



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño y desarrollo de una red
inalámbrica de alta densidad
para una oficina**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Telecomunicaciones

P R E S E N T A

Mauricio Santana Pichardo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Javier Gómez Castellanos



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA RED INALÁMBRICA DE ALTA DENSIDAD PARA UNA OFICINA que presenté para obtener el título de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.


MAURICIO SANTANA PICHARDO
Número de cuenta: 312189109

*“Cuida tus pensamientos, porque se convertirán en tus palabras.
Cuida tus palabras, porque se convertirán en tus actos.
Cuida tus actos, porque se convertirán en tus hábitos.
Cuida tus hábitos, porque se convertirán en tu destino.”*

-Mahatma Gandhi

*“Es bueno ser importante, pero es más importante ser bueno.”
- John Templeton*

*“Un objetivo sin un plan es solo un deseo.”
-Antoine de Saint-Exupéry*

Dedicatoria

Dedico esta tesis a todos los estudiantes e ingenieros que están incursionando en el mundo de las comunicaciones inalámbricas. A lo largo de mi experiencia en el campo me he encontrado con muchas malas prácticas que me han llevado a reflexionar sobre la falta de documentación accesible para dimensionar adecuadamente un proyecto de esta magnitud.

Con frecuencia, este tipo de proyectos son realizados por ingenieros civiles, arquitectos o, en última instancia, técnicos que han aprendido a partir de la experiencia. Si bien reconozco y valoro su trabajo, considero que estos proyectos requieren información más detallada para ser ejecutados de la mejor manera.

Asimismo, para los estudiantes que están por ingresar al ámbito laboral, esta tesis busca servir como una guía didáctica que les permita comprender los aspectos clave que deben considerarse en este tipo de proyectos, las herramientas necesarias y el proceso de documentación adecuado.

Haciendo una analogía, una red inalámbrica puede considerarse un ente vivo, pues depende de múltiples factores externos, a diferencia de una red cableada. Por ello, debe seguir lo que llamo las tres "M": Monitoreo, Mantenimiento y Mejora.

Finalmente, como ingenieros, tenemos la responsabilidad de velar por nuestros propios intereses, por los de nuestros colegas y por los de quienes vendrán después. Al realizar un trabajo de calidad y debidamente documentado, contribuimos a que otros ingenieros, o cualquier persona que se adentre en el mundo de las redes inalámbricas, puedan comprenderlo con facilidad y continuar mejorándolo.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en particular a mi mamá por darme el ejemplo de no rendirme y continuar por muy mal que estén las cosas. Te dedico esta tesis, estés donde estés. A mi hermano Saaid, por siempre apoyarme y ser el oído y el hombro cuando lo necesité.

A mis tías, Victoria y Linda, que siempre han estado en todos los acontecimientos importantes de mi vida, ayudándome, echándome porras y dándome consejos.

A Gabriel, por siempre estarme presionando para terminar; gracias por esos jalones de orejas.

A Alan, por ayudarme a entender y corregir mis errores desde hace catorce años.

A mis maestros de la facultad, que me enseñaron a amar lo que en un principio no entendía.

Al Taller de Cómputo para la Docencia de la DCB, por ser mi primer empleo y darme la confianza de aplicar mis conocimientos en sus equipos.

Al Dr. Javier Gómez Castellanos, por acompañarme en todo este proceso con su paciencia, su conocimiento, sus consejos y su amabilidad.

A los doctores miembros del jurado, por todas sus amabilidades y comentarios.

Por último, a la UNAM, a la FI y a la Torre de Ingeniería, porque fueron mi segunda casa, además de ser mi refugio físico y mental.

Índice

| | |
|---|----|
| Dedicatoria | 3 |
| Agradecimientos..... | 4 |
| Índice..... | 5 |
| Lista de figuras | 7 |
| Lista de tablas | 9 |
| Introducción | 10 |
| Planteamiento del problema | 11 |
| Justificación | 12 |
| Objetivos..... | 12 |
| Metodología | 13 |
| Estructura de la tesis | 13 |
| Capítulo 1. Marco teórico | 15 |
| 1.1 Fundamentos de redes inalámbricas | 15 |
| 1.1.1 Propiedades de la onda | 15 |
| 1.1.2 Modulación | 16 |
| 1.2 Señales de RF | 17 |
| 1.2.1 Interferencia | 17 |
| 1.2.3 Pérdidas en el espacio libre | 19 |
| 1.3 Funcionamiento de WiFi | 19 |
| 1.4 Estándares de redes WiFi..... | 22 |
| Capítulo 2. Análisis y requerimientos de la red | 24 |
| 2.1 Análisis del entorno..... | 24 |
| 2.1.1 Características del espacio de trabajo | 24 |
| 2.1.2 Restricciones de diseño | 26 |
| 2.1.3 Consideraciones de radiofrecuencia | 26 |
| 2.2 Requerimientos de red..... | 28 |
| 2.2.1 Aplicativos | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2 Número de dispositivos finales..... | 31 |
| 2.2.3 Tipo de dispositivos..... | 34 |
| Capítulo 3. Diseño y simulación de la red | 36 |
| 3.1 Diseño preliminar | 36 |
| 3.1.1 Basado en mejores prácticas | 36 |
| 3.1.2 Basado en estimaciones | 40 |
| 3.2 Simulación predictiva | 43 |
| 3.2.1 Referencias del entorno | 43 |
| 3.2.2 Simulación del entorno | 45 |
| 3.2.3 Piso 3 | 48 |
| 3.2.4 Piso 5 | 50 |
| Capítulo 4. Análisis de resultados | 51 |
| 4.1 Resultados de la simulación | 52 |
| 4.1.1 Cobertura | 55 |
| 4.1.2 Roaming | 56 |
| 4.1.3 Throughput | 57 |
| 4.1.4 Interferencia | 58 |
| 4.1.5 Utilización de tiempo-aire | 59 |
| 4.1.6 Capacidad | 60 |
| Capítulo 5. Comparación con estándares y mejores prácticas..... | 61 |
| 5.1 Consideraciones de pisos adyacentes..... | 66 |
| 5.2 Posibles mejoras y ajustes | 70 |
| Capítulo 6. Conclusiones..... | 73 |
| 6.1 Conclusiones de esta tesis | 73 |
| 6.2 Limitaciones del estudio..... | 74 |
| Glosario | 76 |
| Referencias | 77 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Propiedades de la onda (Elaboración propia).----- | 15 |
| Figura 2. Señal portadora y datos para transmitir [3, p. 25].----- | 16 |
| Figura 3. Ejemplos de modulación de audio [4].----- | 17 |
| Figura 4. Acceso al medio con DFC [5, p. 248].----- | 20 |
| Figura 5. Plano de la oficina (Elaboración Propia).----- | 24 |
| Figura 6. Simbología de atenuaciones (Elaboración Propia).----- | 25 |
| Figura 7. Referencia de zonas excluidas (Elaboración Propia).----- | 26 |
| Figura 8. Canales permitidos en las bandas de 2.4 y 5 GHz [9].----- | 27 |
| Figura 9. Modelo de implementación de voz y video [5, p. 20].----- | 30 |
| Figura 10. Diseño de cobertura de baja densidad (izquierda) y de alta densidad de usuarios (derecha) [5, p. 100].----- | 31 |
| Figura 11. Densidad en diseño basado en cobertura básica vs diseño basado en alta densidad [5, pp. 100-101].----- | 32 |
| Figura 12. Relación distancia, MCS y data rates [14].----- | 32 |
| Figura 13. Capacidad máxima de dispositivos en AP Meraki (traducción al español) [20].----- | 36 |
| Figura 14. Throughput por dispositivo para diferentes MCS y SS para 802.11n. [24, p. 11].----- | 38 |
| Figura 15. Throughput por dispositivo para diferentes MCS y SS para 802.11ac. [26, p. 47].----- | 39 |
| Figura 16. Estimación de throughput por dispositivo para diferentes MCS y SS (Elaboración propia).----- | 41 |
| Figura 17. Procedimiento de escalar de mapa (Elaboración propia).----- | 45 |
| Figura 18. Delimitación de área de trabajo (Elaboración propia).----- | 46 |
| Figura 19. Simulación de tipo de dispositivo (Elaboración propia).----- | 46 |
| Figura 20. Asociación de dispositivos al área de trabajo (Elaboración propia).----- | 47 |
| Figura 21. Configuración de la capacidad de la red (Elaboración propia).----- | 47 |
| Figura 22. Configuración de los parámetros de la red (Elaboración propia).----- | 48 |
| Figura 23. Ubicación de los AP con sus respectivos Canales y anchos de canal en las 3 bandas (Elaboración propia).----- | 52 |
| Figura 24. Superposición de canales en entornos de alta densidad [5, p. 96].----- | 61 |
| Figura 25. Superposición de AP en entorno simulado (Elaboración Propia).----- | 62 |
| Figura 26. Ejemplo de repetición de canal [5, p. 97].----- | 64 |
| Figura 27. Diferencia de potencia entre áreas de coberturas [5, p. 98].----- | 64 |
| Figura 28. Utilización de tiempo-aire del AP-P4-12 en la banda de 5 GHz (Elaboración Propia).----- | 68 |

Figura 29. Utilización de tiempo-aire del AP-P4-21 en la banda de 5 GHz (Elaboración Propia).----- 69

Figura 30. Estado de capacidad para AP-P4-16 en banda de 5 GHz (Elaboración Propia).----- 70

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Interferencias [3, p. 75]..... | 17 |
| Tabla 2. Descripción de los efectos de propagación [3, p. 84]. | 18 |
| Tabla 3. Colisiones vs. Slots por CW (Elaboración propia). | 21 |
| Tabla 4. Estándares WiFi (Elaboración Propia)..... | 22 |
| Tabla 5. Throughput por usuario para cada tipo de aplicativo [12]. | 30 |
| Tabla 6. Data rate máximo por tipo de dispositivo (Elaboración propia). | 40 |
| Tabla 7. Throughput máximo por tipo de dispositivo (Elaboración propia). | 40 |
| Tabla 8. Throughput por dispositivo vs cantidad de dispositivos (Elaboración propia).... | 41 |
| Tabla 9. Capacidad de dispositivos por ancho de canal con base en el SS (Elaboración propia). | 42 |
| Tabla 10. Cantidad de dispositivos (Elaboración propia)..... | 43 |
| Tabla 11. Valores de cobertura (Elaboración propia). | 43 |
| Tabla 12. parámetros de las redes inalámbricas (Elaboración propia)..... | 44 |
| Tabla 13. Potencias permitidas del AP C9164 [19]. | 49 |
| Tabla 14. Simulación del piso 3 (Elaboración propia). | 49 |
| Tabla 15. Simulación del Piso 5 (Elaboración propia). | 50 |
| Tabla 16. Configuración de canales, potencias y alturas de los AP (Elaboración propia). | 53 |
| Tabla 17. Configuración de canales, potencias y alturas de los AP (Elaboración propia). | 54 |
| Tabla 18. Cobertura en piso 4 (Elaboración propia)..... | 55 |
| Tabla 19. Roaming en piso 4 (Elaboración propia). | 56 |
| Tabla 20. Throughput en piso 4 (Elaboración propia). | 57 |
| Tabla 21. Interferencia en piso 4 (Elaboración propia)..... | 58 |
| Tabla 22. Utilización del tiempo-aire en piso 4 (Elaboración propia)..... | 59 |
| Tabla 23. Capacidad en piso 4 (Elaboración propia)..... | 60 |
| Tabla 24. Comparación de coberturas para diferentes dispositivos (Elaboración Propia). | 63 |
| Tabla 25. Reuso de canales (Elaboración Propia). | 65 |
| Tabla 26. Reusó de canales, aumentando la potencia de AP seleccionados (Elaboración Propia)..... | 66 |
| Tabla 27. Interferencias de AP Aisladas y conjuntas (Elaboración Propia)..... | 67 |
| Tabla 28. Mapas de interés en 6 GHz (Elaboración Propia). | 72 |

Introducción

Las redes inalámbricas nos han permitido estar comunicados con una ventaja que otro tipo de tecnologías no tienen: la movilidad. Los sistemas de comunicaciones tradicionales, como el teléfono, dependen de estar ubicados en un lugar físico. A su vez, estos tienen sus propias limitantes, como el tipo de cable, su longitud o la potencia que alimenta al teléfono. Estos parámetros dan como resultado que el cableado dependa de un diseño y de la planeación de obra civil. Un caso similar es la fibra óptica, que sigue un esquema parecido al cableado tradicional, con la particularidad de que debe manipularse con mayor cuidado debido a su fragilidad.

Si bien es verdad que todavía utilizamos los sistemas de comunicaciones tradicionales, las redes inalámbricas representaron un cambio disruptivo. Desde la aparición del radio AM/FM, es posible observar cómo podemos llevar un radio de un piso a otro dentro de una casa y seguir escuchando un programa (siempre y cuando exista señal). Por otro lado, existen las comunicaciones tipo push-to-talk (PTT), es decir, la tecnología que utilizan los equipos walkie-talkie, con la cual es posible comunicarse con una o varias personas a una distancia considerable, incluso estando en movimiento.

El WiFi nos permite conectarnos a Internet desde casa u oficina con la ventaja de que podemos movernos entre diferentes habitaciones o pisos y mantenernos conectados sin la necesidad de un cable. La tecnología celular sigue un funcionamiento similar, pero además brinda la facilidad de elegir el tipo de comunicación que se necesite, por ejemplo: enviar un mensaje de texto, realizar una llamada telefónica o navegar en Internet mediante el uso de datos.

Aunque las redes inalámbricas nos brindan el lujo de estar conectados sin importar nuestra ubicación física, es importante tomar en cuenta que también existen factores que afectan la conexión, como las zonas de cobertura, las líneas de vista, la interferencia, el ruido o la densidad de usuarios, entre otras consideraciones.

En esta tesis se aborda un tipo de red inalámbrica: la tecnología WiFi. Se presentará un caso de estudio cada vez más demandado: el uso de WiFi en entornos de oficina, donde se cablean cada vez menos dispositivos y se conectan más usuarios por WiFi. Se tendrán en cuenta desde temas básicos para su comprensión hasta temas avanzados de diseño y desarrollo.

Planteamiento del problema

Contexto

Se trata de una oficina imaginaria ubicada en el cuarto piso de un edificio, con un área total de 2,355 m². La empresa contratante requiere el diseño de una red inalámbrica que cubra todas las áreas de oficina del piso, excluyendo ciertas zonas como baños, elevadores, bodegas y escaleras. La solicitud responde a la necesidad de proporcionar conectividad WiFi a todo el personal que trabaja en estas oficinas.

El entorno plantea varios retos técnicos debido a la falta de conocimiento previo de la empresa sobre redes inalámbricas y a la variabilidad en la cantidad de usuarios conectados, ya que existen días en los que se ocupan todas las estaciones de trabajo, lo que supone una carga máxima para la red. Adicionalmente, la política de permitir el uso de dispositivos personales introduce un factor extra de carga sobre el sistema.

El problema es determinar cuál es la cantidad necesaria de access points que requiere la empresa para brindar una conectividad eficiente a sus usuarios, así como definir las mejores ubicaciones dentro de la oficina para la propagación de señal. Esto conduce a establecer una configuración óptima en términos de potencia y asignación de canales.

El alcance del proyecto incluye el diseño de una red inalámbrica eficiente que sea capaz de:

1. Soportar la conectividad simultánea de todos los usuarios y sus dispositivos personales durante los días de máxima ocupación.
2. Garantizar una cobertura uniforme y estable en las áreas especificadas.
3. Considerar las características físicas del entorno, como la distribución de los espacios y los materiales de las paredes, para minimizar la atenuación de la señal y maximizar el rendimiento de la red.
4. Documentar detalladamente el proceso de diseño de la red inalámbrica, con el objetivo de servir como un caso de estudio práctico para futuros proyectos.
5. Identificar y describir los fenómenos físicos que afectan el rendimiento de las redes inalámbricas en espacios cerrados, proporcionando una guía clara sobre cómo abordarlos en escenarios similares.

Justificación

Si bien las redes cableadas ofrecen alta estabilidad y capacidad, las redes WiFi permiten proporcionar conectividad sin restringir a los usuarios a una ubicación física; en otras palabras, permite la movilidad dentro del espacio de trabajo. Por otra parte, reducen los costos asociados al cableado. Por esta razón, este tipo de soluciones es cada vez más demandado.

La implementación de una red inalámbrica eficiente es crucial para garantizar la productividad y conectividad de los empleados en la oficina. Dado que las empresas dependen cada vez más de la tecnología para sus operaciones diarias, contar con una red bien diseñada se convierte en un factor estratégico que mejora la experiencia de los usuarios, reduce interrupciones y optimiza los recursos. Además, al documentar este diseño se genera un caso de estudio práctico que puede replicarse en contextos similares, contribuyendo al desarrollo y estandarización de mejores prácticas en redes inalámbricas.

Esta tesis es relevante porque aborda una necesidad concreta y cada vez más común en el sector empresarial: la conectividad inalámbrica en espacios de oficina. Con la creciente dependencia de los dispositivos móviles, garantizar una red inalámbrica confiable no solo es una necesidad operativa, sino también una ventaja competitiva para las empresas.

Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es diseñar una red inalámbrica de alta densidad, aplicando las mejores prácticas con el fin de determinar la cantidad óptima de access points, su ubicación y la configuración adecuada de niveles de potencia y asignación de canales. Asimismo, este trabajo puede servir como un caso de estudio imaginario para que los estudiantes tengan una referencia sobre dicho proceso, incluyendo las consideraciones necesarias, los parámetros clave a los que deben prestar atención y los fenómenos que afectan directamente a este tipo de redes.

Objetivos específicos:

- Analizar las características del entorno físico de la oficina, como la distribución de los espacios y los materiales de construcción, con la finalidad de identificar los factores que afectan la propagación de la señal.
- Determinar la cantidad óptima de access points necesaria para soportar la cantidad de dispositivos finales.
- Definir la ubicación de los access points, considerando los niveles de potencia y asignación de canales, para obtener una cobertura eficiente.
- Evaluar el diseño propuesto mediante herramientas de simulación predictiva.

Metodología

Se adoptará una combinación de métodos basados en guías de diseño de redes inalámbricas y de la simulación predictiva. Estos métodos fueron elegidos por los siguientes argumentos:

- Base teórica sólida: Repasar los principios de radiofrecuencia, el funcionamiento del WiFi y los estándares 802.11 proporciona fundamentos que ayudarán a la comprensión y aplicación de las mejores prácticas en el diseño.
- Validación previa al despliegue: La simulación permitirá visualizar y demostrar los temas mencionados anteriormente, lo que servirá como apoyo para capacitar al lector en el uso de las herramientas de simulación.
- Optimización de recursos: Si bien la mejor opción es el método Access Point on Stick (APoS), esta combinación permite equilibrar precisión, costo y tiempo. De esta forma se puede asegurar un diseño eficiente y recrearlo en los escenarios que se consideren pertinentes.

El método APoS consiste en utilizar un AP montado en un trípode. Posteriormente, con ayuda de un scanner, se muestrea la cobertura hasta abarcar toda el área que se desea evaluar. Estas mediciones permiten realizar una caracterización del entorno, así como evaluar de manera real la cobertura, la calidad de la señal, los huecos de cobertura y las atenuaciones en el entorno.

Estructura de la tesis

Esta tesis está conformada por los siguientes capítulos:

El Capítulo 1: Marco Teórico. Está enfocado a sentar las bases para la comprensión de las redes inalámbricas. En él se abordarán los conceptos básicos, como los fundamentos de este tipo de red, los estándares WiFi que lo rigen, los parámetros clave para el diseño de la red y las herramientas que facilitarán todo el proceso. Este es el capítulo más importante para la comprensión del funcionamiento general de la red.

El Capítulo 2: Análisis y requerimientos de la red. Está enfocado al análisis de datos, como la caracterización del entorno, los requerimientos que tendrá la red y su validación mediante recomendaciones de mejores prácticas.

El Capítulo 3: Diseño y simulación de la red. A partir del capítulo anterior, se sentarán las bases para seleccionar los equipos, definir las ubicaciones y la cantidad necesaria de los AP, y estimar la capacidad que deberán soportar.

El Capítulo 4: Análisis de los resultados. A partir de la simulación realizada, se evaluará si el diseño propuesto es correcto, si cumple con los requisitos establecidos previamente y

si se ajusta a la capacidad de usuarios, entre otros factores. De así requerirlo, se harán propuestas para su optimización.

El Capítulo 5: Comparación con estándares y mejores prácticas. Se realizará la comparación entre el diseño obtenido mediante la simulación y las recomendaciones de mejores prácticas, y se detallará si el diseño es correcto o si es necesario corregir algún aspecto.

El Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones. Finalmente, se presentarán las evidencias del funcionamiento de la red, se evaluará el cumplimiento de los objetivos, se indicará el beneficio de realizar la simulación frente a solo aplicar recomendaciones de mejores prácticas, y se discutirán los factores externos que puedan afectar el diseño, así como posibles líneas de trabajo para estudios futuros con alcances similares.

Capítulo 1. Marco teórico

El desarrollo de los temas básicos es de vital importancia para tener un conocimiento sólido al momento de diseñar e implementar una red inalámbrica. Una vez que sean explicados, se tendrá una mayor comprensión de cómo funcionan las redes inalámbricas y esto permitirá identificar los fenómenos físicos involucrados y la forma en que se manejan para erradicar posibles problemas que se verán más adelante. En la práctica, es común que personas ajenas a las redes propongan diseños sin saber cómo funciona el fenómeno, y cuando es hora de repararlo se genera una reacción en cadena que empeora un mal diseño.

Este primer capítulo se concentra en dejar todo el conocimiento básico indispensable para tener una excelente comprensión del tema y que, a la hora de llevarlo a la práctica, este sea una de nuestras mejores herramientas.

Definición de una red inalámbrica

Una red inalámbrica permite a las personas comunicarse y acceder a aplicaciones e información sin necesidad de cables. Esto proporciona libertad de movimiento y la posibilidad de extender las aplicaciones a diferentes partes de un edificio, una ciudad o prácticamente cualquier lugar del mundo [1, p. 3]. Con las actualizaciones recientes de esta tecnología, también es posible que las máquinas se comuniquen con las personas o bien con otras máquinas; tal es el caso de las tecnologías IoT (Internet of Things).

1.1 Fundamentos de redes inalámbricas

1.1.1 Propiedades de la onda

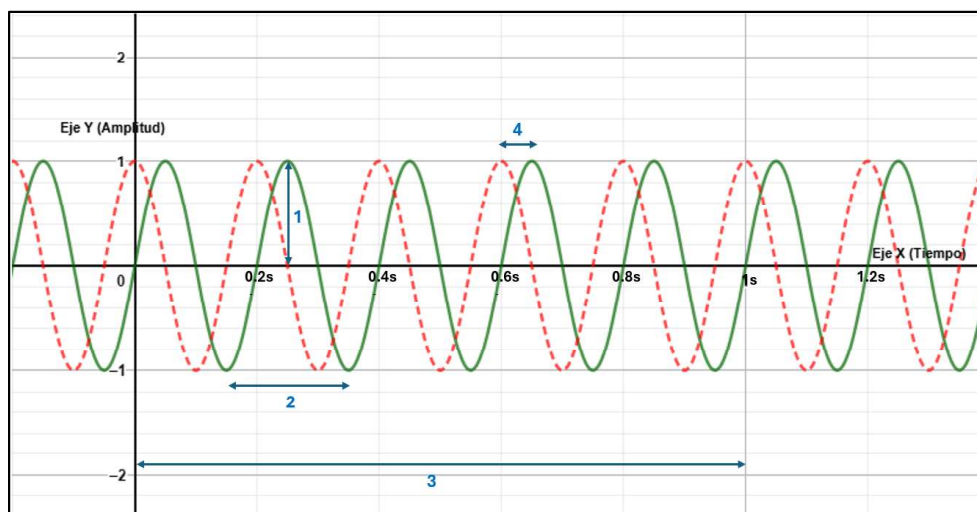


Figura 1. Propiedades de la onda (Elaboración propia).

Con base en la Figura 1 se observan los siguientes parámetros:

1. **Amplitud:** En física, es el parámetro que mide la variación de una magnitud física que cambia periódicamente en el tiempo [2]. Para la tesis, es el valor que existe entre el máximo y el mínimo de intensidad en una señal de RF. La intensidad se mide en términos de potencia, generalmente en Watts [W].
2. **Longitud de onda:** Es la medida física de la distancia que una onda viaja en un ciclo completo. Está representada generalmente por el símbolo λ . En la figura se observa la medida de λ , que equivale a un ciclo. En el vacío, las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz, en el aire este valor es cercano a dicha velocidad. La longitud de onda es un valor utilizado para el cálculo y el diseño de antenas.
3. **Frecuencia:** Es la propiedad que indica el número de ciclos que una señal ha completado durante un segundo. Esta puede ser medida en ciclos por segundo o en Hertz [Hz]. En la figura se muestra cómo puede ser medido un ciclo, representado por λ . En este ejemplo se observa cómo en 1 segundo existen 5 ciclos, lo que corresponde a 5 Hz. Para el caso de la banda de 2.4 GHz, esta se repite 2.4 mil millones de veces en 1 segundo.
4. **Fase:** Es la propiedad que mide el desplazamiento en el tiempo del inicio del ciclo de una señal con respecto a otra. La fase se mide en grados donde 0° corresponde al inicio de un ciclo, 180° a la mitad de un ciclo y 360° el ciclo completo. En la Figura 1, las señales fueron generadas a destiempo, por lo que sus ciclos no coinciden; en este caso se dice que las señales están desfasadas. Cuando las señales se generan al mismo tiempo, sus ciclos coinciden, y en este caso se dice que ambas señales están en fase.

1.1.2 Modulación

En radiofrecuencia, se necesita una señal con una frecuencia estable y predecible, ya que un receptor necesita sintonizar esa frecuencia para detectar la información transmitida. A esta señal se le conoce como portadora, ya que le permite transportar información útil.

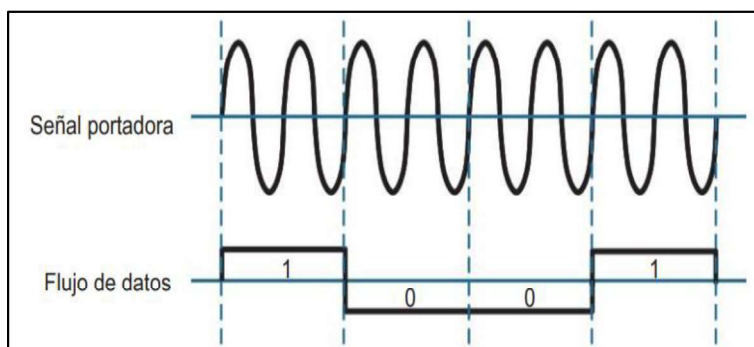


Figura 2. Señal portadora y datos para transmitir [3, p. 25].

En la Figura 2 se observa la señal portadora a una frecuencia desconocida. Para añadir datos a la señal de RF, se requiere conservar la frecuencia de la portadora; sin embargo, debe existir un esquema que altere alguna característica de la señal portadora para poder distinguir entre un bit 0 y un bit 1. El esquema que se utilice debe operar tanto en el transmisor como en el receptor para que la información se interprete correctamente.

