

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA TELEMÁTICA



Trabajo Fin de Grado

EFEECTO DEL ANCHO DE BANDA DE LOS CANALES EN
REDES IEEE 802.11

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Alba Gaona Arévalo

Tutor: Iván Marsá Maestre

Cotutor: Marino Tejedor Romero

2022

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Telemática

Trabajo Fin de Grado

EFFECTO DEL ANCHO DE BANDA DE LOS CANALES EN
REDES IEEE 802.11

Autor: Alba Gaona Arévalo

Tutor: Iván Marsá Maestre

Cotutor: Marino Tejedor Romero

TRIBUNAL:

Presidente: Diego López Pajares

Vocal 1º: José Manuel Arco

Vocal 2º: Iván Marsá Maestre

FECHA: 14 de julio de 2022

*“Por muy alta que sea una montaña,
siempre hay un camino hasta la cima”*

Agradecimientos

En primer lugar, a mi familia, sobre todo a mis padres y a mis hermanos, gracias por el apoyo incondicional que me han dado siempre. A mis abuelos, gracias por no soltarme de la mano nunca y por confiar en mí más que yo misma. Soy quien soy gracias a vosotros. Nunca olvidéis que sois mi motor.

En segundo lugar, quiero dar las gracias a mi tutor, por guiarme y acompañarme en este camino.

Por último, agradecer a la Universidad de Alcalá por todos estos años que he logrado superar gracias a sus profesionales y a la gente excepcional que he conocido a lo largo de los cursos.

Índice de contenidos

Índice de tablas	12
Índice de figuras	13
Resumen	15
Abstract	16
Introducción.....	17
Objetivos	18
Objetivo General	18
Objetivos específicos.....	18
<i>Channel bonding</i> en redes IEEE 802.11	19
Introducción	19
Redes 802.11	21
<i>Channel bonding</i>	25
Problemas del estándar	26
El estándar 802.11 y los desafíos actuales	27
Aumento del tráfico	27
Menor ancho de banda	27
Menor confiabilidad.....	27
Agregación de datos en múltiples bandas (<i>channel bonding</i>):	28
<i>Channel bonding</i> en redes 802.11	28
Cálculo de la interferencia entre canales adyacentes	32
Canales de 20 MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz.	32
Canales de 20 MHz en la banda de frecuencias de 5 GHz	35
Canales de 40 MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz	36
Canales de 40 MHz en la banda de frecuencias de 5 GHz	40

Canales de 20 y 40 MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz.....	42
Máscara espectral de transmisión.....	46
Canal de 20 MHz	46
Canal de 40 MHz	46
Metodología.....	49
Tipo de investigación	49
Datos de partida.....	49
Materiales.....	49
Escenarios	49
Fases del proyecto	51
Fase 1: Revisión bibliográfica	51
Fase 2: Puesta a punto de los equipos	51
Fase 3: Términos teóricos y estado de la cuestión.....	51
Fase 4: Ensayos y recolección de datos	51
Fase 5: Análisis y presentación de los resultados.....	52
Cronograma.....	53
Resultados	54
Rendimientos UP.....	55
Rendimientos Down	58
Evaluación de los resultados	61
Conclusiones.....	62
Pliego de condiciones.....	63
Material hardware:	63
Material software:	63
Actividades realizadas:	64
Presupuesto.....	65

Costes asociados al software:.....	65
Costes asociados al hardware.....	65
Costes de implementación	65
Bibliografía.....	67

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de interferencias resultante de canales 20 MHz en la banda de 2,4 GHz	34
Tabla 2. Matriz de interferencias resultante de canales 40 MHz en la banda de 2,4 GHz	39
Tabla 3. Matriz de interferencias de canales de 40 MHz en bandas de frecuencia de 5 GHz	41
Tabla 4. Coeficientes para canales de 20 y 40 MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz	43
Tabla 5. Resultados de coeficientes de correlación para señal de canal 20 MHz interfiere en uno de 40 MHz.....	45
Tabla 6. Partida de costes asociados al proceso de documentación	65
Tabla 7. Partida de costes asociados al proceso de redacción de memoria del proyecto	66
Tabla 8. Partida de costes asociados a la simulaciones, cálculos y desarrollo de los scripts	66

Índice de figuras

Figura 1. Representación gráfica de la posición de los canales de una red 802.11	17
Figura 2. Representación gráfica de channel bonding con aumento de ancho de banda	25
Figura 3. Gráfico de amplitud de las señales de cada canal y la separación entre estos.	32
Figura 4. Comportamiento de los canales de 40MHz en la banda de frecuencias de 2'4 GHz	36
Figura 5. Comportamiento de los canales de 40MHz en la banda de frecuencias de 5 GHz	40
Figura 6. Representación gráfica de la mascara espectral de transmision para un canal de 20 MHz.....	46
Figura 7. Representación gráfica de la mascara espectral de transmisión para un canal de 20 MHz a 40 MHz	46
Figura 8. Máscara espectral de transmisión de los canales de 40 MHz aplicado en el presente trabajo	47
Figura 9. Perfil de rendimiento channel bonding en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 1, b) escenario 2, c) escenario 3, d) escenario 4	55
Figura 10. Perfil de rendimiento channel bonding en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 5, b) escenario 6, c) escenario 7, d) escenario 8	56
Figura 11. Perfil de rendimiento channel bonding en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 9, b) escenario 10, c) escenario 11, d) escenario 12	57
Figura 12. Perfil de rendimiento channel bonding en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 1, b) escenario 2, c) escenario 3, d) escenario 4	58
Figura 13. Perfil de rendimiento channel bonding en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 5, b) escenario 6, c) escenario 7, d) escenario 8	59
Figura 14. Perfil de rendimiento channel bonding en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 9, b) escenario 10, c) escenario 11, d) escenario 12	60

Resumen

El principal propósito de este trabajo es llevar a cabo un estudio del rendimiento de los canales de la red 802.11 con señales de 20 y 40 MHz, mediante el uso de *channel bonding*.

Con lo anterior se pretende identificar la mejor configuración para la combinación de canales en la que se pueda mantener una alta velocidad al tiempo que se reduce el impacto de las interferencias, especialmente en la banda de frecuencias de 2,4 GHz.

Palabras clave: *Channel bonding*, IEEE 802.11, redes, Wi-Fi, python, rendimiento de canales

Abstract

The main objective of this work is to carry out a study of the throughput of 802.11 network channels with 20 and 40 MHz signals, using *channel bonding*.

The aim is to identify the best configuration for *channel bonding* in which high speed can be maintained while reducing the impact of interference, especially in the 2.4 GHz frequency band.

Keywords: *Channel bonding*, IEEE 802.11, networks, Wi-Fi, Python, throughput

Introducción

Aunque las redes IEEE 802.11 basan su funcionamiento en canales de 20MHz parcialmente solapados, también permiten el uso de canales con un ancho de banda mayor (*channel bonding*). El objetivo del presente trabajo de fin de grado es realizar un estudio del uso de dichos canales de mayor ancho de banda, dado que, aunque pueden posibilitar un mayor régimen binario a los usuarios, también producen una mayor cantidad de interferencia. De esta manera, se procederá a llevar a cabo una investigación sobre los diferentes efectos que tiene, sobre las redes IEEE 802.11, el ancho de banda de los canales.

Esta tecnología utiliza las bandas libres de frecuencias de 2,4 GHz y de 5 GHz. En el caso de las primeras, se hace uso de 11, 13 o 14 canales contiguos parcialmente solapados, lo que provoca interferencias cuando hay muchos dispositivos electrónicos conectados. La posición de estos canales se puede ver en la siguiente figura:

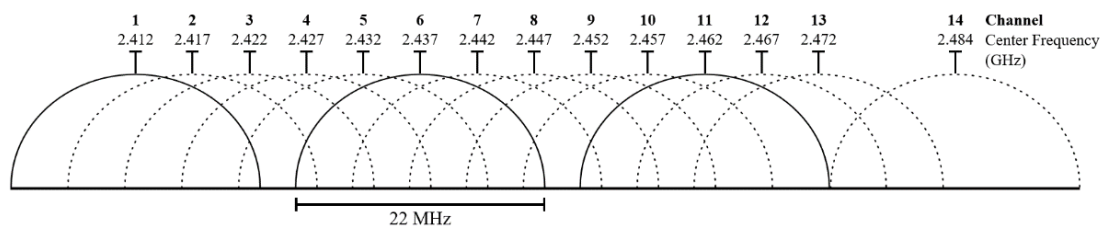


Figura 2. Representación gráfica de la posición de los canales de una red 802.11

En cambio, en el caso de la banda de frecuencias de 5 GHz, se pueden observar hasta 25 canales, los cuales tienen menos interferencias, mayor velocidad de conexión y menor rango de red.

En este trabajo fin de grado se van a analizar las consecuencias que tiene el uso de canales de diferentes anchos de banda en redes inalámbricas Wi-Fi. El solape entre canales adyacentes de las redes Wi-Fi convierte su gestión en un desafío para la comunidad investigadora, siendo habitual el empleo exclusivo de los denominados canales ortogonales, esto es, los canales que no se interfieren entre sí. Sin embargo, este hecho puede cambiar si algunos puntos de acceso de la red emplean anchos de banda diferente. Por ejemplo, unos puntos de acceso pueden operar en canales de 20MHz y otros en canales de 40MHz.

Obviamente, conforme el ancho de banda es superior, es posible obtener un mayor rendimiento de la red en forma de régimen binario, si bien son menos los usuarios que

pueden coexistir en la red sin interferirse entre sí. En este trabajo fin de grado se va a analizar el impacto en la red cuando algunos clientes operan con canales de 20MHz y otros en canales de 40MHz, de manera que pueda comprobarse en el efecto de uso de *channel bonding* tanto para los terminales que lo emplean, como los que no lo emplean.

Así pues, se analizará los incentivos que pueden llegar a tener los puntos de acceso por emplear canales de mayor ancho de banda, dado que es probable que, si todos los puntos de acceso emplean canales de mayor ancho de banda, resulten todos perjudicados en su conjunto. Para poder realizar el estudio, una parte importante del trabajo se basará en proponer una matriz de interferencia cocanal entre canales de diferente ancho de banda, dado que es requisito disponer de dicha matriz para saber cómo se interfieren los diferentes elementos de una red Wi-Fi entre sí dependiendo además del ancho de banda que empleen.

Objetivos

El principal propósito de este trabajo es determinar el rendimiento medio total de los canales de la red 802.11 con señales de 20 y 40 MHz variando el porcentaje de solapamiento adyacente entre estos, a fin de identificar una configuración óptima de dicho solapamiento de señales que no comprometan el funcionamiento de la antena Wi-Fi utilizada.

Objetivo General

- Determinar una configuración óptima de solapamiento adyacente en los canales de la red 802.11 con señales de interferencia de 20 MHz y 40 MHz

Objetivos específicos

- Estimar los coeficientes de solapamiento más adecuados para la red 802.11 para los primeros 12 canales.
- Construir las matrices de interferencia de cocanal entre canales de la red 802.11 con los anchos de banda de 20 y 40 MHz.
- Determinar los rendimientos medio total y por ancho de banda en los 12 canales de la red 802.11 tanto en configuración *Upstream* como *Downstream*.

***Channel bonding* en redes IEEE 802.11**

Introducción

Hoy en día, en el ámbito de las telecomunicaciones, el uso de las redes inalámbricas cada vez está más extendido. Según van evolucionando, el espectro radioeléctrico está más demandado. Es decir, paulatinamente, a medida que aparecen nuevas tecnologías que se implantan, más usuarios lo requieren y más se nota su limitación.

El espectro radioeléctrico está formado por una serie de bandas de frecuencias, de manera que algunas solamente se pueden utilizar obteniendo una licencia, pero hay otras que son libres, es decir, pueden utilizarse sin licencia. Entre estas últimas destacan las bandas de frecuencia alrededor de las frecuencias de 2,4GHz y 5GHz.

El problema que hay en la actualidad, es que, en la banda de frecuencias libres de 2,4GHz, coexisten un elevado número de tecnologías, ya sean las redes IEEE 802.11, los ratones inalámbricos que van conectados al ordenador, Bluetooth... Además de la demanda de ese espacio, también nos encontramos con el reclamo por parte de las personas que cada vez tienen más dispositivos electrónicos que hace uso de esa frecuencia para poder funcionar. Asimismo, no se exige solamente que desempeñen una función, sino que la hagan acorde a una velocidad y fluidez esperadas, como es en el caso de las redes Wi-Fi.

Actualmente, las redes IEEE 802.11 pueden hacer uso principalmente tanto de la banda de frecuencias de 2,4 GHz como de la de 5 GHz. Ambas están ramificadas en canales y su número puede variar dependiendo del país en el que nos encontremos de manera acorde con sus leyes. Asimismo, recientemente se ha añadido la banda de 6 GHz en los estándares más actuales.

Para solventar el problema de las interferencias que nos encontramos al hacer uso de las redes Wi-Fi, los routers actuales son capaces de funcionar tanto en la banda de frecuencias de 2,4 GHz como en la de 5 GHz. Con la gran extensión de la norma IEEE 802.11, las redes pueden trabajar mediante canales más amplios para poder adquirir una mayor capacidad. Se admiten canales de hasta 40 MHz mediante la unión de canales, o *channel bonding*, de 20 MHz. De esta forma se consigue obtener una mayor velocidad, pero las interferencias que se generan entre sí son superiores.

El solape entre canales adyacentes de las redes Wi-Fi convierte su gestión en un desafío para la comunidad investigadora, siendo habitual el empleo exclusivo de los denominados

canales ortogonales, esto es, los canales que no se interfieren entre sí. Sin embargo, este hecho puede cambiar si algunos puntos de acceso de la red emplean anchos de banda diferente. Por ejemplo, unos puntos de acceso pueden operar en canales de 20MHz y otros en canales de 40MHz. Obviamente, conforme el ancho de banda es superior, es posible obtener un mayor rendimiento de la red en forma de régimen binario, si bien son menos los usuarios que pueden coexistir en la red sin interferirse entre sí. En este trabajo fin de grado se va a analizar el impacto en la red cuando algunos clientes operan con canales de 20MHz y otros en canales de 40MHz, de manera que pueda comprobarse en el efecto de uso de *channel bonding* tanto para los terminales que lo emplean, como los que no lo emplean. Así pues, se analizará los incentivos que pueden llegar a tener los puntos de acceso por emplear canales de mayor ancho de banda, dado que es probable que, si todos los puntos de acceso emplean canales de mayor ancho de banda, resulten todos perjudicados en su conjunto. Para poder realizar el estudio, una parte importante del trabajo se basará en proponer una matriz de interferencia cocanal entre canales de diferente ancho de banda, dado que es requisito disponer de dicha matriz para saber cómo se interfieren los diferentes elementos de una red Wi-Fi entre sí dependiendo además del ancho de banda que empleen.

Redes 802.11

En los últimos años, la tecnología LAN inalámbrica (WLAN) se ha convertido en el principal componente utilizado para la informática móvil.

Las redes inalámbricas tradicionales se fundamentan en la presencia de una infraestructura que se basa en la existencia de un punto de acceso (AP) que proporciona acceso inalámbrico para la conectividad de la red a los terminales inalámbricos (WD). Este paradigma ha imperado durante muchos años en las redes móviles, en las redes empresariales y en diversas redes públicas/privadas.

La introducción de la norma 802.11 permitió que un mercado masivo adoptara la tecnología WLAN. Su rápida aparición se ha convertido en un estándar para todos los dispositivos que requieren conectividad de alta velocidad.

El conjunto de normas técnicas IEEE 802 y las adiciones a las redes de área local (LAN) constituyen la base de los productos de redes inalámbricas utilizados por las marcas de Wi-Fi en todo el mundo y es el estándar más utilizado para las redes informáticas inalámbricas. Definen un conjunto de protocolos de control de acceso a los medios (MAC) y de capa física (PHY) para la implementación de redes de área local inalámbricas (WLAN) para la comunicación informática.

El estándar IEEE 802.11 define el uso del nivel de enlace de datos y del nivel físico del modelo OSI, por parte de las redes de área local inalámbricas. Los dispositivos que hacen uso de este estándar tienen el certificado del sello Wi-Fi.

