

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

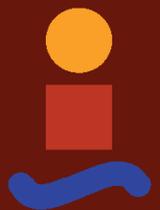
Estudio de las técnicas de Beamforming en el
estándar 802.11ac

Autor: María Vicente Jaramillo

Tutor: María José Madero Ayora

Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Estudio de las técnicas de Beamforming en el estándar 802.11ac

Autor:

María Vicente Jaramillo

Tutor:

María José Madero Ayora

Profesor titular

Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Trabajo Fin de Grado: Estudio de las técnicas de Beamforming en el estándar 802.11ac

Autor: María Vicente Jaramillo

Tutor: María José Madero Ayora

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, a de 2015.

El Secretario del Tribunal

“El mundo está en las manos de aquellos que tienen el coraje de soñar y correr el riesgo de vivir sus sueños”. Paulo Coelho.

Agradecimientos

Me gustaría dedicar este espacio a todas las personas que han hecho posible la redacción de este documento.

En primer lugar, agradecer a mi tutora y directora de proyecto María José Madero Ayora cada minuto que me ha dedicado y el entusiasmo que me ha transmitido en cada correo o visita en su despacho. Gracias por cada una de tus clases, de las que he sacado el máximo partido y difícilmente olvidaré.

A mis profesores, que han sabido transmitirme valores como el esfuerzo, la perseverancia y el trabajo en equipo. Especialmente a los profesores del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, de cada uno de vosotros he aprendido algo que me ha hecho mejorar tanto académica como personalmente. Gracias, Irene, por apostar por mí desde el primer momento. Me has enseñado que también se puede ir a clase con ganas y una sonrisa en la cara, eres un claro ejemplo de compromiso y pasión por la enseñanza.

A Wellness Telecom, por facilitarme la herramienta utilizada para la simulación y todo el material que he necesitado. Gracias por cada minuto que habéis dedicado a ayudarme y a hacerme crecer profesionalmente.

A mi familia y amigos, por cada palabra de ánimo, por creer siempre en mí, por esos ratitos para desconectar,...Habéis sido un gran apoyo durante todos estos años. Sin vosotros, esto no habría sido posible.

María Vicente Jaramillo

Sevilla, 2015

Resumen

La tecnología WiFi ha posibilitado durante los últimos años la movilidad de los usuarios a través de una zona amplia sin perder conectividad a Internet. Este cambio en el concepto que se tenía de las redes anteriormente ha permitido el desarrollo de un gran abanico de aplicaciones y utilidades para explotar al máximo todas las opciones que brindan este tipo de redes.

Desde 1997 hasta la actualidad, el estándar 802.11 ha ido evolucionando para adaptarse a las necesidades que en cada momento han demandado los usuarios. Es ahora cuando la versión 802.11ac del estándar está en pleno auge, respondiendo a las necesidades de velocidad y adaptándose al nuevo concepto de las redes y los dispositivos que están abriéndose hueco en el mercado de las telecomunicaciones.

Para relacionar todo el desarrollo teórico con la realidad, se ha utilizado la herramienta *Ekahau*, que permite realizar estudios (cobertura, ancho de banda, distribución de los canales, solapamiento, SNR,...) sobre las redes WiFi, tanto de forma teórica como *in-situ*.

Abstract

WiFi technology has made possible in recent years the mobility of users across a wide area without losing Internet connectivity. This change in the concept of networks has allowed the development of a wide range of applications and utilities to exploit all the options offered by these networks.

Since 1997, the standard has evolved to adapt to the needs of users. It is now that the 802.11ac standard version is booming, responding to the needs of speed and adapting to the new concept of networks and devices in the emerging telecommunications market.

In order to link all the theoretical development with reality, it has been used *Ekahau* which analyzes (coverage, bandwidth, distribution channels, overlap, SNR,...) WiFi networks, both theoretically and in-situ.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	xi
Glosario	xiv
1 Introducción	1
1.1 <i>Introducción al tema</i>	1
1.2 <i>Objetivos y alcance</i>	1
1.3 <i>Estructura de la memoria</i>	1
2 Estándar IEEE 802.11	5
2.1 <i>Redes inalámbricas</i>	5
2.2 <i>Aspectos generales de redes WiFi</i>	6
2.2.1 <i>Tipos de redes</i>	6
2.2.2 <i>Servicios de red</i>	7
2.2.3 <i>Redes en malla</i>	7
2.2.4 <i>Certificación WiFi</i>	8
2.2.5 <i>Gestión del acceso a los recursos radio</i>	8
2.2.6 <i>Formato de la señal WiFi</i>	10
2.2.7 <i>Seguridad en las redes 802.11</i>	11
2.2.8 <i>Antenas</i>	12
2.3 <i>Evolución del estándar 802.11</i>	13
2.3.1 <i>Aparición y características de las distintas versiones del estándar IEEE 802.11</i>	13
2.3.2 <i>Modalidades de capa física</i>	15
3 Versión 802.11ac del estándar	21
3.1 <i>Introducción</i>	21
3.2 <i>Capa física (PHY)</i>	22
3.2.1 <i>Radiocanales en el estándar 802.11ac</i>	22
3.2.2 <i>Máscara espectral de los radiocanales</i>	23
3.2.3 <i>Modulation and coding set (MCS)</i>	25
3.2.4 <i>Modulación 256-QAM</i>	26
3.2.5 <i>Tramas en la capa PHY</i>	27
3.2.6 <i>Proceso de transmisión y recepción</i>	27
3.2.7 <i>Velocidad de los datos en el estándar 802.11ac</i>	29
3.2.8 <i>Resumen de las especificaciones de capa física</i>	30
3.3 <i>Capa MAC</i>	30
3.3.1 <i>Clear Channel Assessment (CCA)</i>	30
3.3.2 <i>Ancho de banda de operación dinámico (RTS/CTS)</i>	32

4	Ilustración de prestaciones del 802.11ac en cuanto a cobertura y tasa	37
4.1	<i>Conceptos claves para el despliegue de una red WiFi</i>	37
4.2	<i>Software para el diseño de una red inalámbrica</i>	38
4.3	<i>Electrónica de red utilizada</i>	41
4.4	<i>Presentación del escenario</i>	43
4.5	<i>Diseño de la red inalámbrica</i>	47
4.5.1	Zona principal, patio de butacas	47
4.5.2	Zona de prensa	52
4.5.3	Zona de catering	54
4.6	<i>Site Survey</i>	55
5	Beamforming	59
5.1	<i>Introducción</i>	59
5.1.1	Potencia de transmisión	61
5.1.2	NDP (<i>Null Data Packet</i>)	61
5.2	<i>Beamforming monousuario</i>	64
5.2.1	Calibración del canal	65
5.2.2	Trama NDP	65
5.2.3	Trama de acción VHT comprimida	66
5.3	<i>Beamforming Multiusuario</i>	66
5.3.1	Calibración del canal	67
5.3.2	Trama de anuncio NDP	67
5.3.3	Trama NDP	68
5.3.4	Trama de acción comprimida	68
5.3.5	Trama <i>Beamforming Report Poll</i>	68
5.3.6	Transmisión MIMO multiusuario	69
5.3.7	Cambios en la capa física (PHY) para MIMO multiusuario	69
5.3.8	Implementación MIMO multiusuario	70
6	Conclusión y líneas futuras de trabajo	73
6.1	<i>Conclusiones</i>	73
6.2	<i>Líneas futuras de trabajo</i>	73
7	Bibliografía	75
8	Anexos	77
8.1	<i>Datasheet de los APs</i>	77
8.2	<i>Datasheet de las antenas externas</i>	86
8.3	<i>Report obtenido con Ekahau</i>	93



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Cambio de fase DBPSK	17
Tabla 2-2 Cambio de fase DQPSK	17
Tabla 2-3 Modulación DQPSK tasa de 5 Mbps	18
Tabla 2-4 Angulo de fase para tasas de 11 Mbps	18
Tabla 2-5 Diversas configuraciones de códigos convolucionales	19
Tabla 3-1 Diferencias entre los estándares 802.11n y 802.11ac	21
Tabla 3-2 Características de los distintos canales	23
Tabla 3-3 Distintos valores para la máscara espectral	24
Tabla 3-4 Distintos valores de MCS	25
Tabla 3-5 Comparación de las distintas velocidades obtenidas en los distintos estándares	29
Tabla 3-6 Especificaciones de la capa física	30
Tabla 3-7 Umbrales para ambos métodos	32
Tabla 5-1 Parámetros de la matriz de <i>feedback</i>	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Red <i>ad-hoc</i>	6
Figura 2-2 Redes basadas en infraestructura	6
Figura 2-3 Redes en malla	8
Figura 2-4 Certificación WiFi	8
Figura 2-5 Canales disponibles según la nota UN-85	9
Figura 2-6 Problema del nodo oculto	10
Figura 2-7 Formato trama señal WiFi	10
Figura 2-8 Multiplexación MIMO en antenas	12
Figura 2-9 Antena Omnidireccional	12
Figura 2-10 Antena direccional de panel	13
Figura 2-11 Máscara espectral	16
Figura 3-1 Diseño de los canales	23
Figura 3-2 Máscara espectral	24
Figura 3-3 Canales disponibles en cada región	25
Figura 3-4 Comparación de las modulaciones 64-QAM y 256-QAM	26
Figura 3-5 Vector de error	26
Figura 3-7 Trama PHY 802.11ac	27
Figura 3-8 Diagrama de bloques para transmisión y para recepción	28
Figura 3-9 Canales primarios y secundarios	31
Figura 3-10 Coexistencia de varias redes en una misma frecuencia	31
Figura 3-11 Proceso de acceso al canal	33
Figura 3-12 RTS y CTS trabajando conjuntamente	34
Figura 3-13 Canal compartido por varias redes	35
Figura 4-1 Interfaz Ekahau	38
Figura 4-2 Distintos tipos de obstáculos	39
Figura 4-3 Diagramas de radiación horizontal y vertical	39
Figura 4-4 Diagramas de radiación con escalas	40
Figura 4-5 Tilt de las antenas	40
Figura 4-6 AP Cisco 2702	41
Figura 4-7 Antena de panel utilizada para el diseño	42
Figura 4-8 Diagramas de radiación banda 2,4 GHz	43
Figura 4-10 Diagrama de radiación banda 5 GHz	43
Figura 4-11 Diferencia entre entorno típico y entorno de alta densidad	45
Figura 4-12 Plano planta inferior	45

Figura 4-13 Plano planta superior	45
Figura 4-14 Zona de prensa	46
Figura 4-15 Zona de catering	46
Figura 4-16 Requisitos de conectividad para patio de butacas	46
Figura 4-17 Requisitos de conectividad para zona de catering	46
Figura 4-18 Requisitos de conectividad para Zona de prensa	46
Figura 4-19 Requerimientos para el estudio	47
Figura 4-20 Posición de los APs en la zona principal	47
Figura 4-21 Posición de los APs	48
Figura 4-22 Datos de los APs	48
Figura 4-23 Parámetros configurables de la antena	49
Figura 4-24 Cambio de canal y ancho de banda 802.11ac	49
Figura 4-25 Cambio de canal y ancho de banda 802.11n	49
Figura 4-26 Distribución de los canales en ambas bandas	50
Figura 4-27 Nivel de señal en el Patio de Butacas	50
Figura 4-28 Ancho de banda en el Patio de Butacas	51
Figura 4-29 Valor de SNR en el Patio de Butacas	51
Figura 4-30 Zona que abarca cada AP en el Patio de Butacas	52
Figura 4-31 Salud de la red	52
Figura 4-32 Distribución de los APs en la Sala de Prensa	53
Figura 4-33 Nivel de señal en Sala de Prensa	53
Figura 4-34 Ancho de banda en Sala de Prensa	53
Figura 4-35 Distribución de los APs	54
Figura 4-36 Ancho de banda en zona catering	54
Figura 4-37 Cobertura en zona de catering	55
Figura 4-38 Resultado cobertura <i>Site Survey</i>	55
Figura 4-39 Solapamiento de canales <i>Site Survey</i>	56
Figura 4-40 Pérdida de paquetes	57
Figura 5-1 Cobertura omnidireccional	59
Figura 5-2 Proceso de <i>beamforming</i> simplificado	60
Figura 5-3 Desfase entre <i>arrays</i>	61
Figura 5-4 Transmisiones con <i>beamforming</i> y sin <i>beamforming</i>	63
Figura 5-5 <i>Givens Rotation</i>	63
Figura 5-6 Calibración del canal	65
Figura 5-7 Formato trama de anuncio NDP	65
Figura 5-8 Formato trama NDP	65
Figura 5-9 Formato de la de la matriz de acción	66
Figura 5-10 Procedimiento de calibración del canal	67
Figura 5-11 Trama de anuncio NDP Multiusuario	67
Figura 5-12 Trama de acción comprimida	68