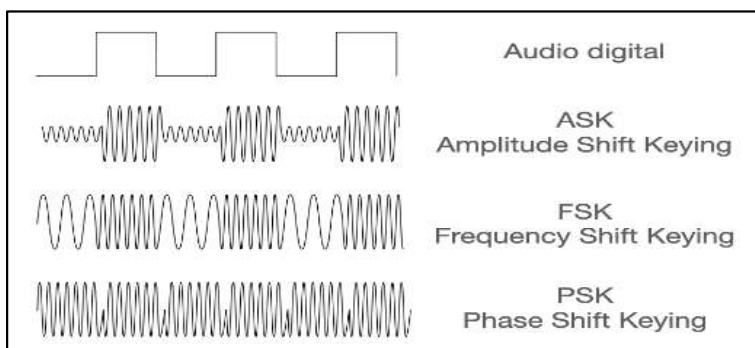


Figura 3. Ejemplos de modulación de audio [4].

En la Figura 3 se observa la señal de audio digital; posteriormente se observa cómo cambia la señal portadora con diferentes esquemas de modulación. La modulación es la alteración de la señal portadora de tal forma que indique la información que debe transportarse. La señal portadora se modifica o se modula según la señal de audio, y es así como logra transportar los datos. En el transmisor se modula y en el receptor se demodula. La modulación tiene como objetivo incluir la mayor cantidad de información en una señal, minimizando la cantidad de datos perdidos por interferencias o ruido.

1.2 Señales de RF

1.2.1 Interferencia

| | | |
|--|---------------------------------------|---|
| | <p>Interferencia Co-Canal</p> | <p>Ocurre cuando dos o más transmisiones usan el mismo canal. En el ejemplo, las señales se superponen en canal 6 y la transmisión se ve afectada.</p> |
| | <p>Interferencia adyacente</p> | <p>Ocurre cuando dos o más transmisores ocupan canales contiguos. En el ejemplo, las señales ocupan canales contiguos, por lo que se superponen en un porcentaje del ancho de banda</p> |
| | <p>Interferencia no 802.11</p> | <p>En el espectro de la banda de 2.4 GHz, existen transmisiones de microondas, bluetooth, etc. A estas transmisiones se les conoce como interferencia no 802.11</p> |

Tabla 1. Interferencias [3, p. 75].

Las interferencias ocurren cuando una o más señales se superponen en una frecuencia, una banda de frecuencias o un canal. Cuando se pierden datos, es necesario retransmitirlos, por lo que se usan más recursos inalámbricos. Por esta razón, siempre se busca que un transmisor pueda usar un canal libre de interferencias o, en su defecto, que tenga el menor número posible de ellas. La Tabla 1 ejemplifica los tipos de interferencias.

1.2.2 Efectos físicos de propagación

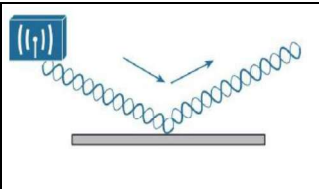
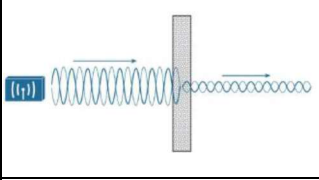
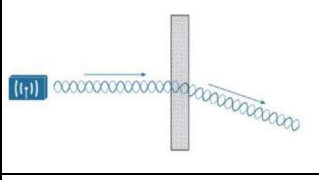
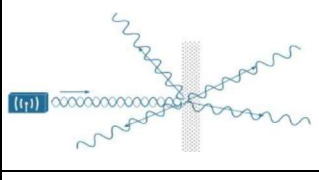
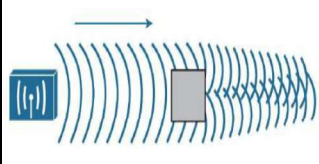
| | | |
|---|------------|--|
|  | Reflexión | Si una señal de radiofrecuencia se encuentra con un material denso el cual no puede atravesar, la señal tiende a cambiar de dirección. Esto puede provocar desfase en la señal y generar que las señales se sumen o se resten |
|  | Absorción | Si una señal de radiofrecuencia pasa a través de un material, la señal perderá potencia o será atenuada. Este fenómeno afecta directamente a la potencia de recepción de los dispositivos finales. |
|  | Refracción | Si una señal de radiofrecuencia pasa a través de dos medios con diferentes densidades, la señal tendrá una desviación en su dirección al atravesar la frontera entre los medios. |
|  | Dispersión | Si una señal de radiofrecuencia pasa por un medio rugoso o irregular, la señal tendrá a desviarse en diferentes direcciones, generando varias copias de la señal original. |
|  | Difracción | Si una señal de radiofrecuencia encuentra un obstáculo en su camino esta se amoldará al obstáculo y seguirá avanzando, aunque puede que el objeto absorba parte de su energía. Como una ola cuando choca con una piedra, la rodea para seguir avanzando. |

Tabla 2. Descripción de los efectos de propagación [3, p. 84].

Los efectos de propagación describen como una señal electromagnética (como las de radio o WiFi) cambia al viajar por el espacio o al atravesar diferentes materiales. Estos fenómenos, afectan a la intensidad, dirección y calidad de la señal. En la Tabla 2 se ejemplifican los tipos de efectos de propagación.

1.2.3 Pérdidas en el espacio libre

Cuando una señal es emitida por un transmisor y es liberada por su antena, su amplitud va disminuyendo a medida que viaja en el medio (aire). A pesar de que no exista ningún obstáculo entre el transmisor y el receptor, la intensidad disminuye conforme la señal avanza. A este fenómeno se le conoce como pérdidas en el espacio libre, o en inglés Free Space Path Loss (FSPL).

Como ejemplo, imagine que una piedra es lanzada al agua. El impacto de la piedra sobre el agua genera ondas que se expanden hacia afuera como pequeñas olas. A medida que las olas se alejan, la energía que se reparte sobre la superficie del agua es cada vez menor; por esta razón, las olas se hacen más pequeñas.

La ecuación de FSPL es la siguiente:

$$FSPL (dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

Donde:

d es la distancia entre el transmisor y el receptor medida en kilómetros.

f es la frecuencia de la señal en MHz

Esta ecuación ayuda a entender que, a mayor distancia y a mayor frecuencia, existen mayores pérdidas.

1.3 Funcionamiento de WiFi

Cuando un dispositivo inalámbrico está listo para enviar datos, debe iniciar el proceso de acceso al medio de red para intentar transmitirlos. Se recuerda que el medio del canal inalámbrico es el aire; por lo tanto, se debe aclarar que es un medio compartido y que todos los dispositivos compiten por transmitir.

El airtime o tiempo-aire, se refiere al tiempo que un dispositivo ocupa el medio compartido de transmisión (el aire) para enviar y recibir datos. En redes WiFi, todos los dispositivos que están asociados a un access point comparten el mismo canal, por lo que el recurso crítico no es tanto el ancho de banda del canal, sino el tiempo de uso de este.

En tecnología inalámbrica, si bien existen organismos reguladores del espectro radioeléctrico (como el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) en México) que establecen las bandas de frecuencia que pueden utilizarse y las condiciones de operación, dentro del canal de comunicación no existe una entidad central que determine qué dispositivo puede transmitir en cada momento. En su lugar, el acceso al medio se gestiona de manera distribuida entre todos los dispositivos que desean utilizar el canal. Este mecanismo se conoce como Distributed Coordination Function (DCF), o función de coordinación distribuida.

Para explicarlo de manera sencilla, imagine una plática entre dos o más amigos. En un inicio, todos escuchan antes de tomar la palabra; si nadie habla, uno empieza la conversación (envío de datos). Si alguien habla (canal ocupado), los demás esperan. Si dos amigos hablan al mismo tiempo (colisión), ambos se callan, esperan un tiempo aleatorio e intentan hablar nuevamente. Con base en el ejemplo anterior, no existe nadie que regule la comunicación: los mismos amigos se regulan. Eso es DCF, la función de autorregulación para transmitir entre los dispositivos. DCF trata de mitigar las colisiones para aprovechar al máximo el recurso crítico, que es el tiempo-aire.

CSMA/CA

El protocolo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) es el mecanismo que utiliza la DCF para que los dispositivos inalámbricos puedan transmitir datos evitando colisiones.

De manera sencilla, el acceso múltiple por detección de portadora se basa en el principio de “escuchar antes de hablar”. En ese sentido, lo que hacen los dispositivos es escuchar si alguien en el medio está transmitiendo o no; esta es la parte de CSMA. La parte de prevención de colisiones, o CA, empieza una vez que termina una transmisión.

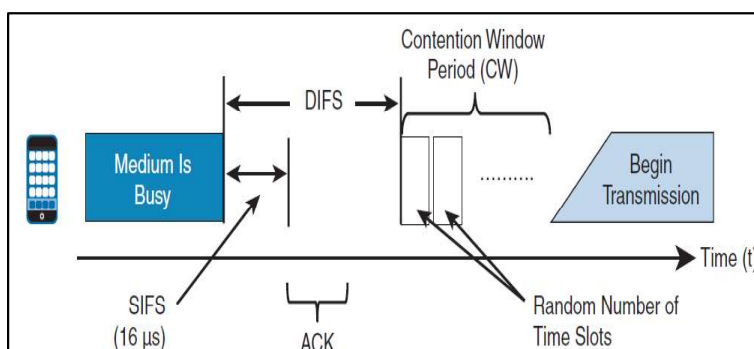


Figura 4. Acceso al medio con DFC [5, p. 248].

La Figura 4 ejemplifica el proceso. Para entenderlo mejor se dividirá en cuatro partes:

1. Medio Ocupado: En primera instancia, el dispositivo se encuentra transmitiendo, por lo que el medio está ocupado. Nadie más puede transmitir, ya que todos los demás dispositivos aplican la regla de "escuchar antes de hablar", esto con el fin de no provocar una colisión.

2. Periodo DIFS: Una vez que termina la transmisión, empieza el tiempo DIFS. Durante este periodo de tiempo, ningún dispositivo transmite. Durante el DIFS existe otro periodo de tiempo más corto llamado SIFS. El SIFS no es más que el tiempo que debe esperar el transmisor en recibir un acuse de recibo (ACK) del receptor. Como tal, el DIFS es un tiempo en el cual los dispositivos que buscan transmitir deben esperar antes de empezar una contienda.

3. Periodo de ventana de contención. Una vez que se asegura la transmisión con el ACK y pasa el tiempo DIFS, todos los dispositivos generan un temporizador de retroceso aleatorio llamado "backoff timer". El backoff timer no es más que una cuenta regresiva aleatoria que va de 0 a CWmin (15 slots tiempo, donde cada uno vale 9 microsegundos). Cuando los dispositivos obtienen su backoff timer, empieza la contienda para ver quién es el primero en llegar a cero y comenzar una nueva transmisión. Este es el periodo que ayuda a reducir las colisiones, ya que, si no existiera todos los dispositivos provocarían colisiones después el DIFS.

En caso de que exista una colisión porque dos dispositivos llegaron a cero al mismo tiempo, entra en juego el algoritmo de retroceso exponencial binario, o BEB (Binary Exponential Backoff).

Si la transmisión no es exitosa, la ventana de contención (CW) se incrementará siguiendo el BEB. El incremento se realizará de manera iterativa con base en el valor mínimo de la ventana de contención (CWmin), siguiendo la siguiente fórmula:

$$CW = 2 \times CWmin + 1$$

Donde CWmin corresponde al valor de la ventana de contención antes de una colisión. El valor inicial de la ventana de contención es CWmin = 15 slots de tiempo.

Si en la siguiente iteración la transmisión es exitosa, la ventana de contención se restablece a su valor mínimo de CWmin. Sin embargo, si la transmisión vuelve a colisionar, la ventana de contención se duplicará de manera iterativa conforme a la ecuación descrita hasta alcanzar su valor máximo, que es CWmax = 1023 slots de tiempo.

| CW | Colisiones | Slots |
|-------|--------------|-------|
| CWmin | 0 | 15 |
| CW1 | 1 | 31 |
| CW2 | 2 | 63 |
| CW3 | 3 | 127 |
| CW4 | 4 | 255 |
| CW5 | 5 | 511 |
| CWmax | 6 o superior | 1023 |

Tabla 3. Colisiones vs. Slots por CW (Elaboración propia).

La Tabla 3 hace referencia a la relación entre el número de colisiones y el tamaño de la ventana de contención, partiendo del valor mínimo de 15 slot y aumentando exponencialmente tras cada colisión. En caso de que el receptor envíe el ACK al transmisor y este lo reciba, la ventana de contención se inicializa nuevamente a CW_{min}.

4. Inicio de la transmisión. Una vez que algún dispositivo gane la contienda, empezará la transmisión. En este punto pueden suceder dos cosas:

1. Que el receptor envíe el ACK, el transmisor asegure una transmisión exitosa y que el ciclo vuelva a empezar.
2. Que exista una colisión del ACK o una interferencia que no permita que el ACK llegue al transmisor. En este caso, el receptor esperará a que el tiempo DIFS termine y no asegurará la transmisión exitosa.

Si el transmisor no recibe el ACK, la ventana de contención se aumenta en relación con la fórmula antes mencionada y se incrementa con cada colisión encontrada hasta llegar a un máximo de CW_{max}. La ventana de contención vuelve a su valor mínimo una vez que se recibe el ACK y se da por exitosa la transmisión.

1.4 Estándares de redes WiFi

A lo largo de la historia, la WiFi Alliance desarrolló una convención de nomenclaturas para ayudar a distinguir en las diferentes tecnologías WiFi. En la Tabla 4, se muestran ejemplo de ellas [6]:

| Estándar WiFi | Nombre Técnico (IEEE) | Nombre Comercial | Año de lanzamiento | Banda de Frecuencias | Velocidad máxima teórica |
|---------------|-----------------------|------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|
| WiFi 1 | 802.11b | WiFi 1 | 1999 | 2.4 GHz | 11 Mbps |
| WiFi 2 | 802.11a | WiFi 2 | 1999 | 5 GHz | 54 Mbps |
| WiFi 3 | 802.11g | WiFi 3 | 2003 | 2.4 GHz | 54 Mbps |
| WiFi 4 | 802.11n | WiFi 4 | 2009 | 2.4 / 5 GHz | 600 Mbps |
| WiFi 5 | 802.11ac | WiFi 5 | 2014 | 5 GHz | 3.5 Gbps |
| WiFi 6 | 802.11ax | WiFi 6 | 2019 | 2.4 / 5 GHz | 9.6 Gbps |
| WiFi 7 | 802.11be | WiFi 7 | 2024 | 2.4 / 5 / 6 GHz | 46 Gbps |

Tabla 4. Estándares WiFi (Elaboración Propia).

IEEE 802.11: Este estándar y sus modificaciones posteriores constituyen la base de las redes inalámbricas WiFi y representan los protocolos de redes informáticas inalámbricas más utilizados a nivel mundial.

IEEE 802.11b o WiFi 1: Se introdujo en el mercado en 1999 con el anuncio de Apple. También operaba a 2.4 GHz, pero para reducir la interferencia de hornos microondas, teléfonos inalámbricos, monitores de bebés y otras fuentes, y para lograr velocidades más altas de datos, incorporó esquemas de modulación denominados modulación de espectro

ensanchado por secuencia directa / codificación complementaria por código (DSSS/CCK). WiFi 1 permitió comunicaciones inalámbricas a distancias de unos 38 m en interiores y unos 140 m en exteriores.

IEEE 802.11a o WiFi 2: También introducido en 1999, fue el sucesor de IEEE 802.11b. Fue la primera especificación WiFi en incorporar un esquema de modulación multiportadora (OFDM) para soportar altas velocidades de datos, a diferencia del diseño de portadora única de WiFi 1. Admitía el funcionamiento a 5 GHz, y su ancho de banda de 20 MHz admitía múltiples velocidades de datos.

IEEE 802.11g o WiFi 3: Se introdujo en 2003. Permitió velocidades de datos más rápidas, de hasta 54 Mbit/s, en la misma banda de frecuencia de 2.4 GHz que IEEE 802.11b, gracias a un esquema de modulación OFDM y otras mejoras. Esto resultó atractivo para el mercado general, ya que los dispositivos de 2.4 GHz eran más económicos que los de 5 GHz.

IEEE 802.11n o WiFi 4: Se introdujo en 2009 para ofrecer compatibilidad con las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz, con velocidades de datos de hasta 600 Mbit/s, múltiples canales dentro de cada banda y otras características. El rendimiento de datos de IEEE 802.11n permitió el uso de redes WLAN en lugar de redes cableadas, lo que permitió nuevos casos de uso y redujo los costos operativos para usuarios finales y organizaciones de TI.

IEEE 802.11ac o WiFi 5: Se introdujo en 2014 para soportar velocidades de datos de hasta 3.5 Gbit/s, con mayor ancho de banda, canales adicionales, mejor modulación y otras características. Fue el primer estándar WiFi que permitió el uso de la tecnología MIMO (múltiples entradas / múltiples salidas), lo que permitió usar múltiples antenas tanto en dispositivos emisores como receptores para reducir errores y aumentar la velocidad.

IEEE 802.11ax o WiFi 6: Publicado en 2021. Emplea un mecanismo multiusuario que permite distribuir la velocidad de datos de 9.6 Gbit/s entre varios dispositivos. También admite el envío de datos por aire a múltiples dispositivos en una sola trama de transmisión y permite que los dispositivos WiFi programen transmisiones al enrutador. Además, se han añadido mecanismos para soportar operaciones en exteriores de mayor alcance.

WiFi 6E: Es una extensión del estándar inalámbrico WiFi 6 (802.11ax) a la banda de radiofrecuencia de 6 GHz. WiFi 6E se basa en WiFi 6, pero solo los dispositivos y aplicaciones WiFi 6E pueden operar en la banda de 6 GHz.

IEEE P802.11be o WiFi 7: Publicado a finales de 2024. Este estándar representa un hito evolutivo importante en la tecnología WiFi, con velocidades de datos aproximadamente cuatro veces más rápidas (~40 Gbit/s) y el doble de ancho de banda (canales de 320 MHz frente a los de 160 MHz de WiFi 6). Además, facilita un uso más eficiente y fiable del espectro disponible mediante la agregación multibanda / multicanal y otros mecanismos. El estándar incluye numerosas mejoras en los protocolos MIMO y otros avances en las capacidades WiFi existentes.

El área efectiva del plano correspondiente a la Figura 5 consta de 2355 m². Se omiten intencionalmente las medidas de largo y ancho; sin embargo, se explicará la demostración de las dimensiones en el Capítulo 3. Por otro lado, la altura de la oficina es de 3.5 m.

Uno de los aspectos más importantes para el análisis del entorno es identificar los materiales de construcción, paso que resulta indispensable para tener una caracterización confiable del diseño, ya que los materiales indican parámetros como la atenuación, la difracción, la reflexión, entre otros. Para este plano, se elige trabajar con cuatro materiales muy utilizados en la construcción y comunes en el entorno de oficina. Estos materiales facilitarán la comprensión del plano.

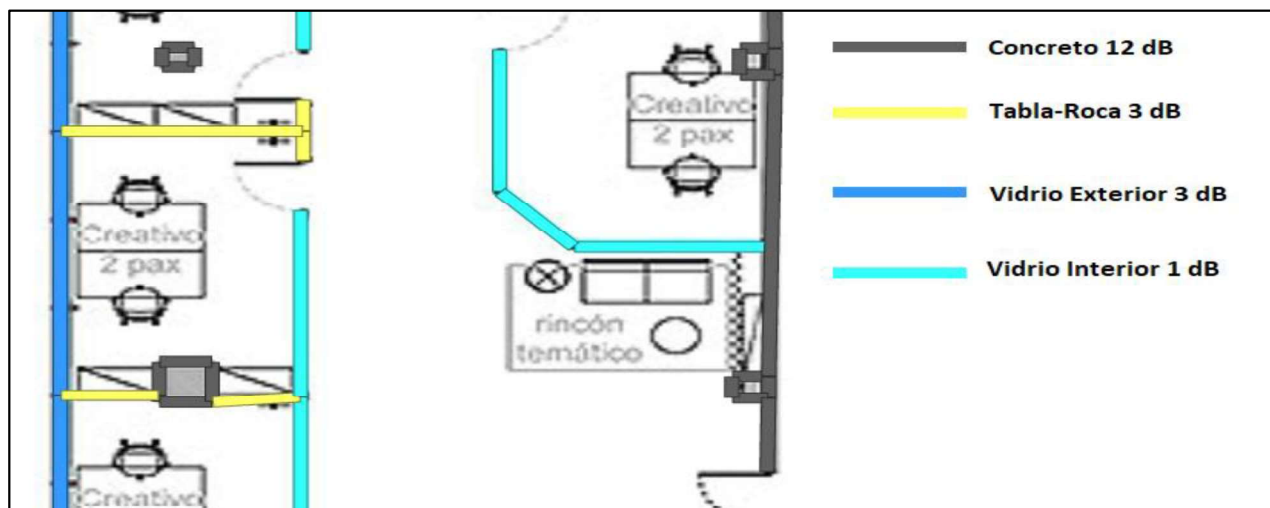


Figura 6. Simbología de atenuaciones (Elaboración Propia).

La Figura 6 explica la presencia de concreto, tablaroca, vidrio exterior (12 mm) y vidrio interior (6 mm). A su vez, la simbología expuesta menciona la atenuación que cada material provoca a la señal de RF [7]. De este modo, se comprende de forma más detallada cómo está construida la oficina y cómo están distribuidos los materiales y los espacios.

Para una comprensión más simple del tema de los materiales, se considerará que cada línea que representa a cada uno de ellos está colocada desde el suelo hasta el techo. Por lo tanto, si se observa una carencia de estos materiales, se debe considerar que corresponde al espacio de una puerta, un pasillo o bien un espacio abierto.

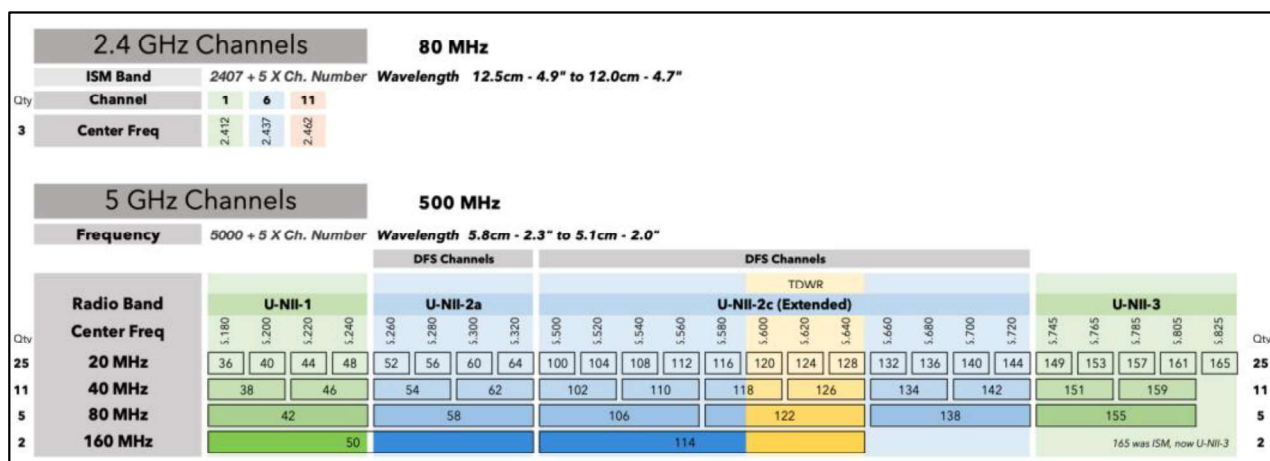


Figura 8. Canales permitidos en las bandas de 2.4 y 5 GHz [9].

En la Figura 8, se observa la lista de canales disponibles para cada una de las bandas. Para el caso de la banda de 2.4 GHz, solo se pueden utilizar 3 canales sin que se traslapen entre ellos; estos solo tienen un ancho de banda de 20 MHz. Por otro lado, en la banda de 5 GHz se puede observar que existen 25 canales con ancho de banda de 20 MHz sin traslape entre ellos, 11 canales de 40 MHz sin traslape, 5 canales de 80 MHz sin traslape, y 2 canales de 160 MHz sin traslape.

Con esta tabla se observa que la banda de 5 GHz tiene un mejor aprovechamiento, con 25 canales, en comparación de los 3 canales disponibles de la banda de 2.4 GHz.

Sin embargo, en la banda de 5 GHz antes de hacer la asignación de canales se deben tener en cuenta dos conceptos importantes:

1. DFS (Dynamic Frequency Selection) [10]:

DFS trata sobre la detección y prevención de radar. Radar significa Radio Detection and Ranging (detección y medición por radio). En el pasado, los radares solían operar en intervalos de frecuencias donde eran el único tipo de dispositivo que operaba en esa banda del espectro. Ahora que las agencias reguladoras están abriendo esas frecuencias para otros usos (como LAN inalámbricas), es necesario que estos dispositivos funcionen de acuerdo con los sistemas de radar.

El comportamiento general de un dispositivo que cumple con el protocolo DFS es detectar cuándo un radar está ocupando el canal, para luego dejar de usar ese canal, monitorear otro canal y cambiar a él si está disponible (es decir, siempre que el canal se encuentre libre de interferencias de radar).

2. TDWR (Terminal Doppler Weather Radar) [11]:

El Control de Tráfico Aéreo (ATC) utiliza el Radar Meteorológico Doppler Terminal (TDWR) para aumentar la seguridad del Sistema Nacional del Espacio Aéreo (NAS).

Para los controladores de tráfico aéreo que gestionan los vuelos que llegan y salen en el área de la terminal, los TDWR proporcionan información vital y advertencias sobre:

- condiciones peligrosas de viento
- precipitaciones
- frentes de ráfagas (viento)
- microrráfagas (viento)

En otras palabras, la Figura 8 hace referencia, en una columna, a cuáles son los canales DFS, dando como resultado 16 canales DFS. Esto quiere decir que, si un access point está configurado en uno de estos canales y detecta que hay transmisión de un radar en el mismo canal, el AP debe configurarse en otro canal.

Por otra parte, TDWR afecta principalmente a los canales 120, 124 y 128. En muchos casos, estos canales no están habilitados por defecto en los equipos o bien no se soporta su uso, con el fin de no crear interferencias en los radares.

Este apartado es importante, ya que si el diseño se ubica cerca de algún aeropuerto o alguna torre de control, el cambio automático de canales por DFS puede representar tiempos de desconexión para los usuarios finales.

2.2 Requerimientos de red

Una vez que se tiene el contexto del plano, surgen los siguientes cuestionamientos: ¿qué tipo de aplicaciones estarán utilizando los usuarios finales?, ¿cuántos dispositivos finales se conectarán a la red?, ¿qué tipo de dispositivos se conectarán a la red? Estas preguntas son clave para identificar cómo se diseñará la red.

Si bien muchos dispositivos son capaces de conectarse a una red WiFi, no todas sus características son iguales. No es lo mismo conectar un smartphone a la banda de 5 GHz que un lector de código de barras a la banda de 2.4 GHz.