La norma IEEE 802.11 forma parte de la serie de normas de redes locales (LAN) del IEEE 802. Es un grupo de especificaciones emergentes definidas por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Comúnmente conocido como la red "Wi-Fi", define una interfaz sobre el aire entre una estación base de cliente inalámbrico y un punto de acceso para dos o más clientes inalámbricos.

En el mundo de la comunicación inalámbrica, el término "Wi-Fi" es sinónimo en general de acceso inalámbrico, aunque es una marca especial de la Wi-Fi Alliance, un grupo dedicado a certificar que los productos Wi-Fi cumplen las normas IEEE 802.11. Bajo el paraguas de la norma IEEE 802.11, hay varias normas que cubren los elementos portadores de los sistemas que deben funcionar juntos. Una de las más destacadas es la

IEEE 802 para las normas del grupo LAN y MAN, de las cuales la IEEE 802.11 es una de las más conocidas.

La versión original de la norma IEEE 802.11, publicada en 1997, ofrece dos velocidades de datos brutos de 1 y 2 megabits por segundo (Mbps) para la transmisión de señales infrarrojas (IR) a bandas de frecuencia industriales, científicas, médicas e ISM de hasta 2,4 GHz para la transmisión de señales IR. Definía la prevención de colisiones en el acceso múltiple basado en la portadora (CSMA / CA) como un método de acceso al medio idéntico al del protocolo Ethernet.

Posteriormente, en lugar de utilizar la banda de 2,4 GHz, el estándar 802.11 optó por la banda de 5 GHz. Para conseguir mejores velocidades, fue el primero en introducir la tecnología OFDM (multiplicación por división de frecuencias ortogonales), un método de modulación digital para codificar los datos a través de múltiples frecuencias, y su esquema de codificación le permitió alcanzar una velocidad máxima teórica de 54 Mbps, una mejora drástica respecto al estándar Wi-Fi original.

Además, este estándar define diferentes versiones, de las cuales las más utilizadas han sido:

IEEE 802.11a: actúa en la banda de frecuencias de 5 GHz. Posee una velocidad máxima de 54 Mbps, aunque las velocidades reales son de aproximadamente 20 Mbps. Tiene 12 canales y ninguno se solapa, de los cuales 8 son para redes inalámbricas y 4 son para conexiones punto a punto. No puede trabajar con equipos del estándar 802.11b.

IEEE 802.11b: es un complemento de la norma 802.11 que permite la recepción de datos con una mejor eficiencia energética sin aumentar la latencia. Actúa en la banda de frecuencias de 2,4 GHz. Su máxima velocidad de 11 Mbps, pero las velocidades reales oscilan entre 2 y 4 Mbps. Cuenta con 14 canales, pero solamente se pueden utilizar 3 sin que haya solapamiento entre las redes inalámbricas. Este estándar tiene una capacidad superior respecto al anterior en el alcance, ya que puede alcanzar una cobertura de hasta 60 metros en zonas interiores y de hasta 120 metros en exteriores con adecuadas velocidades.

IEEE 802.11g: actúa en la banda de frecuencias de 2,4 GHz, lo que hace que sea compatible con el estándar b. Ofrece las mismas tasas de transferencia que la versión a, es decir, puede alcanzar una velocidad máxima de 54 Mbps, pero con una velocidad real

que oscila los 20 Mbps. Consta de 14 canales, pudiéndose usar hasta 11, ya que hay que tener en consideración que tienen que ir de 3 en 3 para evitar el solapamiento. Esto ocasiona que sea necesario atender el diseño de la red.

En lo que respecta a coberturas, esta versión puede conseguir llegar hasta 20 metros en interiores y 75 metros en exteriores, pero dependiendo del fabricante se pueden obtener dispositivos que ofrezcan coberturas más amplias. Aunque el inicio de este punto se hablase de la compatibilidad entre el estándar b y el g, es aconsejable hacer uso de esta última versión debido a que, si un dispositivo de clase b es conectado a un punto de acceso de la clase g, la velocidad bajaría a lo largo del área de cobertura, deteriorando así los demás dispositivos.

IEEE 802.11n: en comparación con las otras versiones, puede actuar al mismo tiempo en las dos bandas de frecuencias, en la de 2,4 GHz (la que utilizan los estándares 802.11b y 802.11g) y en la de 5 GHz (la que aplica el estándar 802.11a). Por consiguiente, el estándar 802.11n es compatible con los dispositivos fundados en todas las versiones anteriores de Wi-Fi. Asimismo, es ventajoso que pueda trabajar en la frecuencia de 5 GHz debido a que está menos congestionada y tiene menos interferencias por causa de otros dispositivos. Su máxima velocidad es de 600 Mbps, con velocidades reales que oscilan entre los 100 y 200 Mbps. En lo que respecta a la cobertura, esta cambia dependiendo del tipo de antena que use, del dispositivo, pero puede llegar a trabajar con coberturas de alrededor de 80 metros en interiores y de 250 metros en exteriores. De la misma forma que pasaba con el estándar g, si hay dispositivos conectados que pertenecen a versiones anteriores, tanto las coberturas como las velocidades sufren una disminución. Esta versión hace uso de la tecnología MIMO, esto quiere decir que puede utilizar diferentes antenas tanto receptoras como transmisoras para así aumentar la efectividad del sistema, proporcionando así el poder lidiar con más información que haciendo uso solamente de una antena.

IEEE 802.11ac: es un estándar WLAN emergente de muy alto rendimiento que podría alcanzar velocidades de datos de la capa física cercanas a los 7 Gbps para la banda de 5 GHz. En consecuencia, está dirigido a servicios de mayor velocidad de datos, como la televisión de alta definición. Este estándar también es conocido como Wi-Fi Gigabit y Wi-Fi 5G. Se basa en 802.11n y aprovecha los avances tecnológicos en sistemas de comunicación, técnicas de codificación, procesamiento de señales y potencia de

procesamiento. Además, ofrece mejoras significativas en la velocidad de transmisión de datos, la fiabilidad y la calidad del servicio (QoS) [1], [2].

IEEE 802.11ax: este estándar contiene un nuevo protocolo de capa física con esquemas de modulación y codificación superiores. A diferencia de 802.11ac, 802.11ax no aumenta el número de flujos espaciales MIMO ni amplía el canal. Por tanto, las velocidades de datos nominales se incrementan hasta 9,6 Gbps. El aumento deseado del rendimiento de los usuarios se consigue gracias a un uso más eficiente del espectro. La característica clave de 802.11ax es la adopción de un enfoque ampliamente utilizado en las redes celulares, pero totalmente nuevo en Wi-Fi. La razón es que los canales muy anchos (80 MHz, 80+80 MHz y 160 MHz) introducidos por 802.11ac sufren interferencias selectivas de frecuencia, lo que perjudica considerablemente las velocidades prácticamente alcanzables [3].

IEEE 802.11be - Extremely High Throughput (EHT): este estándar también es conocido como Wireless-Fidelity (Wi-Fi) 7. Permite en la capa física un ancho de banda ampliado de más de 160 MHz. Mejora la capa de control de acceso al medio (MAC) con un funcionamiento multienlace con un ancho de banda mucho mayor y con operaciones distribuidas entre puntos de acceso vecinos (APs). Se prevé que Wi-Fi 7 admita al menos 30 Gb/s por punto de acceso, unas cuatro veces más rápido que Wi-Fi 6, al tiempo que garantiza la compatibilidad con versiones anteriores y la coexistencia con dispositivos heredados en las bandas sin licencia de 2,4, 5 y 6 GHz [4], [5].

Channel bonding

El estándar IEEE 802.11n permite a los dispositivos inalámbricos operar en canales de 40MHz mediante el uso del *channel bonding*. Esta técnica, también se emplea en las versiones posteriores de Wi-Fi, permitiendo incluso agregaciones de canales superiores a los 40 MHz.

Centrándonos en el estándar 802.11n, esto se lleva a cabo a través de la unión de dos canales de 20 MHz para dar lugar a un único canal de 40 MHz de ancho de banda.

Aunque las transmisiones por medio de los canales de 40 MHz deberían ofrecer ventajas sobre los canales de 20 MHz, la capacidad de rendimiento depende en gran medida de la tecnología de antena adoptada.

El aumento del ancho de banda de los canales incrementa la capacidad, pero tiene el coste de reducir el alcance de la transmisión y aumentar la susceptibilidad a las interferencias.

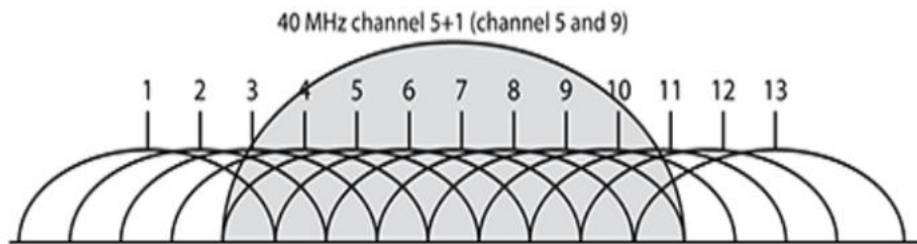


Figura 4. Representación gráfica de *channel bonding* con aumento de ancho de banda

Problemas del estándar

Las interferencias son uno de los principales factores que limitan el rendimiento de la norma 802.11. Este fenómeno tiene lugar cuando dos o más ondas se superponen de forma parcial o total, lo cual da lugar a dos tipos de interferencias:

Interferencias por canales adyacentes (ACI): los dispositivos se obstaculizan entre ellos como “ruido”. Son provocadas a causa de los canales cercanos, esto provoca que este tipo de interferencias afecte sobre todo a la banda de frecuencias de 2,4 GHz cuando se hacen uso de canales de 20 MHz, debido al número insuficiente de canales que no sufren un solapamiento. En esta banda, hay solamente 3 canales no solapados. En cambio, en la banda de frecuencias de 5 GHz, estas interferencias serían muy bajas.

Por otro lado, si se hace uso solamente de canales de 40 MHz (*channel bonding*), el resultado deriva en la aparición de interferencias por canal adyacente en la banda de frecuencias de 2,4 GHz y, en menor medida, también en la de 5 GHz.

Interferencias cocanales: la red se encuentra “congestionada” o “saturada”. Tienen lugar cuando dos o más dispositivos se encuentran operando en el mismo canal de frecuencia. Se manifiesta en ambas bandas y está asociado al método llevado a cabo para realizar la asignación de canales. Este tipo de interferencias tienen lugar en la banda de frecuencias de 5 GHz debido a que se hace uso de muy pocos canales, por ejemplo, si se utilizan canales de 80 MHz solamente se puede hacer uso de hasta 5 canales, dependiendo del país, y en el caso de 160 MHz de uno. De esta manera, todos los dispositivos se encuentran operando en el mismo canal, lo que provoca la congestión o saturación de la red.

Para medir el grado de solapamiento que tiene lugar entre los distintos canales, se hace uso de coeficientes de correlación. Cuando este coeficiente es igual a 1, quiere decir que se está ante una interferencia cocanal.

Para realizar un estudio sobre los coeficientes de correlación que puede haber ante los canales ubicados en las distintas bandas de frecuencia, se va a realizar una matriz de interferencias para las diferentes situaciones.

El estándar 802.11 y los desafíos actuales

Aumento del tráfico

Dado que Wi-Fi se ha vuelto muy popular entre todas las personas del mundo, las personas tienden a usar Wi-Fi en todos los lugares. Esto puede ser en la oficina, en casa, en lugares públicos o en cualquier lugar debido a la portabilidad y facilidad de uso de esta tecnología. Otra razón por la que las personas usan Wi-Fi será que estos dispositivos son muy baratos y usan bandas sin licencia que generalmente serán de 2,4 GHz y 5 GHz.

Además, Wi-Fi es una tecnología que evoluciona rápidamente, por lo que cuando cada persona usa más de un dispositivo habilitado para Wi-Fi, creará una colección de miles y miles de dispositivos Wi-Fi en un área determinada. Por estas razones, la banda sin licencia se congestionará. Algunas estimaciones mencionan que en los próximos años habrán más de 11.600 millones de dispositivos móviles produciendo y consumiendo un total de 30'6 exabytes de tráfico mensual en 2020 [9]–[11].

Menor ancho de banda

El tráfico de red incluye principalmente el tráfico de video, ya que sigue creciendo día a día de 480p a 720p HD, luego 4K, 8K, etc. utilizando muchos anchos de banda de datos. Además del tráfico de video, se puede admitir la realidad aumentada (AR), la realidad virtual (VR), los juegos, los servicios en la nube y el tráfico de trabajo de oficina virtual, que utiliza principalmente ancho de banda [7], [10].

Menor confiabilidad

La mayoría de estos servicios no deberían tener al menos un pequeño retraso en el envío de paquetes a través de la red y no debería haber pérdida de paquetes, la confiabilidad debería estar cerca del 99%. Estos factores estarán entre los problemas que las tecnologías Wi-Fi actuales pueden tener.

La mayoría de las estaciones Wi-Fi admiten estaciones de radio duales y los puntos de acceso (AP) hoy en día admiten triple banda a partir de ahora porque también entraron en acción 6 GHz además de 2,4 y 5 GHz. Por lo tanto, la misión principal de la próxima generación IEEE 802.11 es utilizar de manera eficiente estas tres bandas y canales, lo que también aumentará la velocidad y la satisfacción del cliente.

Agregación de datos en múltiples bandas (channel bonding):

Para aumentar el rendimiento de la tecnología IEEE 802.11 de próxima generación, se busca combinar el espectro de 5 GHz y 6 GHz no solo para la transmisión de datos, sino también para la recepción de señales. Después de agregar las dos bandas, cualquier dispositivo Wi-Fi que planea iniciar una comunicación debe sincronizar la oportunidad de transmisión (TXOP), que es una característica de la capa MAC utilizada en las WLAN [12].

TXOP es una función que se utiliza para limitar el tiempo asignado a una determinada estación para enviar tramas después de haber tenido la oportunidad de comunicarse por el medio. Esto asegura que no habrá colisiones en el medio de transmisión, lo cual será muy importante al transmitir video de alta velocidad o datos de voz. Por lo tanto, el uso de estas técnicas garantizará una comunicación más fluida entre los dos espectros, incluso si se agregan [6], [8], [11].

Con el trasfondo de la creación de Wi-Fi, el número cada vez mayor de usuarios y su demanda cada vez mayor de una mejor Internet es uno de los problemas más conocidos a nivel mundial. Teniendo en cuenta los problemas actuales que se encuentran, como el tráfico, el bajo ancho de banda y la confiabilidad, se espera que la nueva generación IEEE 802.11 brinde las soluciones más óptimas para minimizar las limitaciones de la generación anterior. Si bien la adopción de la próxima generación llevará tiempo, para entonces surgirán más investigaciones que respalden y respalden 802.11ax [9].

Channel bonding en redes 802.11

Remontándonos al año 2011, algunos investigadores ya hablaban de que las tecnologías MIMO en las redes 802.11n permitían velocidades de datos más altas a través de la vinculación de canales (*channel bonding*). Sin embargo, dichos estudios también mencionaban que la unión de canales no estaba libre de inconvenientes. Así, sabemos que el estándar IEEE 802.11n requiere que los dispositivos transmitan por debajo de una potencia de transmisión máxima con y sin vinculación de canales. Por lo tanto, al duplicar el ancho del canal, la relación de ruido y señal (SNR) se reduce efectivamente en 3 dB, ya que el ruido de fondo es el mismo en el canal extendido y, por lo tanto, los errores de recepción aumentan [13], [14]. Esta compensación entre velocidades de transmisión más altas y la susceptibilidad a la interferencia requiere que las condiciones de uso alcancen un equilibrio positivo, en el que mejore el rendimiento. El estándar 802.11n en sí mismo

no brinda pautas ni recomendaciones sobre cómo aprovechar la vinculación de canales [15], [16].