Figura 5-13 Trama <i>Beamforming Report Poll</i>	68
Figura 5-14 Distintas rutas MIMO multiusuario	69
Figura 5-15 Formato de la trama de acción para el caso multiusuario	70
Figura 5-16 Interferencia interusuario	70

GLOSARIO

ACL	Access Control List
AP	Punto de Acceso
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSS	Basic Service Set
CCA	Clear Channel Assessment
CCK	Complementary Code Keying
CEPT	Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones
CNAF	Cuadro Nacional de Atribuciones de Frecuencia
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSD	Cyclic Shift Diversity
CSMA/CA	CSMA with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Clear to Send
DBPSK	Diferential BPSK
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed Interframe Space
DS	Distribution System
DSL	Dynamic Security Link
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ERP	Effective Radiated Power
ESS	BSS Extendido
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying

GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
IBSS	BSS Independiente
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFT	Inverse Fourier Transform
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LAN	Local Area Network
LDPC	Low-Density Parity-Check
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation and Coding Set
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MU-MIMO	MultiUser-MIMO
NDP	Null Data Packet
NFC	Near Field Communication
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
PC	Personal Computer
PCF	Point Coordination Function
PG	Power Gain
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
PLCP	Physical Level Convergence Procedure
PPDU	Physical Protocol Data Unit
PSDU	PLCP Service Data Unit
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RADIUS	Remote Authenticated Dial-In User Service
RSN	Robust Security Network
RTS	Request to send
SFD	Start Frame Delimiter

SNR	Signal-to-Noise Ratio
SSID	Service Set Identifier
STBC	Space-Time Block Code
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VHT	Very High Throughput
WDS	Wireless Distribution System
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WEP	Wired Equivalent Privacy
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area
WPA	WiFi Protected Access
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción al tema

La tecnología WiFi ha posibilitado durante los últimos años la movilidad de los usuarios a través de una zona amplia sin perder conectividad a Internet. Este cambio en el concepto que se tenía de las redes anteriormente ha permitido el desarrollo de un gran abanico de aplicaciones y utilidades para explotar al máximo todas las opciones que brindan este tipo de redes.

A lo largo de este documento se hace un recorrido a través de las distintas versiones del estándar 802.11 haciendo especial hincapié en la versión 802.11ac, que es la que está en auge actualmente. Esta versión aporta grandes mejoras frente a las versiones anteriores, como pueden ser:

- Aumento de la velocidad.
- Reducción de la interferencia entre distintos dispositivos. El paso de la banda de 2,4 GHz a la de 5 GHz ha reducido drásticamente la interferencia entre distintos dispositivos debido a que la banda de 5 GHz no está tan llena como la de 2,4 GHz, aumentando el rendimiento de forma significativa.
- Aumento del ancho de banda, hasta 160 MHz.
- Utilización de modulación 256-QAM, aumentando el rendimiento y la eficiencia de los dispositivos.

A lo largo de este documento se desarrollará por separado cada una de estas mejoras y de otros aspectos nuevos introducidos en esta versión. Además, se estudiarán las técnicas de *beamforming*, aspecto muy importante que permite monitorizar las redes LAN controlando qué dispositivos hay conectados y dónde. De este modo, las empresas tienen la posibilidad de añadir servicios que permitan conocer la ubicación de los usuarios y añadir publicidad, ayudando a conocer las tendencias de la red (movimientos de los clientes y demografía).

Todas las mejoras que incluye el estándar junto con el crecimiento del BYOD (*Bring Your Own Device*, “trae tu propio dispositivo), que consiste en que los empleados puedan utilizar sus dispositivos para acceder a la información de la empresa, potencian la migración en las empresas de las redes 802.11n a las 802.11ac que permiten mayor velocidad y rendimiento, permitiendo un mayor número de dispositivos conectados a los AP.

Una de las principales razones de la gran evolución que están sufriendo las redes WiFi en los últimos años es el crecimiento de los usuarios de *Smartphones* y *Tablets*, que demandan conexión WiFi en los sitios públicos por los que transitan.

1.2 Objetivos y alcance

En ese apartado se detallan cada uno de los objetivos que han motivado la realización de este documento:

- Estudiar toda la evolución de versiones del estándar 802.11.
- Analizar los detalles de capa física de cada uno de los estándares, centrándose en la de la versión 802.11ac y comparándola con todos los anteriores.
- Relacionar la parte teórica de las redes inalámbricas con el mundo real, de manera que se muestren de forma clara todas las prestaciones.
- Realizar un estudio profundo de las técnicas de *beamforming* utilizadas en la versión 802.11ac.

1.3 Estructura de la memoria

El principal objetivo de este documento es realizar un recorrido a través de todas las versiones del estándar 802.11 para poder entender finalmente todas las mejoras que incluye la versión 802.11ac. Para ello, en el Capítulo 2 se tratan aspectos generales de las redes inalámbricas y posteriormente se estudia cada una de las versiones en particular, pasando por la versión 802.11ac sin hacer especial hincapié en sus características.

En el Capítulo 3 se estudia de forma profunda la versión 802.11ac, analizando todos los aspectos y mecanismos utilizados tanto para la capa PHY como para la MAC.

Una visión más práctica de cada uno de los aspectos estudiados en el Capítulo 3 se realiza en el Capítulo 4, ilustrando mediante un caso práctico cada una de las prestaciones del estándar.

Una vez vistas todas las características de la nueva versión del estándar 802.11ac y de las redes inalámbricas, en el Capítulo 5 se realiza un estudio teórico de las técnicas de *beamforming*.

En el Capítulo 6, se realiza una breve conclusión y se comentan brevemente las posibles líneas futuras de trabajo sobre el proyecto.

Los dos últimos capítulos se han reservado para incluir los anexos necesarios y la bibliografía utilizada para la realización del proyecto.

2 ESTÁNDAR IEEE 802.11

En el siguiente capítulo se mostrará una breve introducción a las redes inalámbricas y la definición de algunos conceptos importantes que se utilizan cuando se habla de ellas y finalmente se ofrecerá una visión general de la evolución del estándar 802.11 a lo largo de los años.

2.1 Redes inalámbricas

Una red inalámbrica es una conexión entre nodos por medio de ondas electromagnéticas sin necesidad de conexión física, evitando así el uso de cables.

La creación de redes inalámbricas ha sufrido un gran crecimiento en los últimos años debido al desarrollo de dispositivos IEEE 802.11.

Las redes inalámbricas ofrecen numerosas **ventajas**, entre ellas podemos encontrar las siguientes:

- **Ubicuidad:** acceso a la información desde cualquier lugar dentro de la zona de cobertura, con un cierto grado de movilidad que depende de la tecnología utilizada.
- **Sencillez y rapidez de instalación**, sin obras.
- Flexibilidad: se puede cambiar de una a otra configuración fácilmente.
- Escalabilidad: se pueden desplegar gran cantidad de topologías y es fácil incorporar nuevos usuarios.

Aunque existen numerosas ventajas, también existen **algunos inconvenientes**:

- **Interferencias imprescindibles (intrasistema):** no se pueden controlar las interferencias con otras redes próximas que empleen la misma frecuencia o frecuencias cercanas.
- **Interferencias intersistema:** interferencias con otros sistemas que funcionan en el mismo espectro compartido.
- **Potencia de emisión muy reducida**, reduciendo mucho la cobertura.
- En muchos casos, **pequeño ancho de banda**.
- **Limitada seguridad:** las portadoras radio podrían ser accesibles para terceros.

En función del **alcance**, estas redes se pueden clasificar en 4 tipos:

- **Red extensa, *Wireless Wide Area Network* (WWAN):** es una red de computadoras que abarca varias ubicaciones físicas, dando servicio a una zona, un país e incluso varios continentes. Es cualquier red que une varias redes locales, WLAN, por lo que sus miembros no están todos en una misma ubicación física. Las tecnologías más destacadas son GPRS, GSM, LTE y UMTS.
- **Red metropolitana, *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN):** evolución del concepto de WLAN. Cubre áreas mayores que no se limitan a entornos metropolitanos sino que pueden llegar a tener cobertura regional e incluso nacional. La tecnología más utilizada para este tipo de redes es WiMAX.
- **Redes locales, *Wireless Local Area Network* (WLAN):** red que conecta dos o más dispositivos dentro de un área limitada, como una casa, escuela, o edificio de oficinas. Esto permite a los usuarios moverse dentro de un área de cobertura local y sin perder su conexión. La tecnología más utilizada es WiFi (802.11). También se utiliza HomeRF, HiperLAN e infrarrojos.
- **Redes personales, *Wireless Personal Area Network* (WPAN):** permite interconectar dispositivos en un rango pequeño, entre 9 y 30 metros. La tecnología líder en este tipo de redes es Bluetooth. También se utiliza ZigBee y NFC (*Near Field Communication*).

A lo largo de este documento se estudiará con profundidad el estándar 802.11, dedicado a redes de área local.

2.2 Aspectos generales de redes WiFi

2.2.1 Tipos de redes

Las redes WiFi pueden ser de dos tipos, redes *ad-hoc* y redes basadas en infraestructura.

- **Redes *ad-hoc*:** permiten que un conjunto de terminales WiFi, con adaptadores de red inalámbricos, se conecten entre sí directamente (también se llama conexión *peer-to-peer*). Su uso no es muy común salvo en algunos casos en los que el entorno es cerrado y se necesita intercambiar información de forma eficiente entre los equipos. La comunicación es óptima, el emisor y el receptor que toman el medio transmiten la información una única vez.

Los inconvenientes que presenta son: el aislamiento de otras redes y que las señales de varios dispositivos pueden interferirse, debido a que no hay control centralizado.

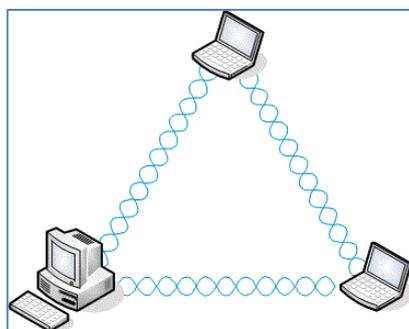


Figura 2-1 Red *ad-hoc*

- **Redes basadas en infraestructura:** se utiliza un elemento centralizador (Punto de Acceso, AP) que gestiona al resto de terminales dentro de su zona de cobertura. Este elemento se conecta tanto a la LAN fija cableada como a los otros terminales por la interfaz aire. Permite comunicación a nivel 2 de OSI (capa de enlace de datos). Cuando dos equipos se quieren comunicar entre sí, toda la información que se intercambian tiene que pasar por el AP. Esta forma de funcionamiento provoca una pérdida de eficiencia ya que hay que enviar dos veces la información, una vez desde el equipo hasta el AP y otra vez desde el AP hasta el destino.

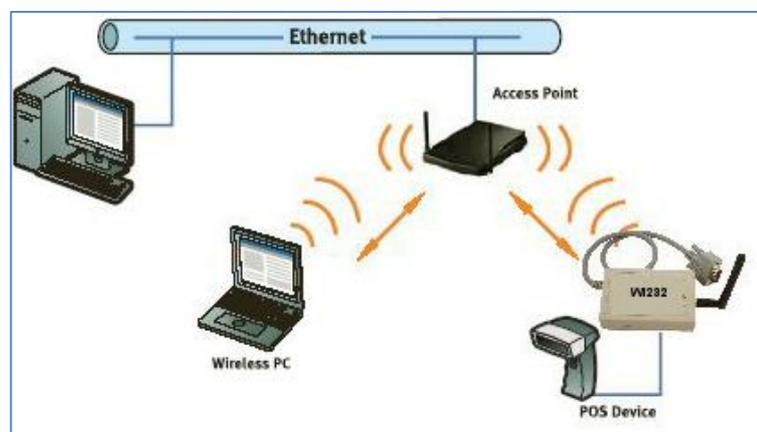


Figura 2-2 Redes basadas en infraestructura

El AP se puede comunicar con otras redes, es en este caso cuando este tipo de estructuras tiene más sentido. A esta configuración se le llama BSS (*Basic Service Set*). El BSS es una entidad autónoma vinculada con la red fija o con otro BSS a través de su AP mediante un sistema de distribución DS

(*Distribution System*). Este sistema de distribución puede ser cableado o inalámbrico, en este caso en lugar de DS se denomina WDS (*Wireless Distribution System*).