2.2.1 Aplicativos

Existe una aplicación principal que impulsa la necesidad de conectividad en el entorno de oficinas. Para la tesis, esta aplicación corresponde a aquellas que requieren la transmisión de datos en tiempo real, como las llamadas de voz y las videoconferencias, debido a que son más sensibles a las variaciones del entorno inalámbrico.

Comprender los requisitos de rendimiento para esta aplicación, así como para las demás actividades que se realizarán en la red, permitirá establecer un objetivo de velocidad de transmisión por usuario.

Aplicaciones como el correo electrónico, la navegación web, las redes sociales y la transferencia de archivos se encuentran en la mayoría de los entornos empresariales. Estas aplicaciones no dependen de un nivel de servicio estricto, sino que requieren que la red proporcione tiempos de respuesta adecuados.

Lo anterior se relaciona con el modelo de implementación de datos (Data Deployment Model) [5, p. 17], el cual soporta tráfico de datos genéricos. En este modelo, un diseño inalámbrico de cobertura básica puede ser suficiente para satisfacer a la mayoría de los usuarios. Para este tipo de cobertura, los access point pueden presentar celdas de mayor tamaño, ya que velocidades de transmisión más bajas pueden utilizarse con éxito a mayores distancias del AP, gracias al uso de esquemas de modulación y codificación más robustos.

No obstante, este modelo no resulta adecuado para el escenario planteado. Si bien se transmitirá tráfico de datos genéricos, también se contemplan aplicaciones que requieren un tiempo de respuesta más rápido, como las llamadas de voz y las videoconferencias. Este tipo de aplicativos dependen directamente del entorno y de un diseño inalámbrico diferente para garantizar su correcto funcionamiento.

El Modelo de implementación de voz y video (Voice/Video Deployment Model) [5, p. 18], tiene por característica enviar y recibir tráfico en tiempo real. Las aplicaciones en tiempo real requieren consideraciones especiales al diseñarse, por lo que es necesario minimizar los siguientes factores para que las sesiones de voz y video se escuchen y visualicen de forma consistente, sin interrupciones ni degradación en la calidad del servicio:

- Latencia: La cantidad de tiempo necesaria para entregar un paquete o trama desde un transmisor a un receptor. Esta puede verse afectado por interferencias, congestión en la red, baja calidad de cobertura.
- Jitter: La variación de la latencia de extremo a extremo que se experimenta cuando llegan paquetes consecutivos a un receptor. Este puede verse afectado por problemas de roaming, colisiones de paquetes y QoS no activado.
- Pérdida de paquetes: El porcentaje de paquetes enviados que no llegan al receptor. Esto puede verse afectado por interferencia o ruido, AP saturados, problemas de roaming.

Incluso una congestión menor puede interrumpir las aplicaciones que requieren comunicación en tiempo real.

Los dispositivos inalámbricos que admiten comunicación de voz o video suelen tener un límite de potencia de recepción aceptable de -67 dBm y un throughput mínimo de 12 Mbps [5, p. 19] . Además, estos dispositivos requieren roaming continuo para que las llamadas de voz o video no se corten ni se interrumpan mientras los clientes se desplazan.

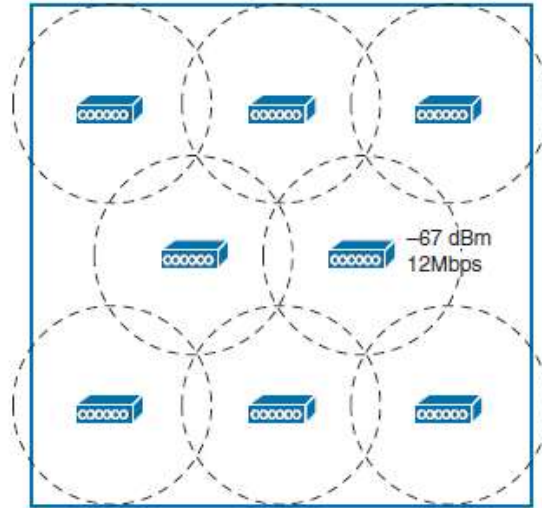


Figura 9. Modelo de implementación de voz y video [5, p. 20].

En la Figura 9 se visualiza el modelo de implementación de voz y video, con énfasis en el roaming eficiente y una cobertura completa. Las celdas suelen diseñarse para que los dispositivos finales puedan soportar al menos un throughput mínimo de 12 Mbps, con límites en la potencia de recepción de -67 dBm para ambas bandas.

Por otro lado, con base en las buenas prácticas de capacidad de Ekahau [12], se presenta la Tabla 5:

| Aplicación | Throughput [Mbps] |
|-----------------------|-------------------|
| Llamadas de Voz | 0.5 |
| Music Streaming | 0.5 |
| Navegación WEB | 1 |
| Servicio de Impresión | 1 |
| Videollamadas | 4 |
| Video Streaming HD | 5 |
| Compartir Archivos | 8 |
| Video Streaming 4K | 25 |

Tabla 5. Throughput por usuario para cada tipo de aplicativo [12].

Con esto, se toma en cuenta que para aplicaciones de voz y video se consideran hasta 5 Mbps, sin embargo, también se debe considerar que se tendrá el File Sharing, lo que aumenta a nuestro diseño 8 Mbps. La capacidad de consumo de la aplicación principal es de hasta 8 Mbps; sin embargo, para proponer un poco de holgura se considerará que el consumo de la aplicación principal será de 10 Mbps.

Considerando lo anterior, el diseño corresponderá a un modelo de implementación de voz y video. El diseño considera aplicaciones de mejor esfuerzo, como el envío de correo

electrónico y la navegación web, pero también se contempla el uso de aplicativos en tiempo real como la transferencia de archivos, las llamadas y las videoconferencias (aplicaciones principales), donde el throughput esperado por usuario corresponde a 10 Mbps y la potencia mínima de recepción de -67 dBm.

2.2.2 Número de dispositivos finales

Continuando con el segundo cuestionamiento, se debe considerar lo siguiente: según el Cisco Annual Internet Report de 2020, el número de dispositivos que tiene cada persona para conectarse a Internet es de 3.6 [13]. Con base en este dato, se promedia a 3 el número de dispositivos por persona (si esto se traduce a un entorno de oficina, para cada persona correspondería una laptop, un smartphome empresarial y uno personal).

Ahora, con ayuda del plano y a partir del número de sillas mostradas en él, se contemplará un usuario por cada una de las sillas, dando un total de 326 sillas, que multiplicadas por 3 resulta en 978 dispositivos finales. La red que debe diseñarse corresponde a una que debe dar cobertura a casi 1000 dispositivos finales. Para fines prácticos se tendrá en cuenta 1000 dispositivos finales.

Una vez definida la cantidad de dispositivos, se considera que el diseño corresponde a un entorno de alta densidad, esto debido a que ninguno de los dispositivos finales será conectado por cable de red, por lo que todo el tráfico se realizará a partir del medio inalámbrico. Teniendo esto en consideración, se debe hacer el análisis de este apartado.

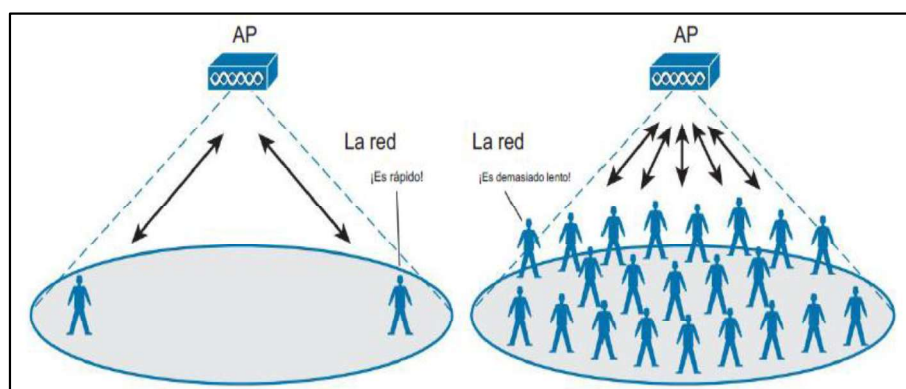


Figura 10. Diseño de cobertura de baja densidad (izquierda) y de alta densidad de usuarios (derecha) [5, p. 100].

La Figura 10 explica de manera gráfica que pasa cuando se sobrecarga un AP, llega un momento en donde todos los usuarios que quieren conectarse a él lo congestionan, de modo que los usuarios verían una afectación en el tiempo de respuesta de su servicio. Esto se debe al mismo funcionamiento de CSMA/CA. Al tener más usuarios en un solo AP, la probabilidad de colisión en el periodo de ventana de contención aumenta, lo que genera que los tiempos de espera para transmitir sean más largos debido a mayores iteraciones en el algoritmo BEB.

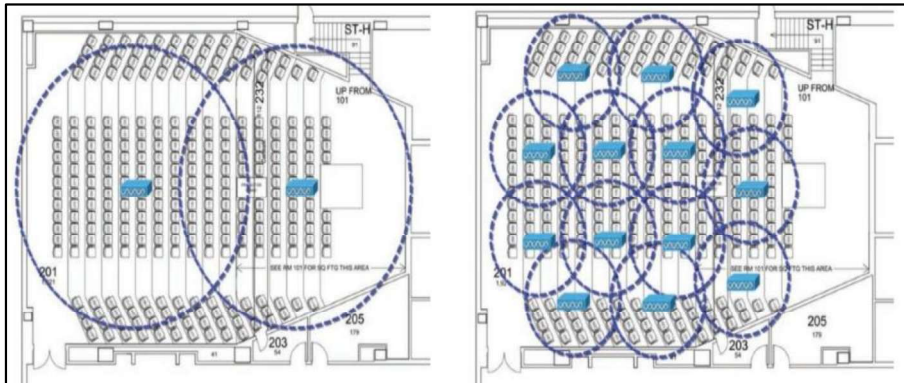


Figura 11. Densidad en diseño basado en cobertura básica vs diseño basado en alta densidad [5, pp. 100-101].

La Figura 11 hace la comparativa de un diseño de cobertura básica contra un diseño basado en alta densidad de usuarios. El diseño basado en cobertura básica solo se enfoca en cubrir toda un área determinada, mientras que el diseño para alta densidad se basa en ofrecer buen rendimiento para la cantidad total de dispositivos finales. La figura muestra la mejor manera de ofrecer un buen rendimiento inalámbrico para entornos de alta densidad, esto se logra agregando más AP al diseño.

Al agregar más AP, se debe reducir el área de cobertura de cada uno de ellos, lo que implica disminuir potencias y realizar la planificación de canales para que no exista interferencia entre ellos. Con esto, se logra que el periodo de ventana de contención no aumente exponencialmente, por lo que los tiempos de espera para transmitir se mantendrán en un rango de tiempo razonable.

Esto es uno de los temas fundamentales por los cuales los entornos de alta densidad se deben enfocar en no saturar el tiempo-aire.

| | | | Distance from AP | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|-----|------------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
| | | | ←Near Far→ | | | | | | | | | | | |
| | | | 102A-QAM 3/6 | 102A-QAM 3/4 | 256-QAM 5/6 | 256-QAM 3/4 | 6A-QAM 5/6 | 6A-QAM 3/4 | 6A-QAM 2/3 | 16-QAM 3/4 | 16-QAM 1/2 | QPSK 3/4 | QPSK 1/2 | BPSK 1/2 |
| Coverage | | | 0.7% | 0.7% | 1.3% | 1.2% | 2.4% | 2.1% | 4.2% | 5.9% | 8.4% | 11.8% | 16.7% | 44.6% |
| Wi-Fi 3 (802.11g) | 20 MHz | 1x1 | | | | | | 54 | 48 | 36 | 24 | 18 | 12 | 6 |
| | 20 MHz | 2x2 | | | | | 72 | 65 | 58 | 43 | 29 | 22 | 14 | 7 |
| Wi-Fi 4 (802.11n) | 40 MHz | 1x1 | | | | | 144 | 130 | 116 | 87 | 58 | 43 | 29 | 14 |
| | 40 MHz | 2x2 | | | | | 150 | 135 | 120 | 90 | 60 | 45 | 30 | 15 |
| Wi-Fi 5 (802.11ac) | 40 MHz | 2x2 | | | | | 300 | 270 | 240 | 180 | 120 | 90 | 60 | 30 |
| | 20 MHz | 1x1 | | | | 87 | 72 | 65 | 58 | 43 | 29 | 22 | 14 | 7 |
| | 20 MHz | 2x2 | | | | 173 | 144 | 130 | 116 | 87 | 58 | 43 | 29 | 14 |
| | 40 MHz | 1x1 | | | 200 | 180 | 150 | 135 | 120 | 90 | 60 | 45 | 30 | 15 |
| | 40 MHz | 2x2 | | | 400 | 360 | 300 | 270 | 240 | 180 | 120 | 90 | 60 | 30 |
| | 80 MHz | 2x2 | | | 867 | 780 | 650 | 585 | 520 | 390 | 260 | 195 | 130 | 65 |
| Wi-Fi 6/7 (802.11ax) | 20 MHz | 1x1 | 143 | 129 | 115 | 103 | 86 | 77 | 69 | 52 | 34 | 26 | 17 | 9 |
| | 20 MHz | 2x2 | 287 | 258 | 229 | 206 | 172 | 155 | 138 | 103 | 69 | 52 | 34 | 17 |
| | 40 MHz | 1x1 | 287 | 258 | 229 | 206 | 172 | 155 | 138 | 103 | 69 | 52 | 34 | 17 |
| | 40 MHz | 2x2 | 600 | 540 | 480 | 432 | 360 | 324 | 288 | 216 | 144 | 108 | 72 | 36 |
| | 80 MHz | 1x1 | 600 | 540 | 480 | 432 | 360 | 324 | 288 | 216 | 144 | 108 | 72 | 36 |
| | 80 MHz | 2x2 | 1201 | 1081 | 961 | 865 | 721 | 649 | 576 | 432 | 288 | 216 | 144 | 72 |
| Wi-Fi 7 (802.11ax) | 160 MHz | 1x1 | 1201 | 1081 | 961 | 865 | 721 | 649 | 576 | 432 | 288 | 216 | 144 | 72 |
| | 160 MHz | 2x2 | 2402 | 2162 | 1922 | 1729 | 1441 | 1297 | 1153 | 865 | 576 | 432 | 288 | 144 |
| Wi-Fi 7 (802.11ax) | 320 MHz | 1x1 | 2402 | 2162 | 1922 | 1729 | 1441 | 1297 | 1153 | 865 | 576 | 432 | 288 | 144 |
| | 320 MHz | 2x2 | 4804 | 4324 | 3843 | 3459 | 2882 | 2594 | 2306 | 1729 | 1153 | 865 | 576 | 288 |

Figura 12. Relación distancia, MCS y data rates [14].

La Figura 12 explica la relación que existe entre la distancia de un dispositivo final con un access point, contemplando el data rate, el esquema de modulación y codificación (MCS por sus siglas en inglés, Modulation Coding Scheme).

El data rate es la velocidad de transmisión teórica que puede obtener un dispositivo final.

El throughput es la velocidad de transmisión real que puede obtener un dispositivo final.

El MCS es el modo en que se adapta la modulación y codificación de la señal en función de la calidad de la señal para lograr la mejor velocidad posible.

Regresando a la explicación, si el dispositivo final se encuentra cerca del AP tendrá un data rate alto, esto porque la señal de recepción es alta o “buena”, lo que permitirá al dispositivo final hacer uso de un MCS con una modulación compleja (lo que se traduce a que enviará más información, es decir, más bits por símbolo) y una codificación con menos protección (envío de menos bits de redundancia).

Si el dispositivo final se encuentra lejos del AP tendrá un data rate bajo, esto porque la señal de recepción es baja o existe interferencia o ruido en el medio. Esto hace que el MCS tenga una modulación más robusta (lo que se traduce a que enviará menos información, es decir, menos bits por símbolo) y una codificación con mayor protección (envío de más bits de redundancia).

Por otro lado, se observa que existen diferentes velocidades en las filas que se marcan “1x1” o “2x2”. Estas filas hacen referencia a los spatial stream y a MIMO. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output por sus siglas en inglés) hace referencia a la tecnología que permite transmitir varios flujos de datos usando múltiples antenas. Spatial stream hace referencia a los flujos de datos transmitidos.

Coloquialmente, estos términos suelen utilizarse para referirse a la cantidad de antenas que tiene un dispositivo. Es importante conocer la capacidad de spatial streams que soportan los dispositivos finales, ya que es uno de los parámetros que determinará el data rate máximo que pueden obtener.

El análisis de la Figura 12 es necesario para estimar la cantidad de dispositivos finales que se pueden asociar a un access point. Esto se explicará en el capítulo 3; sin embargo, una analogía simple es imaginar el data rate como un contenedor de agua, el cual reparte el líquido dependiendo de los requerimientos del destino final. No será la misma demanda de agua para una casa de 6 habitantes que para una casa de 2.

En ese sentido, lo mismo pasa con el WiFi: reparte el data rate entre los dispositivos finales como si fuera el agua y, dependiendo del aplicativo que estén usando, será el consumo. Para el caso de estudio, se diseñará como si cada dispositivo final estuviera consumiendo 10 Mbps de throughput.

Del modelo de implementación de voz y video se debe recordar que las celdas deben permitir al menos una señal de recepción de -67 dBm y un throughput de 12 Mbps. Para el caso de estudio se considerarán 10 Mbps por dispositivo, acorde a los aplicativos definidos.

No obstante, debido a la estimación de la cantidad de dispositivos finales se debe utilizar un diseño inalámbrico de alta densidad, enfocado en incrementar el número de AP y reducir el tamaño de sus celdas. Este enfoque permite distribuir mejor la carga de tráfico y garantizar que los dispositivos finales tengan un rendimiento adecuado.

2.2.3 Tipo de dispositivos

Considerando que se trabajará con 3 dispositivos finales para el diseño, se delimitarán sus características. Sabiendo que se utilizarán laptops y smartphones (empresariales y personales), se eligieron arbitrariamente los siguientes dispositivos:

- Para la laptop, fue seleccionada la Lenovo ThinkPad T14. En su apartado de especificaciones técnicas hace referencia al uso del estándar WiFi 6 [15].
- Para el smartphone empresarial, fue seleccionado el iPhone 15 Pro. En su apartado de especificaciones técnicas hace referencia al uso del estándar WiFi 6 [16].
- Para el smartphone personal, fue seleccionado el Samsung Galaxy Note9. En su apartado de especificaciones técnicas hace referencia al uso del estándar 802.11a/b/g/n/ac, por lo que el estándar más alto que maneja es WiFi 5 [17].

Una de la información más relevantes de los dispositivos es cuántas antenas tiene cada uno de ellos. Para esto hay que buscar en su hoja de especificaciones y validar esto, ya que con ella se obtendrán los spatial streams que soportan y se podrá hacer una mejor aproximación de la cantidad de AP que se deben considerar. Para mayor referencia, consultar el datasheets de los dispositivos en las referencias [15] [16] [17].

Con base en las especificaciones de cada uno de los dispositivos se observa que al menos la Laptop Thinkpad y el iPhone 15 Pro tienen 2 spatial streams, mientras que la especificación del Galaxy Note9 es ambigua ya que dice que soporta esquema de modulación y codificación VHT a 80 MHz, pero con modulación 1024-QAM lo cual para ese esquema no es posible. Debido a esta incongruencia, este dispositivo se modelará bajo el peor caso que sería 1 spatial stream.

En particular, se debe considerar realizar un diseño o una comparativa para el dispositivo menos capaz, ya que podría ser el más importante [18]. Eso quiere decir lo siguiente: los dispositivos finales se conectarán a la red WiFi, pero no todos tienen las mismas ventajas tecnológicas; es decir, no todos cuentan con el estándar WiFi más actual, la antena con mayor ganancia o la mejor capacidad de procesamiento.

Existen diseños particulares, como los almacenes o los centros de distribución, donde no importa tanto la cobertura para una computadora en comparación con la de miles de etiquetadoras o handhelds que soportan la operación diaria. Debido a que estos últimos tienen menores capacidades tecnológicas, su cobertura se puede ver reducida hasta en -10 dBm en comparación con la de una computadora. Por lo que aquí nuestro dispositivo más importante es el que tiene menores ventajas tecnológicas.

Para este estudio, el dispositivo menos capaz es el smartphone Samsung Galaxy Note9.

Si bien las redes para dispositivos de uso personal se consideran bajo el modelo de mejor esfuerzo, y dado que en este caso el dispositivo más importante en un entorno corporativo es la computadora, solo se realizará la comparación de coberturas en el capítulo 5.

Por el momento, se consideran 2 dispositivos finales MIMO 2x2 WiFi 6 y 1 dispositivo final SISO 1x1 WiFi 5. Retomando el análisis de la Figura 12, también se observa que mientras más reciente sea el estándar WiFi, se obtendrán mejores velocidades de transmisión. Sin embargo, eso aplica de tanto para el access point como para el dispositivo final.

Si se elige un access point con un estándar WiFi más actualizado, tendrá la ventaja de poder manejar velocidades de transmisión más altas; eso se traduce en que el data rate máximo podrá dividirse entre un mayor número de dispositivos finales. Por otro lado, si el dispositivo final cuenta con un estándar WiFi más reciente, en caso de conectarse él solo al access point, podrá gozar de una velocidad de navegación más alta.

En ese sentido, se debe seleccionar un AP que soporte estándares al menos hasta WiFi 6. De manera arbitraria se escogió el AP Cisco Catalyst 9164 [19], que en su hoja de especificaciones indica que cuenta con soporte para WiFi 6 y WiFi 6E, cuenta con MU-MIMO 2x2 para la banda de 2.4 GHz y MU-MIMO 4x4 para la banda de 5 GHz y 6 GHz.

Capítulo 3. Diseño y simulación de la red

El diseño en la ingeniería es un proceso que busca desarrollar soluciones innovadoras y funcionales con el fin de resolver un problema. Para ello, se deben considerar aspectos como la eficiencia, la seguridad, la funcionalidad, las restricciones, la estética y, sobre todo la optimización de recursos. Todo diseño busca que se cumpla la función para la que fue modelado de manera óptima.

Sin embargo, existen fases que deben realizarse antes de diseñar, por ejemplo: tomar en consideración los requerimientos, los alcances, las exclusiones, la normativa, las herramientas a utilizar, entre otros aspectos.

En este capítulo se abordarán los temas necesarios para que el diseño y su posterior implementación sigan las mejores prácticas.

3.1 Diseño preliminar

Una vez que se identificaron los requerimientos de la red, es momento de estimar cuál será la cantidad de access points que se utilizarán.

A partir de lo anterior, se debe calcular el número adecuado de access point para soportar la carga de los 1000 dispositivos que estarán conectados en horas pico. Como se mencionó anteriormente, el hecho de tener cobertura en todo el piso no significa que los AP puedan soportar toda la carga de trabajo si esta no es estimada de la manera correcta.

3.1.1 Basado en mejores prácticas

Con base en la documentación de Cisco para “Aproximación del máximo de clientes por punto de acceso” [20], se tiene la Figura 13:

- **Limitación del máximo de clientes por radio** : cada AP WiFi-5 y WiFi-6 tiene dos radios de servicio al cliente, una en cada 2,4 GHz y 5 GHz, mientras que los AP WiFi-6E tienen tres radios de servicio al cliente de 2,4/5/6 GHz.
 - Wi-Fi 5 Wave 1 y anteriores: 128 clientes por radio = 256 clientes máximo por AP
 - Wi-Fi 5 Wave 2 (MR20/30H/33/42/42E/52/53/53E/70/74/84): 256 clientes por radio = 512 clientes máximo por AP
 - Wi-Fi 6 (MR28/36/44/45/46/46E/55/56/76/78/86): 512 clientes por radio = 1024 clientes máximo por AP
 - Wi-Fi 6E (MR57, modelos Cisco Catalyst Wireless): 512 clientes por radio = 1536 clientes como máximo por AP
- ⓘ La lista anterior es solo un **máximo teórico** ; en una implementación real, la interferencia causada por la comunicación simultánea de varios clientes hará que este límite sea mucho menor. El hecho de que un punto de acceso (AP) en teoría pueda gestionar un máximo de 512 o 1024 clientes **no** significa que sea algo que queramos diseñar para ello. Siempre considere los tipos de clientes que se conectan y sus capacidades (nivel tecnológico, flujos espaciales, ancho de canal, por ejemplo), las aplicaciones principales que se utilizarán y, en última instancia, qué determinará el uso del tiempo de transmisión para determinar el máximo de clientes (prácticos) por AP.

Figura 13. Capacidad máxima de dispositivos en AP Meraki (traducción al español) [20].

Si bien este es el máximo teórico que se indica para los diferentes estándares de WiFi, también se menciona que esto depende en gran medida de la interferencia del sitio, por lo que no se recomienda diseñar utilizando estos valores.

Teniendo lo anterior en cuenta, se llega a lo siguiente: los AP pueden soportar la conexión de múltiples usuarios, en algunos casos más de 1000 conexiones sumando todas las bandas. Sin embargo, existen limitaciones como el ruido, la interferencia y la atenuación, lo que provoca que el número máximo teórico no se cumpla en la práctica.

Por lo tanto, no se considera confiable utilizar el número máximo teórico, ya que se cometería una mala práctica en varios sentidos. El primero es considerar el 100% de la capacidad del equipo, y el segundo es que la cantidad máxima de dispositivos no es igual para todos los estándares WiFi, ya que esta depende de su data rate máximo.

Debido a esta ambigüedad, se investigó en diferentes foros y documentación de fabricantes para determinar el número de dispositivos recomendados para un diseño. En promedio, se obtiene que los AP pueden soportar conexiones de hasta 250, 500 o incluso 1000 usuarios; sin embargo, por recomendación, los diseños suelen dimensionarse entre 30 a 60 conexiones por AP. Para esta información se consultaron las referencias [21], [22] y [23].

Con lo anterior expuesto, se tienen los siguientes escenarios:

1. Se consideran 30 conexiones por AP, lo que da como resultado una cantidad total de 34 AP.
2. Se consideran 60 conexiones por AP, lo que da como resultado una cantidad total de 17 AP.

Si bien con estos resultados se puede diseñar, aquí no se está considerando el tipo de aplicativos que utilizarán los dispositivos finales, la interferencia que existirá en el medio, la velocidad de transmisión de los equipos finales, el estándar WiFi que utiliza el access point, entre otros factores.

El análisis basado en la información de foros es muy variable y no ofrece explicaciones claras de por qué debe ser así. En muchos casos se basa únicamente en la experiencia y no proporciona un resultado concluyente. Debido a esto, se realizará el análisis con base en guías de diseño de fabricantes líderes en el mercado: Cisco y Aruba.

De acuerdo con Cisco [24], en un entorno de oficina típico los access point pueden desplegarse en áreas de 230 a 460 metros cuadrados, con una cobertura de señal de -67 dBm y un máximo de 20 a 30 usuarios por celda. Esto representa una densidad aproximada de un usuario por cada 11 metros cuadrados.

Esta recomendación está pensada para un entorno de oficina típico. Para el caso de entornos de alta densidad, las condiciones pueden ser diferentes [24, p. 6].