Además, estudios experimentales previos de 802.11n se habían centrado en brindar información sobre las características a este estándar, a saber, agregación de tramas, unión de canales y sistemas MIMO [17]–[19] y no en lograr caracterizar de manera efectiva la vinculación de canales en entornos de red del mundo real. Además, la mayor parte del trabajo existente se centra en la operación en la banda ISM de 2,4 GHz, que tiene un número limitado de canales y sufre interferencias de productos de consumo de uso común que operan en la misma frecuencia

Para entonces, las restricciones de canal en la banda de 2,4 GHz eran demasiado estrictas para evaluar de manera efectiva el rendimiento de la vinculación de canales y, de hecho, se había encontrado que la vinculación de canales en el rango de 2,4 GHz causa más daños que beneficios [20]–[22].

En esa misma época, Friedrich et al. en 2011 [13], realizaron experimentos en un banco de pruebas 802.11 estacionario implementado en un entorno de oficina semiabierto. Estos autores configuraron un banco de pruebas configurable que permite suficiente flexibilidad para evaluar la vinculación de canales en diversas condiciones de red. Limitamos el funcionamiento al rango de frecuencia de 5 GHz, donde realmente se pueden aprovechar los beneficios de la vinculación de canales.

A partir de estos ensayos experimentales, encontraron que la mayoría de las decisiones aleatorias de vinculación de canales en realidad degradaban el rendimiento. Además, encontraron que las decisiones de vinculación de canales inteligentes requieren el conocimiento no solo de la calidad de la señal de un enlace, sino también de la fuerza de las transmisiones del enlace vecino, su distancia de canal y sus tasas de datos físicos [13].

Por ejemplo, las transmisiones de enlaces vecinos con fuertes intensidades de señal entre ellos podrían provocar interferencias debido a la fuga de canales de las transmisiones en canales no superpuestos pero consecutivos. De manera similar, para enlaces en el rango de detección de portadora (CS) que operan en canales superpuestos, un enlace con bajo rendimiento físico podría degradar el rendimiento de otros enlaces [21].

Finalmente, Friedrich et al en 2011 encontraron dos patrones de interferencia de enlace vecino que deben mitigarse para tomar decisiones de enlace de canal inteligentes:

interferencia cocanal y de canal adyacente. Como resultado de su trabajo encontraron lo siguiente:

- Debido a la función MIMO de los dispositivos 802.11n, el rendimiento no es monótono con RSSI, sino que depende de otros factores, como la diversidad de trayectos múltiples del entorno de transmisión. Por ejemplo, para enlaces con la misma intensidad de señal en diferentes ubicaciones, el rendimiento varía mucho, lo que se debe en parte a la extensión de la dispersión ambiental.
- Tasa de recepción de paquetes (PRR) es una métrica que brinda una imagen más clara que RSSI de la calidad de un enlace. Para enlaces débiles, el PRR cae para altas tasas de transmisión. Sin embargo, para enlaces fuertes, el PRR cae solo cuando el entorno de transmisión no admite altas velocidades de transmisión.
- En un entorno libre de interferencias, la vinculación de canales degrada el rendimiento de la red cuando el RSSI ingresa a un solo par de transmisor y receptor está cerca de la sensibilidad de entrada mínima de ancho para evitar problemas de equidad de acceso al medio causados por competidores más lentos de 20 MHz que ocupan el espectro durante períodos más largos. Se requiere un canal mínimo de 20 MHz para evitar interferencias [23].

El origen de la vinculación de canales en 802.11 ya se venía fraguando desde finales de la década de 2010, en diversos estudios los cuales muchos de ellos presentaron fallos importantes en sus metodologías, por lo que no se logró reportar ningún avance significativo.

Por ejemplo, en lo relativo a al rango de frecuencias 5GHz La vinculación de canales en las redes 802.11n combina dos canales adyacentes de 20 MHz para formar un solo canal de transmisión de 40 MHz. Idealmente, esta función debería duplicar la velocidad de datos de la capa física (PHY). Una de las desventajas de utilizar la vinculación de canales es que quedan menos canales para otros dispositivos [23]. En las implementaciones Wi-Fi tradicionales de esos años de 2,4 GHz, donde solo hay tres canales de 20 MHz que no se superponen, la vinculación de canales ha demostrado ser dañina debido tanto a la disponibilidad limitada del canal como a la degradación del rendimiento resultante.

Friedrich et al y Yang et al. (2006) señalaban que hay más oportunidades para explotar la vinculación de canales en el rango de frecuencia de 5 GHz, donde hay 24 canales de 20 MHz que no se superponen y hasta 12 canales de 40 MHz que no se superponen. Además,

a diferencia de la banda de 2,4 GHz que comparte su frecuencia con productos de consumo de uso común, como Bluetooth, hornos de microondas y teléfonos inalámbricos, la frecuencia de 5 GHz generalmente experimenta menos interferencias.

En cuanto a Gestión de canales, se supo que la capacidad de vinculación de canales para aumentar el rendimiento de datos se puede aprovechar para permitir una mayor flexibilidad en el equilibrio de carga. Esta flexibilidad ha definido la dirección reciente de las soluciones de gestión de ancho de banda que abogan por la adaptación del ancho de canal en las redes inalámbricas para adaptarse a las condiciones de carga cambiantes [24]–[26].

Para entonces, los estudios relacionados a este tema se basaban en la suposición de que aumentar el ancho de banda del canal teóricamente debería aumentar la velocidad de transmisión de datos porque se transmiten más datos en un ancho de banda mayor. Sin embargo, estudios posteriores han demostrado que los beneficios de la vinculación de canales en 802.11n están influenciados por factores de red, como la interferencia y la pérdida [25], [26]. Por lo tanto, está claro que las soluciones de administración de canales en WLAN 802.11n primero deben comprender los comportamientos de enlace de canales para poder tomar decisiones inteligentes sobre la asignación de ancho de banda en la red.

Finalmente añadir que, en lo relativo al conocimiento en profundidad sobre 802.11n, diversos estudios se habían centrado principalmente en proporcionar información sobre la funcionalidad de 802.11n [24], [27], [28]. En aquel entonces se pensaba que en encontrar una vinculación de canales en configuraciones de WLAN del mundo real. Una de las razones principales era que la operación se realizaba en el rango ocupado de 2,4 GHz donde hay un número limitado de canales que no se superponen; por lo tanto, las restricciones de rendimiento son más fuertes para poder medir adecuadamente las diferencias de rendimiento [12], [29]. Además, el trabajo existente evaluó el rendimiento de la vinculación de canales utilizando solo métricas estándar que no tienen en cuenta el rendimiento real logrado en la red ni el efecto de las condiciones variables de la red en el rendimiento. En definitiva, para entonces aún no se había obtenido una imagen completa de las oportunidades de unión de canales en las redes inalámbricas.

Cálculo de la interferencia entre canales adyacentes

Canales de 20 MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz.

En los estándares IEEE 802.11 b y 802.11 g, se puede encontrar un máximo de 14 canales.

Los canales número 12 y 13 únicamente se encuentran accesibles en países que están fuera de Norteamérica. El canal número 14 está disponible exclusivamente en Japón y se encuentra situado a 12 MHz del canal 13. La separación entre el resto de los canales es de 5 MHz, encontrándose situados de la siguiente manera:

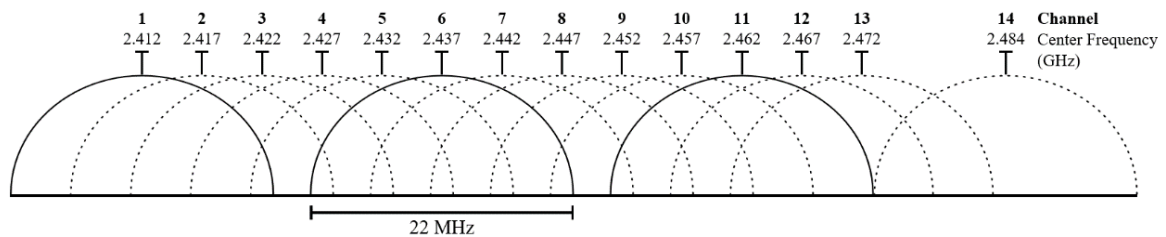
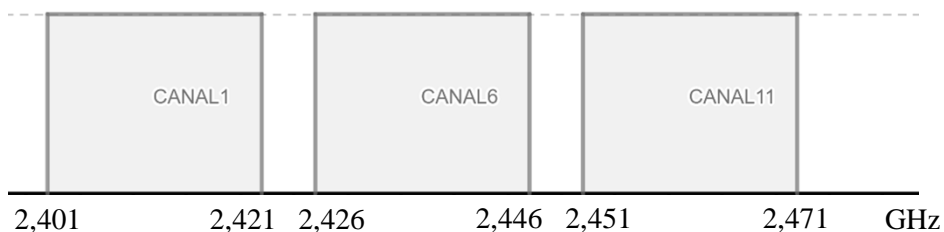


Figura 6. Gráfico de amplitud de las señales de cada canal y la separación entre estos

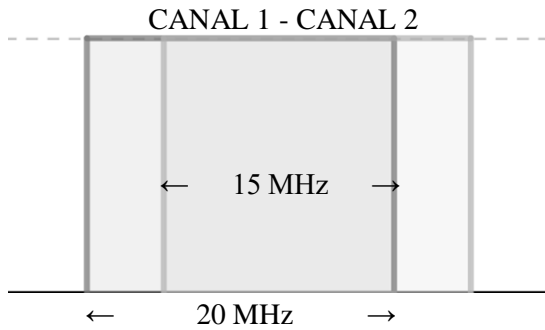
Cada canal requiere de 22 MHz de ancho de banda para poder trabajar. De esos 22 MHz, 20 MHz son para la transmisión de datos y los 2 MHz restantes son de guarda, para intentar prevenir los solapamientos. De todas formas, estos se acaban ocasionando, generando así tanto interferencias cocanales como interferencias por canales adyacentes.

Para realizar los cálculos necesarios para hallar los coeficientes de correlación, el valor del ancho de banda se establecerá en 20 MHz, sin tener en cuenta los 2 MHz de guarda.

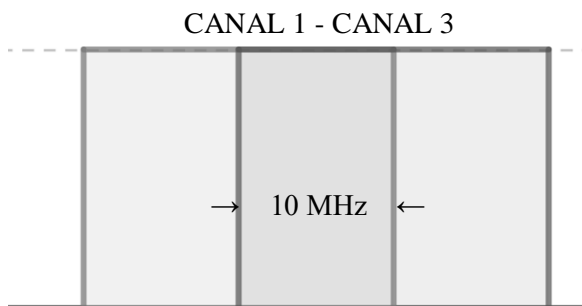
Si se hace la suposición de que la señal en su representación espectral de los canales Wi-Fi es un rectángulo perfecto, quedarían representadas de la siguiente manera:



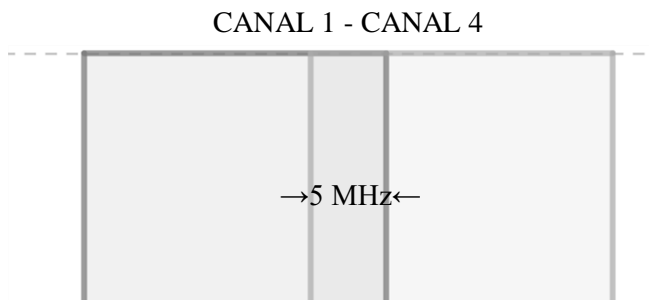
Se podría estudiar el solapamiento entre los canales de la forma mostrada a continuación:



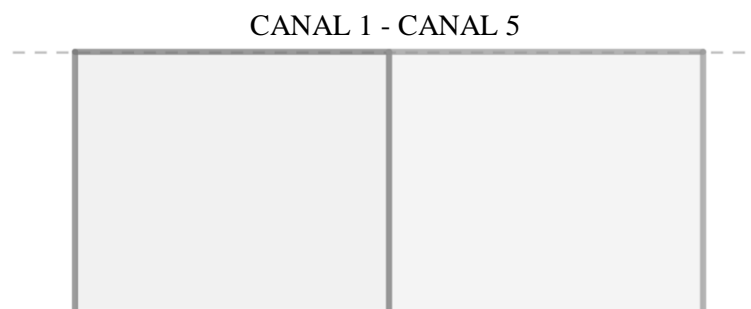
$$\text{Solape} = \frac{15\text{MHz}}{20\text{MHz}} = 0'75$$



$$\text{Solape} = \frac{10\text{MHz}}{20\text{MHz}} = 0'50$$



$$\text{Solape} = \frac{5\text{MHz}}{20\text{MHz}} = 0'25$$



No hay solape



$$Solape_{12,14} = \frac{3MHz}{20MHz} = 0'15$$

$$Solape_{13,14} = \frac{8MHz}{20MHz} = 0'40$$

Aplicando los cálculos anteriores a todos los solapes, se obtendría la siguiente matriz de interferencias:

Tabla 1. Matriz de interferencias resultante de canales 20 MHz en la banda de 2,4 GHz

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	.75	.50	.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	.75	1	.75	.50	.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	.50	.75	1	.75	.50	.25	0	0	0	0	0	0	0	0
4	.25	.50	.75	1	.75	.50	.25	0	0	0	0	0	0	0
5	0	.25	.50	.75	1	.75	.50	.25	0	0	0	0	0	0
6	0	0	.25	.50	.75	1	.75	.50	.25	0	0	0	0	0
7	0	0	0	.25	.50	.75	1	.75	.50	.25	0	0	0	0
8	0	0	0	0	.25	.50	.75	1	.75	.50	.25	0	0	0
9	0	0	0	0	0	.25	.50	.75	1	.75	.50	.25	0	0
10	0	0	0	0	0	0	.25	.50	.75	1	.75	.50	.25	0
11	0	0	0	0	0	0	0	.25	.50	.75	1	.75	.50	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	.25	.50	.75	1	.75	.15
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.25	.50	.75	1	.40
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.15	.40	1

Elaboración propia

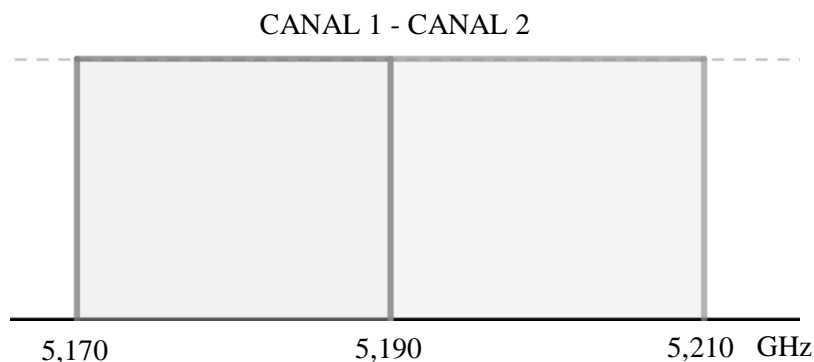
De esta manera queda reflejado que además de las interferencias cocanales que sufren los dispositivos conectados al mismo canal, también experimentarán interferencias debidas a los canales que tengan más cerca.

Canales de 20 MHz en la banda de frecuencias de 5 GHz

La banda de frecuencias de 5 GHz, comparada con la de 2,4 GHz, dispone de un ancho de banda mayor y plantea un menor nivel de interferencias dado que existen menos tecnologías que operan en ella. Pueden hallarse hasta 25 canales, los cuales tienen un ancho de banda de 20 MHz y están separados a su vez a 20 MHz respecto a su frecuencia central. Además, ninguno se solapa con sus canales adyacentes. Es por esto por lo que pueden ser utilizados todos los canales al mismo tiempo.

Algunas de las desventajas que presenta esta banda de frecuencias, en comparación con la de 2,4 GHz, es que al trabajar a una frecuencia mayor se genera una mayor mitigación en las transmisiones. También, se debe tener en cuenta que existe muy poca unanimidad a nivel internacional en lo que respecta a las bandas de uso.

Si se hace la suposición de que la señal en su representación espectral de los canales Wi-Fi es un rectángulo perfecto, se puede estudiar el solapamiento existente entre canales adyacentes de la siguiente manera:



No hay solape

Con esta hipótesis se puede observar que en la matriz de interferencias resultante no existen interferencias por canales adyacentes. Sin embargo, sí que habría interferencias cocanales derivadas de los dispositivos que se encontrasen conectados al mismo canal.