Existen dos modalidades de BSS:

- **BSS independiente (IBSS):** no hay DS (*Distribution System*), por lo que no se puede conectar con otras redes.
- **BSS extendido (ESS):** está formado por un conjunto de BSS interconectados por un DS. Esto permite la itinerancia de terminales entre redes diferentes.

Para identificar de forma unívoca a las células inalámbricas se les asigna un nombre de red, **SSID** (*Service Set Identifier*), formado por una cadena de 32 caracteres. Para poder asociarse con una célula, el equipo debe tener en su configuración el mismo SSID que el de la célula. En el caso de que se desee que el equipo se conecte a cualquier red, en el campo de SSID se introduce “ANY”, el criterio para conectarse a una o a otra suele ser el mayor nivel de potencia.

2.2.2 Servicios de red

Se definen cuatro servicios elementales para regir los procesos más básicos en las redes WiFi:

- **Autenticación:** cualquier equipo que se quiera conectar al BSS se tiene que identificar. El punto de acceso tiene que verificar su identidad y denegarle el permiso o no. Si le deniega el permiso, el equipo no podrá asociarse a la célula. Los puntos de acceso también tienen la opción de acceso libre, en este caso responden de forma positiva ante cualquier solicitud.
- **Des-autenticación:** un equipo solicita darse de baja en la lista de equipos permitidos del BSS.
- **Envío de datos:** los equipos gestionan el flujo de datos desde y hacia la célula.
- **Privacidad:** se utilizan mecanismos de seguridad para la información que se transmite.

Los servicios de distribución se encargan de regular la relación de un equipo con la célula hacia donde este equipo desea enviar la información. Son cinco:

- **Asociación:** la estación debe elegir uno de los AP en los que está autenticada para conectarse a él. Se realiza un proceso de asociación mediante el cual la dirección MAC del equipo se registra en las tablas del AP.
- **Re-asociación:** se utiliza cuando la estación ha perdido temporalmente la conexión con el AP y desea reestablecerla para recuperar la información que hubiera llegado mientras tanto y que el AP tuviese en su memoria temporal (*buffer*).
- **Des-asociación:** lo emplea el equipo para darse de baja en la célula.
- **Integración:** realiza la conversión de formatos de información entre el definido por el 802.11 y el de la red a la cual está conectado el AP (por ejemplo, Ethernet 802.3).
- **Distribución:** encaminamiento del tráfico a la estación destinataria a través del AP al que esté asociado.

2.2.3 Redes en malla

La cobertura de un AP no es muy extensa debido a las frecuencias elevadas que utiliza y a las limitaciones que impone la regulación a la potencia de transmisión, ya que se utilizan bandas de uso común. Si se desea cubrir una zona extensa, se debe instalar una red de APs densa.

La utilización de redes en mallas (*mesh*) facilita estas instalaciones, al permitir que no todos los APs tengan que estar conectados a la red cableada, actuando como repetidores de tráfico. El tráfico que llega a estos APs no se envía al sistema de distribución, sino que se envía a otro AP mediante una conexión inalámbrica.

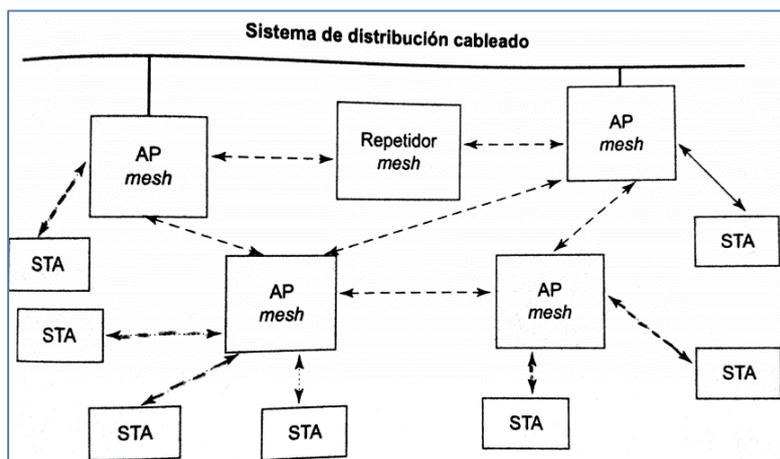


Figura 2-3 Redes en malla

2.2.4 Certificación WiFi

La estandarización de los equipos 802.11 ha sido la responsable del gran éxito que han ido adquiriendo a lo largo de los años.

Las siglas WiFi se refieren a una asociación internacional que se fundó en 1999. En un principio se denominaba WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*) y actualmente se denomina WiFi Alliance.

La principal función de esta asociación es asegurar la interoperabilidad entre los distintos productos WLAN basados en el estándar IEEE 802.11. Actualmente, abarca los estándares 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n y 802.11ac.

La certificación asegura la interoperabilidad entre distintos equipos de distintos fabricantes, de esta forma se asegura un correcto funcionamiento de la red evitando la aparición de posibles incidencias por incompatibilidad de equipos.



Figura 2-4 Certificación WiFi

2.2.5 Gestión del acceso a los recursos radio

2.2.5.1 Bandas de frecuencias

WiFi utiliza bandas de frecuencias de uso común, en concreto las de 2,4 y 5 GHz ya que están disponibles en casi todo el mundo (aunque su regulación es distinta según la zona geográfica). Las transmisiones en la banda de 5 GHz han provocado un aumento en el ancho de banda de la señal transmitida y de la capacidad, aunque reduce la zona de cobertura (alcance) en comparación con la banda de 2,4 GHz, ya que trabaja a mayor frecuencia y las pérdidas son mayores.

En un futuro, las nuevas versiones del estándar WiFi utilizarán la banda de 60 GHz.

La regulación en España se adapta a las normas europeas adoptadas por la CEPT (Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones) y el ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), publicándose en el CNAF (Cuadro Nacional de Atribuciones de Frecuencia).

Para construir una red en la que las interferencias sean mínimas hay que utilizar un **plan de frecuencias** con la finalidad de asignar canales a los puntos de acceso individuales. Se utiliza una distribución en células superpuestas para reutilizar canales. Cuantos más canales sin solapamiento haya, mayor será la distancia entre células que utilizan el mismo canal y menor la probabilidad de que se interfieran. A su vez, tener más canales sin solapamiento implica poder asignar más de un canal a un punto de acceso, por lo que se aumenta la capacidad en células muy cargadas sin producir interferencias asignando más de un canal sin solapamiento.

A continuación se muestran las distintas bandas atribuidas en España a través del CNAF:

- **UN-85: banda entre 2,4 y 2,4835 GHz.** Acceso inalámbrico a redes de comunicaciones y redes de área local sin hilos, preferentemente en el interior de edificios. La PIRE total debe ser inferior a 100 mW. Se trata de una banda de uso común, consta de 13 canales con ancho de banda de 22 MHz con solape parcial, separados 5 MHz entre sí. La portadora del canal n-ésimo es:

$$f_n = 2,412 + 5 \cdot (n - 1) \quad n = 1,2, \dots, 13$$

Cuando hay un único nodo en la zona de cobertura, se puede utilizar cualquiera de los 13 canales. Sin embargo, en el caso en que varios nodos comparten la misma zona de cobertura, se debe asignar a cada uno de los nodos canales que no se solapen, evitando así la aparición de interferencias. Existen 2 grupos de canales, el grupo 1 (canales 1, 7, 13) ofrece 3 canales sin solape y el grupo 2 ofrece más canales (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13) pero con solapamiento parcial.

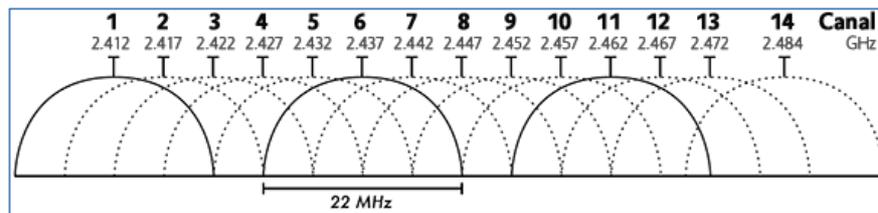


Figura 2-5 Canales disponibles según la nota UN-85

- **UN-128: sub-banda entre 5,15 y 5,35 GHz.** Se utiliza para WLANs en el interior de un recinto. La PIRE total permitida es de menos de 200 mW (100 mW sin técnicas de control de potencia). Se trata de una banda de uso común. Contiene 8 canales separados 20 MHz no solapados entre sí. Se pueden emplear nodos que compartan la misma zona de cobertura.
- **UN-128: sub-banda entre 5,47 y 5,725 GHz.** Se utiliza para WLANs en el exterior de recintos. PIRE total inferior a 1 W (500 mW en el caso de no incluir técnicas de control de potencia). Se trata de una banda de uso común que consta de 11 canales no solapados separados entre sí 20 MHz. Se pueden emplear distintos nodos en la misma zona.

2.2.5.2 Control de acceso al medio

El estándar WiFi incluye una capa denominada MAC (*Medium Access Control*) que forma parte del nivel de enlace y se encarga de gestionar el uso de los recursos radioeléctricos por parte del AP y los terminales que se encuentran sobre el mismo canal de radiofrecuencia.

Se basa en dos funciones de coordinación:

- **Distribuida o DCF (*Distributed Coordination Function*)**, inspirada en el protocolo Ethernet.
- **Centralizada o PCF (*Point Coordination Function*)**, utilizada para tráfico con calidad de servicio garantizada.

En las redes Ethernet cableadas se utiliza el protocolo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) para eliminar la contienda que se produce cuando dos o más dispositivos pretenden acceder a un mismo nodo. Si dos paquetes llegan solapados se detecta que ha ocurrido una colisión y no se envía acuse de recibo, por lo que las transmisiones se repiten.

En las redes WLAN el nodo funciona en semidúplex, por lo que no se puede aplicar el mecanismo descrito anteriormente.

En el caso de DCF se utiliza el modo CSMA/CA (*CSMA with Collision Avoidance*). El transmisor escucha el canal y envía el paquete cuando detecta que está libre. Si detecta que está ocupado, espera un tiempo aleatorio y lo vuelve a intentar. Este protocolo no evita el problema del nodo oculto que se describe a continuación:

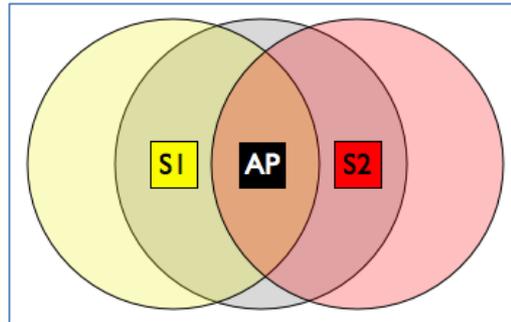


Figura 2-6 Problema del nodo oculto

Los terminales S1 y S2 están dentro de la zona de cobertura del AP, sin embargo entre ellos no hay cobertura. Si el terminal S1 decide conectarse con el AP, como S1 no está dentro de la zona de cobertura de S2, este último no detecta la actividad del canal (S1 está oculto para S2) y puede iniciar una transmisión de paquetes que colisionarán con los de S1 en el AP.

Para solucionar este problema se utiliza una secuencia previa de mensajes de control:

- Si un terminal quiere iniciar una transmisión, envía un mensaje RTS (*Request-To-Send*).
- Al recibir el AP el mensaje RTS, si el canal está libre, envía un mensaje CTS (*Clear-To-Send*).
- Recibido el mensaje CTS el terminal procede a enviar sus paquetes.
- El nodo devuelve una señal ACK de acuse de recibo de los paquetes. Si no se recibe el ACK, se retransmiten los paquetes.

La función centralizada PCF permite establecer prioridades en el acceso al medio, gestionadas por un coordinador PC (*Point Coordinator*). No todos los equipos soportan esta característica.

La función PCF siempre coexiste con DCF pero la primera tiene mayor prioridad. En PCF el AP organiza el tráfico dentro del BSS. Se pregunta a los equipos si tienen paquetes pendientes y se les autoriza a transmitir si es necesario. No puede haber solapamiento ya que los terminales no pueden transmitir si no se les ha dado permiso.

