunicaciones resilientes y de alta capacidad.

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA.

3.1 Enfoque Metodológico.

Esta investigación adopta un enfoque cuantitativo, comparativo y proyectivo, bajo un diseño documental no experimental, en el cual se realiza un análisis técnico de los estándares Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y Mesh, utilizando información obtenida de fuentes especializadas y validadas.

El enfoque cuantitativo permite analizar variables técnicas mensurables, como ancho de banda, eficiencia espectral, latencia, densidad de dispositivos soportados y protocolos de seguridad. El componente comparativo se materializa a través de la construcción de matrices y tablas que contrastan los principales atributos de cada estándar. Finalmente, el carácter proyectivo se refleja en la evaluación de tendencias tecnológicas emergentes y su posible impacto futuro en escenarios de telecomunicaciones inalámbricas.

3.2 Tipo y Nivel de Investigación.

Este trabajo es una investigación documental porque se basa en la recolección, sistematización y análisis de información existente proveniente de fuentes primarias y secundarias.

A nivel metodológico, se clasifica como una investigación de tipo descriptiva y comparativa. Es descriptiva porque se encarga de detallar las características técnicas de los distintos estándares Wi-Fi. Y es comparativa porque confronta estos datos para identificar diferencias, semejanzas, ventajas y limitaciones. No se considera experimental, ya que no se realizarán pruebas de laboratorio ni mediciones de campo. Todo el análisis se fundamentará en información técnica previamente documentada.

3.3 Diseño de Investigación.

El diseño utilizado es no experimental, longitudinal y transversal, de carácter analítico y proyectivo:

- No experimental porque no se manipulan variables directamente.
- Longitudinal, en la medida en que se consideran datos de evolución tecnológica y mejoras sucesivas en los estándares.
- Transversal, porque se compara el estado actual de cada tecnología en un momento determinado.
- Analítico, ya que se busca interpretar los datos obtenidos de manera objetiva.
- Proyectivo, dado que se incorporan escenarios futuros de aplicación e impacto tecnológico.

3.4 Fuentes y Técnicas de Recolección de Datos.

La información se obtuvo mediante una revisión documental exhaustiva, consultando fuentes confiables como:

- Documentación oficial de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sobre los estándares 802.11.
- Publicaciones y directrices de la Wi-Fi Alliance.
- Artículos científicos publicados en revistas indexadas (IEEE Xplore, ACM Digital Library, Springer, entre otras).
- Whitepapers técnicos de fabricantes líderes en soluciones Wi-Fi (Qualcomm, Cisco, Intel, Broadcom, Aruba, TP-Link).

- Libros técnicos y manuales especializados en redes inalámbricas.
- Estudios de caso, benchmarks y análisis de mercado de empresas consultoras del sector TIC.

Para organizar la información, se utilizaron fichas de registro y herramientas digitales para la clasificación y sistematización de datos.

3.5 Variables de Estudio.

Las variables seleccionadas responden a criterios técnicos y operativos relevantes para la evaluación del desempeño de los estándares analizados. Estas variables incluyen:

- Ancho de banda teórico y efectivo.
- Eficiencia espectral (bits/Hz).
- Esquemas de modulación utilizados (e.g., QAM-256, QAM-1024, QAM-4096).
- Latencia estimada.
- Número de usuarios simultáneos soportados.
- Tecnologías incorporadas: MU-MIMO, OFDMA, TWT, Beamforming, uso de canales de 160 MHz o 320 MHz.
- Bandas de frecuencia soportadas (2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz).
- Protocolos de seguridad aplicados (WPA2, WPA3, SAE, etc.).
- Compatibilidad e interoperabilidad.

- Aplicabilidad según escenarios (hogar, empresa, industria, espacios públicos).

3.6 Procedimiento Metodológico.

La investigación se desarrolló en las siguientes etapas:

a. Revisión documental inicial

- Búsqueda de fuentes técnicas, científicas y normativas.
- Selección de material relevante y actualizado.
- Clasificación por estándar (Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y Mesh).

b. Extracción y sistematización de variables técnicas

- Identificación de características técnicas claves.
- Organización de la información en fichas y bases de datos estructuradas.
- Validación cruzada de datos para evitar inconsistencias.

c. Revisión de aspectos de seguridad

- Identificación de protocolos de seguridad en cada estándar.
- Análisis de mejoras introducidas y revisión de vulnerabilidades documentadas.
- Estudio de la evolución de WPA2 a WPA3 y uso de técnicas como SAE y PMF.

d. Construcción de matrices comparativas

- Desarrollo de matrices técnico-funcionales.
- Integración de variables cuantificables y cualitativas.

- Representación gráfica de los datos mediante tablas.

e. Análisis comparativo y proyectivo

- Evaluación de ventajas y desventajas de cada estándar.
- Estudio de adecuación por tipo de entorno (densidad, requerimientos de latencia, cobertura).
- Proyección de escenarios de adopción, considerando tendencias tecnológicas, necesidades del mercado y disponibilidad de dispositivos.

f. Redacción del informe técnico

- Estructuración del documento según lineamientos académicos.
- Revisión técnica y metodológica del contenido.
- Validación por parte del tutor asignado y ajustes según retroalimentación recibida.

3.7 Técnicas e Instrumentos de Análisis.

Para el análisis de los datos recopilados, se utilizaron las siguientes técnicas:

- Análisis de contenido técnico: interpretación de documentación técnica con base en los criterios definidos.
- Comparación cruzada de variables: mediante matrices estructuradas y herramientas de hojas de cálculo.
- Representación gráfica: uso de gráficos comparativos para visualizar diferencias de desempeño (gráficos de radar, tablas comparativas, gráficos de barras).

- Análisis proyectivo: basado en informes de tendencias, roadmaps tecnológicos y ciclos de adopción.

3.8 Validación de la Información.

Se empleó una estrategia de triangulación documental para validar la consistencia de los datos, verificando que los valores y características técnicas fueran consistentes entre distintas fuentes confiables. Además, los resultados fueron revisados por especialistas del área como parte del proceso de validación académica.

3.9 Alcances y Limitaciones.

Alcances:

- Comparación técnica entre los estándares Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y Mesh.
- Evaluación proyectiva en función de variables técnicas.
- Recomendaciones de uso según escenarios reales de aplicación.

Limitaciones:

- Ausencia de pruebas experimentales en campo.
- Limitada disponibilidad de información empírica para Wi-Fi 7 debido a su reciente desarrollo.
- Dependencia de documentación técnica ya publicada y disponible en fuentes oficiales y académicas.

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

4.1 Panorama General del Análisis.

El presente capítulo expone los resultados obtenidos tras el proceso de revisión documental, sistematización y análisis comparativo de los estándares Wi-Fi 5, Wi-Fi 6, Wi-Fi 6E, Wi-Fi 7 y las redes Mesh. El propósito es evaluar sus capacidades técnicas, identificar diferencias significativas y proyectar su posible impacto en diversos escenarios de telecomunicaciones inalámbricas.

El análisis se sustenta en la información recopilada de documentos oficiales de IEEE y Wi-Fi Alliance, artículos científicos, whitepapers técnicos y reportes de fabricantes líderes en el sector. Los resultados se presentan mediante matrices comparativas y se acompañan de observaciones y conclusiones sobre cada estándar.

4.2 Matriz Comparativa General de Características Técnicas.

A continuación, se presenta la matriz comparativa que reúne las características técnicas clave de cada estándar evaluado:

Tabla 1. Características Técnicas.