Canales de 40 MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz

En el estándar 802.11n se puede hacer uso del *channel bonding* para unir dos canales adyacentes de 20 MHz obteniendo así un único canal de transmisión de 40 MHz. Combinando de esta manera dos canales consecutivos en vez de uno es posible lograr, teóricamente, duplicar el espectro disponible. Esto, en general, no pasa con la velocidad real obtenida, ya que se corre el riesgo de incrementar los solapamientos con los canales adyacentes.

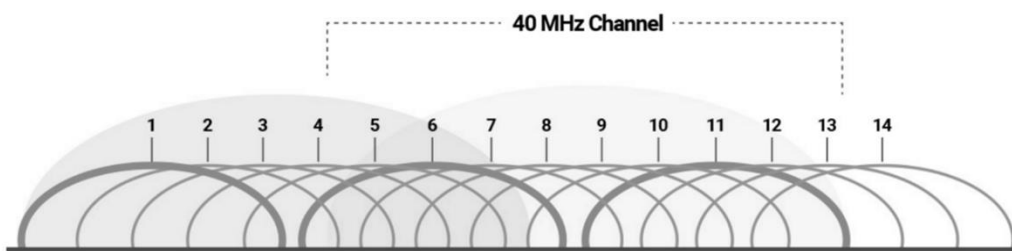
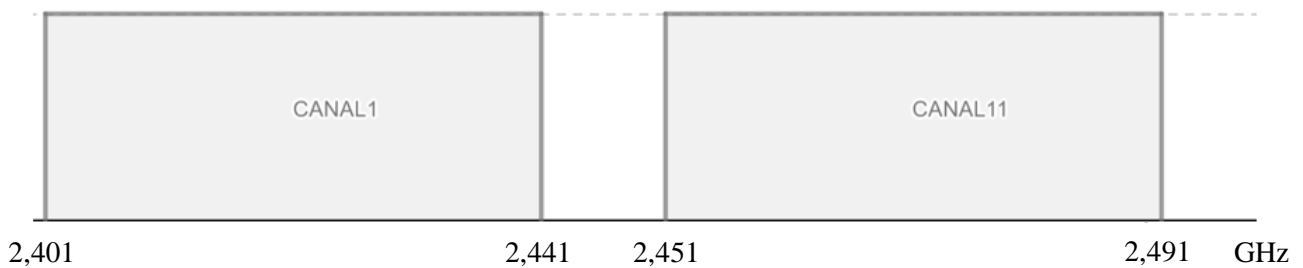
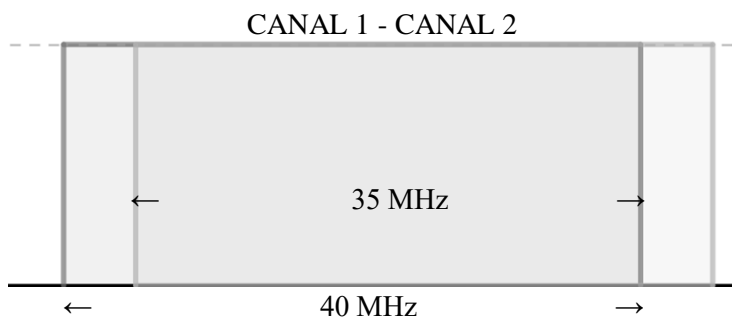


Figura 8. Comportamiento de los canales de 40MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz

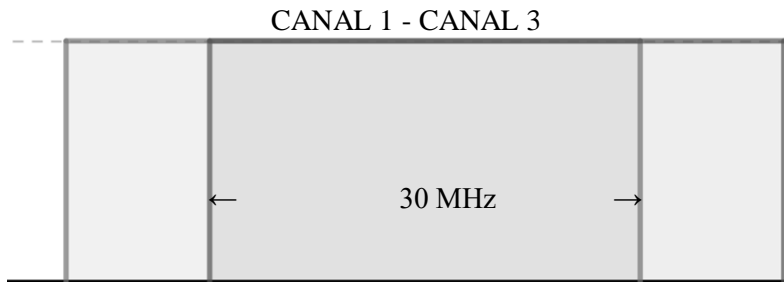
Si se hace la suposición de que la representación espectral de la señal de los canales Wi-Fi es un rectángulo perfecto, se obtiene la siguiente representación:



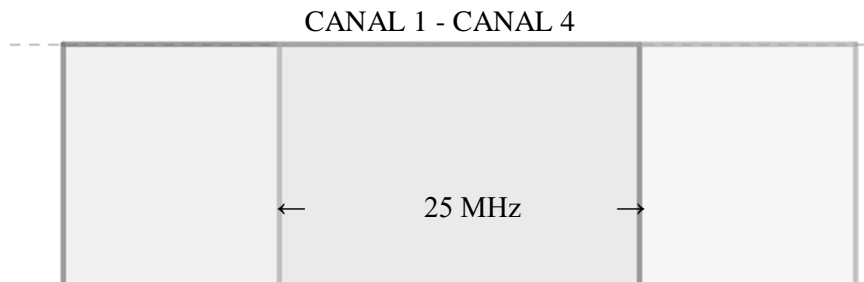
De esta manera, se puede estudiar el solapamiento existente entre canales adyacentes de la siguiente forma:



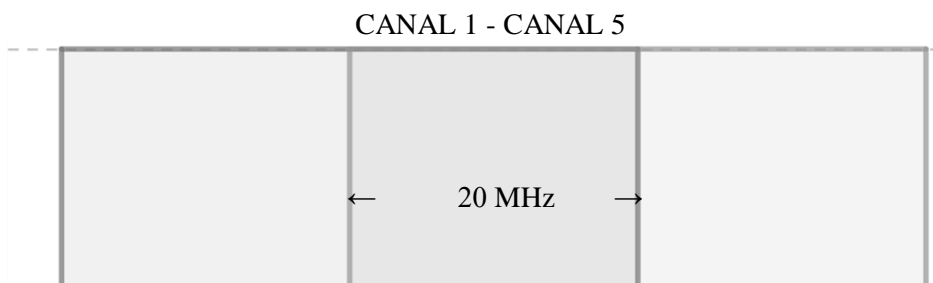
$$\text{Solape} = \frac{35\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'875$$



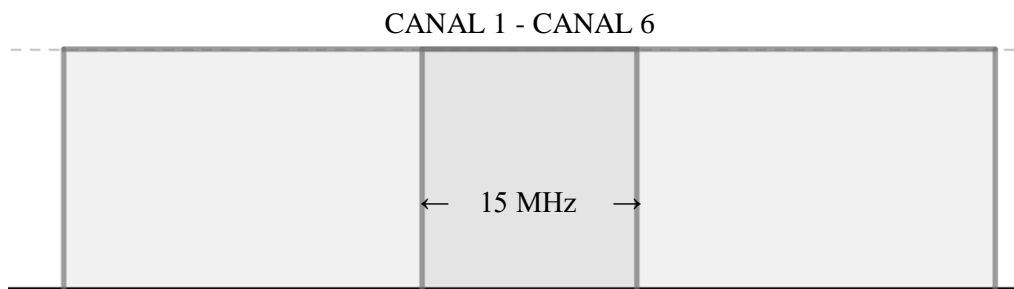
$$\text{Solape} = \frac{30\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'75$$



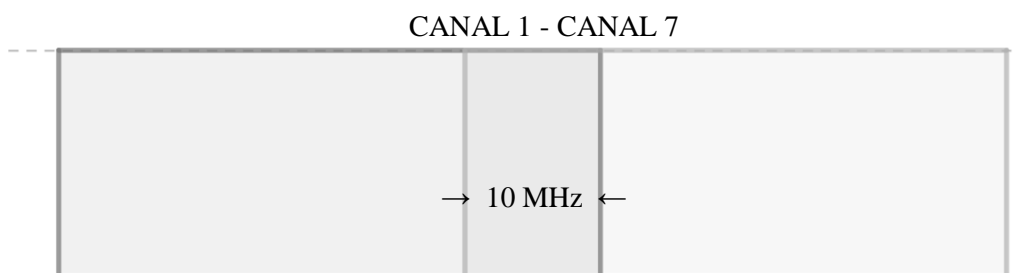
$$\text{Solape} = \frac{25\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'625$$



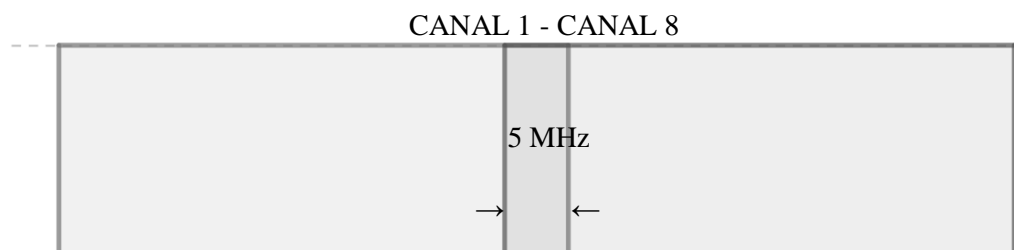
$$\text{Solape} = \frac{20\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'5$$



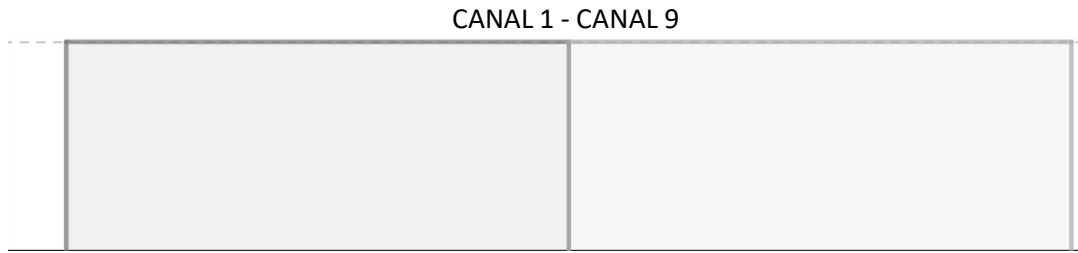
$$\text{Solape} = \frac{15\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'375$$



$$\text{Solape} = \frac{10\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'25$$



$$\text{Solape} = \frac{5\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'125$$



No hay solape

Aplicando los cálculos anteriores a todos los solapes, se obtendría la siguiente matriz de interferencias:

Tabla 3. Matriz de interferencias resultante de canales 40 MHz en la banda de 2,4 GHz

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	.875	.75	.625	.50	.375	.25	.125	0	0	0
2	.875	1	.875	.75	.625	.50	.375	.25	.125	0	0
3	.75	.875	1	.875	.75	.625	.50	.375	.25	.125	0
4	.625	.75	.875	1	.875	.75	.625	.50	.375	.25	.125
5	.50	.625	.75	.875	1	.875	.75	.625	.50	.375	.25
6	.375	.50	.625	.75	.875	1	.875	.75	.625	.50	.375
7	.25	.375	.50	.625	.75	.875	1	.875	.75	.625	.50
8	.125	.25	.375	.50	.625	.75	.875	1	.875	.75	.625
9	0	.125	.25	.375	.50	.625	.75	.875	1	.875	.75
10	0	0	.125	.25	.375	.50	.625	.75	.875	1	.875
11	0	0	0	.125	.25	.375	.50	.625	.75	.875	1

Elaboración propia

Con estos coeficientes de correlación se puede observar que haciendo uso del *channel bonding* en la banda de frecuencias de 2,4 GHz ocasionaría tanto interferencias cocanales como interferencias por canales adyacentes con un rango mayor que si no se hiciera uso de la unión de canales.

Canales de 40 MHz en la banda de frecuencias de 5 GHz

En la banda de frecuencias de 5 GHz, las entidades de regulación han determinado que los canales utilizables estén separados por 20 MHz, tomando como punto de referencia la frecuencia central del canal. Esto quiere decir que, al hacer uso de *channel bonding* para obtener canales con un ancho de banda mayor, ocasiona que se generen solapes entre canales adyacentes, lo cual no pasaba cuando se usaban canales de 20 MHz.

La terminología Wi-Fi para referirse a los números de los canales en la banda de 5 GHz ha cambiado con el estándar 802.11ac. Se hace referencia a la frecuencia del canal central para todo el canal de 40MHz, por ejemplo, el canal 38 con el canal 36 primario de 20 MHz.

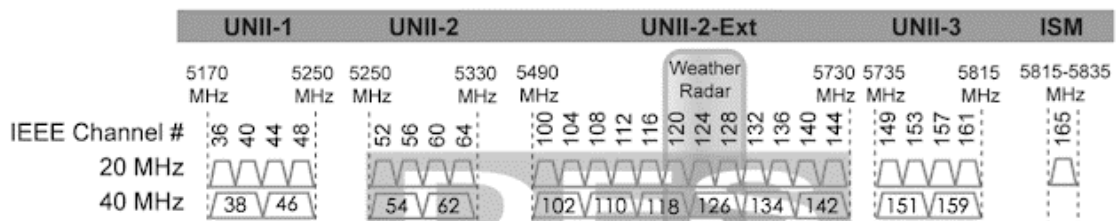
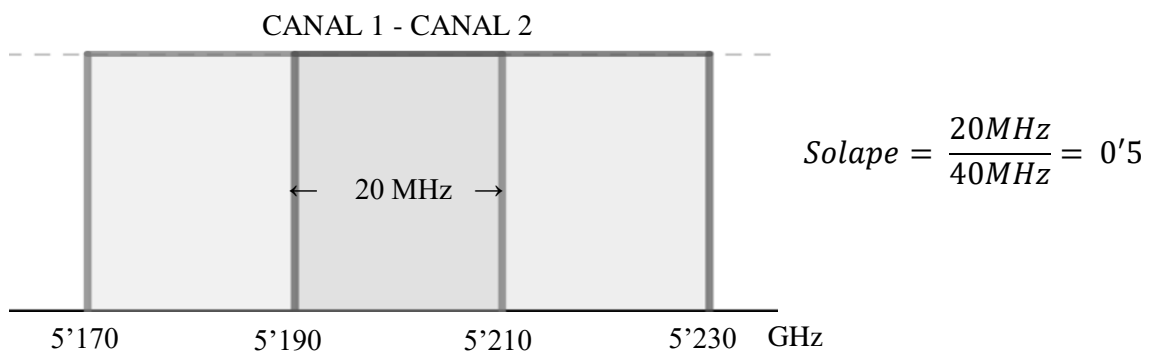


Figura 5. Comportamiento de los canales de 40MHz en la banda de frecuencias de 5 GHz

Si se hace la suposición de que la representación espectral de la señal de los canales Wi-Fi es un rectángulo perfecto, se puede estudiar el solapamiento producido por canales adyacentes de la siguiente manera:



Aplicando el cálculo anterior a todos los solapes, se obtendría la siguiente matriz de interferencias:

Tabla 5. Matriz de interferencias de canales de 40 MHz en bandas de frecuencia de 5 GHz

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	.5	1	.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	.5	1	.5	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	.5	1	.5	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	.5	1	.5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	.5	1	.5	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	.5	1	.5	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	.5	1	.5	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	.5	1	.5	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	.5	1	.5	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.5	1	.5
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.5	1

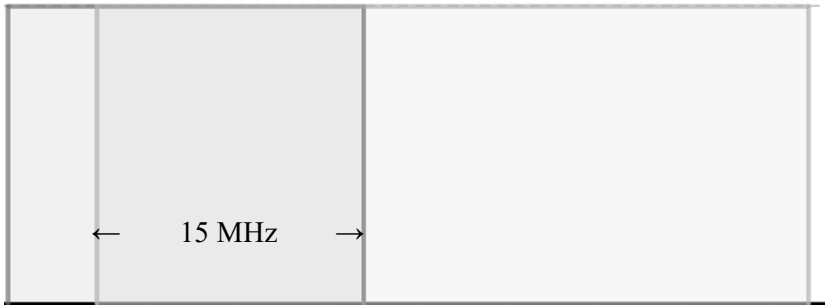
Elaboración propia

Como resultado de esta hipótesis obtendríamos que, además de las interferencias cocanales, cada canal sufriría asimismo interferencias por canales adyacentes debidas a los canales inmediatamente más próximos a él.