Lo anterior no explica mucho; sin embargo, en la misma documentación se presenta la siguiente tabla, la cual ofrece mayor detalle sobre cómo estimar la cantidad de usuarios.

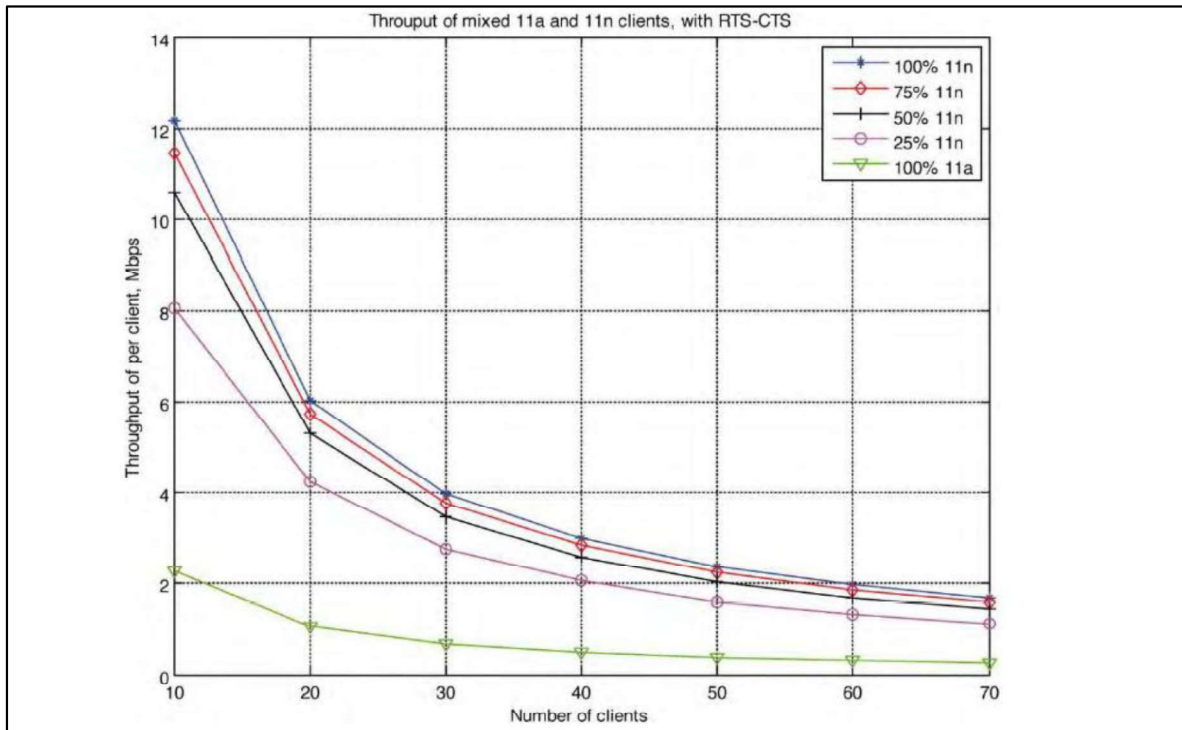


Figura 14. Throughput por dispositivo para diferentes MCS y SS para 802.11n. [24, p. 11].

A partir de la Figura 14, se hace la comparativa de cuál sería el throughput esperado por cliente en Mbps, conforme aumenta el número de dispositivos.

El data rate físico o PHY es el valor teórico de la velocidad de transmisión, mientras que el throughput es el valor real de la velocidad de transmisión. El throughput ya considera la sobrecarga MAC, CSMA/CA y la contención entre clientes, por estas consideraciones es menor al data rate.

Para entender la tabla, debemos considerar que el PHY máximo utilizado corresponde al índice de modulación HT15, con 2 spatial streams, modulación 64-QAM y codificación 5/6, lo que corresponde a 144.4 Mbps. Esto puede verificarse consultando la tabla del índice de modulación [25].

Si este PHY máximo se divide entre 10 clientes, se obtienen 14.4 Mbps. Considerando que el throughput es el valor real de la velocidad de transmisión, el resultado aproximado es de 12.2 Mbps por cliente.

Con base en la figura, se entiende por qué el número máximo recomendado suele estar entre 30 y 60 usuarios por AP. A partir de 40 Usuarios, haciendo una mezcla de 25% de usuarios que soporten 802.11n y 75% de usuarios que soporten 802.11a, el throughput por cliente es de aproximadamente 2 Mbps, el cual para el diseño no es viable, ya que se requieren al menos 10 Mbps por cliente.

Este análisis solo aplica para un AP que soporta 802.11a/b/g/n.

Ahora bien, la información que nos ofrece Aruba [26] es la siguiente:

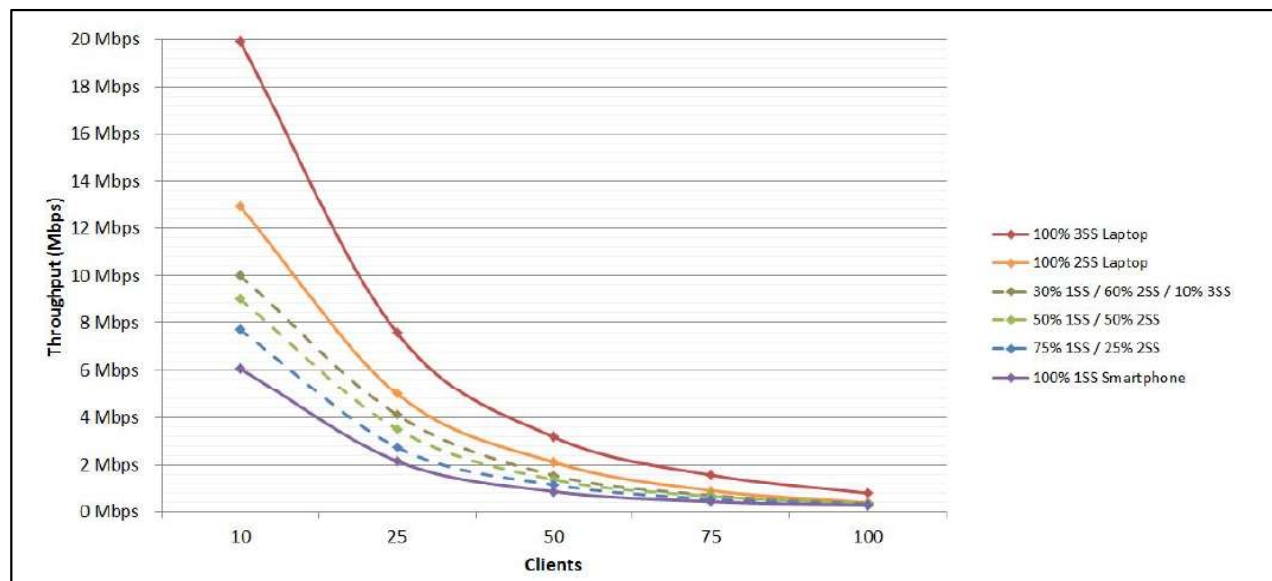


Figura 15. Throughput por dispositivo para diferentes MCS y SS para 802.11ac. [26, p. 47].

A partir de la Figura 15, se hace la comparativa de cuál será el throughput esperado por cliente en Mbps, conforme aumenta el número de dispositivos. Se considera que el PHY máximo corresponde al índice de modulación VHT máximo para cada spatial stream en un canal de 20 MHz. Siendo así, se obtiene 86.7 Mbps para un dispositivo con 1SS, 173,3 Mbps para un dispositivo con 2SS y 288,9 Mbps para un dispositivo con 3SS.

Con esto se puede visualizar que para tecnologías 802.11a/b/g/n/ac, al llegar al umbral de 50 clientes, la velocidad de transmisión por cliente está por debajo de los 4 Mbps. Si bien para aplicaciones que no requieran una velocidad alta 4 Mbps pueden comportarse de manera aceptable, para el diseño de la red se requieren de al menos 10 Mbps por dispositivo.

Para el análisis de ambas guías, las gráficas tampoco consideran la presencia de ruido o interferencias; se asume un entorno de laboratorio donde los dispositivos se reparten equitativamente la velocidad de transmisión.

Con el análisis anterior, se realizará una aproximación de cuántos AP se deben utilizar y para cuántos clientes se estimará cada AP.

Hasta este momento, el promedio para múltiples conexiones hacia un AP en los estándares WiFi 1 a WiFi 5 se encuentra entre 40 y 50 usuarios por AP en cada banda, sin superar los 4 Mbps por cliente.

3.1.2 Basado en estimaciones

Considerando las gráficas del throughput por dispositivo de Cisco y de Aruba, ahora se recrearán las condiciones para el AP 9164, tomando en consideración la tecnología de los dispositivos finales.

La Tabla 6 muestra el PHY máximo por dispositivo.

| Dispositivo | Estándar | Spatial streams | Max Index MCS | Max PHY [Mbps] |
|---------------|----------|-----------------|---------------|----------------|
| Thinkpad T14 | WiFi 6E | 2 | HE 10 / 11 | 2402 |
| iPhone 15 pro | WiFi 6E | 2 | HE 10 / 11 | 2402 |
| Galaxy Note9 | WiFi 5 | 1 | VHT 8 / 9 | 866.7 |

Tabla 6. Data rate máximo por tipo de dispositivo (Elaboración propia).

Para el AP 9164, según su datasheet, este soporta el estándar WiFi 6E (802.11ax). Por lo tanto, tomando en cuenta las velocidades máximas para cada ancho de canal del MCS Index [25] y su relación con los dispositivos finales se obtiene la Tabla 7.

| Dispositivo | Spatial streams | MCS | 20 MHZ | | 40 MHZ | | 80 MHZ | | 160 MHZ | |
|---------------|-----------------|-----|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| | | | Max Data Rate (PHY) | Max Throughput (PHY*0.75) | Max Data Rate (PHY) | Max Throughput (PHY*0.75) | Max Data Rate (PHY) | Max Throughput (PHY*0.75) | Max Data Rate (PHY) | Max Throughput (PHY*0.75) |
| Thinkpad T14 | 2 | 11 | 286.8 | 215.1 | 573.5 | 430.125 | 1201 | 900.75 | 2402 | 1801.5 |
| iPhone 15 pro | 2 | 11 | 286.8 | 215.1 | 573.5 | 430.125 | 1201 | 900.75 | 2402 | 1801.5 |
| Galaxy Note9 | 1 | 8/9 | 86.7 | 65.025 | 200 | 150 | 433.3 | 324.975 | 866.7 | 650.025 |

Tabla 7. Throughput máximo por tipo de dispositivo (Elaboración propia).

Si bien se cuenta con el valor PHY, se debe considerar aproximadamente un 25% de sobrecarga asociada a la cabecera de la capa MAC, el mecanismo CSMA/CA y la contención entre clientes. Por esta razón, el throughput máximo real se estima en el 75% del valor PHY.

Con esto se obtiene una estimación más realista de la velocidad máxima que puede dividirse entre los dispositivos finales.

Con base en lo anterior, la Tabla 8 representa cuánta velocidad de transmisión puede tener cada dispositivo final según su número de spatial streams y el ancho de canal.

| Dispositivos | 20 MHz | | 40 MHz | | 80 MHz | | 160 MHz | |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | 1 SS - 20 [Mbps] | 2 SS - 20 [Mbps] | 1 SS - 40 [Mbps] | 2 SS - 40 [Mbps] | 1 SS - 80 [Mbps] | 2 SS - 80 [Mbps] | 1 SS - 160 [Mbps] | 2 SS - 160 [Mbps] |
| 10 | 6.5025 | 21.51 | 15 | 43.0125 | 32.4975 | 90.075 | 65.0025 | 180.15 |
| 20 | 4.335 | 10.755 | 7.5 | 21.50625 | 16.24875 | 45.0375 | 32.50125 | 90.075 |
| 30 | 2.89 | 7.17 | 5 | 14.3375 | 10.8325 | 30.025 | 21.6675 | 60.05 |
| 40 | 2.1675 | 5.3775 | 3.75 | 10.753125 | 8.124375 | 22.51875 | 16.250625 | 45.0375 |
| 50 | 1.734 | 4.302 | 3 | 8.6025 | 6.4995 | 18.015 | 13.0005 | 36.03 |
| 60 | 1.445 | 3.585 | 2.5 | 7.16875 | 5.41625 | 15.0125 | 10.83375 | 30.025 |
| 70 | 1.238571429 | 3.072857143 | 2.142857143 | 6.144642857 | 4.6425 | 12.86785714 | 9.286071429 | 25.73571429 |
| 80 | 1.08375 | 2.68875 | 1.875 | 5.3765625 | 4.0621875 | 11.259375 | 8.1253125 | 22.51875 |
| 90 | 0.963333333 | 2.39 | 1.666666667 | 4.779166667 | 3.610833333 | 10.00833333 | 7.2225 | 20.01666667 |
| 100 | 0.867 | 2.151 | 1.5 | 4.30125 | 3.24975 | 9.0075 | 6.50025 | 18.015 |

Tabla 8. Throughput por dispositivo vs cantidad de dispositivos (Elaboración propia).

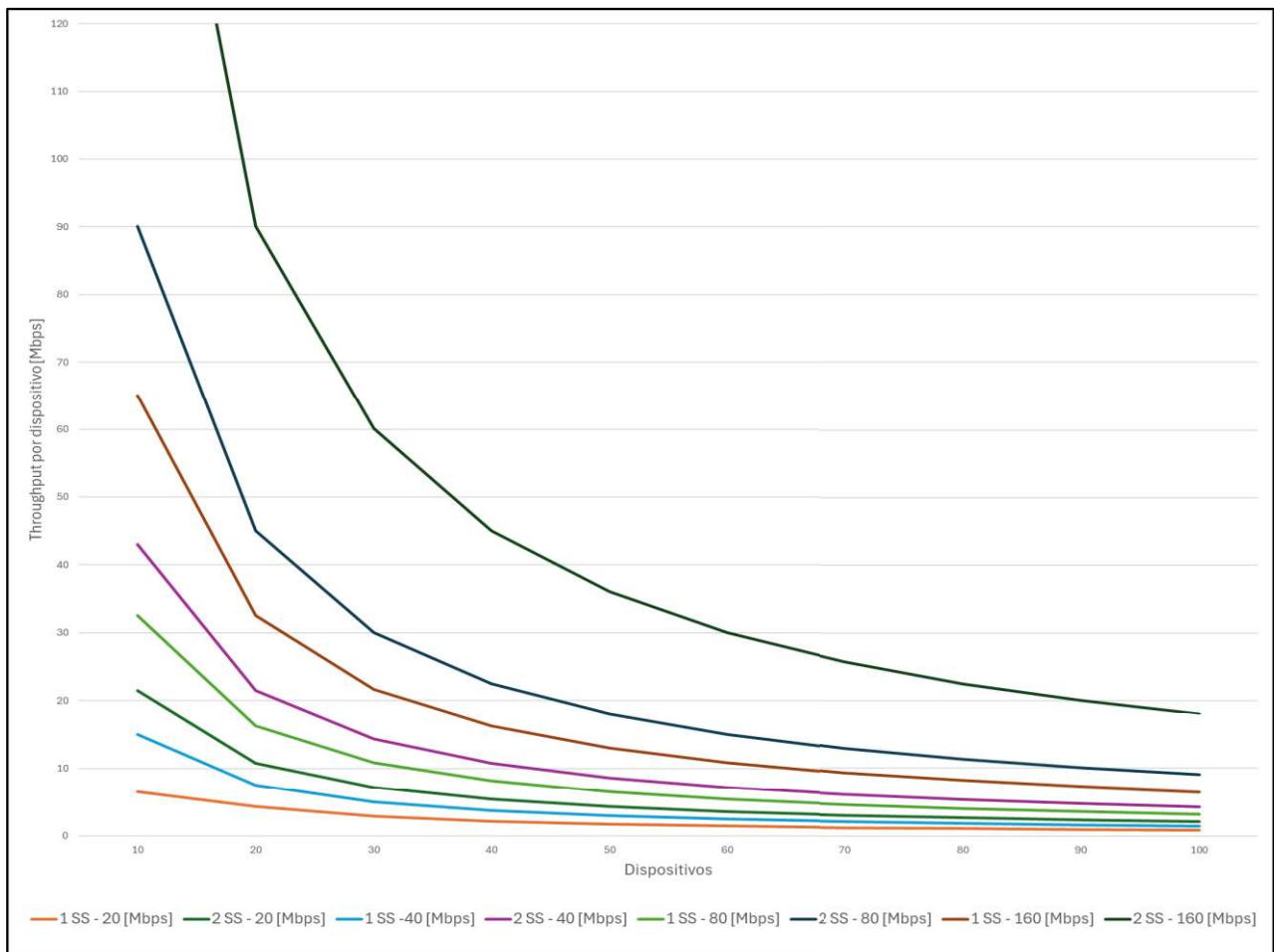


Figura 16. Estimación de throughput por dispositivo para diferentes MCS y SS (Elaboración propia).

La Figura 16 muestra de manera aproximada, la velocidad de transmisión que puede tener cada dispositivo. Se debe recordar que esta aproximación no considera atenuaciones, ruido o interferencia. Sin embargo, los valores pueden emplearse para estimar la cantidad de AP que se requieren.

Se debe prestar atención a los valores que están por arriba de los 10 Mbps. En ese sentido, para el dispositivo WiFi 5 que cuenta con 1 SS y el AP configurado con ancho de canal de 80 MHz se considera que al menos 30 usuarios pueden tener una velocidad garantizada del 10 Mbps. Con ese mismo ancho de canal, para un dispositivo WiFi 6, con 2 SS, la capacidad corresponde a 90 dispositivos que pueden tener una velocidad aproximada de 10 Mbps.

Sin embargo, la gráfica no considera que solo existan 5 canales de 80 MHz disponibles en la banda de 5 GHz, por lo que eventualmente se deberá realizar el reuso de frecuencias. Si el espacio de trabajo es pequeño o existen redes inalámbricas vecinas, el reuso de frecuencias puede incrementar la interferencia entre canales, lo cual puede resultar contraproducente, ya que se estaría disminuyendo la velocidad de transmisión.

Debido a esta consideración, para la banda de 2.4 GHz se utilizarán canales de 20 MHz, mientras que para la banda de 5 GHz se utilizarán canales de 40 MHz.

A continuación, se presenta la Tabla 9 que estima la cantidad de dispositivos soportados por la banda de cada AP considerando una velocidad por dispositivo de 10 Mbps.

| Ancho de canal [MHz] | Dispositivos para 1 SS | Dispositivos para 2 SS |
|----------------------|------------------------|------------------------|
| 20 MHz | 6 | 20 |
| 40 MHz | 14 | 40 |
| 80 MHz | 30 | 90 |

Tabla 9. Capacidad de dispositivos por ancho de canal con base en el SS (Elaboración propia).

Con base en los resultados, se tomará la estimación de 40 dispositivos por AP según el ancho de canal de 40 MHz con 2 spatial streams para la banda de 5 GHz. Debido a que la banda de 2.4 GHz tiende a congestionarse más, se realizara la estimación como si los 1000 dispositivos se conectaran únicamente a la banda de 5 GHz.

De esta manera se obtiene el siguiente análisis:

$$\#APs = \frac{1000 \text{ Dispositivos}}{40 \text{ Dispositivos soportados}} = 25 APs$$

Con base a este número, se realizará la simulación y, a partir de este dato, se compararán los resultados obtenidos.

3.2 Simulación predictiva

La herramienta con la que se realizará la simulación predictiva es Ekahau AI Pro. Esta es una herramienta líder en el mercado para la simulación de entornos WiFi, utilizada para el diseño, análisis y optimización de redes inalámbricas, y ampliamente utilizada por profesionales de redes y telecomunicaciones.

Es importante señalar que se simularán tres pisos contiguos, con base en los planos de la Figura 5: piso 3, piso 4 y piso 5. El piso 4 es el piso de interés; sin embargo, la simulación del piso 3 y piso 5 permitirá aproximarse a un entorno inalámbrico más realista, como el que se presenta en un edificio.

3.2.1 Referencias del entorno

En la Tabla 10, se referencia la cantidad de access point calculados, así como la cantidad de dispositivos finales.

| Dispositivo | Marca | Modelo | Estándar | Capacidad p/dispositivo [Mbps] | Cantidad |
|--------------|---------|---------------|----------|--------------------------------|----------|
| Access Point | Cisco | 9164 | WiFi 6E | N/A | 25 |
| Laptop | Lenovo | Thinkpad T14 | WiFi 6 | 10 | 334 |
| Smartphone | Apple | iPhone 15 | WiFi 6E | 10 | 333 |
| Smartphone | Samsung | Galaxy Note 9 | WiFi 5 | 10 | 333 |

Tabla 10. Cantidad de dispositivos (Elaboración propia).

Posteriormente, en la Tabla 11 se definen los valores de cobertura que se utilizarán para la simulación.

| | 2.4 GHz | 5 GHz |
|---------------------------------|---------|-------|
| Signal Strength [dBm] | -65 | -65 |
| Secondary Signal Strength [dBm] | -75 | -75 |
| Signal to Noise Ratio | 20 | 25 |
| Data Rate [Mbps] | 10 | 10 |
| RTT [ms] | 200 | 200 |
| Packet Loss | 5 | 5 |

Tabla 11. Valores de cobertura (Elaboración propia).

Para ello, se consideran los siguientes parámetros:

El Signal Strength (cobertura) hace referencia al RSSI que debe recibir el dispositivo final para que tenga un desempeño aceptable. Este valor se obtuvo de la documentación “Understand Site Survey Guidelines for WLAN Deployment” [27], donde se menciona que el mínimo aceptable para comunicaciones VoIP es de -67 [dBm]. En este diseño se considera -65 dBm para contar con un margen adicional.

El Secondary Signal Strength (roaming), hace referencia al RRSI que debe tener el segundo mejor AP en un punto específico. Este parámetro es importante porque, si el AP principal falla o se satura, el dispositivo puede cambiar al segundo AP mediante roaming. Tener un buen secondary signal permite mantener una conexión estable incluso cuando el dispositivo cambia de punto de acceso. Los valores comunes para este parámetro suelen estar entre -70 a -85 dBm.

El Signal to Noise Ratio (SNR), representa la relación entre la señal útil y el ruido o interferencia presente en el entorno. De acuerdo con la documentación “Understand Site Survey Guidelines for WLAN Deployment”, el mínimo aceptable para comunicaciones VoIP es de 25 dB. En este caso se toma un valor de 20 dB para la banda de 2.4 GHz, debido a que suele ser una banda más congestionada; sin embargo, mientras más alto sea este valor, mejor será la calidad de la señal.

El Data Rate corresponde a la velocidad máxima teórica a la que se pueden transferir datos a través de un canal de comunicación. Este parámetro es importante porque está directamente relacionado con la distancia de cobertura que puede abarcar un access point: mientras más bajo sea el data rate, mayor será el área de cobertura, y viceversa. De acuerdo con la documentación “Understand Site Survey Guidelines for WLAN Deployment”, el mínimo aceptable para comunicaciones VoIP es de 12 Mbps. Este valor se verifica también en el capítulo 2, en el apartado de aplicaciones, donde se estableció que el throughput de la aplicación principal será de 10 Mbps.

El RTT mide el tiempo que tarda un paquete de datos en ir desde el dispositivo hasta un destino (por ejemplo, un servidor o un AP) y regresar. Según la documentación “Troubleshoot and Debug VoIP Calls” [28], se menciona que el mínimo aceptable para comunicaciones VoIP es de 300 ms. En este diseño se considera 200 ms para garantizar un mejor desempeño.

Finalmente, el Packet Loss indica el porcentaje de paquetes de datos que se pierden y no llegan correctamente a su destino. Idealmente, este valor debería ser 0%, pero para fines prácticos se considera un máximo de 5%.

En última instancia, en la Tabla 12 se considera la configuración de la red, es decir, cuántos SSID serán propagados por los AP y cuáles serán sus parámetros.

| | 2.4 GHz | 5 GHz |
|---|---------|-------|
| Numero de SSIDs | 3 | 3 |
| Data Rate mínimo [Mbps] | 10 | 10 |
| Número máximo de clientes (20 MHz y 40 MHz) | 14 | 40 |

Tabla 12. parámetros de las redes inalámbricas (Elaboración propia).

3.2.2 Simulación del entorno

Con base en el capítulo 2.1, Análisis del entorno, el siguiente paso es realizar la simulación del espacio de trabajo, tomando en cuenta todas las consideraciones previamente establecidas: los materiales que tiene el espacio de trabajo, las alturas, las obstrucciones, las zonas de exclusión y las consideraciones de radiofrecuencia.

Al utilizar el programa de simulación, lo primero que se debe hacer es definir la escala del mapa. Como se mencionó al principio de la tesis, el mapa no contaba con ningún valor de referencia para ser escalado. Sin embargo, en estos casos se toma como referencia una puerta.

Con base en la NOM-030-SSA3-2013 [29], en su sección 6.2.3.3 se menciona que el ancho mínimo de una puerta es de 0.9 m. Por lo tanto, para escalar el mapa se utiliza este valor como referencia, el cual además corresponde aproximadamente al ancho estándar de una puerta.

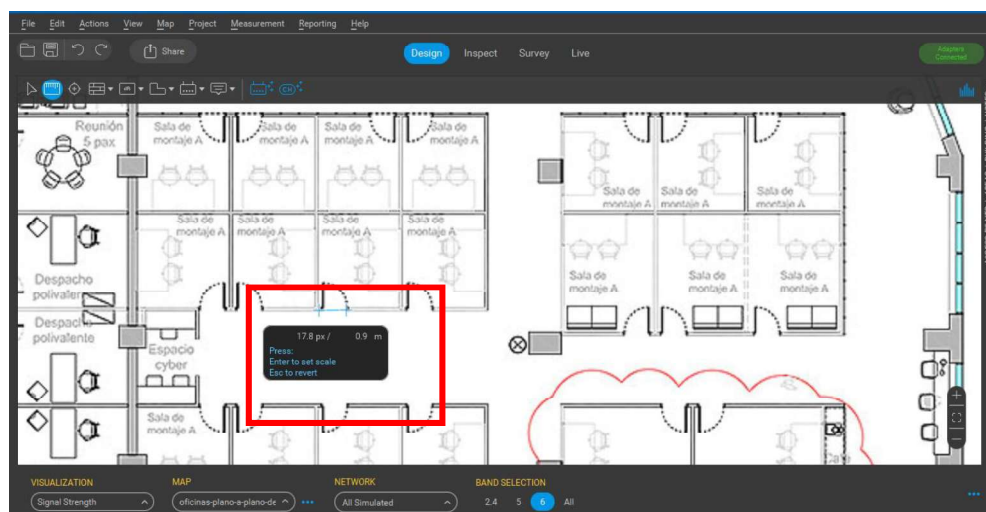


Figura 17. Procedimiento de escalar de mapa (Elaboración propia).

En la Figura 17 se toma la puerta de la “Sala de Montaje A” como referencia, y se aplica la escala de 0.9 metros.

Después de escalar el mapa, se deben identificar todas las paredes, ventanas, columnas, escaleras y, en general, cualquier obstrucción que pueda causar una atenuación de la señal.