Variable Técnica	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 6E	Wi-Fi 7 (802.11be)	Wi-Fi Mesh
Ancho de banda máximo (Gbps)	Hasta 3.5 Gbps	Hasta 9.6 Gbps	Hasta 9.6 Gbps	>30 Gbps (teórico)	Depende del estándar subyacente
Eficiencia espectral (bits/Hz)	~8.5	10–12	10–12	Hasta 15–20	Igual al estándar usado

Variable Técnica	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 6E	Wi-Fi 7 (802.11be)	Wi-Fi Mesh
Modulación máxima soportada	256-QAM	1024-QAM	1024-QAM	4096-QAM	Igual al estándar usado
Latencia estimada (ms)	~20–30 ms	~10–15 ms	~10–15 ms	<5 ms (objetivo)	Variable según topología
Usuarios simultáneos soportados	Moderado (~20–30)	Alta densidad (>50)	Alta densidad (>50)	Muy alta densidad (>100)	Optimizada en Mesh con balanceo dinámico
Bandas de frecuencia	5 GHz	2.4 y 5 GHz	2.4, 5 y 6 GHz	2.4, 5 y 6 GHz	Según estándar usado
MU-MIMO	Downlink solo	Uplink y downlink	Uplink y downlink	Más flujos simultáneos (16+)	Según estándar usado
OFDMA	No	Sí	Sí	Sí, mejorado	Según estándar usado
TWT (Target Wake Time)	No	Sí	Sí	Sí, optimizado	Según estándar usado
Canal máximo soportado (MHz)	160 MHz	160 MHz	160 MHz	320 MHz	Según estándar usado
Protocolos de seguridad	WPA2	WPA3	WPA3	WPA3, optimizaciones futuras	Según estándar usado
Escenarios recomendados	Hogares, oficinas pequeñas	Entornos densos, IoT	Entornos densos, IoT	Aplicaciones críticas, AR/VR, alta densidad	Cobertura extendida, edificios grandes

Análisis de la matriz:

- Wi-Fi 5 fue un salto significativo sobre Wi-Fi 4, pero sus limitaciones se hacen notorias en ambientes de alta densidad y aplicaciones que requieren baja latencia.
- Wi-Fi 6 y 6E introducen OFDMA y mejoran significativamente la eficiencia, haciendo posible servir a más usuarios en entornos saturados.
- Wi-Fi 6E es esencialmente Wi-Fi 6 ampliado al espectro de 6 GHz, ofreciendo más canales y menor congestión.
- Wi-Fi 7 apunta a velocidades muy superiores (teóricamente >30 Gbps) y a latencias por debajo de 5 ms, esenciales para aplicaciones como realidad virtual, AR/VR y redes industriales críticas.
- Las redes Mesh no son un estándar per se, sino una arquitectura que usa cualquiera de los estándares anteriores para ofrecer cobertura extendida y gestión inteligente del tráfico.

4.3 Matriz Comparativa de Seguridad.

Tabla 2. Comparativa de Seguridad.

Aspecto de Seguridad	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6	Wi-Fi 6E	Wi-Fi 7	Mesh
WPA2 soportado	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
WPA3 soportado	No	Sí	Sí	Sí (requerido)	Según estándar usado
SAE (Simultaneous)	No	Sí	Sí	Sí	Según estándar usado

Aspecto de Seguridad	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6	Wi-Fi 6E	Wi-Fi 7	Mesh
Authentication of Equals)					
PMF (Protected Management Frames)	Opcional	Requerido	Requerido	Requerido	Según estándar usado
Vulnerabilidades conocidas	KRACK, ataques de suplantación	Mitigadas en WPA3	Igual a Wi-Fi 6	Mejoras adicionales en gestión de claves	Depende del estándar usado
Mejora frente a versiones anteriores	No	Sí, WPA3 reduce vulnerabilidades	Igual a Wi-Fi 6	Avances en seguridad multicapa	Mejora la seguridad de la red doméstica

Análisis de la matriz:

- Wi-Fi 5 sigue siendo muy usado, pero su seguridad se ve superada por los mecanismos de Wi-Fi 6 en adelante.
- WPA3 es la base para Wi-Fi 6 y superiores, con SAE para mejorar el intercambio de claves.
- Wi-Fi 7 promete incluir nuevas funciones de seguridad adaptadas a entornos de alta densidad y latencia crítica.
- Mesh mejora la seguridad de redes domésticas al gestionar autenticación y tráfico entre nodos, pero depende del estándar sobre el que opere.

4.4 Matriz Comparativa de Escenarios de Aplicación.

Tabla 3. Comparativa de Escenarios de Aplicación.

Escenario de Aplicación	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6	Wi-Fi 6E	Wi-Fi 7	Mesh
Hogares	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Oficinas y empresas	Limitado en alta densidad	Sí	Sí	Sí	Sí
Ambientes industriales	No recomendado	Sí (parcial)	Sí	Altamente recomendado	Parcial
Espacios públicos de alta densidad	Limitado	Sí	Sí	Sí	Sí
IoT	Limitado	Muy recomendado	Muy recomendado	Sí	Sí
Gaming y aplicaciones sensibles a latencia	No recomendado	Parcial	Parcial	Muy recomendado	Según implementación

Análisis de la matriz:

- Wi-Fi 5 mantiene utilidad en entornos domésticos, pero está limitado para alta densidad o latencia crítica.
- Wi-Fi 6 y 6E son muy versátiles, adecuados tanto para IoT como para espacios públicos.
- Wi-Fi 7, aunque en sus primeras etapas, está diseñado pensando en casos de uso exigentes como realidad virtual, AR/VR, industria 4.0 y escenarios críticos donde la latencia es clave.

- Mesh se adapta bien a grandes espacios, reduciendo zonas muertas y gestionando el tráfico dinámicamente.

4.5 Análisis General y Proyecciones.

Tras el análisis comparativo, se identifican las siguientes conclusiones preliminares:

- Existe una clara evolución en cada estándar hacia mayores velocidades, mejor eficiencia espectral y menor latencia.
- La transición de Wi-Fi 5 hacia Wi-Fi 6/6E es aconsejable para entornos de alta densidad y aplicaciones que requieren estabilidad y capacidad para múltiples dispositivos.
- Wi-Fi 7 representa un cambio tecnológico relevante, aunque su despliegue masivo dependerá de la madurez de dispositivos y de la disponibilidad de espectro en cada país.
- Las soluciones Mesh seguirán siendo esenciales en entornos domésticos y empresariales para lograr cobertura uniforme y gestión inteligente del tráfico.
- Las mejoras en seguridad de WPA3 y tecnologías como SAE y PMF serán críticas para proteger redes en escenarios de mayor tráfico y dispositivos conectados.

Se proyecta que en los próximos cinco años, Wi-Fi 6 y 6E se consolidarán como la tecnología dominante en redes residenciales y empresariales. Mientras tanto, Wi-Fi 7 comenzará a implementarse progresivamente en sectores que requieran capacidades avanzadas, especialmente en entornos industriales, gaming profesional y aplicaciones de realidad aumentada o virtual.