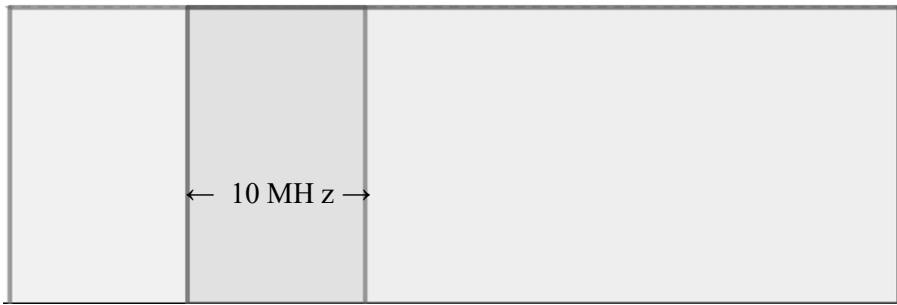
Canales de 20 y 40 MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz

Además de poder trabajar con canales de 20 MHz o canales de 40 MHz, podemos encontrarnos ante el caso de que se trabaje con ambas medidas a la vez en la misma banda de frecuencias.

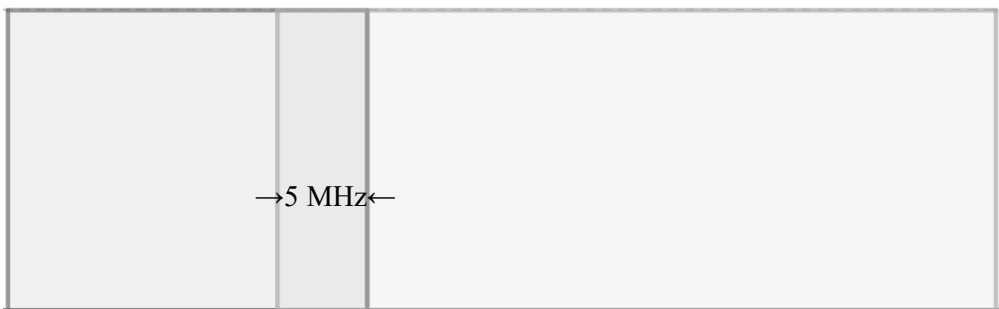
Siguiendo con la suposición de que la representación espectral de la señal es un rectángulo perfecto, el solapamiento de un canal de 20 MHz debido a canales de 40 MHz se podría estudiar de la siguiente manera:



$$\text{Solape} = \frac{15\text{MHz}}{20\text{MHz}} = 0'75$$



$$\text{Solape} = \frac{10\text{MHz}}{20\text{MHz}} = 0'5$$



$$\text{Solape} = \frac{5\text{MHz}}{20\text{MHz}} = 0'25$$



No hay solape

Aplicando los cálculos anteriores, se obtendría la siguiente tabla para cuando la señal de un canal de 40 MHz interfiere con la señal de un canal de 20 MHz.

Tabla 7. Coeficientes para canales de 20 y 40 MHz en la banda de frecuencias de 2,4 GHz

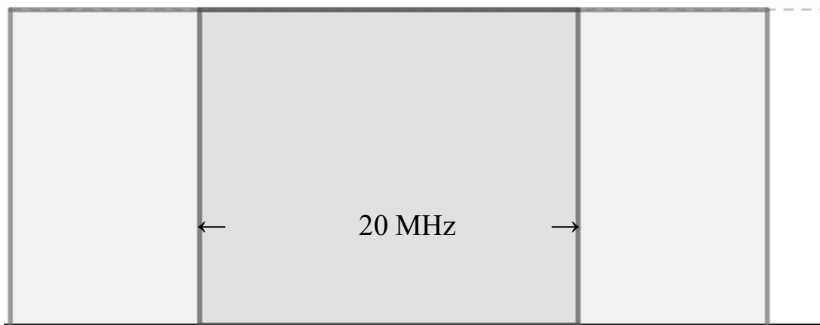
Distancia entre los canales	0	1	2	3	4	...
Coeficiente de correlación	1	0'75	0'5	0'25	0	0

Elaboración propia

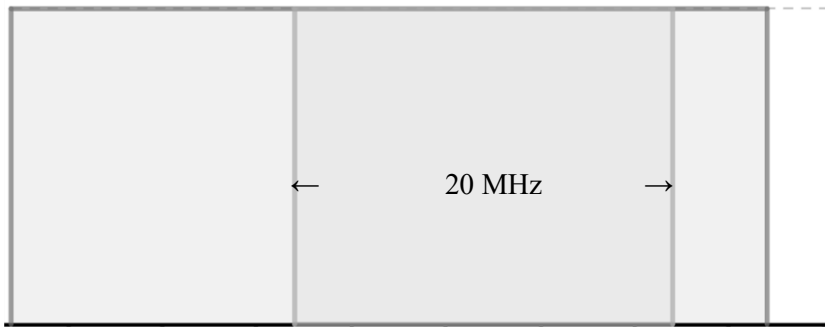
Por otro lado, aplicando el mismo estudio a las interferencias causadas por la señal de un canal de 20 MHz sobre la señal de un canal de 40 MHz, obtendríamos los siguientes resultados:



$$\text{Solape} = \frac{20\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'5$$



$$\text{Solape} = \frac{20\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'5$$



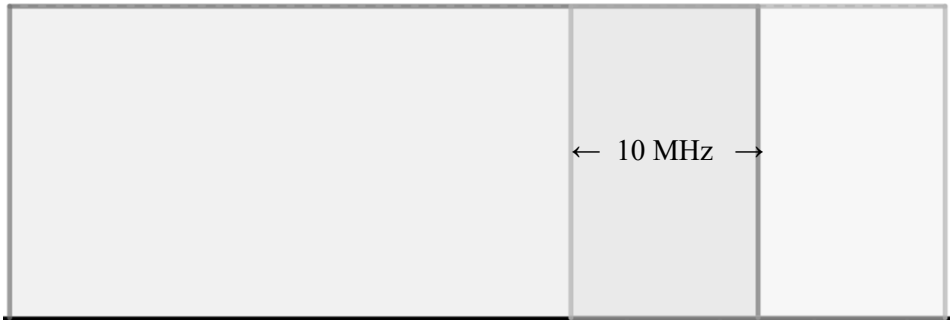
$$\text{Solape} = \frac{20\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'5$$



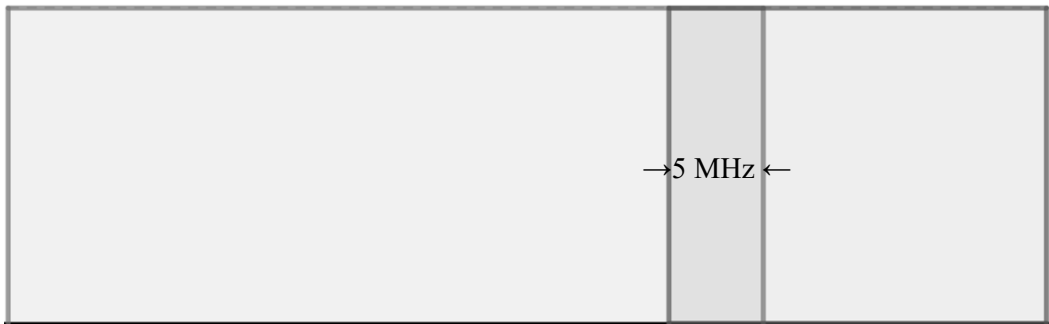
$$\text{Solape} = \frac{20\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'5$$



$$\text{Solape} = \frac{15\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'375$$



$$\text{Solape} = \frac{10\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'25$$



$$\text{Solape} = \frac{5\text{MHz}}{40\text{MHz}} = 0'125$$



No hay solape

Aplicando los cálculos anteriores, se obtendría la siguiente tabla para cuando la señal de un canal de 20 MHz interfiere con la señal de un canal de 40 MHz.

Tabla 9. Resultados de coeficientes de correlación para señal de canal 20 MHz interfiere en uno de 40 MHz

Distancia entre los canales	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
Coefficiente de correlación	1	0'5	0'5	0'5	0'5	0'375	0'25	0'125	0	0

Elaboración propia

Estudiando los resultados obtenidos en ambos casos, se puede observar que en ambas distribuciones existen tanto interferencias cocanales como interferencias por canales adyacentes, aunque con un rango de interferencias diferente.

Máscara espectral de transmisión

Si en vez de utilizar la suposición de que la representación espectral de la señal de los canales es un rectángulo perfecto, empleásemos la máscara espectral de transmisión que usan las redes Wi-Fi, la forma de las ondas sería distinta.

Canal de 20 MHz

En el caso de los canales con un ancho de banda de 20 MHz, la máscara espectral que utilizan para la transmisión de la señal tendría la siguiente forma:

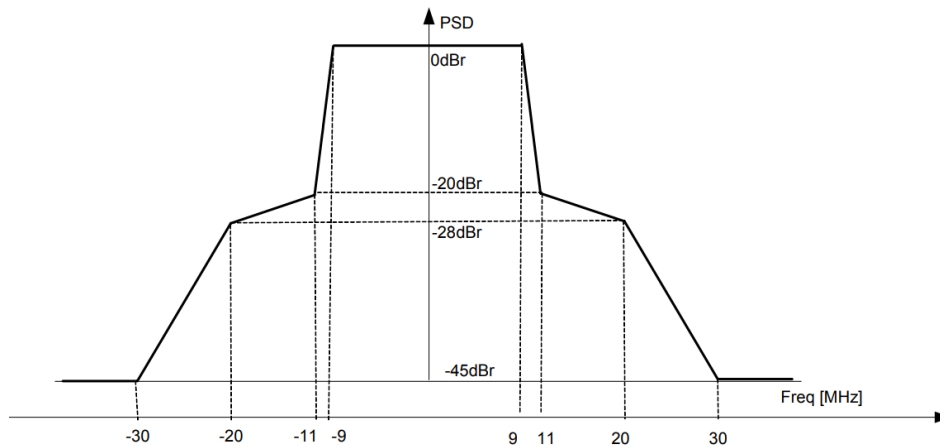


Figura 6. Representación gráfica de la máscara espectral de transmisión para un canal de 20 MHz

Canal de 40 MHz

En el caso de que se hiciese uso de *channel bonding* para poder utilizar canales con un ancho de banda de 40 MHz, se realizaría de la siguiente manera:

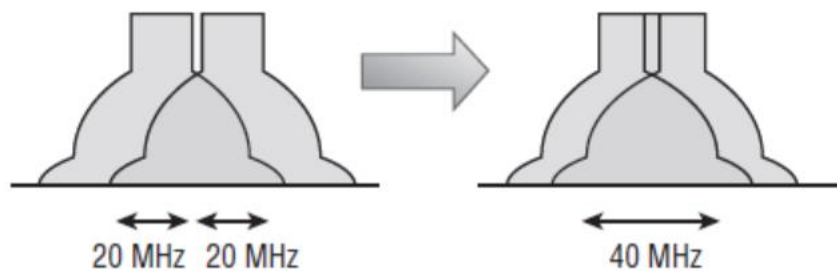


Figura 7. Representación gráfica de la máscara espectral de transmisión para un canal de 20 MHz a 40 MHz

Quedando la máscara espectral de transmisión de los canales de 40 MHz con esta estructura:

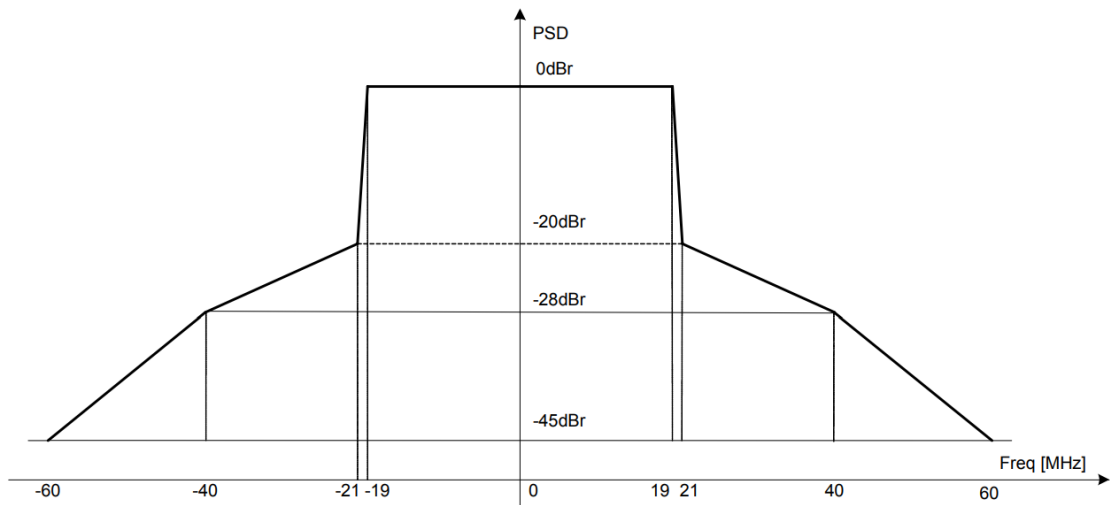


Figura 8. Máscara espectral de transmisión de los canales de 40 MHz aplicado en el presente trabajo

Como se puede observar, el eje “y” se encuentra representado en escala logarítmica. Para pasarlo a escala lineal, vamos a aplicar la siguiente fórmula:

$$10 \cdot \log_{10} u = x$$

Siendo x el valor en la escala logarítmica y u el valor en la escala lineal, despejando obtendríamos lo siguiente:

$$u = 10^{\frac{x}{10}}$$

Si se sustituye la x por los valores mostrados en la máscara espectral de transmisión de las señales Wi-Fi, obtenemos estos valores:

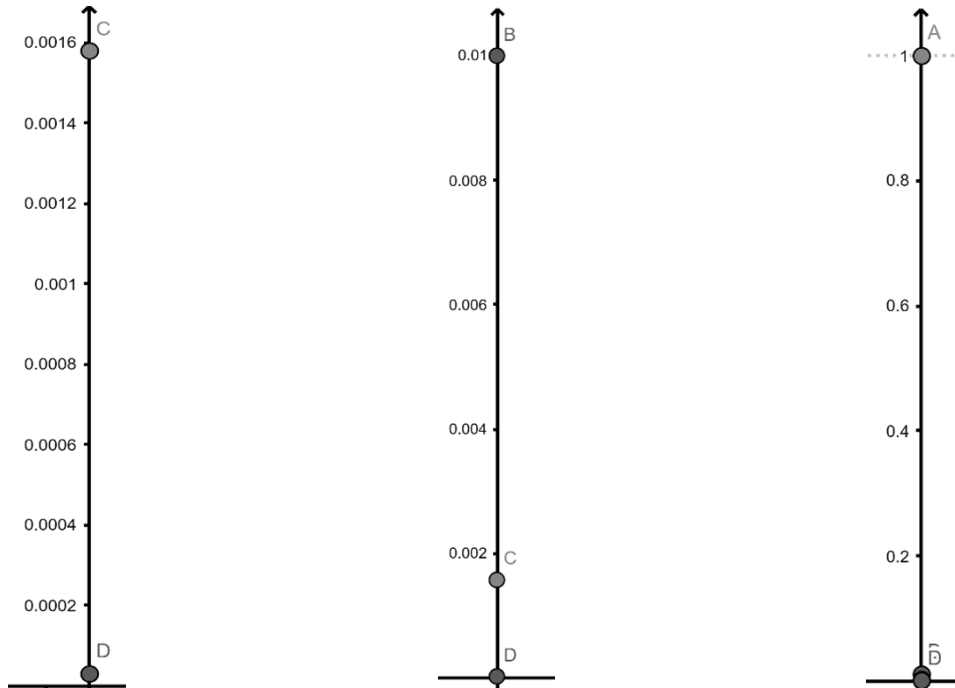
$$x = 0 \text{ dBm} \rightarrow u = 10^{\frac{0}{10}} = 1$$

$$x = -20 \text{ dBm} \rightarrow u = 10^{\frac{-20}{10}} = 0'01$$

$$x = -28 \text{ dBm} \rightarrow u = 10^{\frac{-28}{10}} = 0'00158$$

$$x = -45 \text{ dBm} \rightarrow u = 10^{\frac{-45}{10}} = 0'0000316$$

Si al primer valor le asignamos el nombre A, al segundo B, al tercero C y al último D, la representación visual sería la siguiente:



Como se puede observar, la distancia entre el punto A y los puntos B, C y D es más representativa y significativa que la distancia de los otros tres puntos entre sí. De esta manera se demuestra que la distancia de los puntos B, C y D entre sí es prácticamente despreciable, y por lo tanto la señal quedaría representada por los valores comprendidos entre los -11 y 11 MHz. Pudiendo realizarse el estudio tomando como referencia una señal rectangular.