En la Figura 5, presentada al inicio del capítulo 2, se puede observar cómo las paredes, columnas, ventanas y muros ya se encuentran identificados con distintos colores. Esto es lo que le permite al programa a simular las atenuaciones de la señal.



Figura 18. Delimitación de área de trabajo (Elaboración propia).

Partiendo de la Figura 18, en el programa se selecciona la opción indicada en el recuadro rojo y posteriormente se elige la herramienta Area Tool. Con esta opción se debe ir marcando todo el contorno del muro exterior, para que el programa pueda delimitar las zonas de cobertura y, al mismo tiempo, distribuir de forma homogénea el total de dispositivos. Una vez que se tienen definidas las atenuaciones, se procede a cargar los datos de los dispositivos.

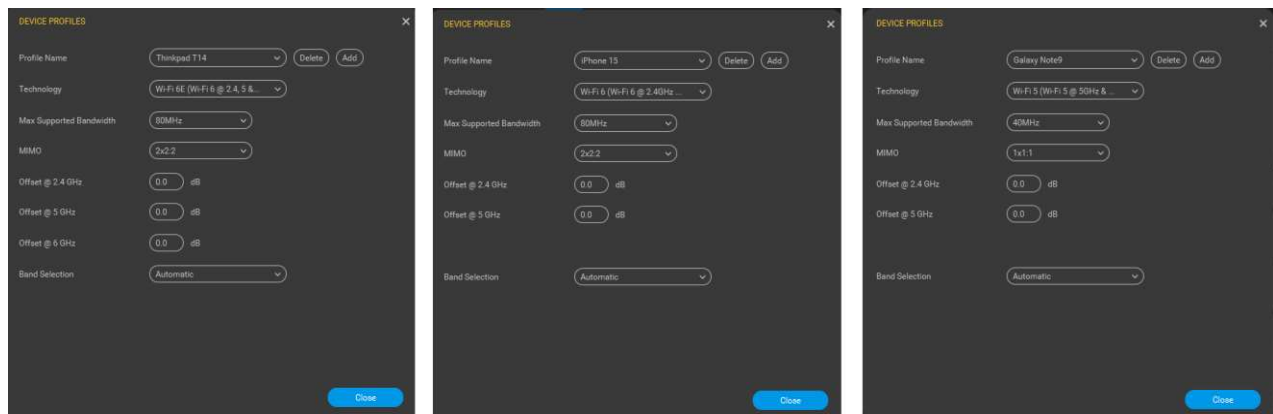


Figura 19. Simulación de tipo de dispositivo (Elaboración propia).

La Figura 19 muestra los perfiles de los dispositivos que se utilizarán. Este procedimiento se realiza desde la pestaña Project > Device Profile. En esta nueva ventana es donde se agregarán los tres perfiles de dispositivos con los que se trabajará.

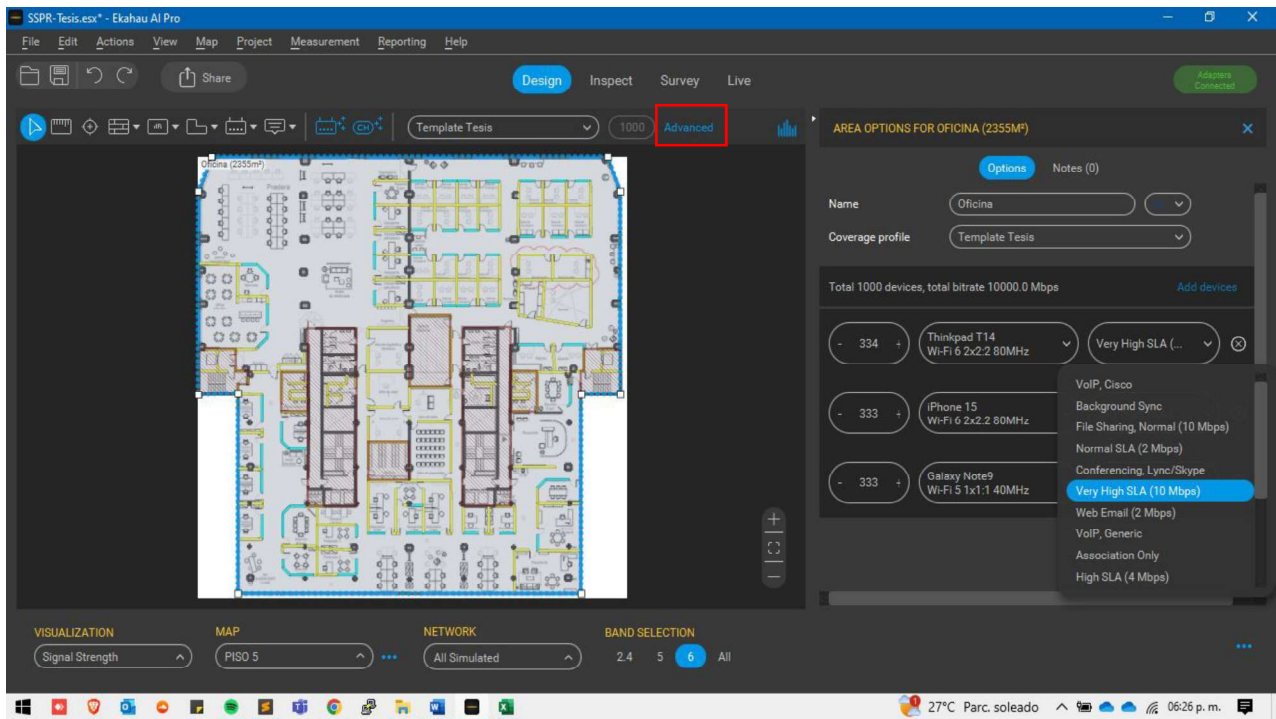


Figura 20. Asociación de dispositivos al área de trabajo (Elaboración propia).

Una vez que se cargaron los perfiles de los dispositivos, se selecciona el área punteada que previamente se creó con la herramienta “Area Tool”. Al seleccionarla, se abrirán las opciones avanzadas (recuadro rojo de la Figura 20). En este apartado se especifica la cantidad de dispositivos, ahí se seleccionará la cantidad de dispositivos que se especificaron y el consumo que estos tendrán. Para este caso, se había establecido un consumo de 10 Mbps por dispositivo.

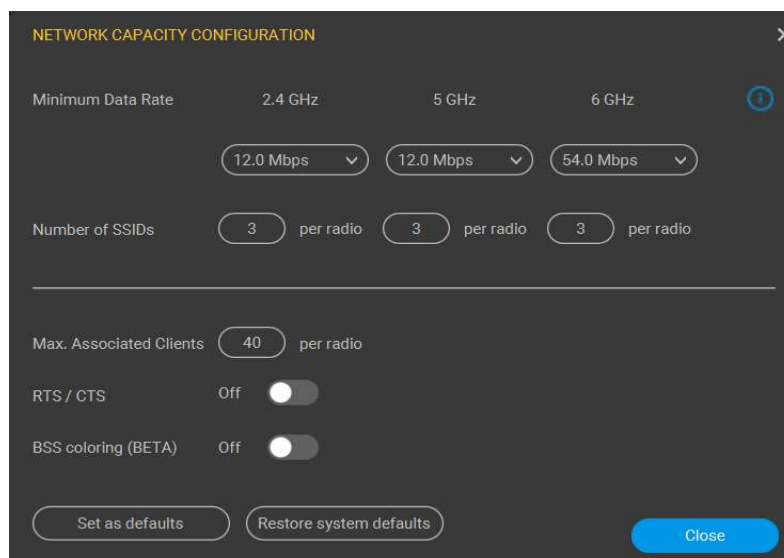


Figura 21. Configuración de la capacidad de la red (Elaboración propia).

La Figura 21 hace referencia a las configuraciones de red planteadas en la Tabla 12. Como se puede observar, no existe la opción de limitar el número de clientes asociados por banda. Sin embargo, se tomará de referencia el valor de 40 dispositivos conectados, con base en los cálculos realizados para la banda de 5 GHz. Esta ventana se obtiene desde la pestaña Project > Network Configuration.

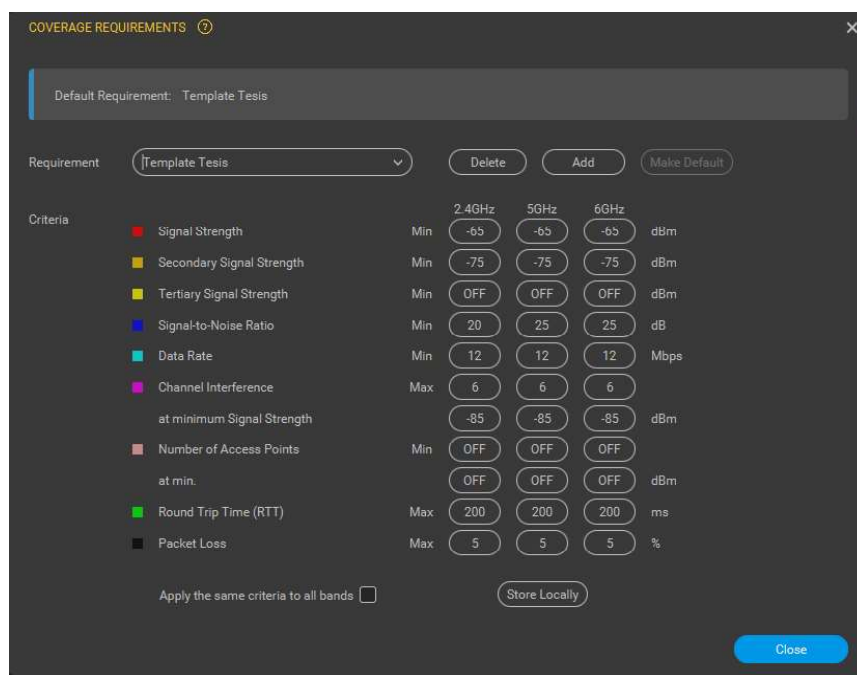


Figura 22. Configuración de los parámetros de la red (Elaboración propia).

La Figura 22 señala los parámetros establecidos en la Tabla 11. Existen parámetros adicionales, como el Tertiary Signal Strength, que se utiliza para servicios de localización mediante WiFi; como este no forma parte del objeto de estudio, se descarta en la simulación. Otro parámetro es el Channel Interference, que muestra hasta seis AP propagando cobertura sobre el mismo canal. Finalmente, el parámetro Number of Access Points indica la densidad de AP presentes en el mapa; sin embargo, en este caso no se le considera, ya que la información requerida se obtendrá a partir de los demás resultados de la simulación.

3.2.3 Piso 3

Como primer ejercicio de la simulación, en el piso 3 se verificará cuál es la cantidad mínima de AP necesarios para cubrir toda el área de cobertura. En este sentido, se estará aplicando una mala práctica, que consiste en utilizar la potencia máxima de los AP para que puedan cubrir un área mayor. La Tabla 13 indica cual es la potencia máxima del AP C9164.

| Potencia | Banda | | |
|----------|------------------|------------------|------------------|
| | 2.4 GHz | 5 GHz | 6 GHz |
| Máxima | 200 mW o 23 dBm | 200 mW o 23 dBm | 200 mW o 23 dBm |
| Mínima | 0.39 mW o -4 dBm | 0.39 mW o -4 dBm | 0.39 mW o -4 dBm |

Tabla 13. Potencias permitidas del AP C9164 [19].

Para esta simulación, y partiendo de la premisa de que la oficina de interés es el piso 4, el piso 3 se utilizará como escenario para simular únicamente los AP necesarios para cubrir todo el espacio de cobertura. La altura entre los pisos es de 3 metros, con una losa de 0.3 metros de espesor.

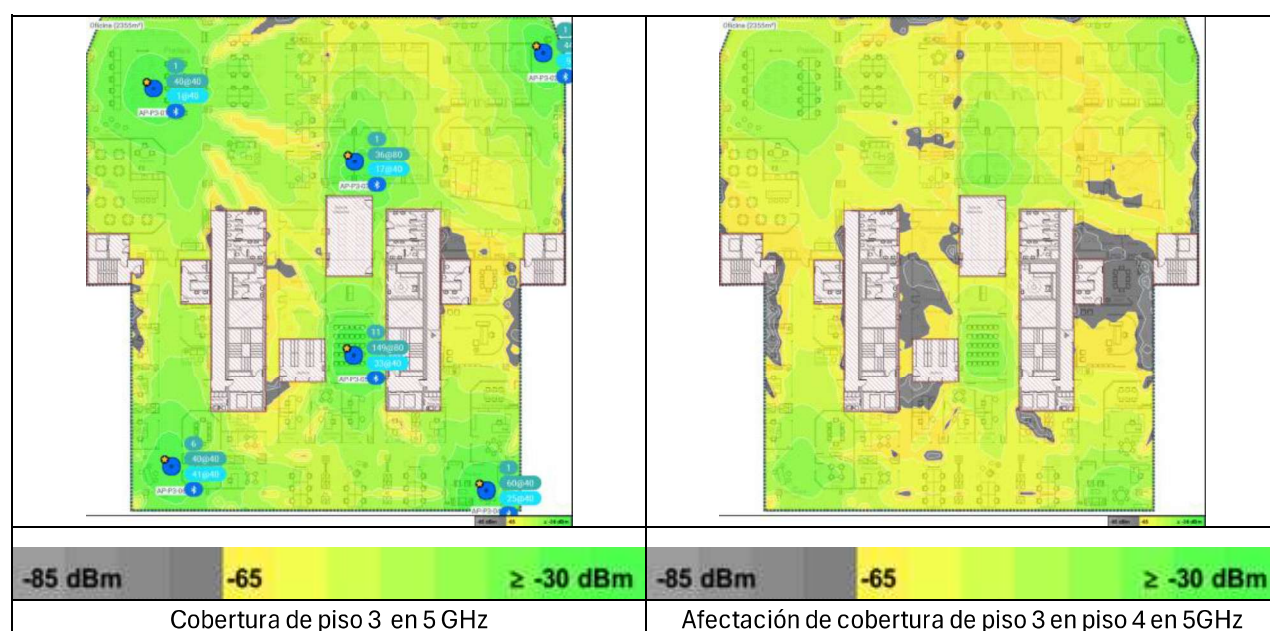


Tabla 14. Simulación del piso 3 (Elaboración propia).

En la Tabla 14, del lado izquierdo, se observa que, para cubrir toda el área de cobertura, seis access point son más que suficientes. Sin embargo, esta configuración representa una mala práctica, debido a que se está usando la potencia máxima del equipo, lo cual puede generar interferencias en los pisos adyacentes. Del lado derecho se aprecia la cobertura del piso 3 impacta sobre el piso 4. En un entorno real esto es muy común, ya que los AP de los pisos adyacentes siempre influyen en el diseño de una red inalámbrica.

3.2.4 Piso 5

En este piso se simularán 12 AP. En esta ocasión se considerará que el piso 5 fue diseñado “de manera correcta”, por lo que no se están utilizando las potencias máximas. Además, al tener una menor cantidad de usuarios, solo utiliza la banda de 5 GHz con anchos de 20 MHz.

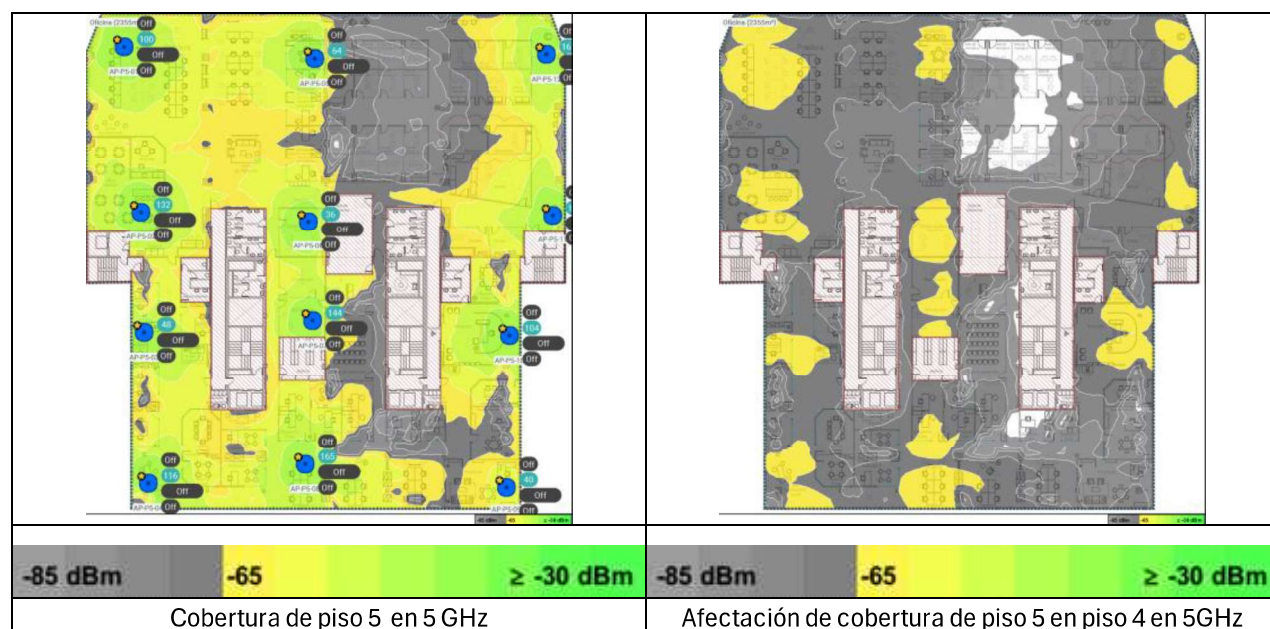


Tabla 15. Simulación del Piso 5 (Elaboración propia).

En la Tabla 15, del lado izquierdo se observa la cobertura generada por los AP. Las ubicaciones y potencias fueron escogidas a propósito para mostrar que existe una zona amplia donde no hay cobertura, a pesar de que hay AP cercanos a esa área. Esto se debe a los muros de concreto presentes en el entorno, los cuales provocan una fuerte atenuación de la señal.

Del lado derecho, se aprecia cómo la cobertura del piso 5 impacta sobre el piso 4.

Con las simulaciones anteriores se observa que existen afectaciones de cobertura provenientes de los pisos adyacentes hacia el piso de interés. Este es un escenario común en redes inalámbricas reales, por lo que resulta importante realizar un estudio en sitio antes de implementar un diseño, con el fin de identificar las condiciones actuales del entorno y las posibles fuentes de interferencia.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Un site survey (estudio de sitio) predictivo, también conocido como de cobertura, es una técnica fundamental en el diseño y planificación de redes inalámbricas, como redes WiFi. Se utiliza para predecir y evaluar la cobertura inalámbrica antes de la implementación real de la red. Este proceso se lleva a cabo utilizando herramientas de software especializadas y modelos matemáticos que estiman cómo las señales de radio se propagarán en un entorno específico.

El proceso de site survey predictivo implica la recopilación de datos sobre el entorno físico, como la disposición de las paredes, la ubicación de obstáculos, la densidad de usuarios previstos y otros factores relevantes. Esta información se introduce en herramientas de software especializadas que utilizan algoritmos de modelado para simular la propagación de señales de radio y predecir la cobertura esperada. El resultado es un diseño de red inicial que se puede ajustar y refinar antes de la implementación real.

En otras palabras, el site survey predictivo es una herramienta esencial en la planificación de redes inalámbricas, ya que ayuda a garantizar una cobertura confiable, un rendimiento óptimo y un uso eficiente de los recursos antes de la instalación física de la infraestructura de red.

En la Figura 23 se puede apreciar la ubicación de los access point, así como la configuración de los radios y la asignación de canales. Al lado de cada access point se observan tres barras, donde la superior corresponde a la banda de 2.4 GHz, la barra intermedia a la banda de 5 GHz, y la barra inferior a la banda de 6 GHz.

También se puede observar que no todos los AP tienen habilitada la banda de 2.4 GHz. Esto se debe a que solo algunos fueron configurados operar en esta banda, con el objetivo de evitar una posible saturación. Esta decisión se tomó considerando que los AP del piso 3 ya están propagando cobertura en esa banda, por lo que habilitar todos los AP del piso 4 podría generar un entorno con mayor interferencia.

En la Tabla 16 y la Tabla 17 se muestra cómo se realizó la asignación de bandas, canales, potencias, de acuerdo con la configuración presentada en la Figura 23.

4.1 Resultados de la simulación

Ubicación de AP

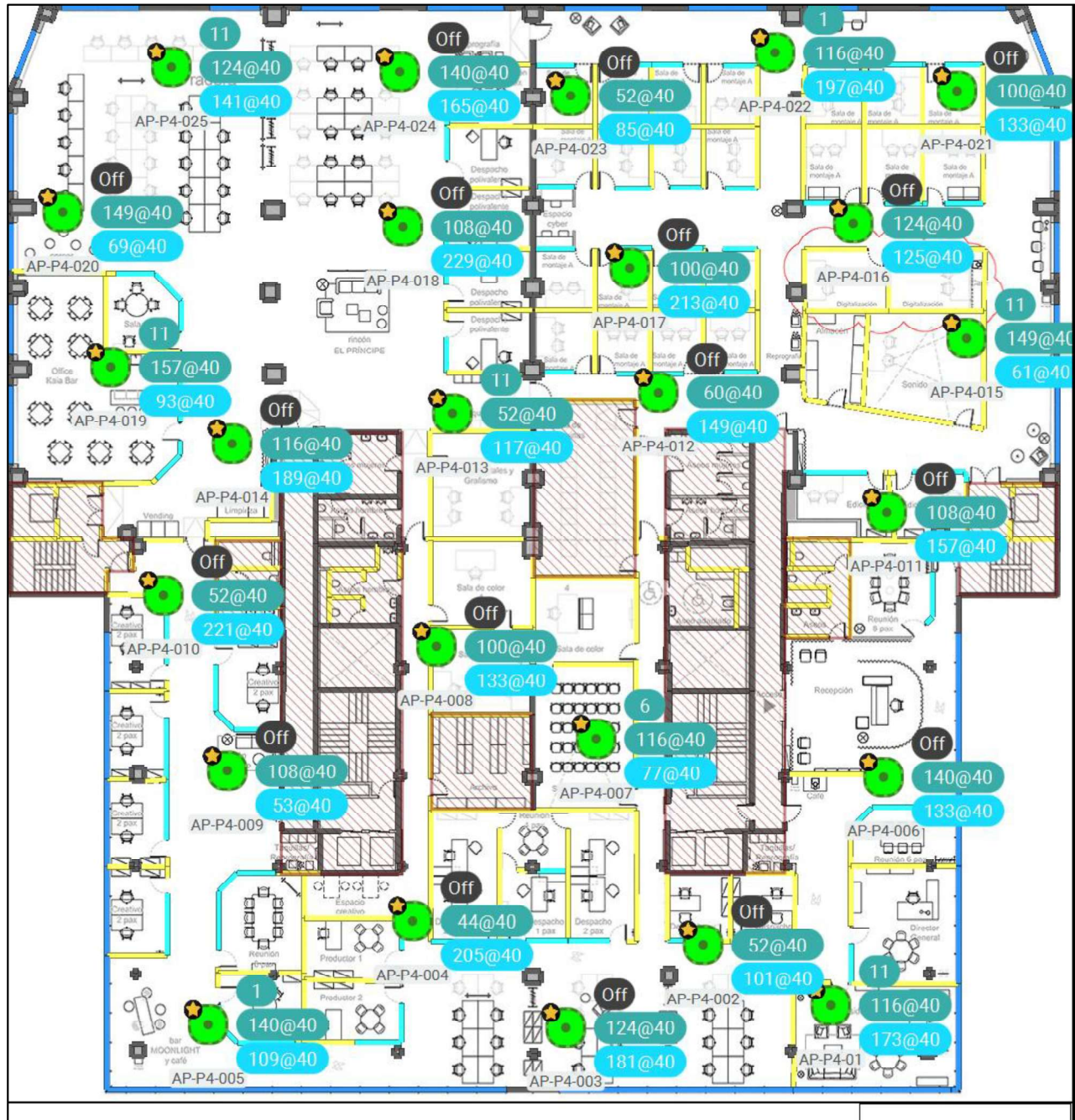


Figura 23. Ubicación de los AP con sus respectivos Canales y anchos de canal en las 3 bandas (Elaboración propia).

| Access Points | | | |
|------------------|----------------|---|----------|
| AP-P4-01 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| WiFi 6 | 11 (2.4 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| WiFi 6 | 116@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 173@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-002 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 52@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 101@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-003 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 124@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 181@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-004 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 44@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 205@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-005 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| WiFi 6 | 1 (2.4 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| WiFi 6 | 140@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 109@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-006 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 140@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 133@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-007 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| WiFi 6 | 6 (2.4 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| WiFi 6 | 116@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 77@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-008 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 100@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 133@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-009 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 108@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 53@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-010 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 52@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 221@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-011 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 108@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 157@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-012 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 60@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 149@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-013 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| WiFi 6 | 11 (2.4 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| WiFi 6 | 52@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 117@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |

Tabla 16. Configuración de canales, potencias y alturas de los AP (Elaboración propia).

| | | | |
|------------------|----------------|---|----------|
| AP-P4-014 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 116@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 189@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-015 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| WiFi 6 | 11 (2.4 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| WiFi 6 | 149@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 61@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-016 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 124@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 125@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-017 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 100@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 213@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-018 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 108@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 229@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-019 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| WiFi 6 | 11 (2.4 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| WiFi 6 | 157@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 93@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-020 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 149@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 69@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-021 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 100@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 133@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-022 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| WiFi 6 | 1 (2.4 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| WiFi 6 | 116@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 197@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-023 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 52@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 85@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-024 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| Off | - (2.4 GHz) | 2.4 m | - |
| WiFi 6 | 140@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 165@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| AP-P4-025 | | Generic WiFi 6E Tri-Band Radio + Generic Omni | |
| WiFi 6 | 11 (2.4 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |
| WiFi 6 | 124@40 (5 GHz) | 2.4 m | 7.0 dBm |
| WiFi 6E | 141@40 (6 GHz) | 2.4 m | 14.0 dBm |

Tabla 17. Configuración de canales, potencias y alturas de los AP (Elaboración propia).

4.1.1 Cobertura

La cobertura se refiere a la potencia de señal que recibe un dispositivo final en relación con un punto de acceso (AP) específico. Generalmente, se expresa en decibeles (dBm) y representa la intensidad de la señal en un punto específico del entorno.

Este parámetro es un indicador importante de la calidad de la conexión inalámbrica. Una señal con mayor potencia generalmente implica una mejor calidad de la conexión, ya que la transferencia de datos es más eficiente y menos propensa a errores. Por el contrario, una señal con menor potencia puede resultar en conexiones más lentas, pérdida de paquetes y una experiencia de usuario deficiente.

La intensidad de la señal puede variar debido a diversos factores, como la distancia entre el dispositivo y el punto de acceso, los obstáculos físicos (como paredes y muebles), la interferencia de otras redes inalámbricas o dispositivos electrónicos, así como las condiciones del entorno, por ejemplo, la presencia de materiales que absorben o reflejan las señales de radio.