2.2.6 Formato de la señal WiFi

La transmisión de la señal WiFi se organiza en tramas PPDU (*Physical Protocol Data Unit*). Una trama PPDU está formada por dos campos fijos (preámbulo y cabecera) y uno variable (datos de la transmisión):

- **Preámbulo PLCP** (*Physical Level Convergence Procedure*): tiene una longitud de 144 bits. Se transmite a 1 Mbps con modulación DBPSK. Contiene dos campos, un campo de sincronización (SYNC) de 128 bits y un delimitador de comienzo de trama (SFD) de 16 bits.
- **Cabecera PLCP**: está formada por 48 bits que se transmiten a 1 Mbps con modulación DBPSK. Está formado por 4 campos, campo de señal (SIGNAL) de 8 bits, campo de servicios (SERVICE) de 8 bits, indicador de longitud (LENGTH) de 16 bits y campo para control de errores (CRC) formado por 16 bits.

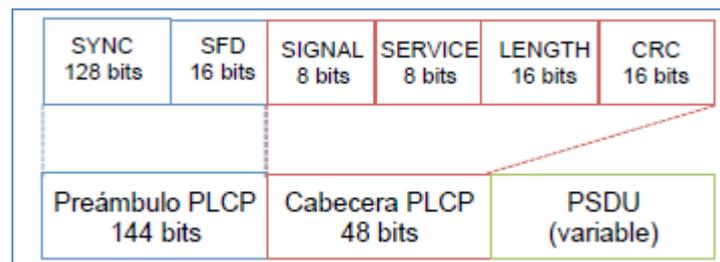


Figura 2-7 Formato trama señal WiFi

- **Campo de datos PSDU (PLCP Service Data Unit)**: se envía a cualquiera de las tasas y modulaciones establecidas. La tasa es de 1 Mbps si se utiliza DBPSK y de 2, 5,5 u 11 Mbps si se utiliza DQPSK.

Para las tasas binarias más altas, existe un formato de trama corto, en el cual, el preámbulo y la cabecera tienen tamaño reducido.

2.2.7 Seguridad en las redes 802.11

Uno de los temas que más preocupa a los usuarios de las redes inalámbricas es el de la **seguridad**. Actualmente, la mayoría de las redes inalámbricas carecen de mecanismos que protejan la integridad de la información y que no permitan el acceso a los datos a terceros.

Para dotar de seguridad a las redes inalámbricas existen varias opciones:

- SSID (*Service Set Identifier*, Identificador del Servicio)
- Filtrado de direcciones MAC
- Sistemas de cifrado y autenticación:
 - o WEP (*Wired Equivalent Privacy*, Privacidad Equivalente a Cableado)
 - o DSL (*Dynamic Security Link*, Enlace de Seguridad Dinámica)
 - o RADIUS (*Remote Authenticated Dial-In User Service*)
 - o WPA (*WiFi Protected Access*)
 - o RSN (*Robust Security Network*)

En los siguientes subapartados se explica de forma más detallada cada uno de los mecanismos anteriores.

2.2.7.1 SSID

El SSID es un identificador de red. La forma en la que normalmente trabajan los puntos de acceso es difundiendo su SSID para que los equipos clientes vean las redes disponibles (lo que realmente ven es su SSID). Para mejorar la seguridad de la red una práctica muy común es ocultar este SSID y solicitar al usuario que lo introduzca a mano. Se dificulta así el acceso de personas ajenas debido a que además de conocer la contraseña hay que conocer el SSID que tiene la red a la que se desea tener acceso.

2.2.7.2 Filtrado de direcciones MAC

Existe la posibilidad de establecer listas de acceso en los puntos de acceso, ACL (*Access Control List*). En estas listas de acceso se recogen las MACs que tienen permiso para conectarse a la red. Cada punto de acceso tiene su propia lista de acceso. Cualquier dispositivo cuya dirección MAC no esté recogida en la lista de control de acceso del AP no podrá autenticarse y conectarse a la red.

2.2.7.3 Sistemas de cifrado y autenticación

Junto a los sistemas utilizados para dotar de seguridad a la red inalámbrica vistos en los subapartados anteriores se presentan los siguientes sistemas de cifrado y autenticación:

- **WEP.** Se genera una clave compartida entre el cliente y el punto de acceso que permite o deniega la conexión. Además de la autenticación, WEP se encarga de encriptar la información intercambiada entre ambos equipos. En la actualidad este sistema no resulta muy seguro ya que se han desarrollado herramientas para calcular esta clave. En este sistema todos los usuarios tienen la misma clave.
- **DSL.** Se trata de un mecanismo que genera claves de forma dinámica y asigna una distinta a cada usuario al inicio de la sesión. Este sistema obliga a iniciar sesión con nombre de usuario y contraseña.
- **RADIUS.** Sistema de gestión centralizada que permite gestionar entornos con gran cantidad de usuarios. Este sistema genera un Certificado de Cliente Universal para permitir la autenticación.
- **WPA.** Aparece como solución a los problemas de seguridad que surgieron con WEP. Los usuarios se autentican contra un servidor, en este servidor están registradas las parejas de usuario-contraseña válidas. Sin embargo, también existe la posibilidad de utilizar WPA prescindiendo este tipo de autenticación, utilizando una clave compartida entre usuario y AP, como en el caso de WEP. La codificación de los datos se mejora frente a WEP gracias al uso de TKIP (*Temporal Key Integrity*

Protocol), que cambia las claves dinámicamente a medida que se va utilizando el servicio.

- **RSN.** Se conoce como WPA2. Es una mejora del sistema WPA, mejorando las deficiencias que aparecieron con este sistema. Cumple todas las especificaciones de seguridad establecidas por el estándar 802.11i.

2.2.8 Antenas

Una antena es normalmente un dispositivo pasivo, no aumenta la potencia de la señal sino que la redistribuye en su diagrama de radiación, otorgando mayor cantidad de potencia a la dirección deseada y menos a las direcciones que no interesan.

La parte más importante de una red inalámbrica es la antena del dispositivo inalámbrico debido a que es la responsable de hacer llegar la señal WiFi a todos los clientes dentro del área de cobertura. Los equipos inalámbricos pueden disponer desde 1 hasta 4 conectores para antenas.

Las señales que emite el dispositivo WiFi se multiplexan en N antenas de emisión y M antenas de recepción, utilizando MIMO, tal y como se muestra en la Figura 2-8:

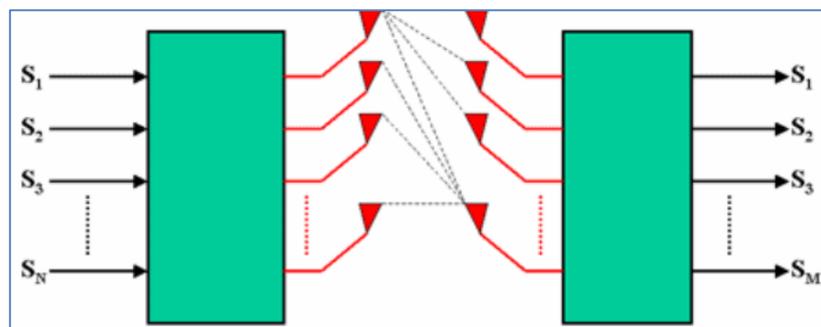


Figura 2-8 Multiplexación MIMO en antenas

En la misma banda de frecuencias se transmiten varios canales en paralelo utilizando distintas antenas. A su vez, también pueden transmitirse distintos canales por la misma antena si tiene suficiente ancho de banda o es una antena multibanda.

Como se ha mencionado anteriormente, hay que tener especial cuidado a la hora de elegir las antenas que se utilizarán para el despliegue de la red inalámbrica. Existen distintas clasificaciones de antenas en función de los siguientes criterios:

- **Ubicación:** dependiendo del lugar en el que se desee colocar la antena, se distingue entre antenas de interior y antenas de exterior. En el caso de las antenas interiores, se tiene muy presente la estética, suelen ser antenas pequeñas colocadas en lugares en los que pasan desapercibidas. Las antenas exteriores suelen ser grandes debido a que necesitan mayor ganancia para poder abarcar una mayor región.
- **Polarización:** en función de la polarización, las antenas se pueden clasificar en antenas con polarización lineal (ya sea horizontal o vertical) y antenas con polarización circular (derecha o izquierda).
- **Tipo de antena deseada:** las antenas que se instalan en los dispositivos inalámbricos suelen ser de dos tipos, antena direccional (la mayoría de las que se utilizan son antenas de panel) y antena omnidireccional.
 - o **Antena omnidireccional:** se trata de una antena que emite y recibe con la misma intensidad en todas las direcciones.



Figura 2-9 Antena omnidireccional

- **Antena direccional:** concentra la mayor parte de la energía de la señal en una única dirección, con un haz muy estrecho pero de mucho alcance. Un buen ejemplo de este tipo de antenas son las antenas de panel, muy utilizadas en redes inalámbricas. La antena de la Figura 2-10 incluye 4 antenas de panel en su interior (se pueden observar 4 conectores coaxiales) para ofrecer MIMO 4x4 en los dispositivos 802.11ac.



Figura 2-10 Antena direccional de panel

Una característica muy importante de las antenas, si no la que más, es su diagrama de radiación, que se verá en el Capítulo 4. Conociendo el diagrama de radiación de la antena tenemos toda la información que necesitamos saber de ella (ganancia, ancho de haz a 3 dB, dirección de máxima potencia, directividad,...). A su vez, son muy importante el *tilt*, la potencia de emisión y la altura a la que se encuentran, que se verá con más profundidad en el Capítulo 4.

- Ancho de haz a 3 dB: es el margen de direcciones en las que el diagrama de radiación toma un valor 3 dB por debajo del máximo. Es decir, la potencia transmitida se reduce a la mitad.
- Directividad: propiedad de una antena para radiar y recibir energía en una zona en particular. Se suele utilizar la directividad para concentrar la señal en la dirección deseada. A su vez, la directividad también es la máxima ganancia directiva de una antena.
- Dirección de máxima potencia: dirección en la que la antena concentra la mayor parte de la potencia a radiar.

2.3 Evolución del estándar 802.11

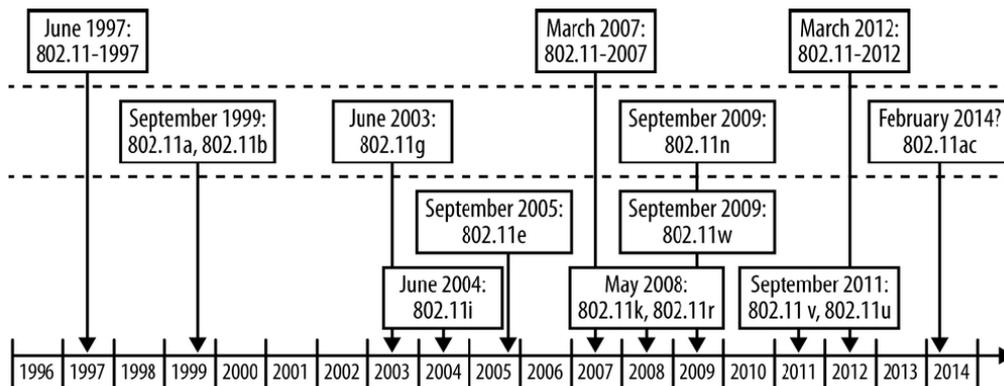
2.3.1 Aparición y características de las distintas versiones del estándar IEEE 802.11

En 1985 la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) permitió el uso de la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), favoreciendo así el desarrollo de las redes inalámbricas ya que dejaba espacio en el espectro radioeléctrico en 2,4 y 5 GHz para uso libre. Este hecho impulsó la creación de una tecnología que trabajara en esas bandas dando lugar al estándar IEEE 802.11.

La evolución del estándar 802.11 ha estado muy relacionada con la demanda del mercado. Actualmente, debido al auge de dispositivos móviles (*smartphones, tablets, Smart TVs,...*) y sus correspondientes aplicaciones, la población demanda cada vez más tasa y calidad de servicio y el estándar 802.11 se tiene que adaptar a eso, apareciendo así el estándar 802.11ac.

El estándar 802.11 se inició en 1997 con la especificación técnica 802.11 *legacy*. Al igual que la mayoría de los estándares, ha sufrido muchos cambios a lo largo de los años. En un principio se tenía una tasa de 1-2 Mbps y en la actualidad se tienen tasas de hasta 1,3 Gbps en la banda de 5 GHz.

A continuación se muestra un esquema de la aparición de cada una de las versiones:



2.3.1.1 802.11 legacy

Se trata de la primera versión del estándar, surge en 1997. Operaba en la banda de 2,4 GHz e introdujo el uso del espectro ensanchado en la interfaz aire en dos opciones, salto en frecuencia FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) y secuencia directa DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). La capacidad que ofrecía era de 1 a 2 Mbps.

Esta versión no tuvo mucha aceptación debido a su escasa tasa pero fue la base para la aparición de las siguientes versiones.