Metodología

Tipo de investigación

El presente estudio se enmarca dentro del enfoque experimental cuantitativo[30]. Es experimental dado que se han tomado datos directamente de la fuente (datos de campo) los cuales corresponden a señales de interferencias a 20 MHz y 40 MHz. Estos datos han sido procesados y analizados a fin de conocer el rendimiento arriba (up) y abajo (down) de los 12 canales de recepción en una red 802.11 (Wi-Fi). El enfoque también es cuantitativo ya que se aplican técnicas de cálculos y análisis estadístico para el cálculo de los niveles de confianza de los rendimientos obtenidos en cada partida.

Datos de partida

Los coeficientes de interferencia ACI entre distintos canales se han determinado siguiendo la teoría de Radio para señales WLAN.

Materiales

Usados para la recogida y el análisis de los datos:

- Ordenador portátil Toshiba Portege como principal herramienta de trabajo.
- Spyder 5.0.5
- Servidor Anaconda3 2021.05
- Python 3.8.8
- MS Excel 365
- MS Word 365

Escenarios

Un punto importante de este proyecto es que se consideran 12 escenarios distintos con los que se pretende evaluar el rendimiento de la técnica de *channel bonding* en cada caso. Los escenarios fijados se basan en la variación de la intensidad de las señales de 20 MHz y 40 MHz, comenzando por el punto donde todos los canales están a 20 MHz y, posteriormente, se van configurando más canales a 40 MHz y reduciendo los de 20 MHz, hasta el punto de que todos los canales estarán a 40 MHz.

Según se va avanzando en los escenarios, va aumentando la densidad de estos. Primero tenemos el escenario 1, con 80 terminales, y se van aumentando de 40 en 40 hasta que se llega al escenario 12, con 520 terminales.

Como parámetros de ejecución se van a definir los siguientes:

- Potencia de transmisión: 14.77 dBm
- Ganancia de la antena transmisora: 0 dB (2.14 dBi)
- Ganancia de la antena receptora: 0 dB (2.14 dBi)
- Sensibilidad: 85 dBm
- Umbrales para escoger el esquema de codificación de la modulación (MCS) Wi-Fi para 20 MHz: [0.0, 6.5, 13.0, 19.5, 26.0, 39.0, 52.0, 58.5, 65.0]
- Umbrales para escoger el esquema de codificación de la modulación (MCS) Wi-Fi para 40 MHz: [0.0, 13.5, 27.0, 40.5, 54.0, 81.0, 108.0, 121.5, 135.0]

Fases del proyecto

El proyecto ha sido desarrollado a través de las siguientes fases o etapas:

Fase 1: Revisión bibliográfica

En esta fase se realiza todo lo relativo a la búsqueda exhaustiva de la bibliografía disponible sobre el tema en cuestión. Más concretamente, se profundizó en los conceptos de *channel bonding* en redes 802.11 utilizando interferencias de solapamiento adyacente con canales de 20 MHz y 40 MHz en bandas de 2,4 GHz y 5 GHz. También se incluyeron aquellos artículos publicados que han realizado ensayos similares a los aquí expuestos, a fin de construir un corolario robusto sobre el tema de investigación. Posteriormente, se podrá redactar el marco teórico y el estado de la cuestión de la memoria final; así como reunir toda la evidencia necesaria para la discusión de los resultados obtenidos.

Fase 2: Puesta a punto de los equipos

Una vez analizados e interiorizados los términos básicos inherentes al trabajo el siguiente paso consistió en reunir los equipos y herramientas necesarios. Los equipos utilizados en los ensayos se muestran en el epígrafe Materiales, de la sección Metodología de la presente memoria.

Fase 3: Términos teóricos y estado de la cuestión

Derivado de la búsqueda bibliográfica, se ha podido redactar el marco teórico y el estado de la cuestión del trabajo. Los términos básicos han incluido la definición de las redes 802.11, origen, evolución, usos y prospectiva futura. También se ha abordado el método de *channel bonding* a fin de conocer el rendimiento de los canales de 20 y 40 MHz en bandas de 2,4 y 5 GHz.

Fase 4: Ensayos y recolección de datos

Esta etapa del proyecto contempla la puesta en marcha de los ensayos experimentales. Se han llevado a cabo 12 pruebas de rendimiento con solapamiento comenzando con canales de 20 MHz los cuales irán disminuyendo en la medida que se incrementan los canales de 40 Hz. Como resultado, se obtienen las lecturas para rendimiento up y down respectivamente, arrojando un total de 24 partidas de datos que muestran la media del rendimiento sin solapamiento, su desviación estándar, la media del canal 20 MHz y 40 MHz y sus respectivas desviaciones.

La recolección y anotación de los datos obtenidos en cada ensayo permitió construir los gráficos de rendimiento con los que el investigador podrá observar y analizar los perfiles de comportamiento resultantes.

Fase 5: Análisis y presentación de los resultados

Tras la obtención de los datos recabados se construyen 24 partidas tabuladas donde se almacenan las medias de los rendimientos en cada cambio de canal (40 MHz y 20 MHz) Los atributos de las tablas obtenidas son: media de rendimiento total, desviación, media de canal 20 MHz, desviación 20 MHz, media de canal 40 MHz y desviación 40 MHz. Estas tablas se tendrán tanto para Up como Down. Con estas tablas y sus respectivos gráficos, se pretenden responder a los objetivos propuestos.

Cronograma

El cronograma de actividades realizadas se presenta en el siguiente diagrama de Gantt. El proyecto tuvo una duración total de 12 semanas que abarcaron desde abril hasta julio del año en curso (2022).

Fecha Inicio: 18/04/2022

Fecha Final: 11/07/2022

Tiempo / Fase	SEMANAS											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Revisión de la literatura	■	■										
Puesta a punto			■									
Bases teóricas				■								
Estado de la cuestión					■							
Ensayos					■	■	■	■	■			
Análisis de los datos									■	■		
Resultados										■	■	■

Resultados

Como ya hemos mencionado anteriormente, el propósito de este estudio es examinar el rendimiento de una WLAN IEEE 802.11n con enlace de canales en respuesta a características particulares de la red. Los resultados obtenidos permiten establecer una base sólida sobre cómo construir redes 802.11n que maximicen el rendimiento de transmisión a través de la vinculación de canales.

En trabajos similares se ha determinado que el rendimiento del comportamiento de la vinculación de canales mejora siempre que la calidad de la señal exceda la sensibilidad del receptor [31]–[34]. En nuestro caso, hemos evaluado cómo se comporta la vinculación de canales en contextos más realistas con enlaces vecinos y potencialmente interferentes.

El impacto de los enlaces vecinos depende de la cantidad de superposición espectral. Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado, especialmente en la banda de 2,4 GHz, en el contexto de canales parcialmente superpuestos [35], [36]. En nuestro estudio evaluamos el impacto de los enlaces vecinos con ancho de banda variable en el rendimiento, para que podamos asignar canales de manera más eficaz.

Vale destacar por supuesto, que tanto la teoría como los resultados experimentales de trabajos anteriores sostienen que, para maximizar el rendimiento, los nodos vecinos de transmisión simultánea deben operar en canales que no se superpongan para evitar la contención y la interferencia para el cliente. Así, en condiciones de canales compartidos, las posibilidades de acceso promedio de una estación dependen de la carga impuesta a la red por otras fuentes de interferencia que operan en los mismos canales o superpuestos.

Derivado de lo anterior, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de rendimientos para escenarios con interferencias de canales de 20 y 40 MHz tanto para carga *Upstream* como *Downstream*.

Rendimientos UP

A continuación, mostramos los resultados de rendimientos en *Upstream* para los 12 escenarios. La línea azul corresponde a la media de rendimiento considerando canales de 20 y 40 MHz en conjunto; la línea verde representa el rendimiento de los canales de 40 MHz y la línea naranja el de los de 20 MHz. En todos los casos, las figuras muestran el valor medio junto con los intervalos de confianza al 95%.

En la figura 9 se muestran los resultados para los 4 primeros escenarios de la red: 1, 2, 3 y 4 en Upstream.

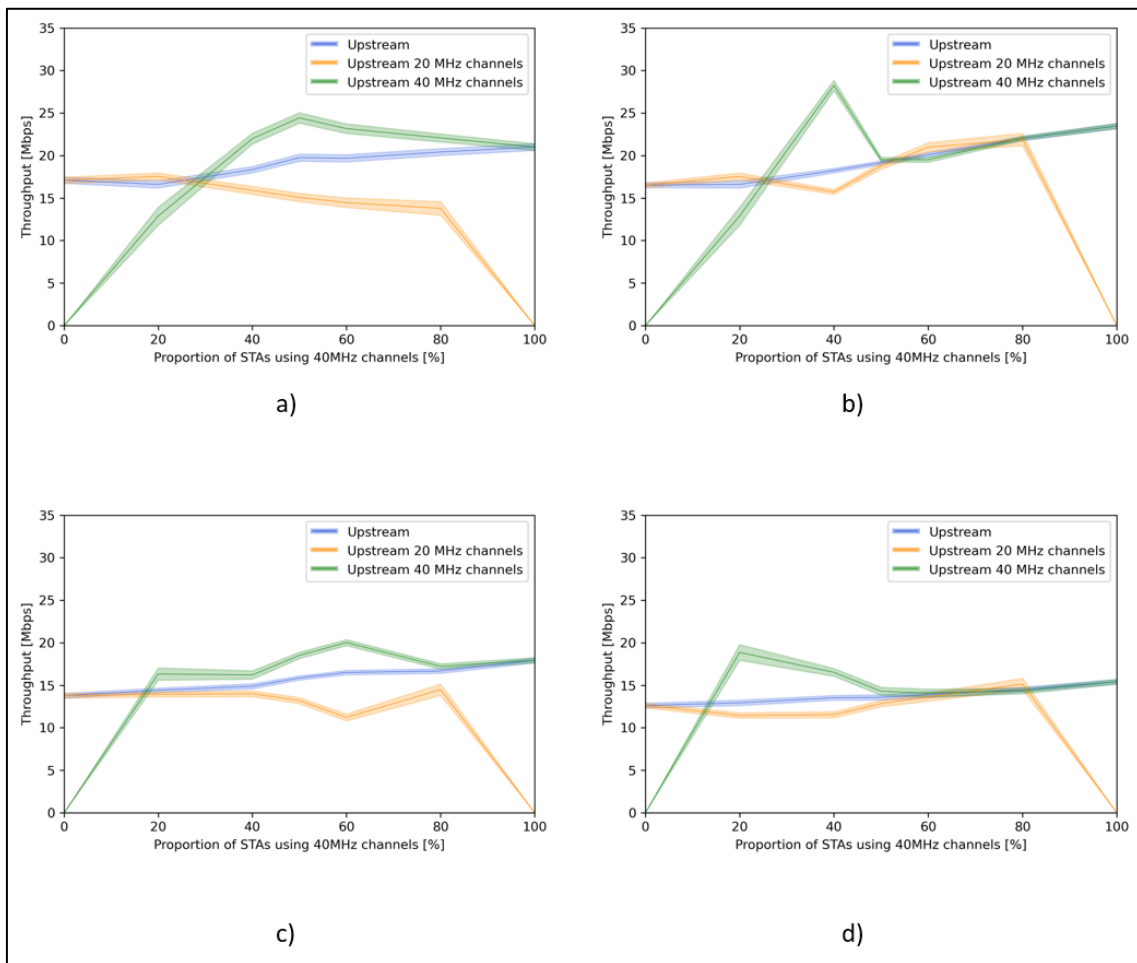


Figura 9. Perfil de rendimiento *channel bonding* en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 1, b) escenario 2, c) escenario 3, d) escenario 4

De la figura 9 se desprende que el escenario que ha obtenido el mejor rendimiento conjunto es la configuración 2 con 23'5 Mbps para un 100% de canales de 40 MHz, y un rendimiento para los canales de 40 MHz de 28'2 Mbps con un 60% de canales de 20 MHz.

El segundo mejor rendimiento se obtuvo en el escenario 1 con 21 Mbps para un 100% de canales de 40 MHz, y un rendimiento para los canales de 40 MHz de 24'4 Mbps para un 50% de canales de 20 MHz.

En los 4 casos observamos que tanto el rendimiento total como el de 40 MHz tienden a estabilizarse luego de utilizar el 50% de canales de 40 MHz e ir aumentando su porcentaje.

En la medida que aumentamos la densidad de cada escenario el rendimiento medio total tiende a disminuir. En la figura 10 se muestran los resultados obtenidos en *Upstream* para los escenarios 5, 6, 7 y 8.

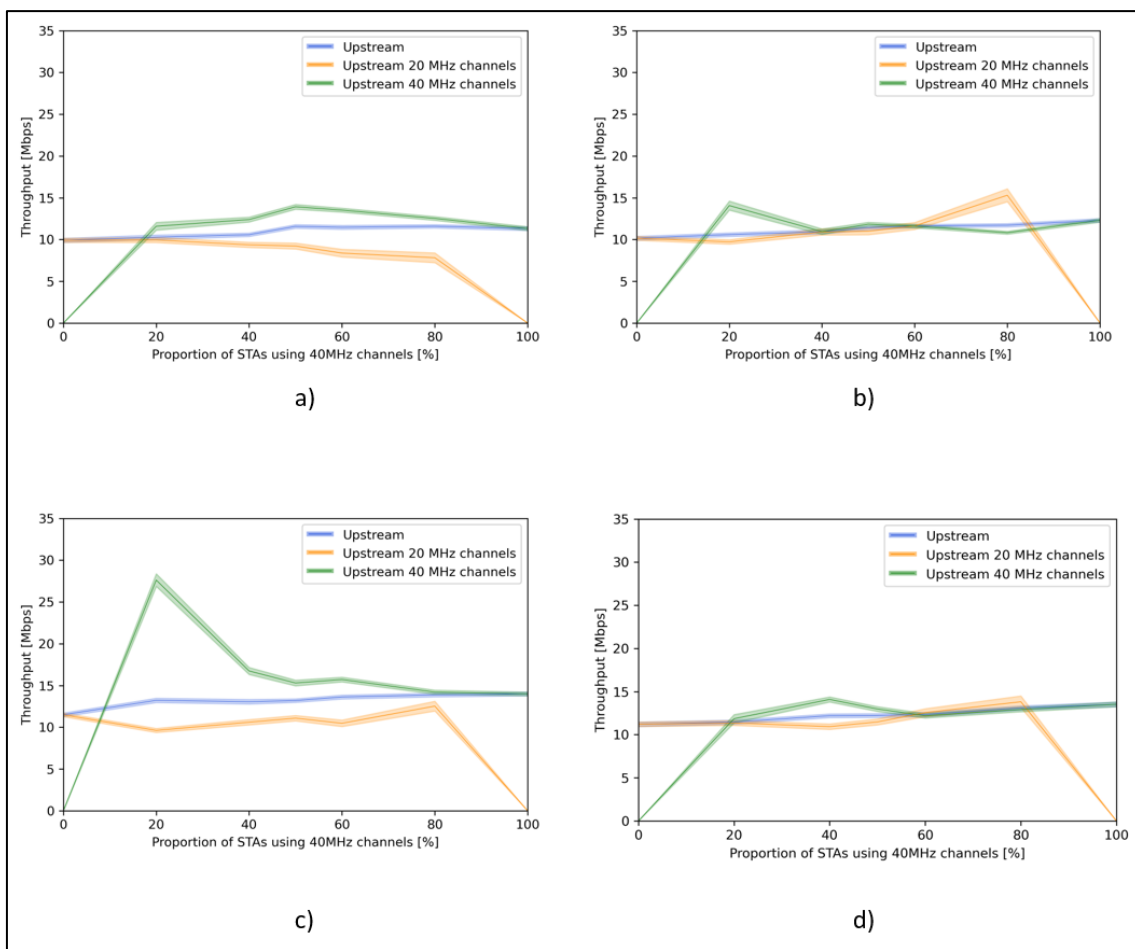


Figura 10. Perfil de rendimiento *channel bonding* en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 5, b) escenario 6, c) escenario 7, d) escenario 8

El máximo rendimiento se ha encontrado en el escenario 7 con 27'6 Mbps para los canales de 40 MHz con un 80% de canales de 20 MHz. Sin embargo, el rendimiento conjunto no supera los 14 Mbps.