En términos de la representación visual, la cobertura se muestra mediante una escala de colores que va del verde, pasando por el amarillo, hasta llegar al gris, donde los tonos verdes indican una señal más fuerte, mientras que los colores más oscuros indican una señal más débil. La Tabla 18 muestra la representación visual de la cobertura para las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

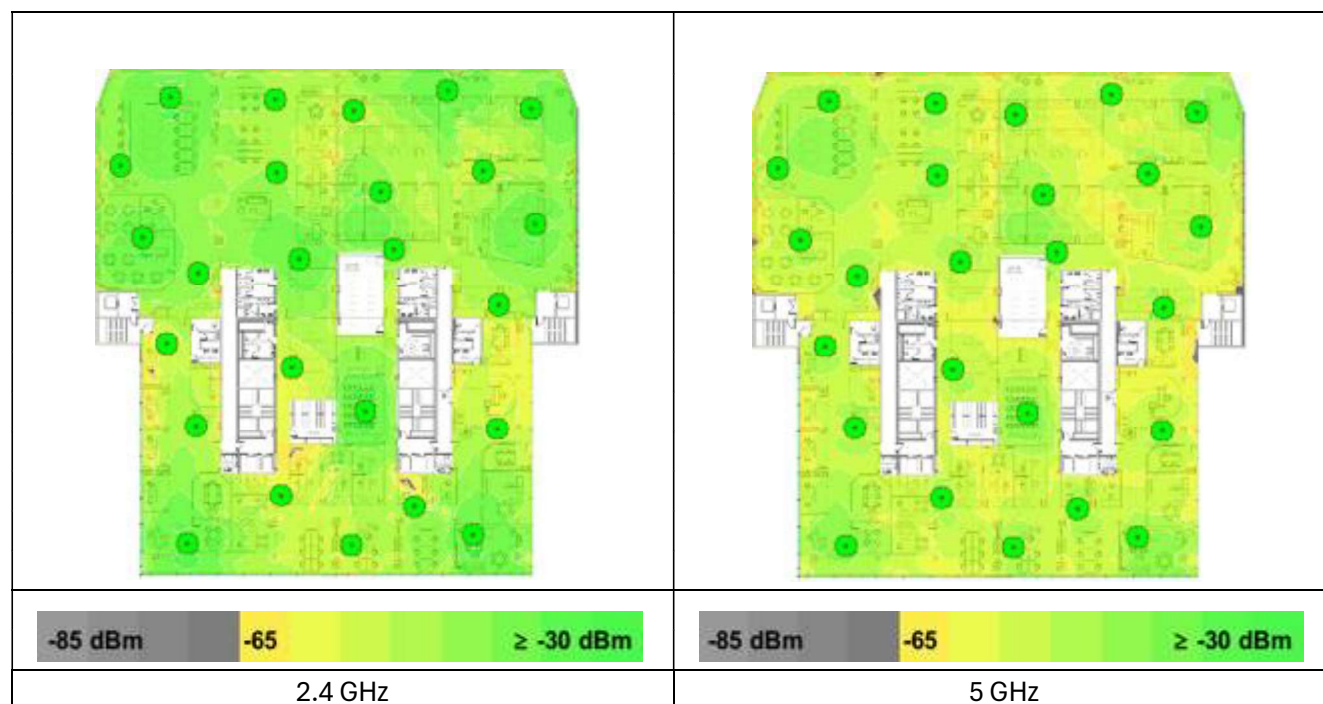


Tabla 18. Cobertura en piso 4 (Elaboración propia).

4.1.2 Roaming

El roaming se refiere al proceso mediante el cual un dispositivo móvil cambia de manera automática y continua de un access point a otro dentro de una red inalámbrica, sin perder la conectividad ni interrumpir la comunicación. Esta es una característica fundamental de las redes WiFi, ya que permite que los dispositivos permanezcan conectados mientras se desplazan dentro de un área cubierta por múltiples access point.

Cuando un dispositivo se encuentra dentro del rango de señal de un AP, se conecta a ese punto de acceso y establece una conexión inalámbrica. A medida que el dispositivo se mueve y se acerca al límite del rango de cobertura, la calidad de la señal comienza a disminuir. En este momento, el dispositivo busca automáticamente otro AP con una señal más fuerte y realiza una transición hacia ese nuevo punto de acceso, normalmente sin que el usuario perciba el cambio.

En términos de la representación visual, el roaming se muestra mediante una escala de colores que va del verde, pasando por el amarillo, el naranja, hasta llegar al gris. Los tonos verdes indican una transición de roaming más eficiente, mientras que los colores más cercanos al rojo o al gris representan un roaming más débil, generalmente porque existen menos puntos de acceso disponibles para realizar la transición. La Tabla 19 muestra la representación visual del roaming para las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

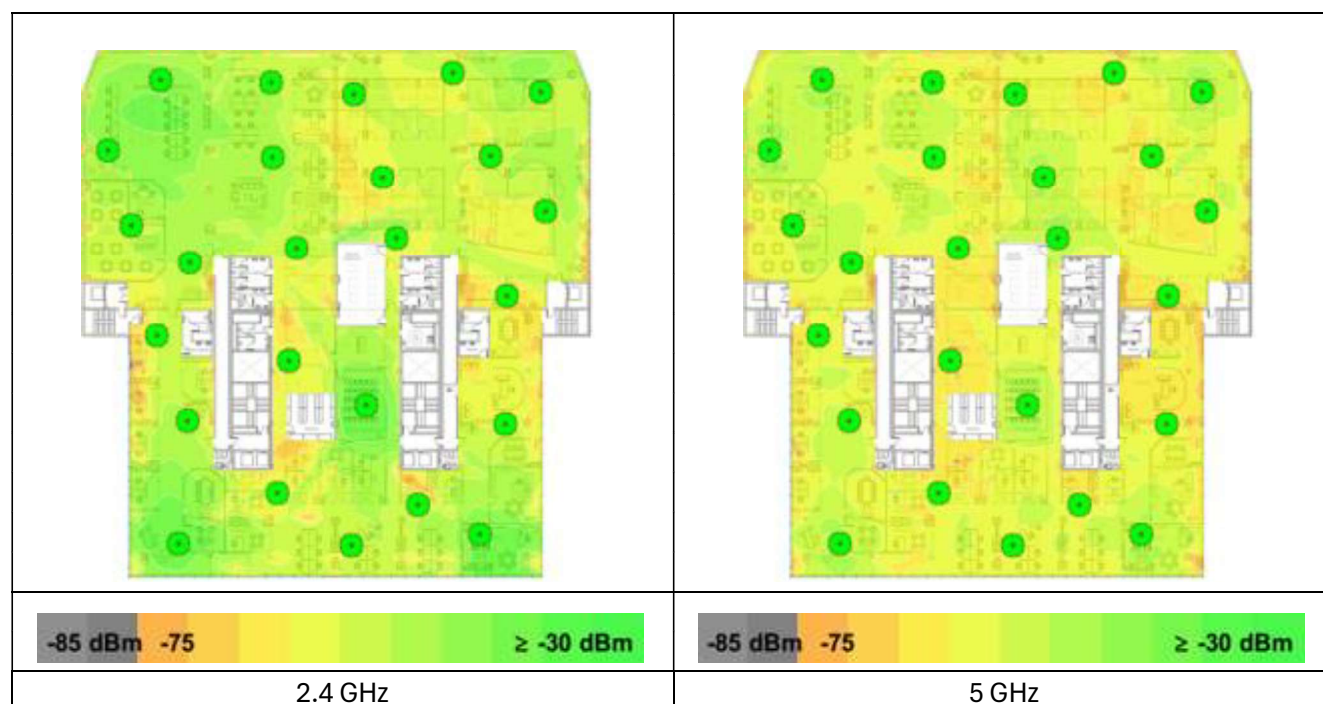


Tabla 19. Roaming en piso 4 (Elaboración propia).

4.1.3 Throughput

El throughput se refiere a la cantidad de datos o información que se puede transmitir exitosamente a través de una red o canal de comunicación en un período de tiempo determinado. Representa la velocidad de transferencia real de datos y es un indicador importante del rendimiento de una conexión o enlace de red.

Suele medirse en bits por segundo (bps), kilobits por segundo (Kbps), megabits por segundo (Mbps) o incluso gigabits por segundo (Gbps), dependiendo de la escala de la red y la velocidad de transmisión. Es importante destacar que el throughput no depende únicamente de la velocidad nominal o teórica de transmisión de la red (data rate), sino también de diversos factores que pueden afectar la transferencia real de datos, como la calidad de la señal, la interferencia, la latencia, el rendimiento del equipo de red y la capacidad del canal.

En términos de la representación visual, el throughput se muestra mediante una escala de colores que va del verde, pasando por el amarillo y el naranja, hasta llegar al rojo; donde los tonos verdes indican mayores velocidades de transferencia, mientras que los colores más cercanos al rojo representan velocidades más bajas. La Tabla 20 muestra la representación visual del throughput para las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

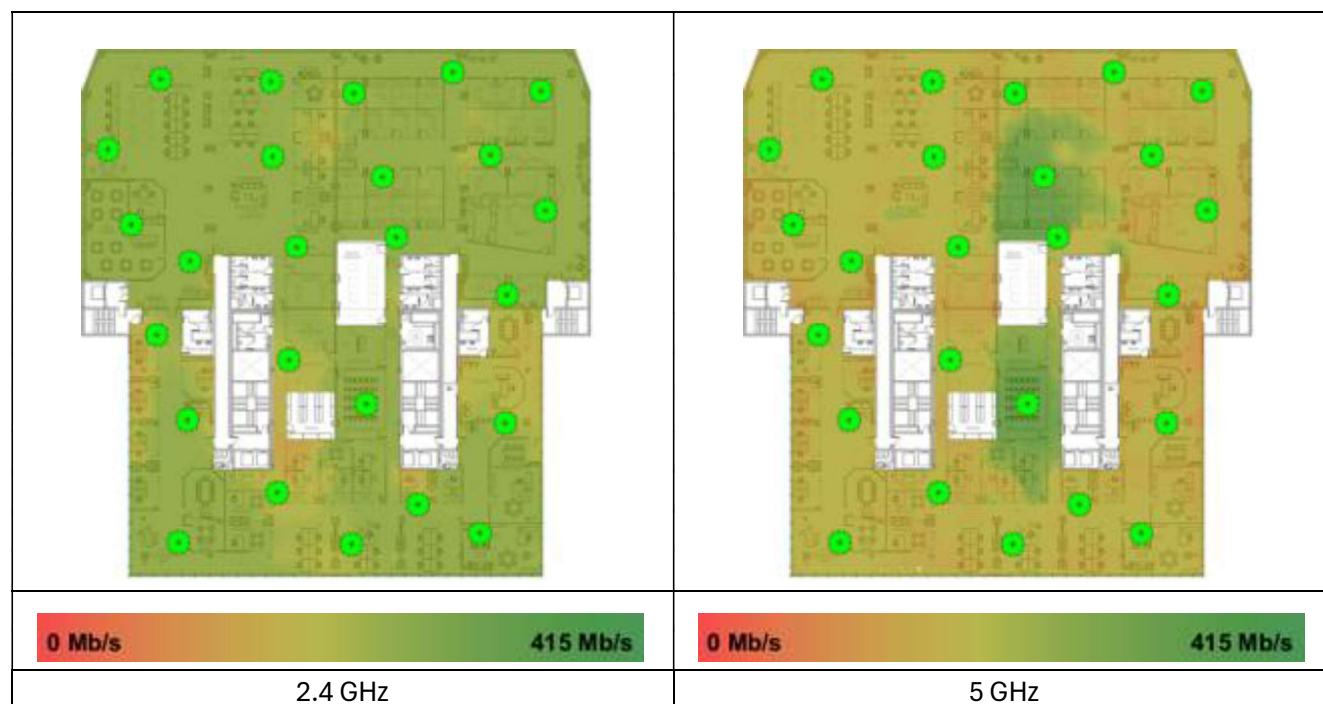


Tabla 20. Throughput en piso 4 (Elaboración propia).

4.1.4 Interferencia

La interferencia se refiere a la presencia de señales no deseadas o ruido en el mismo canal de comunicación que se está utilizando para transmitir datos. Este fenómeno puede afectar negativamente el rendimiento y la calidad de la señal en una red inalámbrica.

Las interferencias pueden ser cocanal, adyacentes o interferencias que no pertenecen al estándar 802.11. Estas condiciones pueden provocar diversos problemas en la red, como una disminución del throughput, aumento de la latencia, pérdida de paquetes, desconexiones frecuentes o una degradación general del rendimiento.

En términos de representación visual, la interferencia se muestra mediante una escala de colores que va del verde, pasando por el amarillo, el naranja y el rojo, hasta llegar al gris, donde los tonos verdes indican una interferencia mínima o nula, mientras que los colores más cercanos al rojo o al gris indican una mayor presencia de dispositivos generando interferencia. La Tabla 21 muestra la representación visual de la interferencia para las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

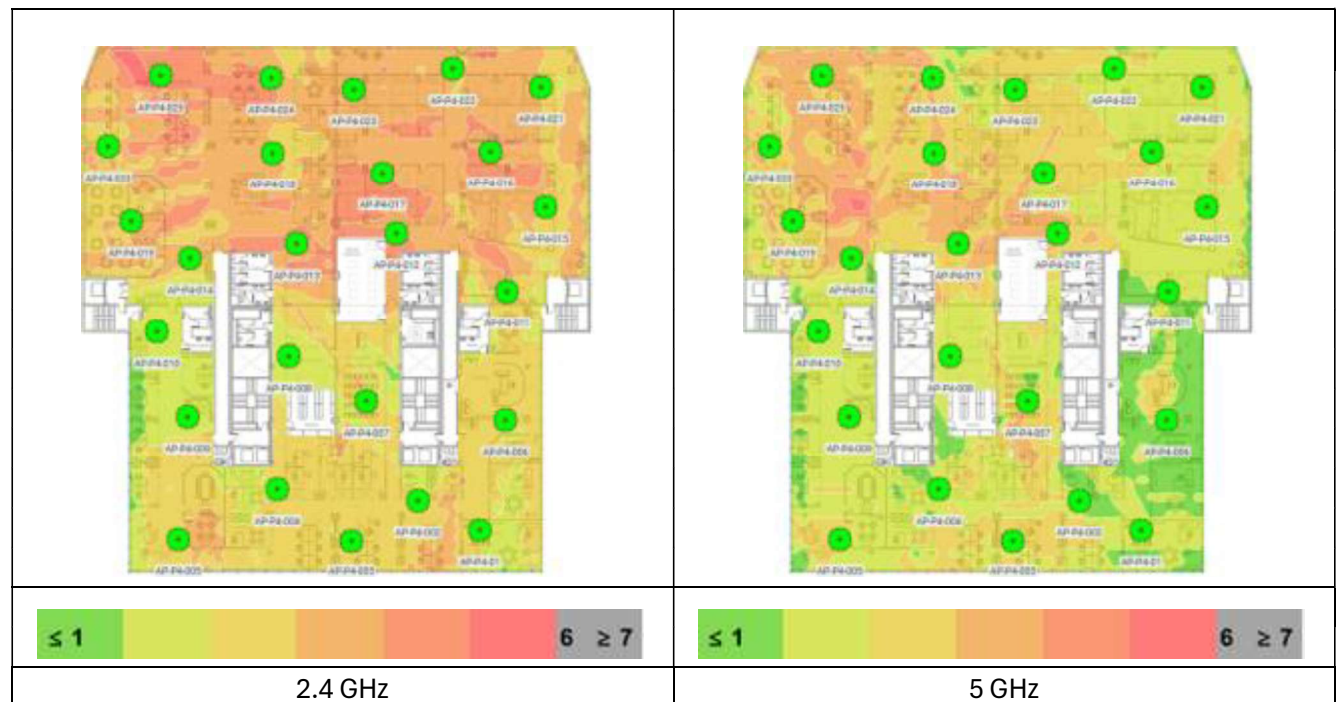


Tabla 21. Interferencia en piso 4 (Elaboración propia).

4.1.5 Utilización de tiempo-aire

Este parámetro se refiere a la cantidad de tiempo que se utiliza para transmitir datos dentro de un canal de comunicación inalámbrica. En otras palabras, representa la eficiencia y el aprovechamiento del tiempo de transmisión en la red.

La utilización del tiempo-aire generalmente se expresa como un porcentaje y representa la proporción de tiempo total disponible en el canal que se utiliza para transmitir datos. Un porcentaje alto indica que se está utilizando una gran cantidad de tiempo en un canal para transmitir datos, lo que puede reflejar una alta demanda de tráfico o congestión en la red. En otras palabras, este parámetro se refiere al porcentaje de dispositivos transmitiendo al mismo tiempo en un canal de comunicación inalámbrica.

En términos de la representación visual, la utilización de tiempo-aire se muestra mediante una escala de colores que va del verde, pasando por el amarillo y el naranja, hasta llegar al rojo, donde los colores verdes indican poca saturación del canal y los colores más rojos indican congestión sobre el canal. La Tabla 22 muestra la representación visual de la utilización del tiempo-aire para las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

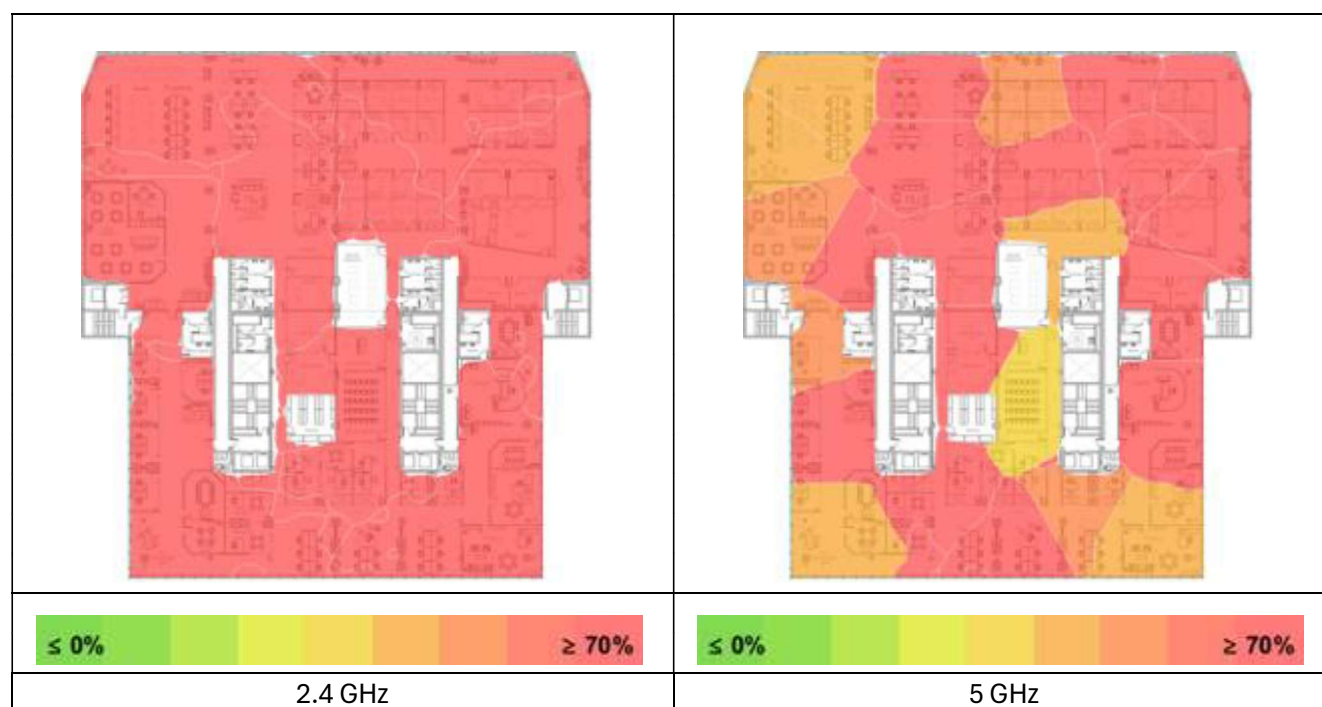


Tabla 22. Utilización del tiempo-aire en piso 4 (Elaboración propia).

4.1.6 Capacidad

La capacidad es un parámetro de evaluación dentro del programa de simulación que mide la capacidad de una red WiFi para soportar la demanda de dispositivos y tráfico en una determinada área. Esta métrica se enfoca en identificar si la infraestructura inalámbrica instalada —principalmente access points y ancho de banda del canal— puede manejar el número de clientes, el tipo de aplicaciones utilizadas y el volumen de datos esperados sin degradar el rendimiento de la red.

Los esquemas permiten identificar las áreas donde existe un exceso de dispositivos conectados a un mismo access point, lo cual puede generar cuellos de botella en la red. A mayor número de clientes, más se divide el ancho de banda y se incrementa el tiempo-aire requerido para cada dispositivo.

En términos de la representación visual, las zonas de color verde representan que la capacidad se encuentra con baja demanda de dispositivos, mientras que la zona roja indica que hay una sobredemanda de dispositivos en los AP. La Tabla 23 muestra la representación visual de la utilización del tiempo-aire para las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

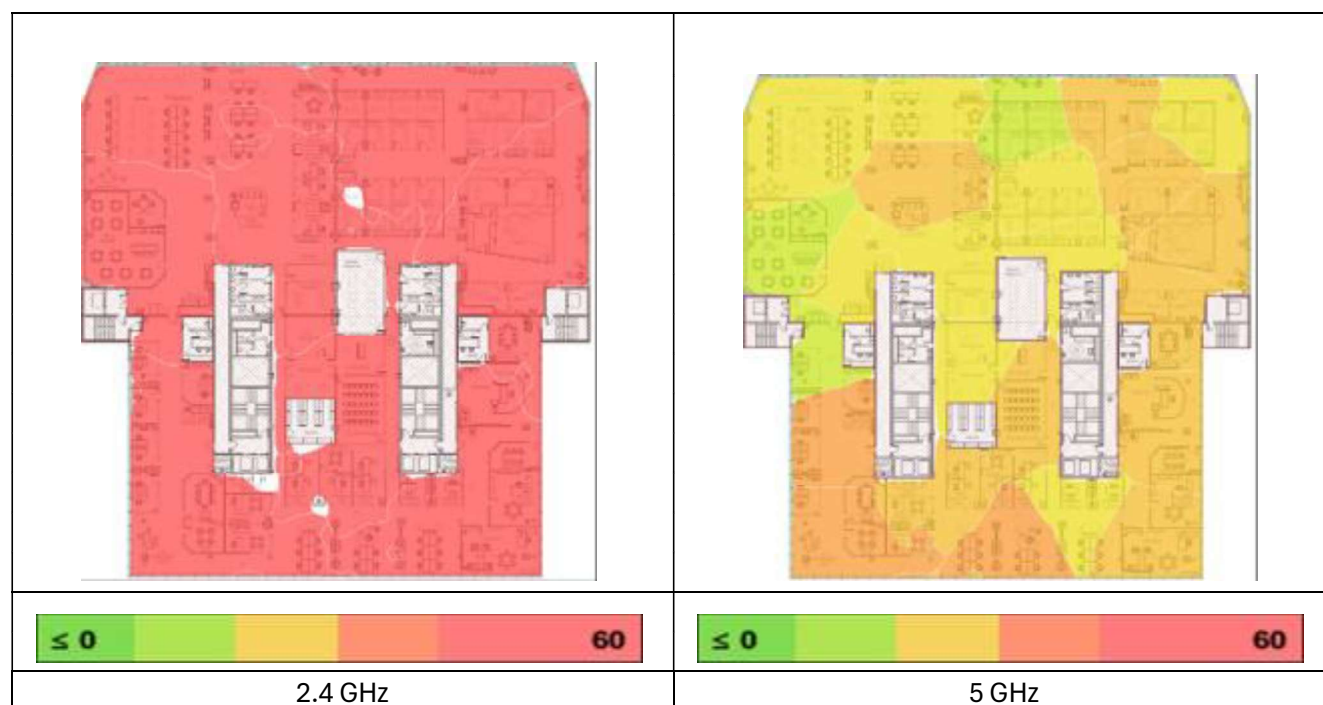


Tabla 23. Capacidad en piso 4 (Elaboración propia).

Capítulo 5. Comparación con estándares y mejores prácticas

Comenzando con el análisis de la Figura 23, a diferencia de los pisos 3 y 5, para el diseño de la red en el piso 4 se consideró superponer la cobertura de los radios.

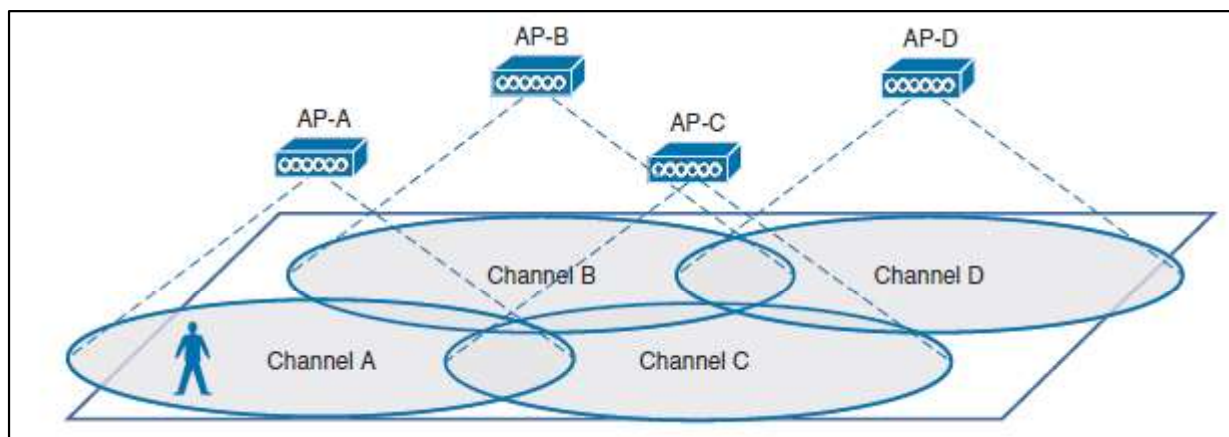


Figura 24. Superposición de canales en entornos de alta densidad [5, p. 96].

La Figura 24 ayuda a entender mejor este concepto. Como práctica recomendada, siempre se deben colocar los AP de manera que su celda se superponga con las celdas de los access point vecinos más cercanos entre un 10% y un 20% aproximadamente. Esta superposición es necesaria para proporcionar cobertura de RF continua (roaming) a los dispositivos inalámbricos mientras se desplazan de una celda a otra de un punto de acceso, sin experimentar una pérdida de señal perceptible [5, p. 96].

Por otro lado, al realizar un diseño inalámbrico se debe considerar que los canales de los AP adyacentes deben ser diferentes. En un diseño basado en las mejores prácticas, los AP adyacentes no deberían configurarse para usar el mismo canal, ya que pueden interferirse entre sí. En cambio, a medida que los dispositivos se mueven, estos deben desplazarse de un AP a otro, así como de un canal a otro.

Se toma como referencia un acercamiento a la Figura 23, con lo cual se obtiene la Figura 25. En esta imagen se observa cómo la asignación de canales en las bandas de 2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz, de arriba abajo, no se interfieren entre sí. En el caso particular de la banda de 2.4 GHz, tres de los cuatro AP mostrados no tienen habilitada esta banda, esto con el fin de evitar crear un entorno de interferencia que llegue a saturar la capacidad de los AP.