La WiFi Alliance no estandarizó ningún producto comercial de esta versión del estándar.

2.3.1.2 802.11b

En 1999 aparece la segunda generación del estándar y la primera que tuvo éxito comercial con productos 802.11b certificados por la WiFi Alliance.

Se caracteriza por operar en la banda de 2,4 GHz, al igual que la versión anterior, y por tener una capacidad máxima de transmisión de 11 Mbps. Incluye mecanismos de adaptación de la tasa binaria en función de las características del canal radioeléctrico, por ejemplo la técnica de *Dynamic Range Shifting*. Esta técnica consiste en que si las características del canal son óptimas, se alcanza el pico teórico, en caso contrario se disminuye la tasa (reduciendo la potencia umbral). Utiliza una codificación avanzada CCK (*Complementary Code Keying*) lo que permite alcanzar tasas binarias teóricas de hasta 11 Mbps.

Para mejorar las prestaciones del anterior, incorpora un protocolo de seguridad de las comunicaciones denominado WEP (*Wired Equivalent Privacy*) que ofrece al usuario un grado de privacidad comparable con el de las redes cableadas. Este mecanismo de cifrado no ha resultado muy eficiente por lo que se necesita desarrollar mecanismos de protección más robustos.

Esta versión tuvo tanto éxito que aceleró la aparición de nuevos estándares

2.3.1.3 802.11a

Esta versión se desarrolló en paralelo con la 802.11b. Trabaja en la banda de 5 GHz y ofrece una capacidad teórica de hasta 54 Mbps con tecnología OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Debido a que trabaja en la banda de 5 GHz, se tiene una mayor atenuación de la señal por lo que la zona de cobertura disminuye considerablemente. Presenta una cobertura típica en exteriores entre 30 m (a 54 Mbps) y 300 m (a 6 Mbps) y en interiores entre 12 m (a 54 Mbps) y 90 m (a 6 Mbps). Esta desventaja hace que su uso no esté tan extendido como ocurre con el 802.11b y que no se considere una nueva generación.

No puede interoperar con equipos 802.11b.

2.3.1.4 802.11g

En 2003 aparece la tercera generación del estándar. Esta versión opera en la banda de 2,4 GHz y ofrece tasas de hasta 54 Mbps, al igual que la versión 802.11a, mediante el uso de OFDM. Permite operar con equipos del estándar 802.11b debido a que trabajan en la misma banda, con una tasa de 11 Mbps y usando DSSS. Añade a

las tasas de 802.11b las de OFDM definidas en 802.11a, entre 6 y 54 Mbps. Al operar en la banda de 2,4 GHz, las condiciones de propagación son más favorables alcanzándose mayor velocidad de transmisión para una distancia dada.

Incorpora un protocolo de seguridad más robusto, WPA (*WiFi Protected Access*).

2.3.1.5 802.11n

La cuarta generación aparece en 2009. En este estándar se define una nueva modalidad de capa física que permite operar tanto en 2,4 como en 5 GHz. Se obtiene una tasa máxima teórica de 600 Mbps, aunque en la práctica se reduce a 450 Mbps en modo *three-stream* con 150 Mbps en cada flujo de datos. En esta versión se observa un aumento considerable de la tasa debido al uso de OFDM complementada por la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). La tecnología MIMO consiste en el envío de múltiples flujos de información gracias a la existencia de varias antenas, tanto en el transmisor como en el receptor. En esta versión se utiliza MIMO 4x4 (3x3 en la práctica, 3 flujos simultáneos). MIMO nxn aumenta la capacidad del canal n veces en condiciones óptimas.

La cobertura típica es de unos 500 m.

Los dispositivos 802.11n son compatibles con los dispositivos de todas las versiones anteriores, favoreciendo así la aparición de nuevos dispositivos y potenciando su éxito comercial.

2.3.1.6 802.11ac

La versión más reciente del estándar aparece en 2014, se trata de la quinta generación. Se caracteriza por operar en la banda de 5 GHz y conseguir tasas muy elevadas, de hasta 1,3 Gbps. Utiliza MIMO 8x8 (en la práctica utiliza 4 transmisiones simultáneas). Emplea mayores anchos de banda y modulaciones con muchos niveles (hasta 256 QAM).

Es en 2015 cuando los dispositivos 802.11ac están apareciendo en el mercado, extendiéndose su uso debido a la tasa tan elevada que ofrecen y el gran auge de los dispositivos móviles desde los últimos años.

En el siguiente capítulo se va a hacer más hincapié en los aspectos más importantes de esta versión del estándar y las características de las capas físicas que se utilizan.

2.3.2 Modalidades de capa física

Para maximizar la posibilidad de que múltiples usuarios puedan compartir bandas sin licencia sin interferirse unos con los otros, la FCC establece ciertas restricciones en los sistemas de comunicaciones que podrían operar allí.

El requisito fundamental es que el sistema no transmita toda su energía en un segmento estrecho de la banda. Debe repartir su radiación en un segmento más grande de banda, es decir, los usuarios están obligados a aplicar técnicas de espectro ensanchado. De esta forma, la interferencia entre sistemas localizados en un mismo emplazamiento se reduce al mínimo.

A continuación se va a estudiar cómo se aplican las técnicas de espectro ensanchado en cada una de las versiones del estándar 802.11.

2.3.2.1 Modalidades del estándar inicial y 802.11b

En el estándar 802.11b aparecen 3 tipos de tecnologías para la capa física:

- Portadoras RF moduladas en espectro ensanchado por salto de frecuencia FHSS.
- Portadoras RF moduladas en espectro ensanchado por secuencia directa DSSS.
- Transmisión por infrarrojos.

La opción de infrarrojos no ha tenido transcendencia comercial.

En el estándar 802.11 *legacy* se utiliza FHSS. No se utiliza en ninguna de las siguientes versiones del estándar que han ido apareciendo ya que no soporta tasas de más de 1 o 2 Mbps.

La tecnología FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) divide la banda de 2,4 GHz en 75 canales de 1

MHz. La transmisión se realiza empaquetando los bits. Cada uno de estos paquetes modula una de las 75 portadoras de cada canal. La modulación que se utiliza es GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) de 2 o 4 niveles, en la que un 1 lógico representa una desviación positiva de la frecuencia y un 0 una desviación negativa. Para el envío de cada uno de los paquetes, se realiza un salto de portadora (la portadora cambia) siguiendo un patrón previamente establecido entre los terminales involucrados en la transmisión. Se producen 2,5 saltos por segundo. Cada enlace utiliza una secuencia de salto distinta de entre las 22 posibles para evitar que coincida la misma portadora en dos comunicaciones distintas.

La tecnología FHSS no se utiliza actualmente para WiFi pero es la base de la capa física de Bluetooth.

La mayor aportación de la modalidad de capa física del estándar 802.11b fue añadir al nivel físico dos nuevas tasas, 5,5 y 11 Mbps (gracias a DSSS). Anteriormente, con FHSS, se tenían tasas de 1 y 2 Mbps. Esto implica que los sistemas 802.11b sean compatibles con los 802.11 a 1 y 2 Mbps en DSSS, pero no en FHSS.

Las redes basadas en el 802.11b utilizan una técnica para mantener un nivel de calidad de servicio en entornos complicados, con muchas interferencias o de gran extensión, llamada Adaptación de Enlace que permite regular la tasa de transmisión dependiendo de las condiciones del canal. Si las condiciones del canal son buenas, los equipos pueden conectarse a 11 Mbps. Sin embargo, si las condiciones del canal no son favorables, la tasa se reduce. Este mecanismo es transparente para el usuario y para los niveles superiores.

La tecnología **DSSS** (*Direct Sequence Spread Spectrum*) multiplica cada bit de información por un código formado por un tren de impulsos de corta duración llamados chips. Si se define N como el número de chips, la tasa de chips que se obtiene es $R_c = N \cdot R_b$ siendo R_b la tasa de bits. La transformación de un bit en un símbolo de N chips produce un aumento del ancho de banda de transmisión (ensanchamiento del espectro). La señal expandida es robusta frente a interferencias y, además, posee una ganancia de procesamiento PG (*Processing Gain*) que se define como $PG = 10 \cdot \log(R_c/R_b)$.

El ancho de banda de la señal transmitida depende de cómo se filtra y transmite la señal. El estándar define una máscara espectral que indica un límite de cuánta potencia puede radiar un transmisor que cumpla las especificaciones a una cierta distancia de la frecuencia nominal, como se puede observar en la Figura 2-11.

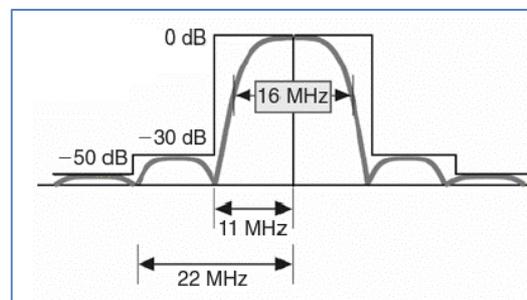


Figura 2-11 Máscara espectral

Existen dos modos de modulación en función de la tasa binaria en 802.11b:

- **Tasas de 1 y 2 Mbps:** se utiliza para la expansión un código de Barker, que es una secuencia de 11 chips:

$$c = \{+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1\}$$

Al conjunto de los 11 chips se le llama símbolo.

La velocidad de transmisión es de 11 Mchip/s o 1 Msimb/s y la ganancia de procesamiento $PG = 10 \cdot \log 11 = 10,4 \text{ dB}$.

Para $R = 1 \text{ Mbps}$ la modulación es DBPSK con una anchura de banda nominal de 22 MHz, aunque en la Figura 2-11 se observa que el ancho de banda de una señal típica real es de unos 16 MHz, con un valor de 10 dB por

debajo del máximo. En la Tabla 2-1 se pueden observar los cambios de fase en función del bit de entrada.

Bit	Cambio de fase (radianes)
0	0
1	π

Tabla 2-1 Cambio de fase DBPSK

De la Tabla 2-1 se puede deducir que el “0” se expansiona con “c” y el “1” con “-c”.

Para $R = 2$ Mbps, se utiliza modulación DQPSK. Los bits se agrupan en parejas. A cada bit le corresponde una variación de fase, como se muestra en Tabla 2-2. La señal binaria se convierte en un código de 11 Mchip/s, pero con mayor ganancia, $PG = 10 \cdot \log 11/2 = 7,4$ dB

- **Tasas de 5,5 y 11 Mbps:** para las tasas binarias altas se emplea la codificación CCK (*Complementary Code Keying*). Los códigos CCK tienen una distancia mínima muy elevada por lo que en entornos multitrayecto la probabilidad de error de bit es muy reducida. Se consiguen tasas de transmisión tan elevadas gracias a la utilización de técnicas de cifrado de desfase basadas en DQPSK. DQPSK transmite dos bits por periodo de símbolo, codificados como uno de cuatro cambios de fase posibles. La longitud del código de expansión es de 8 chips y la tasa de transmisión de 11 Mbps.

Bits	Variación de fase (radianes)
00	0
01	$\pi/2$
11	π
10	$-\pi/2$

Tabla 2-2 Cambio de fase DQPSK

Para tasas de 5,5 Mbps, el transmisor divide la información en bloques de 4 bits (d_0, \dots, d_3). Cada bloque corresponde a un símbolo de 8 bits. La tasa de símbolo es $5,5 \text{ Mbps}/4 = 1,375$ Msímbolos/s y la ganancia de procesado vale $PG = 10 \cdot \log 8/4 = 3$ dB. Los bits d_0 y d_1 definen la variación de fase respecto de la fase del símbolo anterior (modulación DQPSK). La variación es distinta según se trate de símbolos pares o impares, como se puede observar en la Tabla 2-3.

Bits (d_0, d_1)	Variación de fase (radianes)	
	Símbolos pares	Símbolos impares

00	0	π
01	$\pi/2$	$-\pi/2$
11	π	0
10	$-\pi/2$	$\pi/2$

Tabla 2-3 Modulación DQPSK tasa de 5 Mbps

Para llegar a 11 Mbps se agrupan en símbolos cada grupo de 8 bits, por lo que no hay expansión y la ganancia de preprocesado es 0 dB. La tasa de símbolos es $11/8 = 1,375$ Msímbolos/s. Al igual que en el caso anterior, los bits d_0 y d_1 se codifican en DQPSK, es decir, en función del desfase del símbolo actual con respecto al símbolo anterior, como se puede observar en la Tabla 2-3. Los 6 bits restantes se agrupan en parejas y se codifican utilizando la codificación CCK. A cada pareja de bits se asocia un ángulo de desfase, como se puede observar en la Tabla 2-4, y se utiliza para averiguar la palabra en clave.