Para el resto de los escenarios las señales de 20 y 40 MHz alcanzan rápidamente la estabilidad a partir del 20% de canales 40 MHz y 80% de canales de 20 MHz utilizado (véase escenarios 5, 7 y 8).

El patrón observado en la figura 10 se repite en los siguientes 4 escenarios (9, 10, 11 y 12), donde el rendimiento medio total, a 40 MHz y 20 MHz ha disminuido con respecto a la figura 9 (ver figura 11). A excepción del escenario 10, donde la media de los canales de 40 MHz con un 80% de canales de 20 MHz alcanza un pico máximo de 15'4 Mbps, el resto de los escenarios mostraron un rendimiento medio por debajo de los 10 Mbps.

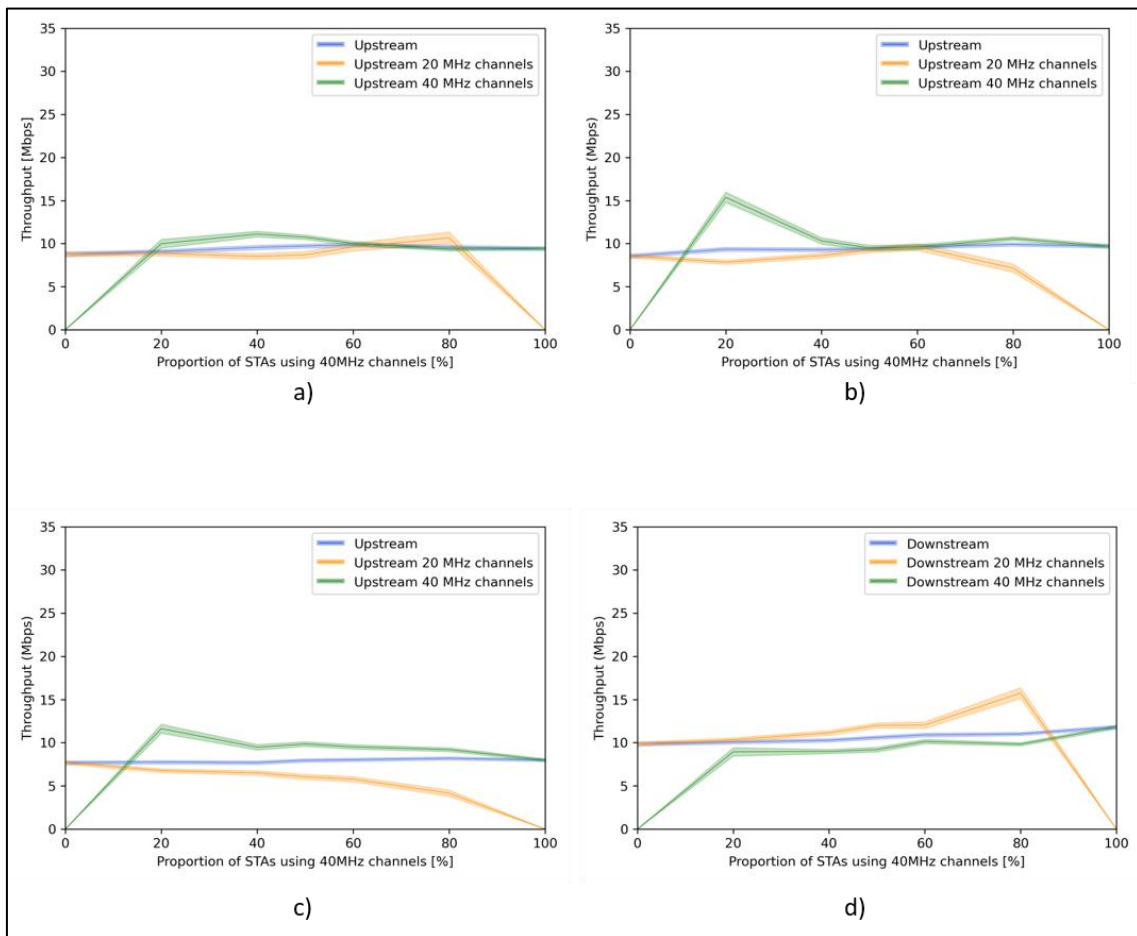


Figura 11. Perfil de rendimiento *channel bonding* en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 9, b) escenario 10, c) escenario 11, d) escenario 12

Vale destacar, sin embargo, el comportamiento del rendimiento medio en el escenario 12 de los canales de 20 MHz con un 20% de dichos canales, el cual tiene un pico de 16'5 Mbps.

Rendimientos Down

Pasando a los análisis en *Downstream*, los resultados para los 12 escenarios se muestran en las figuras 11, 12 y 13 respectivamente.

A priori, los rendimientos obtenidos para los canales 1, 2, 3 y 4 (ver figura 12) son similares al caso *Upstream*, con picos de rendimiento medio total entre 12 y 25 Mbps.

En cuanto a los rendimientos considerando una única señal de interferencia, cabe destacar la de 40 MHz en el escenario 2, alcanzando los 30 Mbps usando un 80% de canales de 20 MHz, y en el escenario 1, llegando hasta los 26'8 Mbps con un 60% de canales de 20 MHz. Asimismo, y con valores superiores a la media total, sobresalen los escenarios 3 y 4 con picos de 20'7 y 19 Mbps respectivamente.

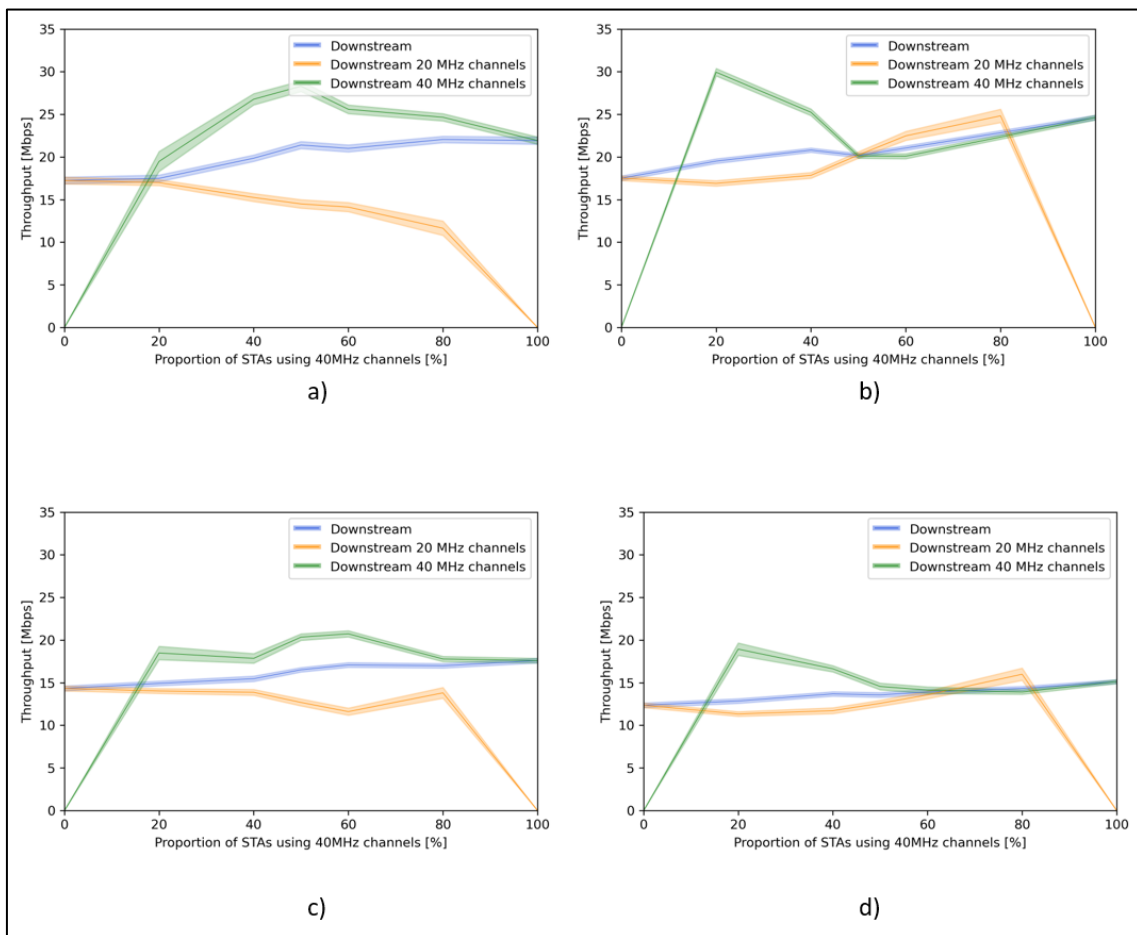


Figura 12. Perfil de rendimiento *channel bonding* en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 1, b) escenario 2, c) escenario 3, d) escenario 4

Análogo a lo evidenciado en la figura 10, en la medida que se avanza en los escenarios de la red y aumenta la densidad, se observa una disminución considerable del rendimiento del *channel bonding* (ver figura 13).

En la figura 13 podemos observar que pasando a los escenarios 5, 6, 7 y 8, el rendimiento medio total obtenido no supera los 13 Mbps. Encontrándose un pico importante para la señal de 40 MHz en el escenario 7, con un 80% de canales de 20 MHz, que ronda los 20 Mbps.

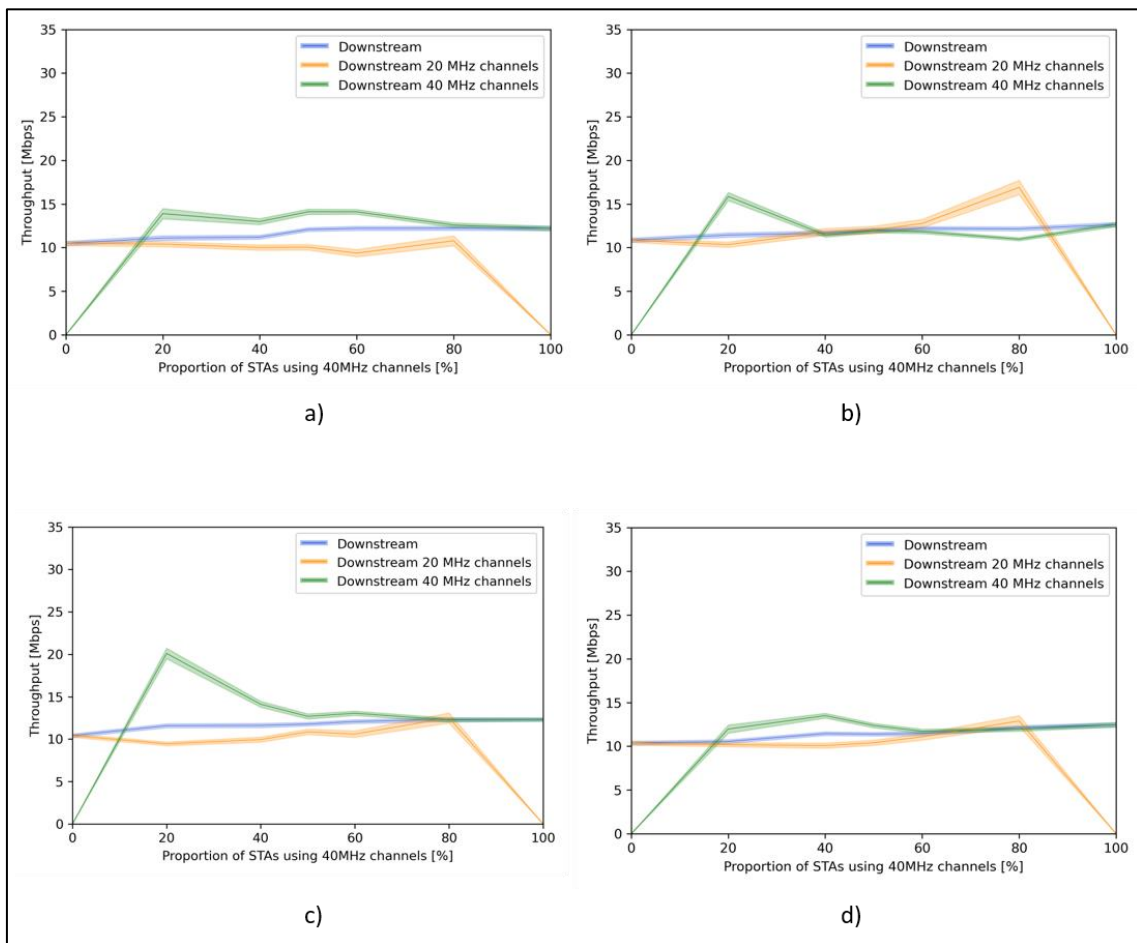


Figura 13. Perfil de rendimiento *channel bonding* en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 5, b) escenario 6, c) escenario 7, d) escenario 8

En cuanto a los resultados correspondiente a los escenarios 9, 10, 11 y 12, los rendimientos obtenidos disminuyen con respecto al caso anterior, donde el rendimiento medio conjunto apenas logra superar los 10 Mbps (escenario 12).

Se destacan picos importantes en el escenario 10 en la señal de 40 MHz con un 80% de canales de 20 MHz y un rendimiento de 14'1 Mbps. Y en el escenario 12 en la señal de 20 MHz con un 20% de canales de 20 MHz y un rendimiento de 15'7 Mbps.

El escenario 12 ha mostrado el mayor rendimiento a lo largo de los ensayos aplicados para *Downstream*.

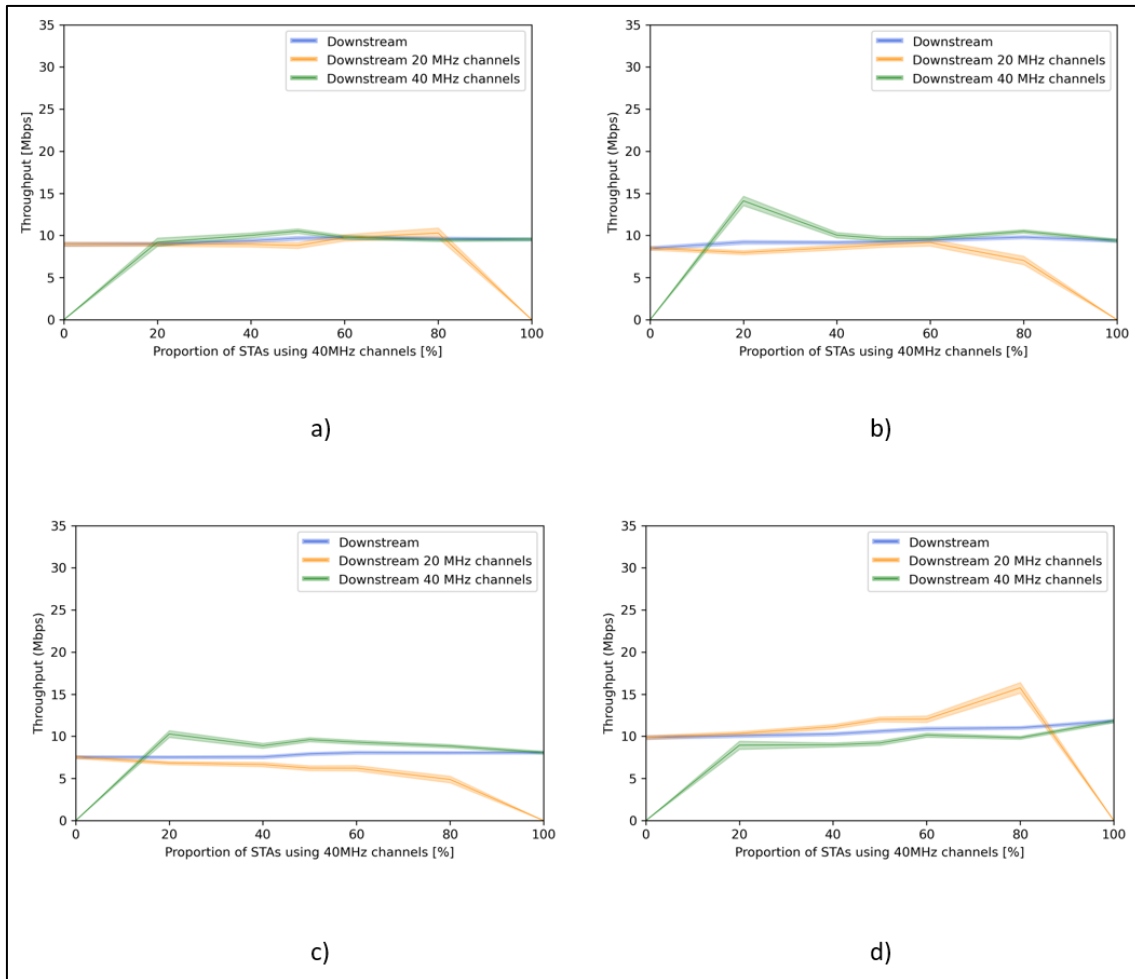


Figura 14. Perfil de rendimiento *channel bonding* en canales 20 y 40 MHz: a) escenario 9, b) escenario 10, c) escenario 11, d) escenario 12

Evaluación de los resultados

De los resultados mostrados anteriormente se puede deducir que tanto en el caso del análisis en *Upstream* como en el caso *Downstream*, el aumento de los terminales perjudica negativamente al rendimiento.