4.6 Propuestas Estratégicas de Implementación.

- Para proyectos actuales, se sugiere optar por Wi-Fi 6 o 6E, especialmente en instalaciones nuevas o actualizaciones de infraestructura.
- Evaluar Wi-Fi 7 en proyectos planificados para los próximos 2–3 años, sobre todo en sectores críticos o de alta demanda de datos.
- Considerar redes Mesh para resolver problemas de cobertura en edificios grandes o entornos residenciales complejos.
- Priorizar la implementación de WPA3 para mitigar riesgos de seguridad presentes en versiones anteriores.

4.7 Limitaciones de los Resultados.

- Parte de los datos sobre Wi-Fi 7 se basan en documentación preliminar y proyecciones, pues aún no existe un despliegue masivo ni estudios de campo extensos.
- Los resultados podrían variar en función de la implementación específica de cada fabricante y las condiciones físicas de los entornos de uso.
- No se realizaron mediciones experimentales propias, por lo que los datos dependen de fuentes documentales y benchmarks publicados.

El análisis permite contar con un panorama técnico sólido sobre las tecnologías Wi-Fi más recientes y sus posibles aplicaciones en distintos escenarios. Este conocimiento será valioso tanto para la toma de decisiones técnicas como para la planificación de inversiones en infraestructura de telecomunicaciones inalámbricas en los próximos años.

CAPÍTULO V.

5. CASOS DE ESTUDIO Y APLICACIONES PRÁCTICAS.

En el contexto de la evolución de las tecnologías inalámbricas, el análisis de casos reales es clave para comprender cómo los estándares Wi-Fi han superado retos técnicos y operativos en diferentes entornos. A lo largo de diversas industrias, sectores académicos y espacios residenciales, la adopción de Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y las redes Mesh ha respondido a necesidades específicas de capacidad, cobertura y eficiencia, lo cual permite evidenciar no solo su potencial, sino también sus limitaciones prácticas. Este capítulo explora escenarios concretos en los que estas tecnologías han sido implementadas, identificando sus beneficios y desafíos, y aportando elementos útiles para la toma de decisiones en proyectos de telecomunicaciones inalámbricas.

5.1 Wi-Fi 5 (802.11ac) – Madurez tecnológica y limitaciones.

Un caso representativo del uso de Wi-Fi 5 se encuentra en centros de oficinas corporativas. Esta tecnología, consolidada en el mercado, ha ofrecido velocidades superiores a 3.5 Gbps en condiciones ideales, lo que permitió cubrir necesidades de navegación, videoconferencias y acceso a aplicaciones en la nube. Sin embargo, empresas con espacios abiertos y alta densidad de dispositivos han reportado problemas de saturación y degradación en la calidad del servicio, especialmente en horas pico.

Ventajas identificadas:

- Amplia compatibilidad con dispositivos existentes.
- Costos de implementación relativamente bajos.

Limitaciones:

- Menor eficiencia en entornos de alta densidad.
- Latencias superiores comparadas con generaciones posteriores.

5.2 Wi-Fi 6 (802.11ax) – Alta densidad y eficiencia espectral.

En entornos de alta densidad, Wi-Fi 6 ha demostrado una notable capacidad de respuesta. Por ejemplo, el Levi's Stadium en California adoptó esta tecnología para proveer conectividad simultánea a decenas de miles de usuarios durante partidos y conciertos. Gracias a mecanismos como OFDMA y MU-MIMO bidireccional, Wi-Fi 6 ha permitido reducir la congestión y mantener servicios como streaming y redes sociales en tiempo real, incluso con elevados picos de demanda.

Ilustración 14. Levi's Stadium en California



Fuente: Computer Hoy. (2014, agosto 12). *Los secretos del estadio más avanzado tecnológicamente del mundo*. ComputerHoy.

<https://computerhoy.20minutos.es/noticias/life/secretos-del-estadio-mas-avanzado-tecnologicamente-del-mundo-45380>

Datos de referencia:

- Usuarios simultáneos: 60.000.
- Latencia promedio: 10-15 ms.
- Inversión aproximada: > USD 2 millones.

Aspectos positivos:

- Mejor aprovechamiento del espectro disponible.
- Adecuado para entornos con alta densidad de usuarios.

- Incorporación de WPA3 como estándar de seguridad.

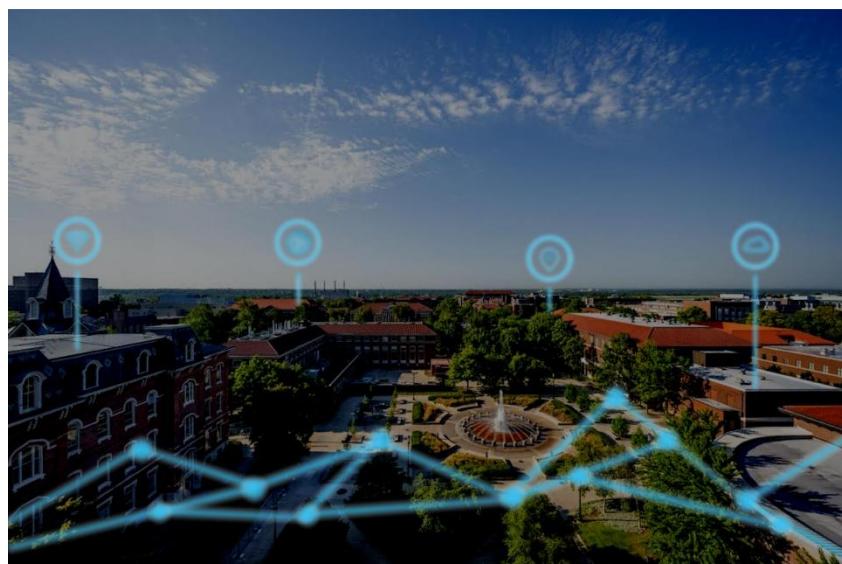
Retos identificados:

- Costos de infraestructura superiores a Wi-Fi 5.
- Necesidad de dispositivos compatibles para obtener todos los beneficios.

5.3 Wi-Fi 6E – Expansión al espectro de 6 GHz.

El despliegue de Wi-Fi 6E ha comenzado a consolidarse en escenarios especializados. Universidades como Purdue en Estados Unidos han implementado esta tecnología en laboratorios y centros de investigación donde las necesidades de ancho de banda y baja latencia son críticas. La banda de 6 GHz ha permitido operar con canales más amplios y menor interferencia, aunque la adopción plena aún se ve limitada por la disponibilidad de dispositivos compatibles.

Ilustración 15. Campus Universidad Purdue EEUU



Fuente: Hyatt, I. (2024, julio 17). *Wi-Fi network speeds: Board of trustees approves upgrades for campus and home residence halls*. The Purdue Exponent.

https://www.purdueexponent.org/campus/general_news/ian-hyatt-wifi-network-speeds-board-of-trustees-campus-at-home-residence-halls-it/article_94037ff8-62e7-11ef-ba3d-0fdb9e7fdf46.html

Características destacadas:

- Mayor cantidad de canales disponibles y menos saturación.
- Ideal para aplicaciones de realidad aumentada y virtual.

Limitaciones observadas:

- Escasez de equipos cliente compatibles en el mercado.
- Costos más elevados que Wi-Fi 6.

Tabla 4. Comparativa técnica.