Pareja de bits	Variación de fase (radianes)
00	0
01	π
10	$\pi/2$
11	$-\pi/2$

Tabla 2-4 Angulo de fase para tasas de 11 Mbps

2.3.2.2 Modalidades del 802.11a y 802.11g

La capa física de la versión 802.11a del estándar se basa en la modulación OFDM. Se utiliza la banda de 5 GHz con una velocidad de transmisión comprendida entre 6 y 54 Mbps. En la versión 802.11g se utiliza el mismo formato, con la diferencia de que se trabaja en la banda de 2,4 GHz.

En la modulación OFDM se divide el flujo de bits en N flujos de menor velocidad que modulan N portadoras ortogonales con algún tipo de modulación digital de M estados: QPSK, 16-QAM o 64-QAM. Al repartirse el flujo binario entre N subportadoras, la velocidad de símbolo es N veces menor.

Un símbolo está formado por 48 subportadoras que transportan información y 4 subportadoras piloto con una secuencia pseudoaleatoria conocida que se utilizan para sincronización. Las subportadoras activas anteriormente citadas se rellenan hasta 64, con $\Delta f = 312,5$ KHz, siendo Δf la separación entre subportadoras. Si las 64 subportadoras estuvieran ocupadas, se obtendría una señal con ancho de banda $64 \cdot \Delta f = 20$ MHz. Las subportadoras de los extremos y la central están inactivas, por lo que el ancho de banda real es de unos 16,6 MHz, adaptándose a la máscara espectral que se mostró en la Figura 2-11.

Un símbolo OFDM dura 3,2 μ s, incluyendo este tiempo de símbolo un tiempo útil de la señal y un tiempo de guarda, T_g , entre símbolo y símbolo para absorber el multitrayecto.

Se utiliza canalización de 20 MHz y un total de 52 subportadoras (48 de tráfico y 4 pilotos).

La versión 802.11a utiliza una canalización de 20 MHz. En Europa se utilizan 19 canales, en 5,15-5,35 GHz y 5,47-5,725 GHz. La PIRE máxima que se permite en Europa para interiores es de 200 mW, con control de

potencia y selección dinámica de frecuencia, y en exteriores hasta 1 W.

Las combinaciones de los tres formatos posibles de la modulación con las tasas de codificación de canal se pueden observar en la Tabla 2-5:

Modulación	Codificación de canal	Tasa binaria (Mbps)
BPSK	1/2	6
BPSK	3/4	9
QPSK	1/2	12
QPSK	3/4	18
16-QAM	1/2	24
16-QAM	3/4	36
64-QAM	2/3	48
64-QAM	3/4	54

Tabla 2-5 Diversas configuraciones de códigos convolucionales

En 802.11g se utilizan los mismos canales que en 802.11b en la banda de 2,4 GHz. Combina las velocidades de 1, 2, 5,5 y 11 Mbps que incluye la modalidad 802.11b con las definidas en la Tabla 2-5, entre 6 y 54 Mbps.

Por otro lado, también se incluyen otros dos formatos nuevos, cuyo uso es opcional:

- ERP-PBCC: formato de modulación combinada con codificación. Incorpora las velocidades de 22 y 33 Mbps.
- DSSS-OFDM: formato opcional para compatibilidad con 802.11b. El preámbulo y la cabecera se transmiten en DSSS mientras que los datos se transmiten en OFDM. La transición de uno a otro hay que realizarla con cuidado ya que se modifica el reloj y se cambia de portadora única a multiportadora.

La modulación OFDM presenta ventajas frente a otros sistemas, como por ejemplo la resistencia al multitrayecto o a la interferencia de banda estrecha, la facilidad para adaptarse a las condiciones del canal y la utilización de un ancho de banda ajustado a las necesidades, lo que es importante en transmisiones de alta velocidad.

2.3.2.3 Modalidades 802.11n y 802.11ac

Estas versiones ofrecen al usuario tasas binarias muy elevadas, superando los 100 Mbps.

La versión 802.11n opera en las bandas de 2,4 y 5 GHz y ofrece tasas de hasta 600 Mbps utilizando canales de 20 y 40 MHz.

Utiliza modulación OFDM con formatos similares a los que se pueden observar en la Tabla 2-5. Se descarta la opción de BPSK 3/4 y se añade 64-QAM con 5/6.

En esta versión se utiliza MIMO 4x4 con códigos STBC (*Space-Time Block Code*) permitiendo la transmisión de hasta 4 flujos binarios simultáneos haciendo uso del mismo ancho de banda. En cada uno de los flujos se puede utilizar una modulación distinta. Existen 76 combinaciones distintas de ancho de banda (20 o 40 MHz), número de transmisiones (1, 2 o 4) y codificación de canal de cada uno.

La máxima velocidad es 600 Mbps y se alcanza combinando 4 flujos de 150 Mbps sobre un canal de 40 MHz.

La versión 802.11ac se verá con más profundidad en el siguiente capítulo. Se trata de una extensión y mejora de la versión 802.11n. Trabaja únicamente en la banda de 5 GHz, lo cual aporta la ventaja de tener mayor ancho de banda (anchos de banda de 20, 40, 80 y 160 MHz) y menor interferencia. Utiliza una modulación OFDM

llegando hasta 256-QAM (con $r=3/4$ y $r=5/6$). Utiliza MIMO 8x8 con capacidad para tener hasta 8 flujos binarios simultáneos en el mismo ancho de banda. Se pueden alcanzar velocidades de hasta 1,7 Gbps por cada estación.

3 VERSIÓN 802.11AC DEL ESTÁNDAR

En este capítulo se pondrán de manifiesto las características más importantes de la versión 802.11ac del estándar 802.11 para presentar los aspectos más importantes que se estudiarán en capítulos posteriores.

3.1 Introducción

Tras el desarrollo e implementación del estándar 802.11n en los nuevos dispositivos que aparecían en el mercado, surge la necesidad de conseguir redes más rápidas. Es por esta razón por la que se crea un grupo de trabajo denominado VHT (*Very High Throughput*).

En Mayo de 2007 este grupo de trabajo decidió que era mejor tener dos subgrupos de trabajo, cada uno focalizado en aumentar la velocidad en una banda en concreto. El primero de ellos, el grupo de trabajo AC, se encargaría de la banda existente por debajo de los 6 GHz, compatible con todos los estándares anteriores y, el otro, el grupo de trabajo AD, se encargaría de la banda existente en 60 GHz. Este segundo grupo se encuentra con la desventaja de que hay que cambiar radicalmente la noción de las redes inalámbricas que se tenía hasta el momento y, además, el alcance se ve muy reducido debido a las altas frecuencias utilizadas.

El grupo de trabajo AC tenía como objetivo conseguir un estándar que trabajara a 1 Gbps y que fuera capaz de transmitir a múltiples estaciones o que trabajara a 500 Mbps y transmitiera a una única estación.

En este apartado se verá con mayor profundidad el grupo de trabajo AC.

El estándar 802.11ac surge como una evolución del estándar 802.11n. A diferencia del estándar 802.11n, que desarrolló nuevas técnicas para aumentar el rendimiento, el estándar 802.11ac utiliza y mejora técnicas ya existentes. Por ejemplo, en lugar de utilizar MIMO como se venía utilizando anteriormente, para enviar datos a un único usuario, aparece el concepto de MIMO multiusuario, que permite al AP enviar datos a múltiples usuarios al mismo tiempo. En la Tabla 3-1 se muestran las diferencias entre ambos estándares.

802.11n	802.11ac
Canales de 20 y 40 MHz	Se añaden canales de 80 y 160 MHz
Trabaja en la banda de 2,4 y 5 GHz	Trabaja en la banda de 5 GHz
Modulación BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM	Añade 256-QAM
Trabaja con muchos tipos de <i>beamforming</i>	Soporta únicamente el <i>beamforming</i> NDP, que se verá en el Capítulo 5
Admite hasta 4 flujos espaciales	El AP soporta hasta 8 flujos espaciales y los clientes hasta 4
Solo admite transmisión a un único usuario	Permite transmitir tanto a un único usuario como a usuarios múltiples
Incluye mejoras significativas en la capa MAC	Soporta mejoras similares con ampliaciones para soportar las altas tasas de datos

Tabla 3-1 Diferencias entre los estándares 802.11n y 802.11ac

A continuación se explica con más profundidad cada una de las diferencias expuestas en la tabla anterior.

- Canales más anchos. Con el estándar 802.11ac aparecen dos tipos nuevos de canales, los canales de 80 y 160 MHz. Es complicado encontrar un hueco para un canal de 160 MHz, por lo que actualmente se ofrecen dos opciones: 1 canal de 160 MHz, o 2 canales de 80 MHz.
- Modulación 256-QAM. Como en estándares anteriores se transmite una serie de símbolos formados por un conjunto de bits. Antes de la llegada del estándar 802.11ac se podían enviar hasta 6 bits en un periodo de símbolo, sin embargo, gracias al uso de modulaciones más innovadoras se pueden enviar hasta 8 bits por periodo de símbolo.
- *Beamforming*. Con el estándar 802.11ac se simplifican todas las técnicas de *beamforming* existentes anteriormente y se elige un único método para que todos los dispositivos sean compatibles entre sí. Una de las causas por las que el *beamforming* no ha tenido éxito con el estándar 802.11n es que no había un único método y los dispositivos no eran compatibles entre sí.
- Más flujos espaciales y MIMO multiusuario. La versión 802.11ac ofrece hasta 8 flujos espaciales mientras que la versión 802.11n ofrecía solo 4. Además, la versión 802.11ac desarrolló MIMO multiusuario.
- En el estándar 802.11ac se trabaja en la banda de 5 GHz solamente, a diferencia de 802.11n, que trabaja en las dos. Se ha ideado de esta forma debido a que para ofrecer las técnicas más innovadoras se necesitan canales más anchos y, por tanto, trabajar en la banda de 5 GHz.

3.2 Capa física (PHY)

El aumento de velocidad en la capa física se produce gracias a 3 factores:

- Mayor cantidad de flujos espaciales.
- Canales más anchos.
- Modulación más eficiente incluyendo más bits en cada unidad de tiempo.

El aumento de los flujos espaciales de 4 a 8 multiplica también por dos el rendimiento del sistema con respecto a un sistema 802.11n. El número de flujos espaciales no puede ser mayor que el número de elementos en el *array* de antena. Si el número de elementos en el *array* fuera mayor que el número de flujos espaciales, se obtendría una ganancia de procesamiento beneficiosa para el sistema debido a que aumenta la SNR en el *beamforming*.

3.2.1 Radiocanales en el estándar 802.11ac

Como se ha visto anteriormente, este estándar aporta dos tamaños nuevos de canales, 80 y 160 MHz. Este estándar divide al canal en múltiples subportadoras OFDM, cada una con un ancho de banda de 312,5 kHz. Se utiliza una subportadora distinta para cada transmisión. Algunas de estas subportadoras son subportadoras piloto y no se utilizan para transmitir datos de usuarios, sino que se utilizan para medir el canal.

Todos los dispositivos 802.11ac deben soportar canales de 80 MHz. Adicionalmente, pueden tener o no la capacidad de soportar canales de 160 MHz, como se ha comentado anteriormente, o en un único bloque de 160 MHz o en dos bloques de 80 MHz.

A continuación, en la Figura 3-1 se muestra el diseño de los canales en el estándar 802.11ac y las portadoras piloto que se añaden en la transmisión. En cada una de las líneas horizontales se presenta el diseño de las subportadoras OFDM en un tipo de canal.