En ambas situaciones se observa que los mejores resultados en cuanto a rendimiento se obtienen en los primeros escenarios, cuyo número de terminales es hasta 5 veces menor que en el escenario número 12.

Según va aumentando la densidad, se percibe como el rendimiento va descendiendo paulatinamente, hasta que se obtiene su resultado más bajo en las últimas gráficas.

Asimismo, se puede observar que como regla general según se incrementa el número de terminales, los rendimientos tienden a estabilizarse. De los escenarios con menos terminales se puede deducir que según se va aumentando el % de canales de 40 MHz utilizados, el rendimiento conjunto sufre una pequeña mejora y va aumentando ligeramente. Pero según crece la densidad, el rendimiento se vuelve más constante independientemente de la distribución los canales, llegando a ser su resultado muy parecido en los tres casos (rendimiento conjunto, rendimiento de la señal de 20 MHz y rendimiento de la señal de 40 MHz).

Por otro lado, analizando los resultados, se puede concluir que los clientes de 40 MHz no perjudican a los de 20 MHz. En general, el rendimiento tanto de la señal de 20 MHz como el de la señal de 40 MHz tiende a mantenerse estable indistintamente de la distribución de canales utilizada.

Conclusiones

La vinculación de canales en redes 802.11n (*channel bonding*) se muestra como un método que promete mayores tasas de transmisión de datos y un mejor rendimiento. En este trabajo, identificamos un conjunto clave de factores de red que nos permiten evaluar con precisión el impacto de las condiciones de la red y las opciones de vinculación de canales en el rendimiento, especialmente en operación de 2,4 GHz. Encontramos que las decisiones de vinculación de canales inteligentes se basan particularmente en la intensidad de la señal de los enlaces y la utilización del canal.

Los resultados expuestos sirven como términos de uso para integrar de manera inteligente la operación de 20 MHz en implementaciones de red para maximizar el rendimiento y la eficiencia de este tipo de redes.

Este trabajo apoya la base sobre la cual se pueden construir soluciones de gestión de canales para redes 802.11n, tomando en cuenta los principios de diseño de gestión de canales de la literatura existente. Además, estos resultados se pueden extrapolar tanto en toda la red para mejorar la gestión de canales de toda la WLAN como en todo el enlace para facilitar los mecanismos de adaptación de la tasa por paquete para optimizar pares individuales de transmisores y receptores.

Pliego de condiciones

A través del pliego de condiciones expondremos los materiales de hardware y los recursos de software que han sido necesarios para la elaboración de este proyecto.

Material hardware:

- Ordenador portátil Toshiba Portege Pro como herramienta principal de trabajo.



- Monitor HP, ratón y teclado como soporte para comodidad de trabajo.

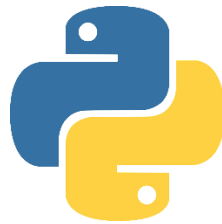


Material software:

- Anaconda Navigator como entorno de desarrollo (Spyder y librerías internas destacando NetworkX y NumPy).



- Python como lenguaje de programación para la implementación de los scripts. (En su versión 3.8.8).



- Microsoft Office para la redacción de la memoria, realización de la presentación y del diagrama de Gantt. (Microsoft Office Word, Microsoft Office Power Point y Microsoft Office Excel)



Actividades realizadas:

Las actividades realizadas para llevar a cabo este proyecto se muestran a continuación:

1. Revisión crítica y profunda de la literatura disponible sobre el tema en cuestión
2. Puesta a punto de los recursos tanto de hardware como software que se utilizarían
3. Construcción de la fundamentación teórica a partir de la revisión bibliográfica (punto 1)
4. Análisis y diseño del estado de la cuestión a fin de conocer el panorama de investigación sobre el campo de estudio inherente a este proyecto.
5. Realización de las simulaciones y cálculos sobre los canales de experimentación de la señal
6. Análisis y visualización de los resultados obtenidos
7. Exposición de conclusiones finales

Presupuesto

Las partidas de costes asociados a la realización del proyecto han sido desglosadas en función del software utilizado, el hardware requerido y el tiempo de dedicación para las actividades relacionadas al proyecto como: redacción de la memoria, lectura de la documentación técnica, desarrollo de los scripts, visualización de los resultados y testing de la aplicación final.

Costes asociados al software:

- Office 365 – licencia anual E2: 130€
- Python: 0€
- Anaconda versión usuario: 0€
- Spyder IDE: 0€

Total software: **130'00 €**

Costes asociados al hardware

- Monitor HP M27fwa de 68'6 cm (27''): 177'65 €
- Teclado Logitech G213 Prodigy: 39'98 €
- Ratón inalámbrico - Logitech M171, 1000 ppp, Ambidextro, USB, Negro: 12'99€
- Portátil - Dynabook Toshiba Portégé: 1399'00 €

Total hardware: **1.629'62 €**

Costes de implementación

Los costes de implementación se expresarán de manera tabulada. Cada tabla corresponde a una partida distinta. Para dichos costes hemos estimado un precio de labor en 13€/h.

Tabla 6. Partida de costes asociados al proceso de documentación

Documentación		
Tecnología o Librería	Horas	Precio (€)
Anaconda	12	156'00 €
Python 3.8	20	260'00 €
Spyder	20	260'00 €
Red Wi-Fi 802.11	10	130'00 €
Métodos de cálculo	8	104'00 €
Total (€)		910'00 €

Elaboración propia

Tabla 7. Partida de costes asociados al proceso de redacción de memoria del proyecto

Memoria descriptiva		
Concepto	Horas	Precio (€)
Maquetación	2	26'00 €
Redacción	110	1.430'00 €
Correcciones	20	260'00 €
Impresión	0	20'00 €
Total		1.736'00 €

*Elaboración propia***Tabla 8. Partida de costes asociados a la simulaciones, cálculos y desarrollo de los scripts**

Simulaciones y cálculos		
Concepto	Horas	Precio (€)
Obtención de Datos	5	65'00 €
Desarrollo Python	44	572'00 €
generación de resultados	2	26'00 €
Visualización	4	52'00 €
Testing	10	130'00 €
Total		845'00 €

Elaboración propia

Por consiguiente, el presupuesto total requerido para este proyecto viene expresado en la siguiente tabla:

Documentación	910'00 €
Memoria descriptiva	1.736'00 €
Simulaciones y cálculos	845'00 €
Software	130'00 €
Hardware	1.629'62 €
Total	5.250'62 €

Elaboración propia

Presupuesto final: 5.265'62€

Bibliografía

- [1] Ong, Eng Hwee, et al. «IEEE 802.11 ac: Enhancements for very high throughput WLANs.» *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. IEEE, 2011.
- [2] Siddiqui, Farhan, Sherali Zeadally, and Khaled Salah. «Gigabit wireless networking with IEEE 802.11 ac: technical overview and challenges.» *Journal of networks* 10.3 (2015): 164.
- [3] Khorov, Evgeny, et al. «A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs.» *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21.1 (2018): 197-216..
- [4] Deng, Cailian, et al. «IEEE 802.11 be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities.» *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.4 (2020): 2136-2166..
- [5] Garcia-Rodriguez, Adrian, et al. «IEEE 802.11 be: Wi-Fi 7 strikes back.» *IEEE Communications Magazine* 59.4 (2021): 102-108.
- [6] M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, y E. Lopez-Aguilera, «IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for Future High Efficiency Wi-Fi», *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 24, n.º 3, pp. 130-137, 2016.
- [7] S. De Bast, R. Torrea-Duran, A. Chiumento, S. Pollin, y H. Gacanin, «Deep Reinforcement Learning for Dynamic Network Slicing in IEEE 802.11 Networks», en *INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops, INFOCOM WKSHPS 2019*, 2019, pp. 264-269.
- [8] S. Wang, B. Li, M. Yang, y Z. Yan, «Intrusion detection for Wi-Fi network: A deep learning approach», en *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, 2019, vol. 264, pp. 95-104.
- [9] R. Ali, Y. Bin Zikria, S. Won Kim, y B.-S. Kim, «Deep Reinforcement Learning paradigm for dense wireless networks in Smart-Cities», *researchgate.net*, pp. 43-70, 2020.
- [10] R. Ali, N. Shahin, R. Bajracharya, B. S. Kim, y S. W. Kim, «A self-scrutinized backoffmechanism for IEEE 802.11ax in 5G unlicensed networks», *Sustain.*, vol. 10, n.º 4, 2018.

- [11] M. Nurchis y B. Bellalta, «Target wake time: Scheduled access in IEEE 802.11ax WLANs», *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, n.º 2, pp. 142-150, abr. 2019.
- [12] F. Siddiqui, S. Zeadally, y K. Salah, «Gigabit Wireless Networking with IEEE 802.11ac: Technical Overview and Challenges», *J. Networks*, vol. 10, n.º 3, 2015.
- [13] J. Friedrich, S. Frohn, S. Gubner, y C. Lindemann, «Understanding IEEE 802.11n multi-hop communication in wireless networks», en *2011 International Symposium on Modeling and Optimization of Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, WiOpt 2011*, 2011, pp. 321-326.
- [14] G. Judd y P. Steenkiste, «Characterizing 802.11 wireless link behavior», *Wirel. Networks*, vol. 16, n.º 1, pp. 167-182, jun. 2010.
- [15] K. Ogunjemilua, J. N. Davies, R. Picking, y V. Grout, «An Investigation into Signal Strength of 802.11n WLAN», en *Proceedings of the Fifth Collaborative Research Symposium on Security, E-Learning, Internet and Networking (SEIN 2009)*, 2009, n.º November, pp. 191-204.
- [16] K. Bicakci y B. Tavli, «Denial-of-Service attacks and countermeasures in IEEE 802.11 wireless networks», *Computer Standards and Interfaces*, vol. 31, n.º 5. North-Holland, pp. 931-941, 01-sep-2009.
- [17] R. Murty, J. Padhye, A. Wolman, y M. Welsh, «Dyson: An architecture for extensible wireless LANs», en *Proceedings of the 2010 USENIX Annual Technical Conference, USENIX ATC 2010*, 2010, pp. 201-214.
- [18] M. Y. Arslan *et al.*, «ACORN: An auto-configuration framework for 802.11n WLANs», *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 21, n.º 3, pp. 896-909, 2013.
- [19] M. Y. Arslan, K. Pelechrinis, I. Broustis, S. V Krishnamurthy, S. Addepalli, y K. Papagiannaki, «Auto-configuration of 802.11n WLANs», en *Proceedings of the 6th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, Co-NEXT'10*, 2010.
- [20] P. Bahl, R. Chandra, T. Moscibroda, R. Murty, y M. Welsh, «White space networking with Wi-Fi like connectivity», en *Computer Communication Review*, 2009, vol. 39, n.º 4, pp. 27-38.
- [21] D. Halperin, B. Greenstein, A. Sheth, y D. Wetherall, «Demystifying 802.11 n

- power consumption», *usenix.org*, 2009.
- [22] M. T. Masonta, M. Mzyece, y N. Ntlatlapa, «Spectrum decision in cognitive radio networks: A survey», *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, n.º 3, pp. 1088-1107, 2013.
- [23] D. Y. Yang, T. J. Lee, K. Jang, J. B. Chang, y S. Choi, «Performance enhancement of multirate IEEE 802.11 WLANs with geographically scattered stations», *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 5, n.º 7, pp. 906-919, 2006.
- [24] S. Yun, D. Kim, y L. Qiu, «Fine-grained spectrum adaptation in Wi-Fi networks», en *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, 2013, pp. 327-338.
- [25] V. Kone *et al.*, «The Effectiveness of Opportunistic Spectrum Access: A Measurement Study», *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 20, n.º 6, pp. 2005-2016, 2012.
- [26] L. Yang, W. Hou, L. Cao, B. Y. Zhao, y H. Zheng, «Supporting demanding wireless applications with frequency-agile radios», en *Proceedings of NSDI 2010: 7th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, 2010, pp. 65-79.
- [27] I. Pefkianakis, Y. Hu, S. H. Y. Wong, H. Yang, y S. Lu, «MIMO rate adaptation in 802.11n wireless networks», en *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, 2010, pp. 257-268.
- [28] Y. C. Chen, Y. S. Lim, R. J. Gibbens, E. M. Nahum, R. Khalili, y D. Towsley, «A measurement-based study of multipath TCP performance over wireless networks», en *Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference, IMC*, 2013, pp. 455-468.
- [29] M. D. Dianu, J. Riihijärvi, y M. Petrova, «Measurement-based study of the performance of IEEE 802.11ac in an indoor environment», en *2014 IEEE International Conference on Communications, ICC 2014*, 2014, pp. 5771-5776.
- [30] A. Sans y L. R. B. Atenea Alonso Serrano, Lorena García Sanz, Irene León Rodrigo, Elisa García Gordo, Belén Gil Álvaro, «Métodos de investigación de

- enfoque experimental», *Metodol. la Investig. Educ.*, pp. 167-193, 2012.
- [31] S. H. R. Bukhari, M. H. Rehmani, y S. Siraj, «A Survey of *Channel bonding* for Wireless Networks and Guidelines of *Channel bonding* for Futuristic Cognitive Radio Sensor Networks», *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, n.º 2, pp. 924-948, 2016.
- [32] M. Y. Arslan, K. Pelechrinis, I. Broustis, S. V Krishnamurthy, S. Addepalli, y K. Papagiannaki, «Auto-configuration of 802.11n WLANs», en *Proceedings of the 6th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, Co-NEXT'10*, 2010.
- [33] R. Gummadi, D. Wetherall, B. Greenstein, y S. Seshan, «Understanding and mitigating the impact of RF interference on 802.11 networks», *Comput. Commun. Rev.*, vol. 37, n.º 4, pp. 385-396, 2007.
- [34] H. A. Omar, K. Abboud, N. Cheng, K. R. Malekshan, A. T. Gamage, y W. Zhuang, «A Survey on High Efficiency Wireless Local Area Networks: Next Generation Wi-Fi», *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, n.º 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 2315-2344, 01-oct-2016.
- [35] Y. Wu, K. S. Liu, J. A. Stankovic, T. He, y S. Lin, «Efficient multichannel communications in wireless sensor networks», *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 12, n.º 1, 2016.
- [36] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. W. Mutka, y N. Xi, «The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: A survey», *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, n.º 1, pp. 101-120, 2013.



Universidad
de Alcalá