Para la banda de 5 GHz y 6 GHz, se observa un “@40”, que indica que el canal está configurado con un ancho de canal de 40 MHz. A pesar de este ancho de canal, los AP no se generan interferencia entre ellos.

En general, el diseño de todo el piso 4 sigue este principio para evitar generar un entorno de interferencia. Esto se puede revisar más detalladamente en las tablas de las ubicaciones de los AP.

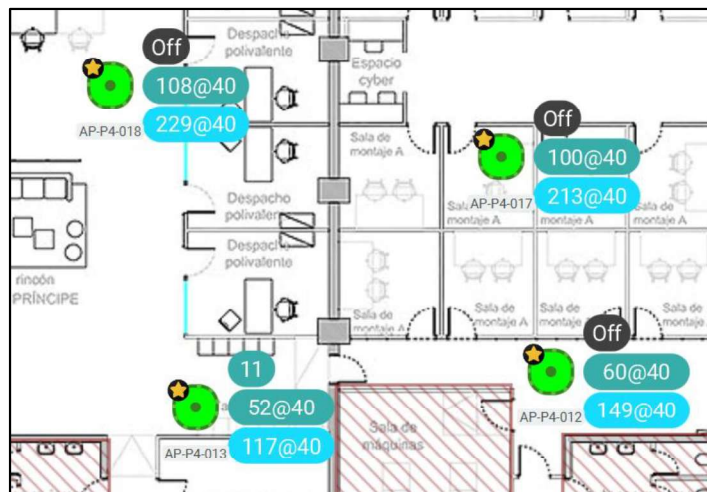


Figura 25. Superposición de AP en entorno simulado (Elaboración Propia).

Como se apreció en la simulación del piso 3, es posible dar cobertura a toda el área con un número mínimo de AP; sin embargo, esto no garantiza que todos nuestros usuarios se puedan conectar.

Partiendo de este punto, la mejor manera de ofrecer un mejor rendimiento inalámbrico a una red de alta densidad es distribuir múltiples access point y canales. Este enfoque requiere una planificación cuidadosa y un diseño que utilice access point adicionales para cubrir el área. Sin embargo, en lugar de añadir access point que cubran un área extensa, el tamaño de celda de cada punto de acceso debe reducirse para incluir solo la cantidad deseada de usuarios o un área muy pequeña [5, p. 100].

Continuando con el análisis de la red, ahora se considerarán las imágenes de la Tabla 18. En estas imágenes también se puede ver que la cobertura cubre todo el piso 4. La diferencia de este diseño con la simulación que se realizó al piso 3 es precisamente la incorporación de más AP, configurados en diferentes canales, pero con una potencia de transmisión más baja.

A diferencia de la simulación en el piso 3 que se usaron 23 dB en ambas bandas, para el piso 4 se observa que se utilizaron las potencias de 14 dB y 7 dB para las bandas de 2.4 y 5 GHz, respectivamente. Con estas configuraciones se garantiza cobertura en todo el piso, y al mismo tiempo, se ofrece a los usuarios una mayor posibilidad de acceder al medio y disfrutar de una mejor experiencia de red.

Como se hacía mención en el capítulo 2.2.3, hay ocasiones en las que el dispositivo menos capaz puede ser el más importante. A continuación, se presenta la cobertura para un dispositivo móvil, es decir, la cobertura que perciben dispositivos como los smartphones o

handheld en comparación con la que percibe una laptop. Para obtener los mapas de cobertura de un dispositivo móvil, el programa de simulación resta 10 dBm a los resultados de la Tabla 18.

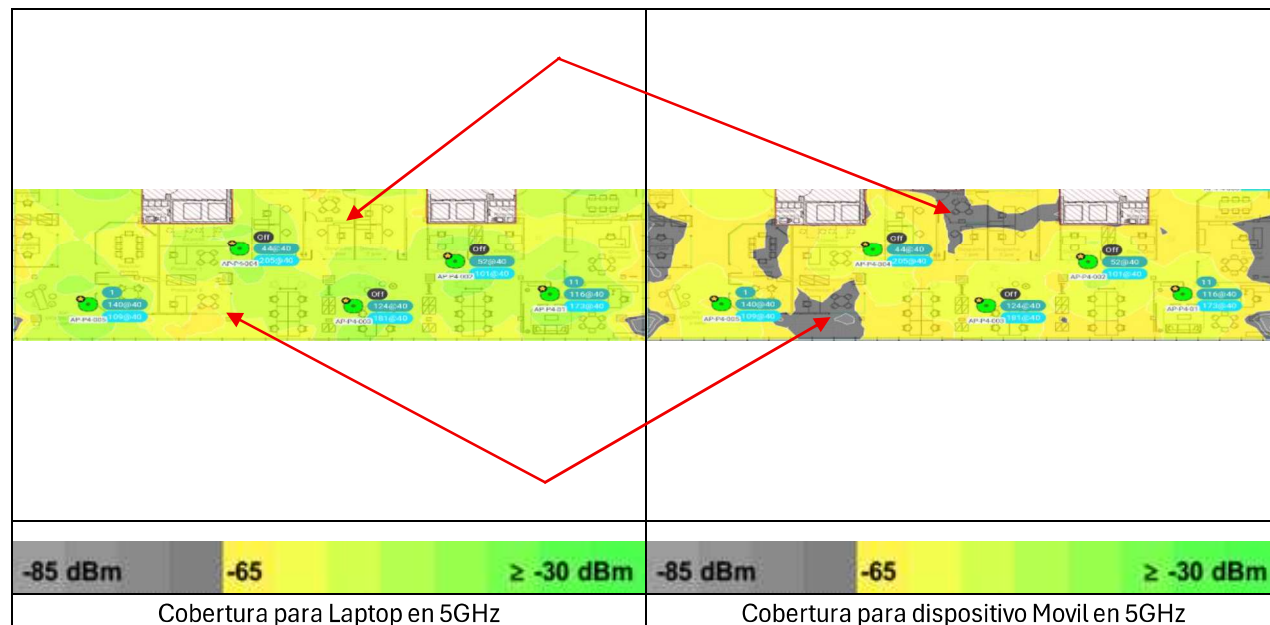


Tabla 24. Comparación de coberturas para diferentes dispositivos (Elaboración Propia).

La Tabla 24 es un extracto de cómo se ve la cobertura en 5 GHz en una zona determinada del piso 4. Lo que se observa se puede interpretar de la siguiente manera: una laptop tendrá mejor área de cobertura que un dispositivo móvil; para el dispositivo móvil, en las zonas grises ya no habrá cobertura y su conexión se volverá inestable.

Por eso, al momento de diseñar siempre es importante tener en cuenta los dispositivos de interés. Es clave identificar cuáles dispositivos son los más críticos y cuáles son los menos avanzados tecnológicamente. En la comparativa se observan huecos de cobertura para los dispositivos móviles; en este caso, si se hubiera diseñado para el dispositivo menos capaz, se habría tenido que subir la potencia o bien agregar más AP para compensar la demanda de cobertura.

Sea cual sea el dispositivo, se debe asegurar de que la red cumpla con los requisitos mínimos para este equipo. En la mayoría de los casos, los fabricantes de dispositivos proporcionan especificaciones o requisitos para un rendimiento óptimo [30].

En nuestro caso, los smartphones no son los dispositivos más importantes, ya que en el entorno empresarial las laptops suelen ser los equipos de trabajo crítico. Sin embargo, esta consideración debe tenerse en cuenta en otros casos, como almacenes, donde los dispositivos más críticos pueden ser escáneres que operen con el estándar WiFi 3 y cuya tarjeta de red sea tenga menor umbral de recepción que el resto de los equipos.

Continuando con la revisión de las mejores prácticas, al asignar un canal a cada AP en un diseño también se debe prestar atención a cómo se reutilizan los canales en un área. Los AP que usan el mismo canal no solo pueden interferir entre sí si sus celdas son adyacentes y se tocan, sino que también pueden interferir si no están lo suficientemente separadas [5, p. 97].

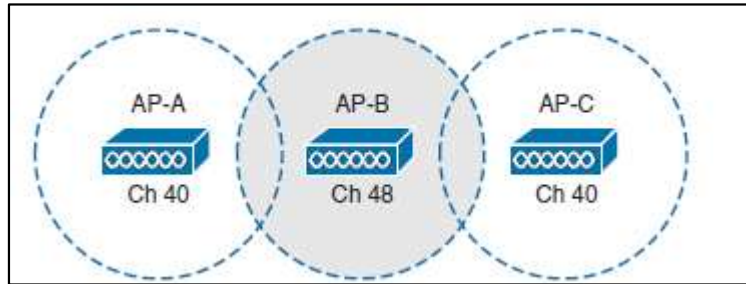


Figura 26. Ejemplo de repetición de canal [5, p. 97].

En la Figura 26 se muestra el ejemplo como el AP-A y el AP-C están configurados ambos en el canal 40. Las líneas punteadas hacen referencia a los límites de la celda a -67 dBm. Como se puede observar, las coberturas de ambos AP no se superponen sobre sí; sin embargo, puede darse el caso de que no se configuren las potencias correctas y ambas coberturas terminen superponiéndose, creando un entorno de interferencia. La buena práctica indica que debe existir una diferencia de potencia de -19 dB en los límites de cobertura de los AP que estén configurados en el mismo canal.

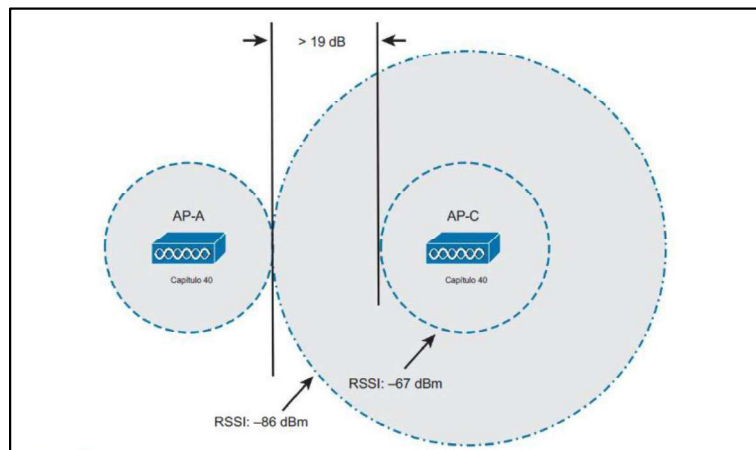


Figura 27. Diferencia de potencia entre áreas de coberturas [5, p. 98].

De la Figura 27 se observa que el límite de cobertura del AP-A se encuentra a -67 dBm. Para que este no tenga interferencia con el AP-C, su señal en ese mismo punto debe ser de al menos -86 dBm, lo que provoca una diferencia de 19 dB.

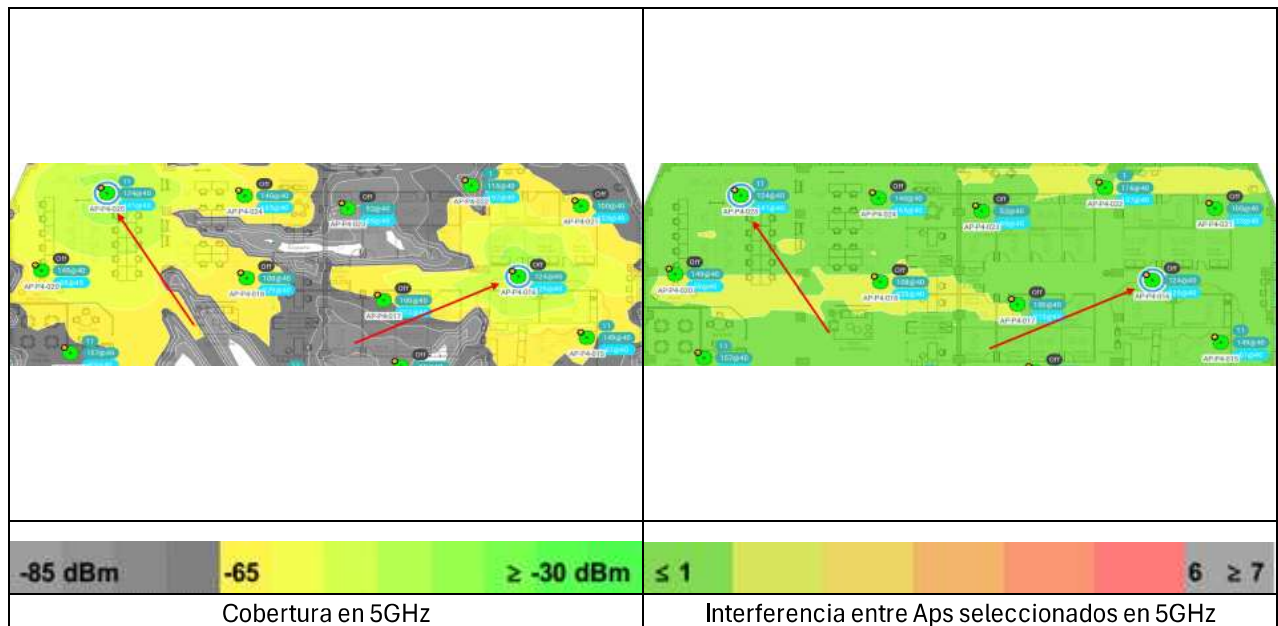


Tabla 25. Reuso de canales (Elaboración Propia).

Para ejemplificar lo anterior, se tomarán los AP seleccionados de la Tabla 25. Del lado izquierdo, la imagen solo toma en cuenta la simulación de los AP seleccionados, ya que ambos se encuentran configurados en el canal 124 para la banda de 5 GHz. En medio de ellos se observa un hueco de cobertura, representado por una zona gris. Justo donde termina el contorno amarillo se encuentra el límite de -67 dBm.

Del lado derecho se identifica la interferencia que existe entre estos dos AP, donde las áreas verdes representan zonas libres de interferencia, mientras que las zonas amarillas indican regiones donde la diferencia de potencia menor a los 19 dB.

La Tabla 26 muestra la comparativa en caso de que se aumente a 21 dBm la potencia de transmisión los dos AP seleccionados. De lado izquierdo es evidente cómo aumenta considerablemente el área de cobertura; del lado derecho, también se observa cómo la interferencia entre estos dos AP se incrementa en más zonas del área de cobertura.

Con esta comparativa se explica de manera visual que, si los AP tienen una potencia de transmisión alta, el reuso de frecuencias será más complejo al abarcar áreas más grandes de cobertura. Además, esto afecta directamente a la interferencia en el medio y, de una manera menos evidente, el roaming dentro del área de cobertura.

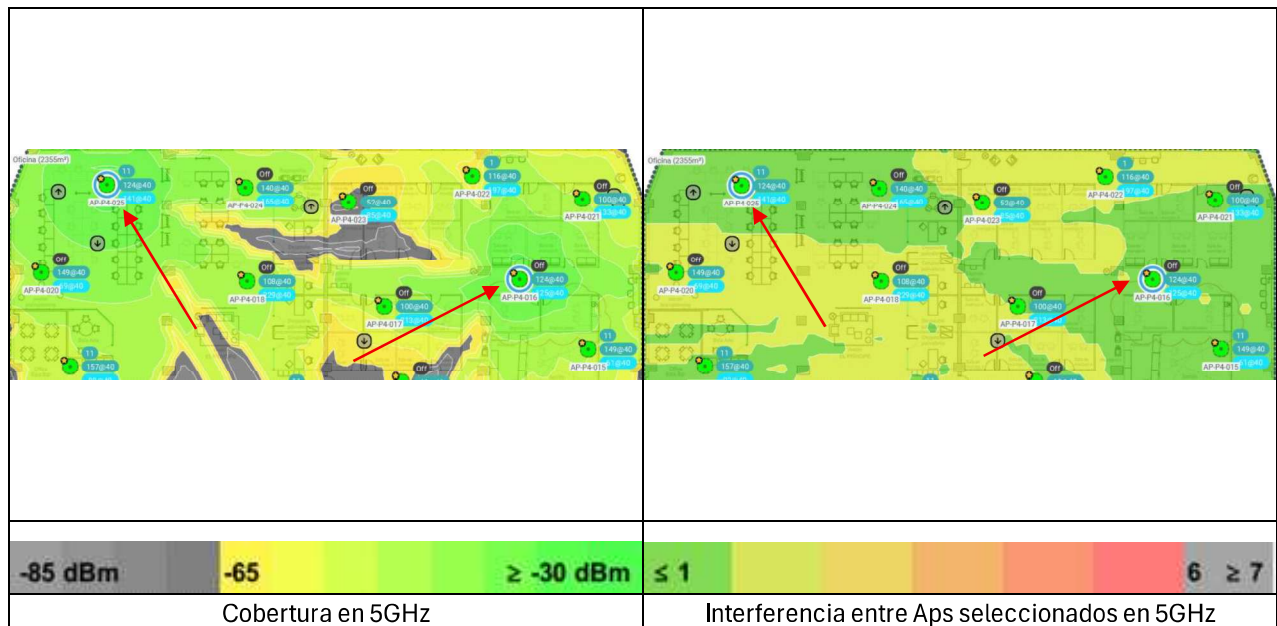


Tabla 26. Reusó de canales, aumentando la potencia de AP seleccionados (Elaboración Propia).

5.1 Consideraciones de pisos adyacentes

Sin embargo, a partir este análisis surgen las siguientes preguntas: ¿qué pasa con los AP del piso 3 y del piso 5? ¿Estos AP y su configuración afectan al diseño? ¿Se deben considerar estos parámetros para el diseño? La respuesta es que los AP de los pisos adyacentes afectan directamente el desempeño de la red y definitivamente deben considerarse para realizar un diseño robusto, capaz de soportar los requerimientos del cliente y, a su vez, sortear las malas prácticas o configuraciones que puedan existir en redes vecinas.

Para estos casos, las buenas prácticas recomiendan realizar un layer 1 site survey. Se trata de un site survey pasivo que tiene como objetivo detectar la actividad de RF en las instalaciones. Este estudio siempre debe realizarse, ya que es probable que permita descubrir dispositivos WiFi y no WiFi que compitan por el espectro. Esto facilita detectar fuentes de interferencia de forma temprana y abordar el problema antes de que afecte el diseño. Con este estudio se pueden identificar las fuentes de interferencia y, en algunos casos, eliminarlas o al menos tenerlas en cuenta en el plan de asignación de canales y en las proyecciones de rendimiento [5, p. 38].

En este caso, por esa razón se realizaron las simulaciones tanto del piso 3 como del piso 5, con el objetivo de generar un caso de estudio más cercano a un entorno real, donde se pudieran observar los comportamientos de los AP en los tres pisos del edificio y así contar con un mayor contexto del espectro de RF.

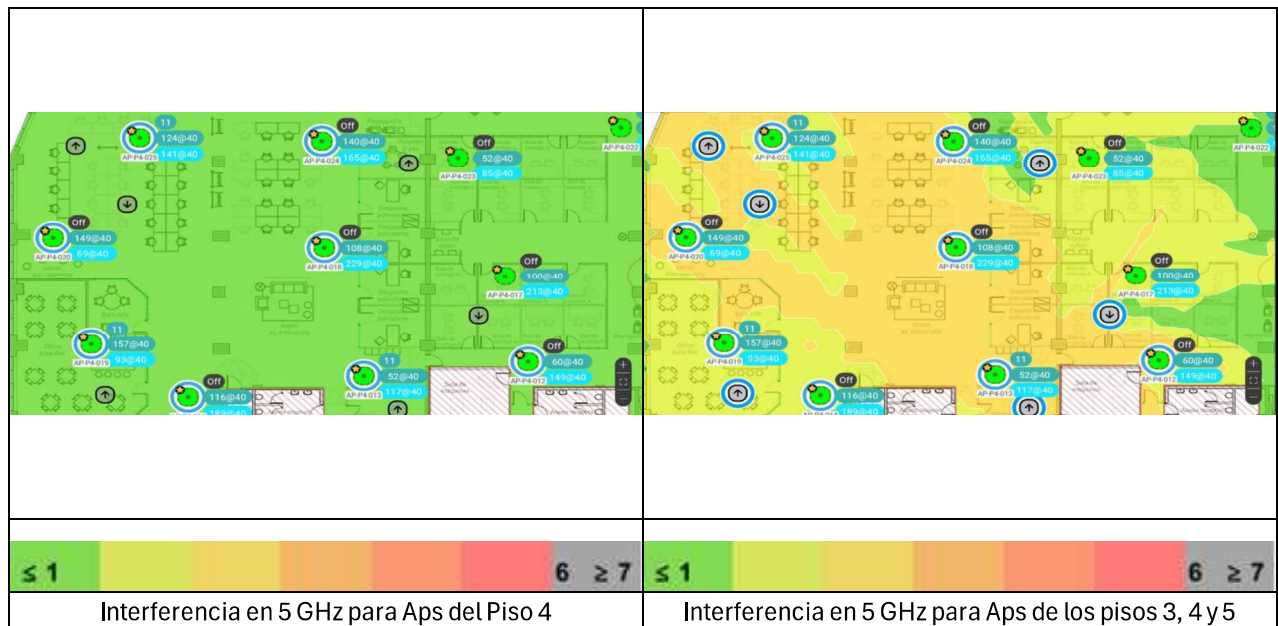


Tabla 27. Interferencias de AP Aisladas y conjuntas (Elaboración Propia).

Para hacer más evidente este punto, la Tabla 27 muestra en el lado izquierdo cómo se ve la interferencia solo si se consideran los AP del piso 4. El hecho de que toda el área se encuentre de color verde indica que no existe interferencia. En un entorno ideal, los demás pisos no tendrían que afectar nuestro diseño.

La imagen del lado derecho muestra un entorno real, donde los AP que tienen flechas arriba y abajo corresponden a los AP de los pisos 5 y 3, respectivamente. En un entorno real se deben considerar todas las señales que puedan interferir con el diseño. Por esta razón, en la mayoría de los casos se recomienda realizar un site survey pasivo de Layer 1, con el fin de comprobar el entorno real de RF del sitio.

Para cerrar la parte de la comparación de las mejores prácticas, se abordará la densidad de clientes.

La densidad de clientes se refiere esencialmente a la cantidad de dispositivos por punto de acceso. Cuando un solo cliente está asociado a un AP, puede aprovechar todo el data rate disponible a través de este. A su vez, ningún otro dispositivo puede competir por el tiempo-aire en el canal del AP. A medida que más clientes se conectan a un AP, todos deben competir por el tiempo-aire disponible en el canal. Cuanto más activos sean los clientes en el canal, menor será el tiempo de transmisión disponible para cada uno. El resultado final es un rendimiento deficiente y una experiencia de usuario insatisfactoria.

La buena práctica indica que un buen diseño inalámbrico debe proporcionar cobertura de RF donde sea necesaria. También debe considerar la densidad de clientes, de modo que cada AP pueda soportar la capacidad deseada. En otras palabras, el diseño debe

proporcionar una cantidad adecuada de AP para que la población de usuarios se distribuya entre ellos, ofreciendo así mayor capacidad por punto de acceso [5, p. 15].

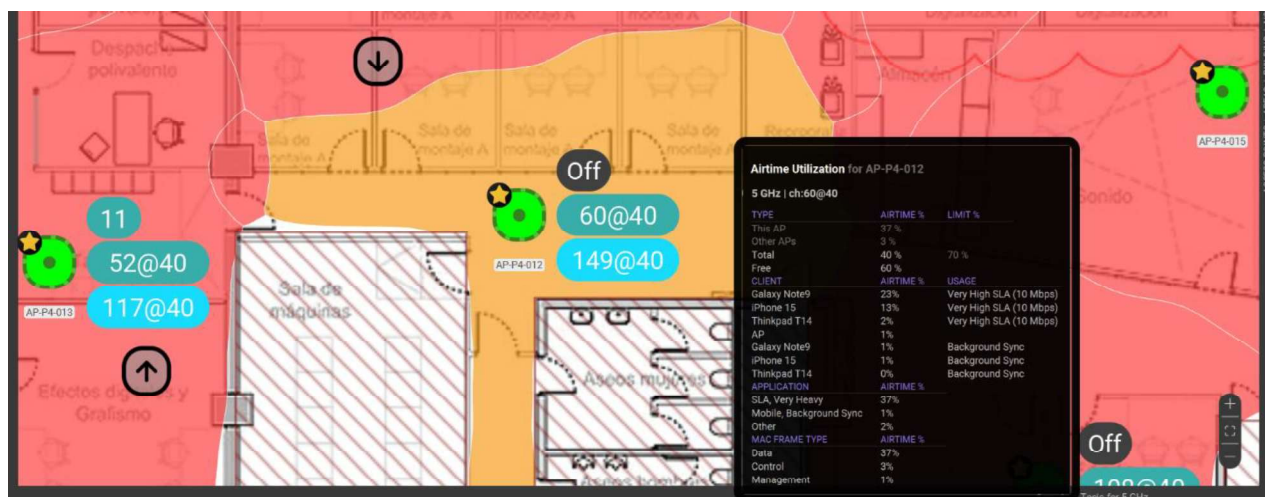


Figura 28. Utilización de tiempo-aire del AP-P4-12 en la banda de 5 GHz (Elaboración Propia).

En la Figura 28 se observa el porcentaje de tiempo-aire que maneja el AP-P4-12 (zona naranja). En este se ve que tiene un porcentaje del 40%, del cual 37% del tiempo-aire está siendo utilizado por este AP y el 3% restante es utilizado por otros AP. En otras palabras, la imagen indica que el canal 60 de la banda de 5 GHz, ubicado en la zona del AP-P4-12 está siendo utilizado en un 37% por dispositivos finales asociados al AP-P4-12 mientras que el 3% restante lo utilizan otros dispositivos finales asociados a otros AP en el mismo canal. Esto significa que existe un 60% del tiempo-aire disponible antes de que el canal empiece a congestionarse.

Se debe entender que el tiempo-aire disponible se basa en el canal y no en el AP, ya que todos los AP buscan transmitir en el mismo canal, debido a que es un medio compartido. Esto significa que mientras menos AP estén configurados en un mismo canal, los dispositivos finales tendrán mayor probabilidad que un solo AP pueda transmitir sus datos con éxito.