Parámetro	Wi-Fi 6	Wi-Fi 6E
Bandas utilizadas	2.4 y 5 GHz	2.4, 5 y 6 GHz
Canales disponibles	Limitados	Más amplios y menos saturados
Áreas de aplicación	Oficinas, corporativo	Laboratorios, alta demanda de datos

5.4 Redes Mesh – Expansión de cobertura.

En el ámbito residencial, las redes Mesh basadas en Wi-Fi 6 han ganado popularidad gracias a su capacidad para ofrecer cobertura uniforme en viviendas amplias. Empresas como TP-Link, Netgear o Asus han lanzado soluciones Mesh que permiten eliminar zonas muertas y mantener una conectividad estable en hogares de múltiples pisos o con distribución compleja. Su facilidad de instalación, generalmente mediante aplicaciones móviles, ha sido clave para su adopción.

Ejemplo de configuración habitual:

- Número de nodos: 3.
- Área cubierta: 400–600 m².
- Precio estimado: USD 250–450.
- Velocidad media: 500 Mbps–1 Gbps en condiciones óptimas.

Beneficios identificados:

- Cobertura uniforme en grandes superficies.

- Fácil configuración y gestión.
- Roaming transparente entre nodos.

Aspectos que considerar:

- Mayor costo inicial en comparación con routers tradicionales.
- Posible pérdida de rendimiento leve en redes muy extensas.

Ilustración 16. Redes Mesh Residencial



Fuente: Howset. (s. f.). *Configurar redes Mesh: Conectividad avanzada*. Howset.

<https://howset.com/es/configurar-redes-mesh-conectividad/>

5.5 Wi-Fi 7 (802.11be) – Innovación en desarrollo.

Aunque Wi-Fi 7 aún está en una etapa preliminar, existen casos piloto que anticipan sus posibilidades. Fabricantes como Qualcomm han desarrollado pruebas en entornos industriales, buscando latencias inferiores a 3 ms para sistemas de automatización, robótica avanzada y procesos críticos. Estas capacidades abren un espectro de

aplicaciones que incluyen realidad aumentada industrial, telemedicina y redes sensibles al tiempo.

Datos de pruebas preliminares:

- Velocidad proyectada: >30 Gbps.
- Modulación: 4096-QAM.
- Ancho de canal: hasta 320 MHz.

Ventajas potenciales:

- Capacidad para entornos críticos que exigen ultra-baja latencia.
- Mayor eficiencia espectral.

Desafíos identificados:

- Alto costo de equipos en fase prototipo (USD 1.500–2.000 por AP).
- Limitada disponibilidad de dispositivos cliente.
- Dependencia de la regulación para uso de bandas de 6 GHz y superiores.

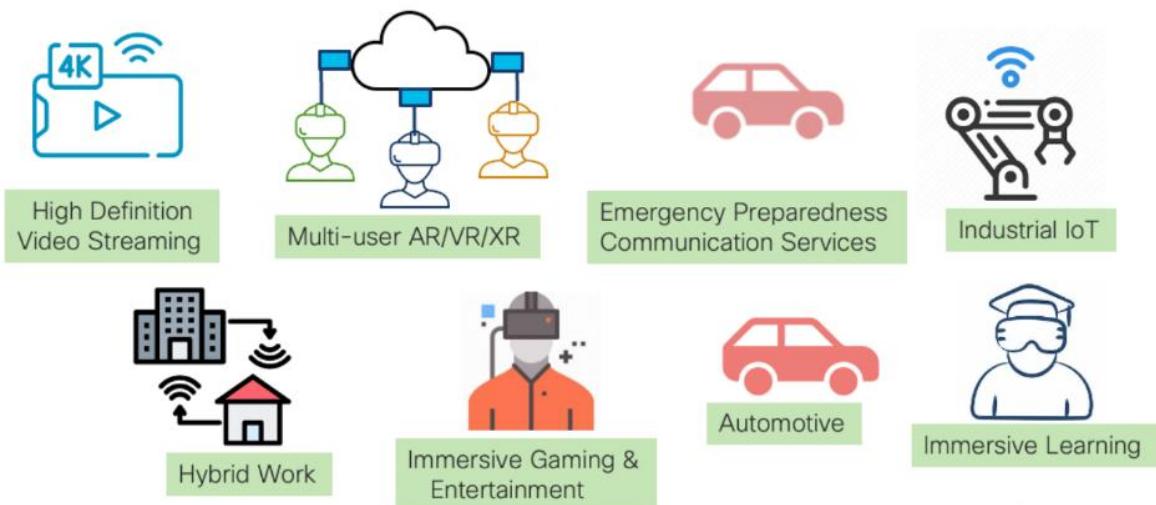
Tabla 5. Visión Integrada de los Casos de Estudio.

Tecnología	Caso de Aplicación	Beneficios Clave	Retos Identificados
Wi-Fi 5	Oficinas corporativas	Bajo costo, alta compatibilidad	Saturación en alta densidad
Wi-Fi 6	Estadios deportivos	Manejo de alta densidad, baja latencia	Alto costo inicial
Wi-Fi 6E	Campus universitarios	Menos interferencia, banda de 6 GHz	Pocos dispositivos compatibles
Mesh Wi-Fi 6	Hogares grandes	Cobertura uniforme, fácil gestión	Costos más elevados
Wi-Fi 7	Industria 4.0 (pilotos)	Latencia ultra-baja, alta capacidad	Ecosistema aún inmaduro

La experiencia derivada de estos casos evidencia que cada estándar Wi-Fi encuentra su espacio óptimo de aplicación, condicionado por factores técnicos, económicos y regulatorios. Si bien tecnologías como Wi-Fi 5 continúan siendo viables en entornos donde la densidad de dispositivos es baja, las nuevas generaciones —especialmente Wi-Fi 6, 6E y próximamente Wi-Fi 7— se perfilan como esenciales en escenarios de alta exigencia, tanto en el ámbito empresarial como industrial.

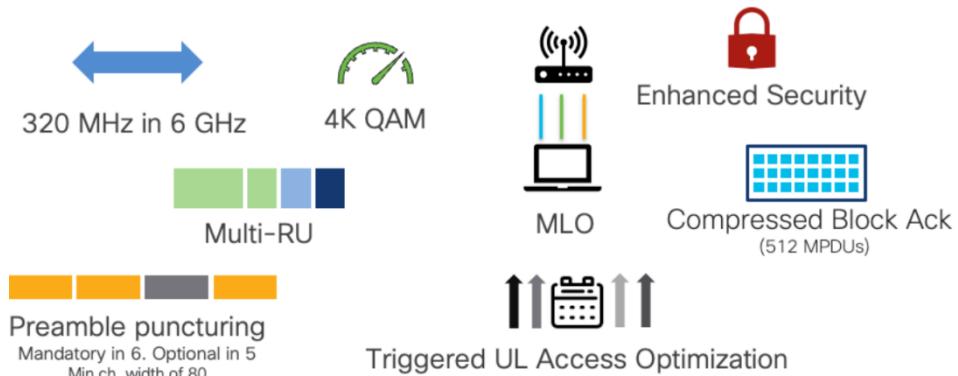
Las redes Mesh, por su parte, seguirán expandiendo su presencia, particularmente en entornos residenciales, donde los usuarios demandan estabilidad y cobertura homogénea. De cara al futuro, el despliegue efectivo de Wi-Fi 7 dependerá no solo de avances tecnológicos, sino también de la evolución del mercado, la regulación del espectro y la disminución progresiva de costos de adopción.

Ilustración 17. Wi-Fi 7 - Casos de Uso



Fuente: Cisco Meraki. (2023). *Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide*. Cisco Meraki Documentation. https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_%28802.11be%29_Technical_Guide

Ilustración 18. Características Wi-Fi 7



Fuente: Cisco Meraki. (2023). *Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide*. Cisco Meraki Documentation. https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_%28802.11be%29_Technical_Guide

CAPÍTULO VI.