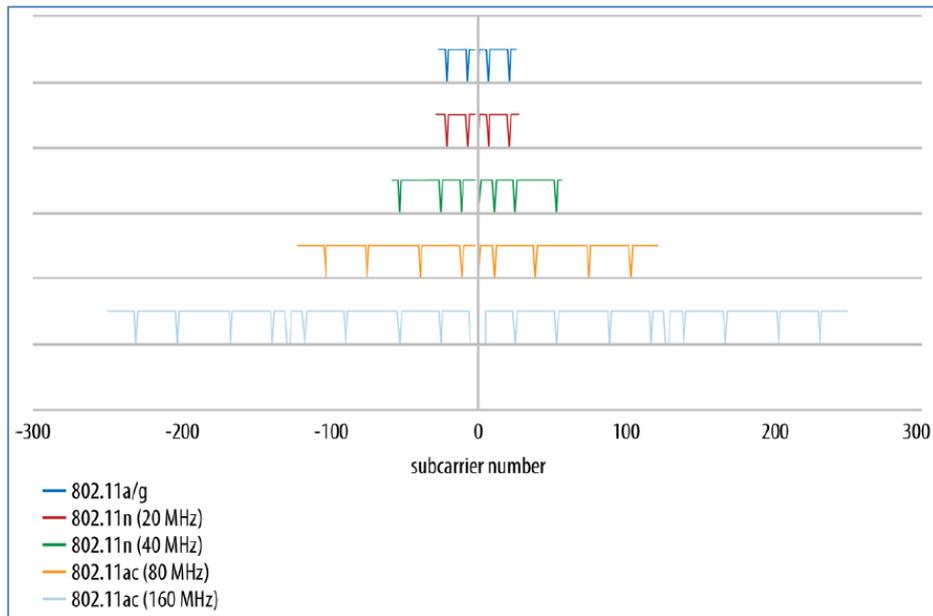


Figura 3-1 Diseño de los canales

Las portadoras piloto representan una sobrecarga para el canal debido a que son portadoras que no se pueden utilizar para transmitir datos. Esta pérdida de eficiencia se hace menos notable a medida que aumenta el ancho del canal.

A continuación se muestra una tabla con las características de los canales en los distintos tipos de estándares:

PHY standard	Subcarrier range	Pilot subcarriers	Subcarriers (total/data)	Capacity relative to 802.11a/g	Capacity relative to 20 MHz 802.11ac
802.11a/g	-26 to -1, +1 to +26	$\pm 7, \pm 21$	52 total, 48 usable (8% pilots)	x1.0	n/a
802.11n/802.11ac, 20 MHz	-28 to -1, +1 to +28	$\pm 7, \pm 21$	56 total, 52 usable (7% pilots)	x1.1	x1.0
802.11n/802.11ac, 40 MHz	-58 to -2, +2 to +58	$\pm 11, \pm 25, \pm 53$	114 total, 108 usable (5% pilots)	x2.3	x2.1
802.11ac, 80 MHz	-122 to -2, +2 to +122	$\pm 11, \pm 39, \pm 75, \pm 103$	242 total, 234 usable (3% pilots)	x4.9	x4.5
802.11ac, 160 MHz ^u	-250 to -130, -126 to -6, +6 to +126, +130 to +250	$\pm 25, \pm 53, \pm 89, \pm 117, \pm 139, \pm 167, \pm 203, \pm 231$	484 total, 468 usable (3% pilots)	x9.75	x9.0

^uFor 80+80 MHz channels, the numbers are identical to the 160 MHz channel numbers.

Tabla 3-2 Características de los distintos canales

3.2.2 Máscara espectral de los radiocanales

Todos los canales existentes en el estándar 802.11ac tienen la misma forma que otros canales OFDM, diferenciándose únicamente el ancho de energía transmitida. En la Figura 3-2 se puede observar una máscara general, expresada en dBr (decibelios relativos) con respecto al pico de potencia en la frecuencia central. En la máscara espectral no es necesario dar valores de frecuencias porque es igual para cualquier ancho de banda.

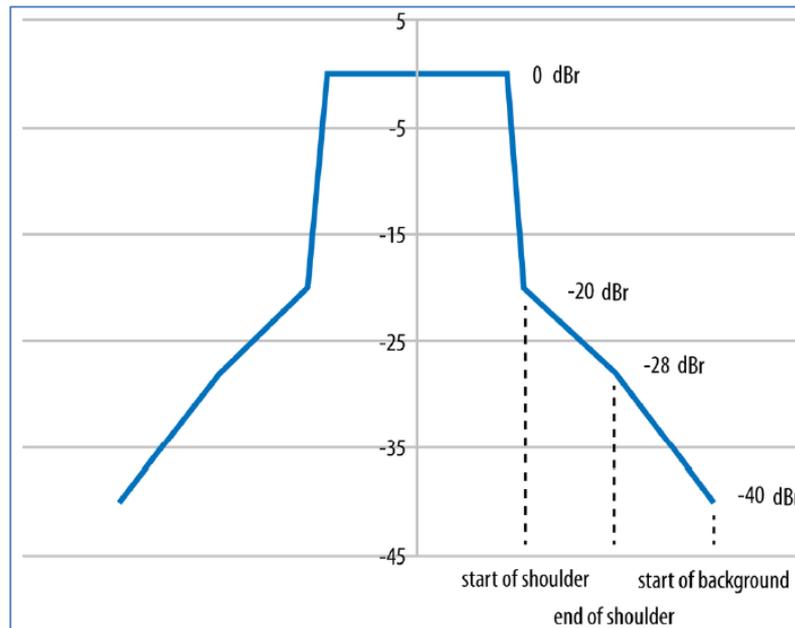


Figura 3-2 Máscara espectral

Para ayudar a interpretar mejor la máscara espectral, es conveniente dar los valores de *Start of shoulder*, *End of shoulder* y *Start of background*. En la Tabla 3-3 se muestran los valores que toman estos parámetros.

<i>Channel size</i>	<i>Edge of peak (0 dBr)</i>	<i>Start of shoulder (-20 dBr)</i>	<i>End of shoulder (-28 dBr)</i>	<i>Start of background (-40 dBr)</i>
20 MHz	9 MHz	11 MHz	20 MHz	30 MHz
40 MHz	19 MHz	21 MHz	40 MHz	60 MHz
80 MHz	39 MHz	41 MHz	80 MHz	120 MHz
160 MHz	79 MHz	81 MHz	160 MHz	240 MHz

Tabla 3-3 Distintos valores para la máscara espectral

Los canales disponibles para transmitir y recibir dependen del país en el que se encuentre el equipo. La mayoría de los equipos incluyen un sintonizador para seleccionar el canal deseado en función del país en el que se encuentre.

En la Figura 3-3 se pueden observar los canales disponibles dependiendo de la región. Los canales más anchos toman el nombre de uno de los canales (canal primario) siendo el resto de canales contenidos en el ancho de banda canales secundarios.

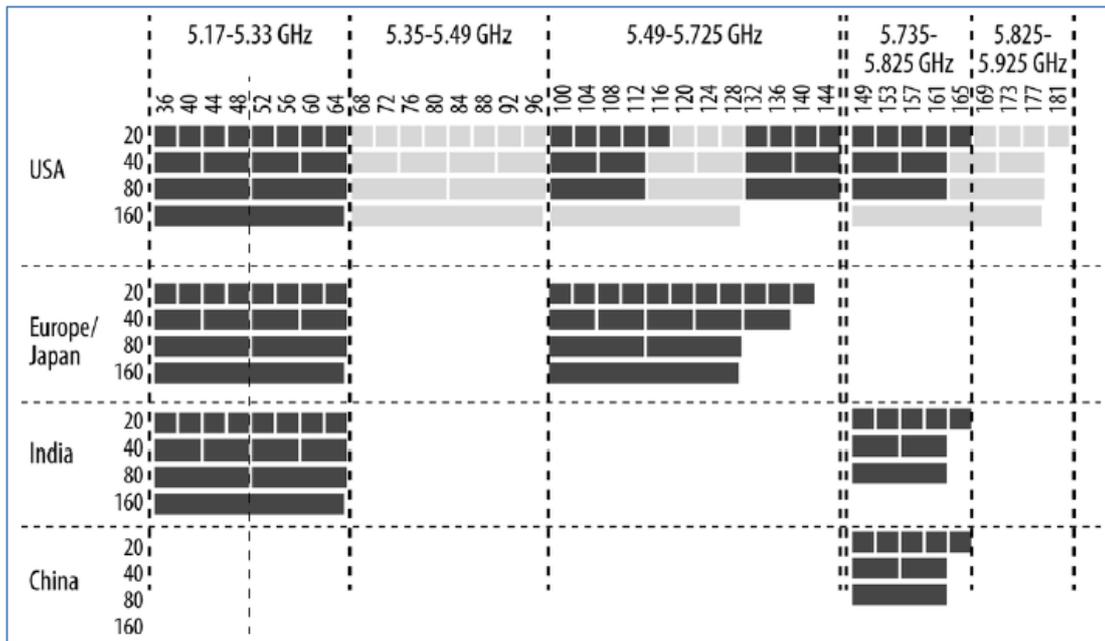


Figura 3-3 Canales disponibles en cada región

Normalmente se envían tramas *Beacon* en los canales primarios para avisar de que en esos canales se está transmitiendo. El tema de coexistencia de canales es muy importante y se tratará a lo largo del capítulo.

3.2.3 Modulation and coding set (MCS)

Seleccionar un MCS correcto es mucho más sencillo en el estándar 802.11ac que en el 802.11n. Existen 10 opciones de MCS, que se pueden observar en la Tabla 3-4. El valor de modulación indica el número de bits transmitidos en cada periodo de símbolo. La tasa de código indica cuántos bits de datos de usuarios se pueden enviar (numerador) por cada cuántos bits del canal (denominador). Las tasas de código más elevadas tienen más datos de usuario y menos redundancia, con la desventaja de que la recuperación ante fallos es peor.

Valor MCS	Modulación	Tasa de código (r)
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6

Tabla 3-4 Distintos valores de MCS

Se utiliza el índice MCS para unir en un único número tanto el valor de la modulación como el de la tasa de código.

Una novedad que se introduce con este estándar es que el valor de MCS no está ligado al número de flujos espaciales. Para conocer la velocidad del enlace es necesario combinar el valor de MCS y el número de flujos espaciales.

3.2.4 Modulación 256-QAM

Con el estándar 802.11ac aparece una nueva modulación, la 256-QAM. Esta modulación consta de 16 cambios de fase y 16 niveles de amplitud (en lugar de 8 y 8 que presentaba la modulación 64-QAM). En la Figura 3-4 se pueden observar ambas modulaciones. Las dos tienen una apariencia similar pero la 256-QAM tiene muchos más puntos en la constelación. El aumento de puntos de la constelación sirve para mejorar considerablemente la velocidad del sistema. En lugar de transmitir 6 bits por cada subportadora, una modulación 256-QAM transmite 8 bits. Esta modificación aumenta la velocidad en un 30 % con respecto al estándar 802.11n.

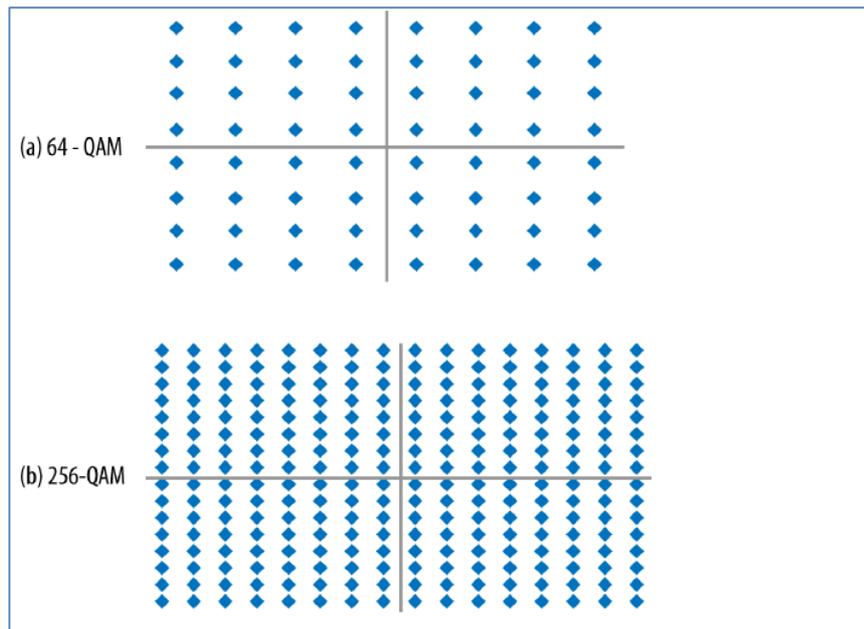


Figura 3-4 Comparación de las modulaciones 64-QAM y 256-QAM

Para usar la modulación 256-QAM, los errores del enlace deben ser mínimos debido a que los puntos de la constelación se encuentran muy próximos y se pueden confundir unos con otros. Cuando se recibe un símbolo, normalmente no coincide con el lugar exacto que debería tener en la constelación. A la diferencia entre la posición ideal que debería tener el símbolo y la posición real se le llama “Vector de error”, como se representa en la Figura 3-5.