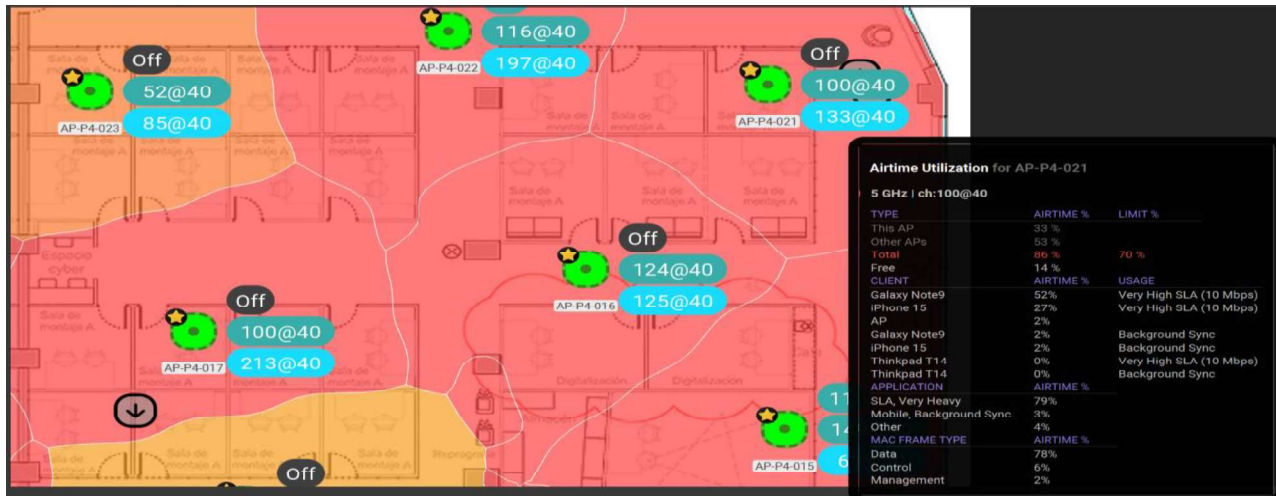


Figura 29. Utilización de tiempo-aire del AP-P4-21 en la banda de 5 GHz (Elaboración Propia).

En la Figura 29 se observa el porcentaje de tiempo-aire que maneja el AP-P4-21 (zona roja superior derecha) en la banda de 5 GHz. A diferencia de la figura anterior, lo primero que se observa es que el tiempo-aire tiene un 86% de utilización, de cual 33% corresponde a este AP y 53% al resto de AP. Esto quiere decir que el tiempo-aire está siendo utilizado en mayor medida por dispositivos asociados a otros AP que por los dispositivos del propio AP-P4-21, lo cual genera congestión en el canal.

Específicamente, en este caso particular, se observa como agentes externos, como los AP de pisos adyacentes, pueden tener un gran impacto en la red. Por otro lado, si no se hace una correcta asignación de canales y potencias, también se podría generar una congestión del canal.

En palabras sencillas, al tener un tiempo-aire del 86%, los tiempos para que un usuario pueda transmitir aumentan considerablemente, nuevamente debido al proceso de la ventana de contención, lo que da como resultado mayor latencia, pérdida de paquetes y un bajo rendimiento para el usuario final.

Por esta razón, una buena práctica para instalaciones de alta densidad es desactivar algunas de las radios de 2.4 GHz, con el fin de minimizar la interferencia cocanal y maximizar el rendimiento total del sistema [31].

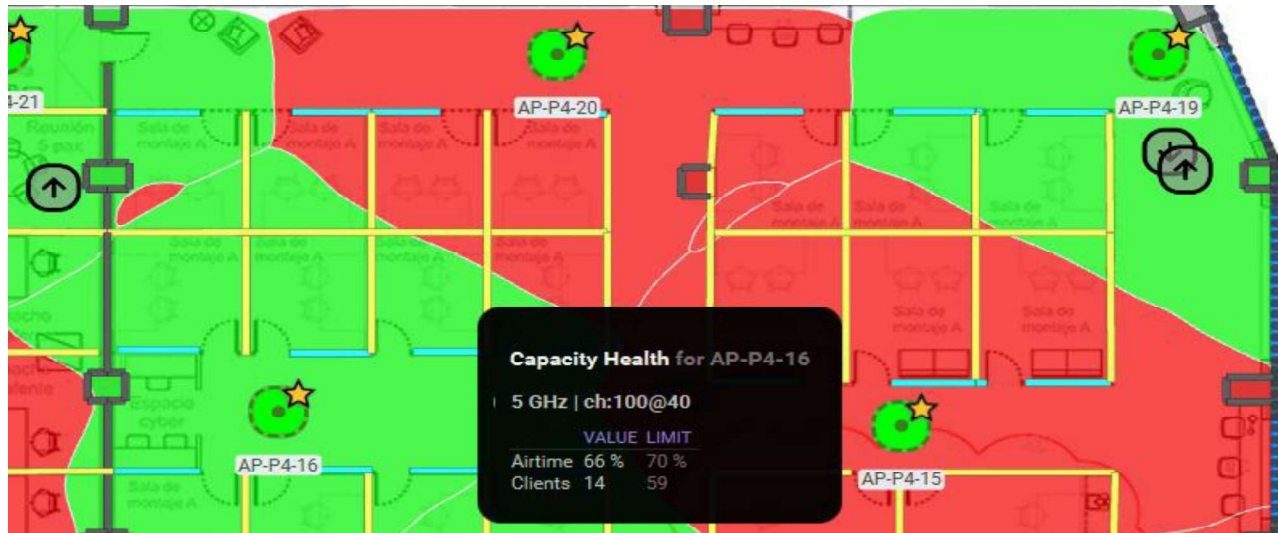


Figura 30. Estado de capacidad para AP-P4-16 en banda de 5 GHz (Elaboración Propia).

La Figura 30 muestra el estado de capacidad, que no es más que el porcentaje de tiempo-aire y de densidad de clientes conectados a un AP. Si los valores se encuentran por debajo de los valores límite, la zona que cubre de cobertura de ese AP se considera eficiente.

Al visualizar nuevamente las imágenes de la Tabla 23, ahora se puede entender por qué estas aparecen en rojo. Puede ser que no estén los 40 clientes estimados conectados al AP; sin embargo, el hecho de que el tiempo-aire se encuentre encima del umbral del 70% significa que hay más AP en el mismo canal compitiendo para que los clientes conectados a ellos puedan transmitir, tanto AP del piso 4 como AP de los pisos adyacentes.

Además, se debe considerar que el programa trata de distribuir a los dispositivos finales de manera uniforme por todo el piso. Sin embargo, en un entorno real los dispositivos se desplazan y no siempre están consumiendo los 10 Mbps que se estimaron, por lo que en un escenario real este comportamiento puede variar. Aun así, al momento de diseñar siempre se debe considerar el peor caso, razón por la cual se realizaron todas las consideraciones previas con el fin de estresar la red.

5.2 Posibles mejoras y ajustes

Una vez evaluada la simulación, se ha demostrado se ha demostrado que el área cuenta con una cobertura del cien por ciento. De igual manera, el mapa de calor del roaming es eficiente para ambas bandas.

En la banda de 2.4 GHz solo se habilitaron 8 AP para dar cobertura a todo el piso 4. Una posible mejora es evaluar si esos 8 AP son los más adecuados para abastecer todo el piso. Se debe recordar que solo se habilitaron 8 AP debido a la limitación de reuso de canales en esta banda y que, debido a que se simularon AP en los pisos contiguos, la

interferencia entre canales es elevada, lo que da como resultado que el tiempo-aire se vea congestionado.

En ese sentido, si dependiera de la administración de los AP en los pisos contiguos, se deberían considerar los siguientes ajustes:

- Optar por deshabilitar la banda de 2.4 GHz, con la finalidad de no generar más interferencia en el sistema
- Si no es posible deshabilitar la banda de 2.4 GHz, habilitar el menor número de AP.
- En la banda de 2.4 GHz, priorizar el área de cobertura en lugar de la capacidad.
- Considerar que solo existen tres canales disponibles, por lo que el reuso de frecuencias se verá limitado por las potencias que se asignen.

Con estas consideraciones se lograría un entorno con menor interferencia, lo que permitiría que el tiempo-aire se descongestione.

En el caso de que la banda de 2.4 GHz pueda deshabilitarse, la capacidad de usuarios que esta soportaba pasaría a ser carga de la banda de 5 GHz. En general, para cualquier diseño en el que se deshabilite la banda de 2.4 GHz, sería necesario aumentar el número de AP para que la red sea capaz de gestionar los recursos de RF sin congestionar los canales.

Por otro lado, una mejora que podría ayudar considerablemente es utilizar la banda de 6 GHz. El estudio no se centró mucho en esta banda debido a que, a la fecha de realización de esta tesis, en México todavía no existen muchos dispositivos finales que la soporten. A su vez, los access point que permiten operar en esta banda fueron lanzados al mercado apenas a mediados de 2024.

Si bien el IFT determinó en febrero de 2023 [32] cuales serían los lineamientos para la utilización de esta parte del espectro radioeléctrico, en la actualidad la mayoría de los dispositivos finales solo son capaces de utilizar hasta la banda de 5 GHz.

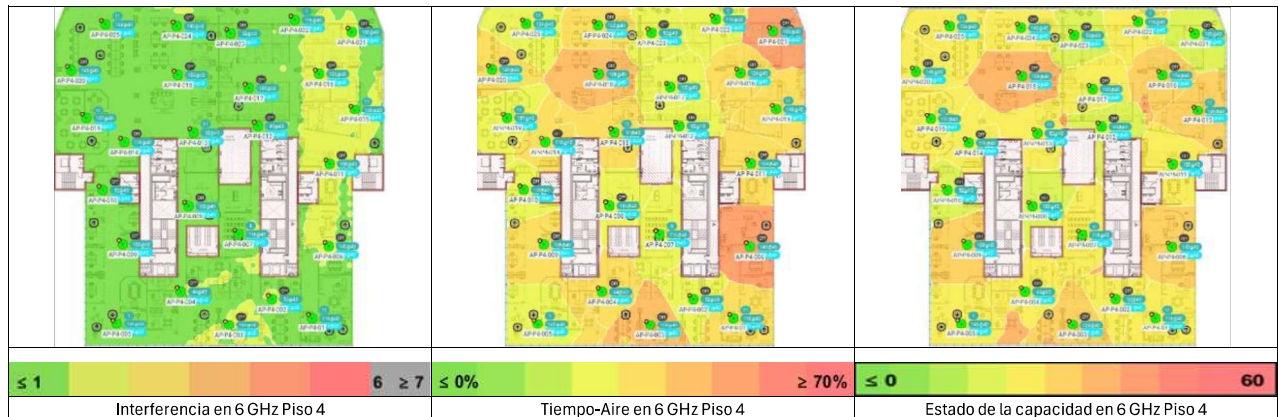


Tabla 28. Mapas de interés en 6 GHz (Elaboración Propia).

La Tabla 28 hace referencia a los mapas de calor que permiten observar cómo se comportaría la banda de 6 GHz en el entorno simulado. Recordando que en los pisos contiguos no se configuró esta banda, lo cual se hizo a propósito, ya que, como se mencionó anteriormente, todavía no existe una demanda en el mercado que justifique una actualización tecnológica.

Sin embargo, en las figuras se nota que la interferencia entre canales es prácticamente nula. En cuanto a la utilización de tiempo-aire, se observa que si existen zonas que pueden llegar a congestionarse, pero no se comparan con la congestión que se observaba en las bandas de 2.4 y de 5 GHz. Además, ayuda mucho el hecho que no exista interferencia entre canales, por lo que las congestiones disminuyen considerablemente.

No obstante, aunque se tengan resultados favorables, se debe recordar que para la tesis el único dispositivo de la lista que soporta la banda de 6 GHz es el iPhone. Por esta razón, es importante saber con qué dispositivos se trabajará, ya que no tendría sentido utilizar la banda de 6 GHz si no hay dispositivos que puedan aprovecharla.

En general, la mejora evidente que se utilizará en los próximos años será hacer uso de esta banda. Sin embargo, siempre se deben considerar todos los parámetros analizados a lo largo del documento, además de tener en cuenta que mientras mayor sea la frecuencia de transmisión, menor será el radio de cobertura. Por lo tanto, este aspecto también debe considerarse al momento del diseño.

Si todos estos factores ya han sido considerados, es un buen momento para comenzar a utilizar esta banda, ya que todavía no se encuentra saturada como las otras bandas disponibles.

Capítulo 6. Conclusiones.

6.1 Conclusiones de esta tesis

La primera conclusión es evidenciar que el parámetro de mayor interés para una red inalámbrica, especialmente en escenarios de alta densidad, es el tiempo-aire. El rendimiento que experimentan los usuarios está directamente relacionado con este parámetro. Por un lado, si el porcentaje de tiempo-aire dentro de una celda de cobertura es bajo, los usuarios conectados al AP tendrán un buen rendimiento. Por otro lado, si los usuarios que están conectados a un AP cuya celda presenta un alto porcentaje de tiempo-aire utilizado, el rendimiento será menor. Esto se refleja directamente en mayores tiempos de espera para transmitir.

Lo anterior conduce a la segunda conclusión: si el tiempo-aire es el parámetro principal para el diseño, se debe evitar su saturación. En este sentido, resulta más conveniente agregar más AP al área que se desea cubrir en lugar de aumentar la potencia de transmisión con una menor cantidad de AP. Al aumentar el número de AP incrementa igualmente la cantidad de canales disponibles, y si se realiza una planeación correcta del reuso de frecuencias, es posible obtener una cobertura eficiente con menores niveles de interferencias, aumentando así las probabilidades de contar con un entorno menos congestionado.

Como se observó en el análisis de la utilización del tiempo-aire, el aire es un medio compartido, por lo que pueden existir múltiples AP utilizando el mismo canal, lo que impacta directamente en el rendimiento de los dispositivos finales. Además, se debe considerar que no solo los AP bajo nuestra administración influyen en el porcentaje de utilización del canal, sino que también los AP ubicados en los pisos adyacentes. Esta es una de las razones por las que la banda de 2.4 GHz se encuentra tan saturada, ya que solo existen tres canales sin interferencia cocanal configurables. A esto se le suma la presencia de otros dispositivos que operan en la banda ISM, que se encuentran transmitiendo en el mismo espectro. Como resultado, la utilización del tiempo-aire alcanza valores elevados, lo que se traduce en un menor rendimiento para los dispositivos finales.

Por lo anterior, se recomienda realizar un site survey Layer 1 o site survey pasivo incluso antes de realizar la simulación del entorno. Este primer estudio permite identificar la presencia de AP en los pisos adyacentes y otras posibles fuentes de interferencia. Con esta información es posible tomar decisiones más acertadas sobre la asignación de canales y potencias de transmisión en los AP que se propondrán para el diseño, siempre con el objetivo de minimizar las interferencias y evitar la saturación de tiempo-aire.

Como tercera conclusión, es importante enfatizar que, aunque un AP puede indicar en su hoja de especificaciones que soporta más de 2000 conexiones en sus diferentes bandas, el parámetro que nos va a delimitar cuántos dispositivos podemos conectar a un AP dependerá directamente del throughput requerido por la aplicación principal para la cual se diseñó la red.

Recordando que para el desarrollo de la tesis la aplicación principal considera un throughput de 10 Mbps por dispositivo, se determinó que, en la banda de 5 GHz y utilizando un canal de 40 MHz, es posible soportar aproximadamente 40 dispositivos finales por AP. Sin embargo, si se requiere diseñar para una aplicación con mayores exigencias de throughput, o bien para un estándar WiFi más reciente, la Figura 16 constituye una referencia adecuada. El procedimiento de cálculo correspondiente se desarrolla en el capítulo 3.1.2

La cuarta conclusión hace referencia a las características de los dispositivos finales. En primer lugar, se debe identificar el estándar WiFi que soportan, ya que este influye en el data rate máximo alcanzable. En segundo lugar, es importante verificar la cantidad de antenas o spatial streams soportados, dado a que este parámetro impacta directamente en la capacidad y el rendimiento del enlace inalámbrico.

Por último, se debe considerar el tipo de dispositivo, ya sea una laptop, un celular, una handheld, etc. Como se analizó a lo largo de la tesis, el dispositivo menos capaz puede convertirse en el factor más importante del diseño, ya que esto afecta directamente al dimensionamiento de las celdas de cobertura y, en consecuencia, al rendimiento general de la red.

6.2 Limitaciones del estudio

Debido a que todo el documento se elaboró con base en simulaciones y estimaciones, no se cuenta con valores de un entorno real. Sin embargo, todas las consideraciones realizadas permiten presentar un escenario que se aproxima a un modelo real. Esto hace referencia, principalmente, a las interferencias y malas prácticas que se intentaron representar en los pisos 3 y 5.

Otro de los factores que no se puede recrear de forma completamente fidedigna es el comportamiento de las ondas en el edificio. Hasta el momento, el programa de simulación no es capaz de reproducir todos los efectos de propagación. Por lo que puede ser que en un entorno real, la cobertura medida sea diferente a la obtenida en el diseño simulado.

Se debe considerar que, generalmente, muchos access points incorporan algoritmos que les permite reconocerse entre sí y autorregular parámetros como los canales, potencias, anchos de canal. Esto se debe a que el entorno inalámbrico es altamente susceptible al cambio. Por ejemplo, puede ocurrir que en algún momento aparezca un nuevo dispositivo o red vecina que genere interferencias y obligue a los AP a ajustar sus configuraciones.

No obstante, en la mayoría de los casos, el administrador de red es quien debe definir los grados de libertad que tendrán estos algoritmos de auto regulación. Para el caso particular de esta tesis, estos algoritmos no fueron tomados en cuenta dentro de la simulación.

Finalmente, este caso de estudio se realizó específicamente para un entorno de alta densidad. Aunque la información presentada puede ser útil en otros contextos, se recomienda que, para entornos diferentes —como cobertura básica, red en malla, enlaces punto a punto o punto a multipunto— se consulte la bibliografía adicional que permita comprender mejor estos casos de uso. Asimismo, la tesis no profundiza en el diseño de la red cableada, la cual también debe considerarse en un entorno real.

Glosario

AP — Access Point (Punto de acceso inalámbrico)

APoS — Access Point on Stick (Método de medición de cobertura inalámbrica mediante un punto de acceso montado en trípode)

CSMA/CA — Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Protocolo de acceso al medio utilizado en redes WiFi)

dBm — Decibel-milliwatts (Unidad logarítmica utilizada para medir potencia de señal)

HE — High Efficiency (Clasificación del estándar WiFi 6 / 802.11ax)

MAC — Medium Access Control (Subcapa del modelo OSI encargada del acceso al medio)

MCS — Modulation and Coding Scheme (Esquema de modulación y codificación que determina la velocidad de transmisión)

MIMO — Multiple Input Multiple Output (Tecnología que permite transmitir múltiples flujos de datos mediante varias antenas)

Mbps — Megabits per second (Unidad de velocidad de transmisión de datos)

PHY — Physical Layer (Capa física del modelo OSI encargada de la transmisión de señales)

PTT — Push-to-Talk (Sistema de comunicación bidireccional usado en radios)

RF — Radio Frequency (Frecuencia de radio utilizada en comunicaciones inalámbricas)

RSSI — Received Signal Strength Indicator (Indicador de intensidad de señal recibida)

SNR — Signal-to-Noise Ratio (Relación señal-ruido)

SS — Spatial Stream (Flujo espacial de datos en sistemas MIMO)

VHT — Very High Throughput (Clasificación del estándar WiFi 5 / 802.11ac)

WiFi — Wireless Fidelity (Tecnología de redes inalámbricas basada en estándares IEEE 802.11)

WLAN — Wireless Local Area Network (Red de área local inalámbrica)

Referencias

- [1] J. Geier, *Wireless Networks First-step*, Indianapolis, IN, USA: Cisco Press, 2005, pp. 11-12.
- [2] CUAIEED, «Función senoidal, amplitud y longitud de onda,» UNAM, 2017. [En línea]. Available: https://uapas1.bunam.unam.mx/matematicas/funcion_senoidal_amplitud/.
- [3] D. Hucaby, *CCNA Wireless 200-355*, Indianapolis, IN, USA: Pearson Education, 2016.
- [4] J. Cañón, «Técnicas de modulación digital,» 3 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://jorgecanon.com/tecnicas-de-modulacion-digital/>.
- [5] J. Henry, *CCNP Enterprise Wireless Design ENWLSI 300-425 and Implementation ENWLSI 300-430 Official Cert Guide*, Hoboken, NJ, USA: Cisco Press, 2021.
- [6] IEEE, «The Evolution of Wi-Fi Technology and Standards,» IEEE SA, Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/>.
- [7] Ekahau, «How to Measure Wall Attenuation For Spotless Wi-Fi Network Designs,» Ekahau Inc, Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.ekahau.com/blog/how-to-measure-wall-attenuation-for-spotless-wi-fi-network-designs/>.
- [8] A. Garcia, «Disposición Técnica IFT-008-2015,» Instituto Federal de Telecomunicaciones, Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.ift.org.mx/node/20716>.
- [9] Ekahau, «Channel Planning Best Practices for Better Wi-Fi,» Ekahau Inc, Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.ekahau.com/blog/channel-planning-best-practices-for-better-wi-fi/>.
- [10] Cisco, «Overview on 802.11h, Transmit Power Control (TPC) and Dynamic Frequency Selection,» Cisco Systems Inc, Julio 2021. [En línea]. Available:

<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless-mobility/80211/200069-Overview-on-802-11h-Transmit-Power-Cont.html>.

- [11] F. A. Administration, «Terminal Doppler Weather Radar (TDWR),» FAA, Noviembre 2024. [En línea]. Available: https://www.faa.gov/air_traffic/weather/tdwr.
- [12] Ekahau, «Wi-Fi Capacity Requirements: Designing Wireless Networks for Device Density,» Ekahau Inc, Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.ekahau.com/blog/understanding-wi-fi-capacity-requirements/>.
- [13] T. Beacon, «Wi-Fi predictions from Cisco's Annual Internet Report,» Wi-Fi Alliance, Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.wi-fi.org/ko/beacon/the-beacon/wi-fi-predictions-from-ciscos-annual-internet-report>.
- [14] J. Jongerius, «Understanding Wi-Fi 4/5/6/6E/7 (802.11 n/ac/ax/be),» Wi is FI, Julio 2025. [En línea]. Available: <https://www.wiisfi.com/#overview>.
- [15] Lenovo, «ThinkPad T14 Gen 4 (14" Intel),» Lenovo Group, Ltd., [En línea]. Available: https://www.lenovo.com/mx/es/p/laptops/thinkpad/thinkpad-t/thinkpad-t14-gen-4-14-inch-intel/len101t0057?orgRef=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F&srsitid=AfmBOoor0RMcexRspGK90F-9dWDYIv7COFTaRXKV1vxYDIVhJunVhpCa#tech_specs.
- [16] Apple, «iPhone 15,» Apple Inc, 2023. [En línea]. Available: <https://www.apple.com/mx/iphone-15/specs/>.
- [17] Samsung, «El nuevo y súper poderoso Galaxy Note 9: Para los que lo quieren todo,» Samsung Electronics, Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://news.samsung.com/latin/el-nuevo-y-super-poderoso-galaxy-note-9-para-los-que-lo-quieren-todo>.
- [18] Ekahau, «Wi-Fi Design Best Practices [2024 Guide],» Ekahau Inc, Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.ekahau.com/blog/wi-fi-design-best-practices/>.
- [19] Cisco, «Cisco Catalyst 9164 Series Access Points Data Sheet,» Cisco Systems, Junio 2024. [En línea]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/catalyst-9164-series-access-points/catalyst-9164-series-access-points-ds.html>.

- [20] Meraki, «Approximating Maximum Clients per Access Point,» Cisco Systems, Enero 2024. [En línea]. Available: https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Approximating_Maximum_Clients_per_Access_Point.
- [21] mgonzalez, «Clients recommenden per AP,» Meraki, 10 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://community.meraki.com/t5/Wireless/Clients-recommenden-per-AP/td-p/187580#:~:text=Up%20to%2030%20is%20a,to%2035%20clients%20per%20AP..>
- [22] R. Chchi, «Wireless Access Point Maximum Users,» Cisco Inc., 03 11 2017. [En línea]. Available: <https://community.cisco.com/t5/wireless/wireless-access-point-maximum-users/td-p/3042360>.
- [23] BushBond, «How many devices can be connected to a single Access point?,» Hewlett Packard, 07 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://community.arubanetworks.com/discussion/how-many-devices-can-be-connected-to-a-single-access-point>.
- [24] Cisco, «Wireless LAN Design Guide For high-density client environments in higher education,» Cisco Systems Inc., 2017. [En línea]. Available: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/docs/education/cisco_wlan_design_guide.pdf.
- [25] F. Vergès, «MCS Index Table, Modulation and Coding Scheme Index 11n, 11ac, and 11ax,» [En línea]. Available: <https://mcsindex.com/>.
- [26] C. Lukaszewski, «VERY HIGH-DENSITY 802.11ac NETWORKS Theory Guide,» Aruba Networks, 2015.
- [27] Cisco, «Understand Site Survey Guidelines for WLAN Deployment,» Cisco Systems Inc, Noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/116057-site-survey-guidelines-wlan-00.html>.
- [28] Cisco, «Troubleshoot and Debug VoIP Calls,» Cisco Systems Inc, Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/h323/14081-voip-debugcalls.html>.

- [29] CNDH, «NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-030-SSA3-2013,» CNDH, Septiembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.cndh.org.mx/DocTR/2016/JUR/A70/01/JUR-20170331-NOR03.pdf>.
- [30] Ekahau, «Designing For the Least Capable, Most Important Device,» Ekahau Inc, Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.ekahau.com/watch/on-demand-designing-for-the-least-capable-most-important-device/>.
- [31] Ekahau, «Wi-Fi Capacity Planning and the Importance of Balancing between 2.4GHz and 5GHz,» Ekahau Inc, Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.ekahau.com/blog/wi-fi-capacity-planning-importance-balancing-2-4ghz-5ghz/>.
- [32] IFT, «EL PLENO DEL IFT CLASIFICA LA BANDA DE 5925-6425 MHZ COMO ESPECTRO LIBRE,» Instituto Federal de Telecomunicaciones, Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.ift.org.mx/comunicacion-y-medios/comunicados-ift/es/el-pleno-del-ift-clasifica-la-banda-de-5925-6425-mhz-como-espectro-libre-comunicado-132023-16-de>.
- [33] R. L. Haupt, Wireless communications systems. An introduction, IEEE Press, 2020.
- [34] C. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, US: Bell System Technical Journal, 1948.
- [35] Cisco, «Troubleshoot Wireless Speed Issues,» Cisco Systems Inc, Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless/wireless-lan-controller-software/220877-troubleshoot-wireless-speed-issues.html>.
- [36] Arunkumar, «What is the relationship between data rate, SNR, and RSSI?,» Hewlett Packard, Julio 2014. [En línea]. Available: <https://community.arubanetworks.com/community-home/librarydocuments/viewdocument?DocumentKey=4d1e7eb0-90a0-4208-9413-b7ea7ac8bd6e&CommunityKey=39a6bdf4-2376-46f9-853a-49420d2d0caa&tab=librarydocuments>.
- [37] H. David, CCNA WIRELESS 200-355. Official Cert Guide, Indianapolis: Cisco Press, 2016.

- [38] H. Juniper, «Maximum Devices and WLANs per AP?,» HPE Juniper Networking, Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.mist.com/documentation/maximum-devices-and-wlans-per-ap/>.
- [39] Ubiquiti, «The WiFi Industry Standard,» Ubiquiti, 2025. [En línea]. Available: <https://ui.com/us/en/wifi/flagship>.
- [40] F. Vergès, «MCS Index Table,» SemFio Networks, 2023. [En línea]. Available: <https://mcsindex.net/>.
- [41] Ekahau, «What Makes Wi-Fi “Good”? 10 Key Performance Factors,» Ekahau Inc, Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.ekahau.com/blog/what-makes-wi-fi-good-10-key-performance-factors/>.