6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y EVALUACIÓN COSTO-BENEFICIO.

La adopción de nuevas tecnologías Wi-Fi constituye una decisión estratégica que integra desempeño técnico y racionalidad económica. Los estándares Wi-Fi, desde Wi-Fi 5 (802.11ac) hasta el emergente Wi-Fi 7 (802.11be), introducen mejoras en velocidad, latencia, capacidad de conexión simultánea y eficiencia espectral, lo que influye directamente en la elección de infraestructura y dispositivos cliente. Por ello, el análisis económico debe vincularse estrechamente con el desempeño comparativo de cada estándar para fundamentar decisiones de inversión coherentes y sostenibles.

6.1 Variables Económicas Consideradas.

Se consideran las siguientes variables, relacionadas directamente con el desempeño técnico observado:

- **Costo de adquisición de infraestructura:** Puntos de acceso (AP), switches PoE y controladores inalámbricos, ponderando el desempeño en entornos de alta densidad.
- **Costo de dispositivos cliente compatibles:** Evaluando la capacidad de aprovechar las mejoras de velocidad y capacidad simultánea de cada estándar.
- **Licencias o tasas regulatorias:** Especialmente relevantes para bandas de 6 GHz (Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7).
- **Costos operativos y de mantenimiento:** Incluye soporte técnico, actualizaciones de software y consumo energético, en función de las capacidades de cada tecnología.

- **Vida útil tecnológica:** Considerando la obsolescencia relativa de cada estándar frente a las demandas futuras.
- **Beneficios proyectados:** Incrementos en productividad, reducción de latencia, mayor capacidad de usuarios y mejoras en la experiencia del usuario, correlacionados con el desempeño técnico.

6.2 Costos de Dispositivos Cliente.

Tabla 6. Costos de Infraestructura y Dispositivos Cliente.

Tecnología	Costo promedio por AP (USD)	Notas
Wi-Fi 5	100 – 250	Tecnología madura, menor capacidad de usuarios simultáneos.
Wi-Fi 6	300 – 600	Mejor desempeño en entornos densos; inversión moderada.
Wi-Fi 6E	400 – 800	Mayor costo por chips de 6 GHz, alta eficiencia espectral.
Wi-Fi 7	1.200 – 2.000 (prototipo)	Tecnología emergente, alto rendimiento y capacidad.
Mesh Wi-Fi 6	250 – 450 (kit de 3 nodos)	Cobertura extensa, ideal para entornos complejos.

El costo de actualización de dispositivos cliente se correlaciona directamente con la capacidad de aprovechar la velocidad, eficiencia y cobertura de cada estándar. Por ejemplo, Wi-Fi 7 ofrece alto desempeño, pero requiere dispositivos compatibles con sobrecostos de hasta 50 % frente a Wi-Fi 5.

6.3 Costos de Mantenimiento y Operación.

La eficiencia energética y los requerimientos de mantenimiento reflejan el desempeño técnico: APs de mayor capacidad (Wi-Fi 6E y 7) consumen más energía, aunque técnicas como Target Wake Time (TWT) optimizan el consumo en dispositivos cliente.

**Tabla 7. Tabla de Ejemplo.
Diferencial de costos en dispositivos cliente.**

Tipo de dispositivo	Wi-Fi 5 (USD)	Wi-Fi 6 (USD)	Wi-Fi 6E (USD)	Wi-Fi 7 (USD)
Laptop gama media	600	750	850	1.100
Smartphone gama alta	800	950	1.100	1.500
Tablet empresarial	400	480	550	>700

Tabla 8. Estimación de consumo energético por AP.

Tecnología	Consumo promedio (W)	Notas
Wi-Fi 5	10 – 12	Bajo.
Wi-Fi 6	12 – 15	Moderado.
Wi-Fi 6E	13 – 17	Superior por chips adicionales.
Wi-Fi 7	18 – 25	Mayor capacidad, mayor consumo.

6.4 Análisis de Retorno de Inversión (ROI).

Comparando costos y beneficios:

- **Wi-Fi 5:** inversión mínima, limitada capacidad y cobertura; adecuado para entornos de baja densidad.
- **Wi-Fi 6/6E:** mayor inversión inicial, pero permite reducir incidencias de red, tiempo de soporte y aumentar capacidad en picos de uso, recuperando la inversión en 2–3 años.

- **Wi-Fi 7:** costos elevados; rendimiento máximo y capacidad para entornos críticos, aunque aún poco rentable en aplicaciones comerciales generales.
- **Redes Mesh:** inversión inicial superior a un router convencional, pero optimizan cobertura y eliminan zonas muertas, generando ahorro en cableado y repetidores adicionales.

Caso hipotético de análisis económico:

Supongamos una empresa mediana que necesita modernizar su red Wi-Fi. Evaluamos Wi-Fi 5, 6 y 6E para un edificio de oficinas con 20 APs y 200 dispositivos cliente.

Tabla 9. Análisis económico

Concepto	Wi-Fi 5 (USD)	Wi-Fi 6 (USD)	Wi-Fi 6E (USD)
Costo total de APs	4.000	10.000	14.000
Costo de actualización dispositivos cliente	0	30.000	40.000
Consumo energético anual (USD)	1.200	1.500	1.800
Costos totales primer año	5.200	41.500	55.800

Beneficio estimado Wi-Fi 6/6E:

- 30 % menos incidencias de red.
- 20 % menos tiempo de soporte técnico.
- +25 % de capacidad en picos de uso.
- Posibilidad de nuevas aplicaciones (VoIP avanzada, video HD sin cortes).

Con estos beneficios, Wi-Fi 6 podría recuperar la inversión adicional en aproximadamente 2–3 años, gracias a menor downtime, mayor eficiencia y reducción de costos de soporte.

6.4 Costos en Redes Mesh.

Las redes Mesh representan una categoría particular:

- Su costo inicial es superior al de un router simple.
- Reducen la necesidad de cableado y repetidores adicionales.
- Representan un ahorro a largo plazo en entornos complejos.

**Tabla 10. Comparativa.
Red residencial tradicional vs Mesh Wi-Fi 6.**

Concepto	Router tradicional (USD)	Mesh Wi-Fi 6 (USD)
Costo inicial	80–150	250–450 (kit 3 nodos)
Cobertura máxima	100–150 m ²	400–600 m ²
Zonas muertas	Frecuentes	Mínimas
Repetidores necesarios	1–2 adicionales	No necesarios

6.5 Consideraciones Regulatorias y Costos.

En países donde el uso del espectro de 6 GHz requiere licencias específicas, pueden existir costos adicionales:

- América Latina: Brasil y México han liberado la banda de 6 GHz sin costo de licencia para dispositivos de baja potencia, mientras que otros países aún evalúan tarifas.

- Europa: limitado en potencia; podría requerir permisos para determinadas aplicaciones.
- EE. UU.: uso libre, sujeto a límites técnicos.

Impacto: las empresas deben evaluar estos costos regulatorios como parte de sus proyecciones económicas.

6.7 Riesgos y Factores que Impactan el Costo-Beneficio.

- Ritmo de adopción de dispositivos cliente.
- Disponibilidad de equipamiento compatible en el mercado.
- Posibles cambios regulatorios.
- Rápida obsolescencia tecnológica.
- Necesidad de formación técnica para gestionar nuevas redes.

El análisis económico muestra que la adopción de estándares Wi-Fi más recientes implica un costo inicial significativamente más alto, pero a mediano y largo plazo puede representar ahorros operativos, aumento de la eficiencia y mejoras en la calidad del servicio.

- Wi-Fi 5 sigue siendo viable en entornos con baja densidad y limitados requerimientos.
- Wi-Fi 6 y 6E representan una inversión rentable en empresas y espacios públicos de alta demanda.

- Wi-Fi 7, aunque prometedor, aún es económicamente prohibitivo para la mayoría de las aplicaciones comerciales, salvo sectores industriales críticos.
- Redes Mesh tienen un costo inicial mayor, pero ofrecen una solución eficiente para entornos residenciales o de oficinas con topologías complejas.

La decisión final debe basarse en un análisis detallado de necesidades específicas, presupuesto disponible y proyección de uso futuro, considerando tanto los costos como los beneficios tangibles e intangibles.

CAPÍTULO VII.

7. Aspectos Regulatorios de las Tecnologías Wi-Fi en Panamá.

El análisis del desempeño y la viabilidad de adopción de tecnologías Wi-Fi no puede desligarse de los aspectos regulatorios que delimitan el uso del espectro radioeléctrico. En Panamá, el organismo competente en materia de regulación y administración del espectro es la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP), que define las frecuencias disponibles, condiciones técnicas, potencias máximas y obligaciones legales asociadas al despliegue de redes inalámbricas. Este capítulo detalla el estado actual de la normativa panameña, su relación con los estándares Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y Mesh, y analiza las oportunidades y restricciones que podrían impactar los proyectos de telecomunicaciones inalámbricas en el país.

Ilustración 19. La Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP)



Fuente: Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2021, marzo 8).

Comunicado 3. ASEP. <https://asep.gob.pa/comunicado-3/>

7.1 Marco Legal y Organismos Competentes.

En Panamá, el uso del espectro radioeléctrico está regido principalmente por:

- Ley 31 de 1996: Establece el marco legal de los servicios públicos de telecomunicaciones.
- Reglamento de Radiocomunicaciones: Basado en las disposiciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).
- Resoluciones de la ASEP: Determinan parámetros técnicos, asignación de frecuencias y condiciones específicas de operación.

La ASEP es responsable de emitir licencias, regular el uso de bandas de frecuencia y sancionar a operadores o usuarios que incumplan las normativas.

7.2 Regulaciones para Bandas ISM.

Las tecnologías Wi-Fi han operado tradicionalmente en bandas no licenciadas (ISM) como 2,4 GHz y 5 GHz. En Panamá:

- **Banda 2,4 GHz (2400-2483.5 MHz):**
 - Uso libre, sin necesidad de licencia.
 - Potencia máxima permitida: 1000 mW (30 dBm) EIRP.
 - Respetar límites de interferencia y cumplimiento de equipos homologados.
- **Banda 5 GHz (5150-5350 MHz y 5470-5725 MHz):**
 - Permitida para uso interior y exterior, con algunas restricciones.
 - Potencia máxima:

- Indoor: hasta 200 mW (23 dBm).
- Outdoor (según canal y segmento): hasta 1000 mW (30 dBm) con DFS obligatorio.

- Requiere que los dispositivos implementen mecanismos de selección dinámica de frecuencia (DFS) para evitar interferir con radares.

Estas bandas sustentan el funcionamiento de Wi-Fi 5 y parte de Wi-Fi 6, sin mayores limitantes regulatorias.

7.3 Situación de la Banda de 6 GHz (Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7).

La mayor transformación regulatoria en los últimos años ha girado en torno a la banda de 6 GHz (5925-7125 MHz), fundamental para Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7. En Latinoamérica, países como Brasil, Chile, México y Costa Rica han liberado parcial o totalmente esta banda para uso no licenciado.

En Panamá, la situación es la siguiente:

- Estado actual: La banda de 6 GHz no ha sido aún liberada oficialmente para uso no licenciado.

- Reglamento vigente: No contempla las nuevas disposiciones del Wi-Fi 6E.

- Planes a futuro: La ASEP ha iniciado estudios técnicos y consultas públicas sobre la posibilidad de habilitar esta banda, aunque no existe todavía un cronograma definido para su liberación.

Implicaciones técnicas y económicas:

- Restricción de equipos: Los AP y dispositivos cliente Wi-Fi 6E no pueden operar legalmente en 6 GHz en Panamá, salvo en entornos de laboratorio y bajo permisos experimentales.

- Retardo en adopción tecnológica: Empresas y proveedores enfrentan incertidumbre para inversiones en Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7.
- Potencial económico: La liberación de esta banda podría generar importantes beneficios en términos de capacidad, reducción de congestión y despliegue de nuevas aplicaciones, especialmente en áreas urbanas densas o espacios de alta demanda.

7.4 Normas sobre Equipos y Homologación.

La ASEP exige la homologación de equipos inalámbricos, lo cual implica que los dispositivos Wi-Fi deben cumplir con:

- Límites de potencia definidos en las normas locales.
- Certificaciones internacionales (ej. FCC, CE, IC) como requisito previo para homologación.
- Etiquetado y documentación técnica que acredite las características del equipo.

Este proceso es obligatorio tanto para importadores como para operadores que planeen desplegar infraestructura inalámbrica a nivel comercial.

7.5 Aspectos Regulatorios para Redes Mesh.

Las redes Mesh, aunque operan en bandas ISM, también están sujetas a las mismas limitaciones de potencia y homologación de equipos. No existe una regulación diferenciada para Mesh, pero:

- Deben respetar los límites de EIRP establecidos por ASEP.

- Su despliegue masivo en exteriores podría requerir autorización si se exceden potencias permitidas.
- Los enlaces backhaul inalámbricos entre nodos Mesh deben cumplir las disposiciones de DFS en bandas de 5 GHz.

En el entorno residencial, la instalación de redes Mesh se encuentra exenta de licencia, siempre que se respeten las normas de potencia y equipos homologados.

Tabla 11. Análisis Comparativo de Restricciones y Oportunidades.

Tecnología	Bandas Usadas	Estado Regulación Panamá	Observaciones
Wi-Fi 5	2,4 y 5 GHz	Permitido sin licencia	Cumplir límites de potencia y DFS en 5 GHz.
Wi-Fi 6	2,4 y 5 GHz	Permitido sin licencia	Sin restricciones adicionales a Wi-Fi 5.
Wi-Fi 6E	6 GHz	No liberado aún	Requiere definición regulatoria.
Wi-Fi 7	6 GHz y superiores	No liberado aún	Depende de avances regulatorios.
Mesh Wi-Fi	2,4 y 5 GHz	Permitido sin licencia	Sujeto a límites de potencia y homologación.

7.6 Proyecciones y Recomendaciones.

El futuro de las tecnologías Wi-Fi en Panamá dependerá en gran medida de las decisiones regulatorias sobre la banda de 6 GHz. Mientras Wi-Fi 5 y 6 son hoy plenamente viables, la adopción de Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7 está supeditada a:

- Definición oficial del uso de 6 GHz.
- Procesos de homologación más ágiles.

- Difusión de guías técnicas por parte de ASEP para orientar a operadores y usuarios.

El mercado panameño tiene alto potencial para beneficiarse de Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7, especialmente en sectores como educación, salud, industria y entretenimiento. Sin embargo, las empresas deben proceder con cautela en inversiones en equipamiento de última generación hasta que exista claridad legal y normativa.

Panamá cuenta con un marco regulatorio sólido para Wi-Fi 5 y 6, mientras que las redes Mesh se consolidan como una opción viable y permitida para mejorar la cobertura en espacios residenciales y empresariales. No obstante, la plena implementación de Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7 requerirá de acciones regulatorias que desbloqueen nuevas oportunidades para el país en el campo de las telecomunicaciones inalámbricas.

CONCLUSIONES.

El estudio confirma que las tecnologías Wi-Fi han alcanzado avances significativos en velocidad, eficiencia y adaptabilidad, aunque su adopción masiva sigue condicionada por factores regulatorios, costos de despliegue y compatibilidad de dispositivos. Wi-Fi 5 continúa siendo funcional y confiable en muchos entornos; Wi-Fi 6 y 6E marcan la transición hacia redes optimizadas para altas densidades y aplicaciones exigentes; y Wi-Fi 7, aunque promete capacidades disruptivas, aún enfrenta limitaciones de madurez y disponibilidad, especialmente en contextos como Panamá donde el acceso al espectro de 6 GHz sigue pendiente. Las redes Mesh se consolidan como alternativa eficaz para resolver problemas de cobertura en infraestructuras complejas, aunque requieren una planificación cuidadosa de topología, costos e interferencias.

En el caso panameño, la investigación revela un hallazgo clave: la liberación oportuna de la banda de 6 GHz será determinante para permitir el despliegue real de Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7. Sin esta decisión regulatoria, Panamá corre el riesgo de rezagarse frente a otros países de la región en la adopción de tecnologías críticas para el desarrollo digital. La competitividad tecnológica del país dependerá, por tanto, de una política de espectro clara y alineada con prácticas internacionales, acompañada de inversiones estratégicas y de la formación de talento local especializado. En síntesis, el Wi-Fi representa una palanca fundamental para la transformación digital de Panamá, siempre que exista coordinación entre empresas, reguladores, academia y fabricantes para asegurar un despliegue eficiente, seguro y sostenible.

RECOMENDACIONES.

Como resultado del análisis de las tecnologías Wi-Fi 5, 6, 6E, 7 y de las redes Mesh, junto con los aspectos regulatorios, técnicos y económicos revisados, se plantean recomendaciones dirigidas a empresas, organismos reguladores, proveedores de servicios, fabricantes y la comunidad académica. Estas buscan alinear el desarrollo tecnológico del país con su realidad económica, regulatoria y social, asegurando que Panamá no quede rezagada en la adopción de innovaciones inalámbricas.

Recomendaciones para Empresas y Entidades Privadas

- Evaluar con precisión las necesidades de conectividad antes de invertir, evitando sobredimensionar infraestructuras. En Panamá, donde muchas organizaciones aún operan con Wi-Fi 5, la migración hacia Wi-Fi 6 representa un equilibrio óptimo entre costo y beneficio.
- Planificar actualizaciones con visión de mediano plazo. La transición inmediata hacia Wi-Fi 7 no es recomendable dada su limitada madurez tecnológica y altos costos actuales.
- Incorporar análisis de retorno de inversión (ROI) que consideren también consumo energético, licencias y compatibilidad de dispositivos, un factor sensible en la economía panameña.
- Implementar redes Mesh en entornos residenciales y empresariales de áreas urbanas y semiurbanas con estructuras complejas, donde las deficiencias de cobertura son frecuentes.
- Capacitar a personal técnico en nuevas funcionalidades (OFDMA, MU-MIMO, WPA3), garantizando un uso eficiente de la infraestructura.

Recomendaciones para el Organismo Regulador (ASEP)

- Acelerar el proceso de análisis técnico y jurídico para liberar la banda de 6 GHz, tomando como referencia modelos ya aplicados en Brasil, México y Chile, y así evitar rezagos regionales.
- Publicar guías claras sobre condiciones de uso, potencia y homologación de equipos, para reducir la incertidumbre regulatoria en el mercado panameño.
- Establecer procesos de homologación más ágiles y menos costosos, especialmente para dispositivos de consumo masivo, fomentando la adopción de nuevas tecnologías.
- Promover consultas públicas inclusivas con sectores productivos, educativos y de innovación, garantizando que las decisiones sobre espectro respondan a las necesidades del país.
- Evaluar la posibilidad de uso indoor sin licencia en la banda de 6 GHz, con limitaciones de potencia para mitigar interferencias.

Recomendaciones para Proveedores de Servicios y Operadores

- Diseñar redes adaptadas a la densidad de usuarios y tipo de tráfico. En entornos urbanos panameños de alta concurrencia, Wi-Fi 6 representa una solución inmediata, mientras que Wi-Fi 7 debe reservarse para servicios críticos o de baja latencia.
- Integrar Wi-Fi y redes celulares (Wi-Fi Offload, Wi-Fi Calling) para optimizar recursos de espectro y garantizar continuidad en áreas de baja cobertura móvil.

- Priorizar equipos con soporte WPA3, TWT y OFDMA, fortaleciendo la seguridad y eficiencia energética, aspectos críticos en la competitividad de los operadores locales.
- Monitorear la penetración de dispositivos compatibles en Panamá, evitando migraciones prematuras que encarezcan la oferta sin generar valor real a los clientes.

Recomendaciones para Fabricantes y Proveedores de Equipamiento

- Ofrecer equipos multibanda (2.4, 5 y 6 GHz) que faciliten la transición gradual hacia Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7, alineados con el ritmo de adopción regulatoria panameña.
- Diseñar soluciones con bajo consumo energético, dado que el costo operativo es un factor decisivo para empresas locales.
- Ajustar estrategias de precios y disponibilidad en Panamá, fomentando que equipos compatibles con nuevas tecnologías sean accesibles.
- Colaborar estrechamente con ASEP y actores nacionales, aportando evidencia técnica que respalde la liberación de la banda de 6 GHz.

Recomendaciones para la Comunidad Académica y de Investigación

- Impulsar investigaciones locales que evalúen el desempeño real de Wi-Fi 6, 6E y 7 en condiciones propias de Panamá (clima, densidad urbana, entornos residenciales y empresariales).
- Generar estudios de caso que integren costos, beneficios y ROI, ofreciendo información útil para empresas y organismos estatales.

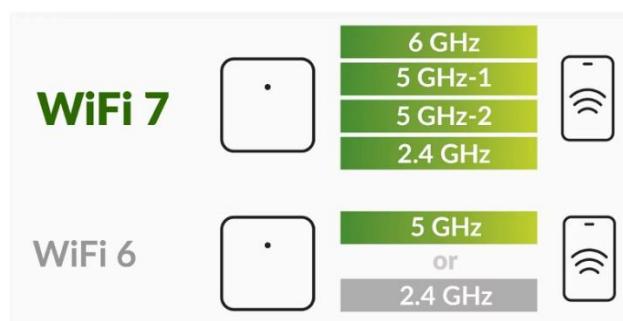
- Establecer convenios internacionales para acceso a equipamiento de prueba en bandas aún no liberadas, contribuyendo con evidencia empírica a la definición de políticas nacionales.
- Incluir en los planes de estudio universitarios módulos sobre tecnologías emergentes, OFDMA, MU-MIMO y seguridad WPA3, preparando profesionales capaces de liderar la transición digital.

Consideraciones Finales

El despliegue de tecnologías Wi-Fi de última generación en Panamá representa una oportunidad estratégica para modernizar infraestructuras, incrementar la competitividad y fomentar la innovación. No obstante, la adopción debe estar sustentada en análisis económicos y regulatorios sólidos, evitando inversiones prematuras.

Mientras Wi-Fi 5 y 6 continúan siendo soluciones estables para la mayoría de entornos, la adopción de Wi-Fi 6E y 7 dependerá del marco normativo y de la capacidad de inversión del país. Solo mediante la articulación entre empresas, reguladores, operadores, fabricantes y academia será posible aprovechar plenamente el potencial de las telecomunicaciones inalámbricas y garantizar que Panamá avance hacia una sociedad digital inclusiva y competitiva.

Ilustración 20. Eficiencia y confiabilidad de Wi-Fi



Fuente: Juniper Networks. (2023). *What is Wi-Fi 7*. Juniper Networks.

<https://www.juniper.net/mx/es/research-topics/what-is-wi-fi-7.html>

REFERENCIAS.

- Alliance for Telecommunications Industry Solutions. (2023). *Wi-Fi 6E and the path to 6 GHz spectrum utilization*. ATIS. <https://www.atis.org/wi-fi-6e-6ghz>
- Aruba Networks. (2023). *Understanding the security advancements in Wi-Fi 6 and Wi-Fi 7*. Aruba Networks. <https://www.arubanetworks.com/techdocs>
- AirTight Networks. (2022). *Wireless security: WPA3 and beyond*. AirTight Networks. <https://www.airtightnetworks.com/resources>
- Cisco Systems. (2023). *Wi-Fi 6/6E/7 explained*. Cisco Systems. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise-networks/802-11ax.html>
- D-Link. (2023). *Wi-Fi 7 technical whitepaper*. D-Link. <https://www.dlink.com/en/whitepapers/wi-fi-7>
- Federal Communications Commission. (2020). *Unlicensed use of the 6 GHz band*. FCC. <https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-6-ghz-band-wi-fi-and-other-unlicensed-uses>
- Gómez, C., Camps-Mur, D., & Paradells, J. (2020). Benefits of IEEE 802.11ax for IoT applications: A performance evaluation. *Sensors*, 20(4), 1044. <https://doi.org/10.3390/s20041044>
- Hosseini, S. A., & Hossain, E. (2022). Wi-Fi 7 and 6 GHz spectrum: Evolution and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 60(10), 29–35. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200104>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2021). *IEEE standard for Wireless LAN medium access control and physical layer specifications (802.11ax-2021)*. IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11ax-2021.html
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2023). *IEEE 802.11be – Extremely high throughput*. IEEE. <https://standards.ieee.org/ieee/802.11be>
- Khorov, E., Lyakhov, A., Krotov, A., & Guschin, A. (2019). A survey on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs. *Computer Communications*, 145, 10–29. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.05.008>
- Qualcomm. (2023). *The future of Wi-Fi with 802.11be (Wi-Fi 7)*. Qualcomm. <https://www.qualcomm.com/news/onq/2023/02/the-future-of-wi-fi-with-802-11be>
- Wi-Fi Alliance. (2023). *Wi-Fi CERTIFIED 6™ and 6E technology overview*. Wi-Fi Alliance. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-6>

- Eurotronix. (2023, junio 20). *Celebramos el día mundial del WiFi*. Eurotronix. <https://eurotronix.com/es/noticias/celebramos-el-dia-mundial-del-wi-fi/>
- Astound. (s. f.). *Wi-Fi 7 vs. Wi-Fi 6 vs. Wi-Fi 5 differences*. Astound. <https://www.astound.com/learn/internet/wifi-7-wifi-6-wifi-5-differences/>
- Computer Hoy. (2016, abril 1). *Historia del WiFi: así empezó todo en los años ochenta*. ComputerHoy. <https://computerhoy.20minutos.es/noticias/internet/historia-del-wifi-asi-empezo-todo-anos-ochenta-79475>
- ResearchGate. (2008). *Figura 121: Arquitectura WiFi 802.11* [Ilustración]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-121-Arquitectura-WiFi-80211-48_fig4_48227749
- ResearchGate. (2008). *Figura 123: Modo Ad Hoc* [Ilustración]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-123-Modo-Ad-Hoc-44_fig5_48227749
- CCNA desde Cero. (s. f.). *¿Qué es una red WiFi Mesh?*. CCNA desde Cero. <https://ccnadesdecero.es/que-es-red-wifi-mesh/>
- KeepCoding. (2022, octubre 14). *La radiofrecuencia: cómo funciona y aplicaciones*. KeepCoding. <https://keepcoding.io/blog/la-radiofrecuencia-como-funciona-y-aplicaciones/>
- Mini-Circuits. (2021, mayo 19). *The basics of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)*. Mini-Circuits. <https://blog.minicircuits.com/the-basics-of-orthogonal-frequency-division-multiplexing-ofdm/>
- RedesZone. (2021, enero 30). *Bandas y frecuencias del WiFi: Guía completa*. RedesZone. <https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-wifi/bandas-frecuencias-wi-fi/>
- CICESE. (2018, septiembre 5). *WPA3: El protocolo de seguridad más seguro para tu red WiFi*. Seguridad CICESE. <https://seguridad.cicese.mx/noticia/2195/WPA3:-el-protocolo-de-seguridad-m%C3%A1s-seguro-para-tu-red-Wifi>
- BandaAncha. (2023, febrero 22). *Guía para entender las versiones de WiFi: dónde usarlas y qué ventajas tienen*. BandaAncha. <https://bandaancha.eu/articulos/guia-entender-versiones-wifi-donde-10139>
- CCNA desde Cero. (s. f.). *¿Qué es una red WiFi Mesh?*. CCNA desde Cero. <https://ccnadesdecero.es/que-es-red-wifi-mesh/>
- Cetecom Advanced. (2023, abril 18). *Wi-Fi 7: The new standard for wireless communications*. Catacomb Advanced. <https://cetecomadvanced.com/en/news/wifi-7/>

Computer Hoy. (2014, agosto 12). *Los secretos del estadio más avanzado tecnológicamente del mundo*. ComputerHoy.

<https://computerhoy.20minutos.es/noticias/life/secretos-del-estadio-mas-avanzado-tecnologicamente-del-mundo-45380>

Hyatt, I. (2024, julio 17). *Wi-Fi network speeds: Board of trustees approves upgrades for campus and home residence halls*. The Purdue Exponent.

https://www.purdueexponent.org/campus/general_news/ian-hyatt-wifi-network-speeds-board-of-trustees-campus-at-home-residence-halls-it/article_94037ff8-62e7-11ef-ba3d-0fdb9e7fdf46.html

Howset. (s. f.). *Configurar redes Mesh: Conectividad avanzada*. Howset.
<https://howset.com/es/configurar-redes-mesh-conectividad/>

Cisco Meraki. (2023). *Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide*. Cisco Meraki Documentation. https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_%28802.11be%29_Technical_Guide

Cisco Meraki. (2023). *Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide*. Cisco Meraki Documentation. https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_%28802.11be%29_Technical_Guide

Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2021, marzo 8). *Comunicado 3*. ASEP. <https://asep.gob.pa/comunicado-3/>

Juniper Networks. (2023). *What is Wi-Fi 7?*. Juniper Networks.
<https://www.juniper.net/mx/es/research-topics/what-is-wi-fi-7.html>