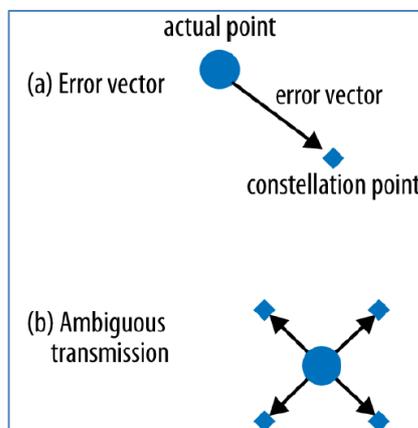


Figura 3-5 Vector de error

Como se puede observar en la Figura 3-5(b), cuando el punto recibido se encuentra en medio de varios puntos de la constelación, el receptor debe elegir uno de ellos aleatoriamente, dando lugar a posibles errores.

3.2.5 Tramas en la capa PHY

Las tramas del nuevo estándar deben ser compatibles con los estándares anteriores, debido a que un dispositivo 802.11a o 802.11n debe ser capaz de conocer la longitud de la trama para no transmitir a la vez en ese intervalo de tiempo. La trama en sí es muy similar a la del estándar 802.11n, con la diferencia de que en el preámbulo se incluye un campo para permitir MIMO multiusuario que debe incluir el número de flujos espaciales utilizados y los múltiples receptores a los que va dirigida la trama.

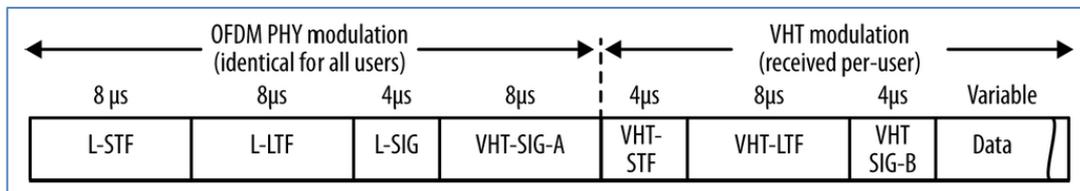


Figura 3-6 Trama PHY 802.11ac

Cada uno de los campos tiene las siguientes funciones:

- L-STF (*Non-HT Short Training Field*) y L-LTF (*Non-HT Long Training Field*). Son una secuencia de 12 símbolos OFDM que sirven para sincronizar los temporizadores, seleccionar la antena de transmisión, anunciar que va a comenzar la transmisión,...
- L-SIG (*Non-HT Signal Field*). Es un campo que utilizan los receptores para calcular el tiempo de transmisión de la trama.
- VHT-SIG-A (*VHT Signal A Field*) y VHT-SIG-B (*VHT Signal B Field*). Ambos campos incluyen atributos de la trama, si es una trama multiusuario, la modulación, codificación, anchura del canal, ...
- VHT-STF (*VHT Short Training Field*). Ayuda al receptor para establecer la ganancia de recepción y para detectar parámetros repetidos.
- VHT-LTF (*VHT Long Training Field*). Consiste en una secuencia de símbolos que configuran la demodulación del resto de la trama, empezando por el campo *VHT Signal B Field*. Consta de 1, 2, 4, 6 u 8 símbolos dependiendo del número de flujos de transmisión. El número de símbolos requeridos se redondea al valor par inmediatamente superior al número de flujos. Por ejemplo, si se tuvieran 5 flujos se utilizarían 6 símbolos. También se utiliza para el *beamforming*.
- *Data Field*. Este campo contiene los datos a transmitir. En el caso de que este campo esté vacío, se trata de un paquete NDP, que se utilizará para *beamforming* y se verá con más profundidad en el Capítulo 5.

3.2.6 Proceso de transmisión y recepción

A continuación, en la Figura 3-7, se presenta el diagrama de bloques de los sistemas utilizados tanto para recepción como para transmisión.

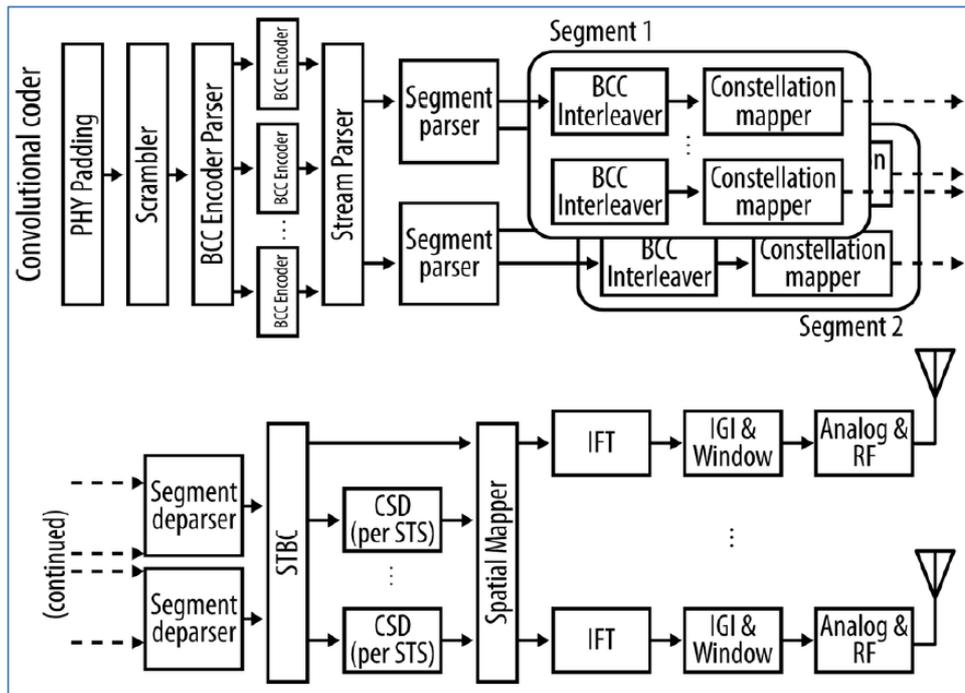


Figura 3-7 Diagrama de bloques para transmisión y para recepción

Cuando la capa MAC tiene una trama para transmitir, la pasa al nivel físico y se sigue el siguiente proceso:

- 1°. Se prepara el campo *Service Field*. Este campo se transmite antes que los datos. Está formado, principalmente, por el CRC que se calcula a partir del contenido del campo VHT-SIG-B.
- 2°. *PHY padding*. Se utiliza para rellenar la trama hasta llegar a la longitud requerida.
- 3°. *Scrambling and forward error correction (FEC) encoding*. El codificador reduce la probabilidad de tener largas cadenas de bits idénticas a su salida. La salida del codificador (*scrambler*) llega a un codificador FEC que puede ser un codificador convolucional o un codificador LDPC.
- 4°. *Stream parsing*. Se encarga de separar los bits que salen del codificador FEC para cada flujo espacial. La salida se envía al *interleaver*, que es el primer componente radio.
- 5°. *Segment parsing*. Se utilizan para las transmisiones que ocupan 160 MHz solamente, tanto si se trata de 160 MHz continuos o 2 bloques de 80 MHz. Mapea estas frecuencias en 2 *frequency segments*.
- 6°. *Convolutional code interleaving*. Se toman trozos secuenciales de la cadena de bits para separar los errores. Los códigos convolucionales funcionan mejor cuando los errores están aislados, por este motivo separar las largas cadenas de bits en trozos más pequeños para aislar errores es uno de los pasos más importantes.
- 7°. *Constellation mapping*. Los bits se mapean en la constelación QAM seleccionada.
- 8°. *LDPC tone mapping*. En este punto se toman puntos de la constelación y se asignan a subportadoras OFDM adecuadamente separadas, para evitar que interfieran unos con otros.
- 9°. *Segment deparsing*. Se utiliza para canales de 160 MHz. Vuelve a unir los dos trozos de 80 MHz en los que separó el *Segment parsing* el trozo de 160 MHz.
- 10°. *Space-time block coding (STBC)*. Este paso es opcional. Se utiliza para transmitir un flujo espacial por múltiples antenas para conseguir redundancia, formando *space-time streams*.
- 11°. *Pilot insertion and cyclic shift diversity (CSD)*. Los puntos de la constelación se combinan con los datos de las subportadoras piloto para crear los datos de transmisión. Cuando hay varios datos para transmitir, se les aplica una diferencia de fase para poder diferenciarlos en el receptor.
- 12°. *Spatial mapping*. Mapea *space-time streams* en cadenas de transmisión.
- 13°. *Inverse Fourier Transform (IFT)*. Toma los datos del dominio de la frecuencia y los pasa al dominio del tiempo para transmitirlos.

- 14°. *Guard insertion and windowing*. El periodo de guarda se inserta al comienzo de cada símbolo y el proceso de *windowing* se utiliza para mejorar la calidad de la señal en el receptor.
- 15°. *Preamble construction*. El preámbulo consiste en un campo *non-VHT-modulated training fields*. Se crea un preámbulo para cada canal de 20 MHz.
- 16°. *RF and analog section*. Prepara los datos para transmitirlos por la antena después del preámbulo. Se convierte la forma de onda obtenida en el punto anterior en una señal situada en una portadora en el centro del canal de transmisión seleccionado por el AP. Un amplificador de potencia aumenta la potencia de la señal tanto como sea necesario para que llegue hasta el dispositivo deseado, cumpliendo con los límites regulados.

En el lado del receptor el proceso es el inverso al que se ha visto anteriormente. Las señales que entran en la antena se pasan por un amplificador de bajo ruido (LNA). El preámbulo se utiliza para establecer en el receptor ajustes de frecuencias necesarios ante posibles desvanecimientos del canal. Después de la corrección del canal basada en el preámbulo y en las portadoras pilotos, se reciben los símbolos de la constelación. Si se hubiera elegido STBC en la transmisión, varios de los flujos recibidos se combinarán en una única cadena de bits. Si no, cada flujo recibido se convertiría en una cadena de símbolos de la constelación. Los símbolos de la constelación se convierten en bits y se pasan por el decodificador FEC que corrige los errores existentes. Los bits resultantes se decodifican en una trama MAC y se pasa al nivel MAC para su procesamiento.

3.2.7 Velocidad de los datos en el estándar 802.11ac

La velocidad de los datos viene determinada por el ancho de banda del canal, la modulación elegida, el número de flujos espaciales y el intervalo de guarda.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las distintas velocidades alcanzadas en los distintos estándares.

Tecnología	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz
802.11b	11 Mbps			
802.11a/g	54 Mbps			
802.11n (1 flujo espacial)	72 Mbps	150 Mbps		
802.11ac (1 flujo espacial)	87 Mbps	200 Mbps	433 Mbps	867 Mbps
802.11n (2 flujos espaciales)	144 Mbps	300 Mbps		
802.11ac (2 flujos espaciales)	173 Mbps	400 Mbps	867 Mbps	1,7 Gbps
802.11n (3 flujos espaciales)	216 Mbps	450 Mbps		
802.11ac (3 flujos espaciales)	289 Mbps	600 Mbps	1,3 Gbps	2,3 Gbps
802.11n (4 flujos espaciales)	289 Mbps	600 Mbps		
802.11ac (4 flujos espaciales)	347 Mbps	800 Mbps	1,7 Gbps	3,5 Gbps
802.11ac (8 flujos espaciales)	693 Mbps	1,6 Gbps	3,4 Gbps	6,9 Gbps

Tabla 3-5 Comparación de las distintas velocidades obtenidas en los distintos estándares

3.2.8 Resumen de las especificaciones de capa física

En la siguiente tabla se clasifican todas las especificaciones del estándar como obligatorias u opcionales.

Característica	Obligatoria/opcional	Comentarios
Formato de tramas VHT	Obligatorio	
Canales de 20 y 40 MHz	Obligatorio	Estos anchos de banda ya existían en estándares anteriores
Canales de 80 MHz	Obligatorio	
Canales de 160 MHz y 80+80 MHz	Opcional	No existía en los primeros dispositivos 802.11ac que salieron al mercado
Flujo único de datos MCS de 0 a 7	Obligatorio	
Flujo único de datos MCS 8 y 9	Opcional	Opcional pero muy conveniente que los dispositivos lo soporten
2 flujos de datos	Opcional	
3 flujos de datos	Opcional	
4 flujos de datos	Opcional	
De 5 a 8 flujos de datos	Opcional	
MCS 8 y 9 (256-QAM) con más de un flujo	Opcional	
Periodo de guarda de 400 ns	Opcional	Aunque es opcional, casi todos los dispositivos lo soportan
LDPC	Opcional	
STBC	Opcional	

Tabla 3-6 Especificaciones de la capa física

3.3 Capa MAC

La mayoría del trabajo realizado sobre la capa MAC no ha sido para mejorar la eficiencia como se ha hecho en otros estándares, sino que se ha centrado en mejorar para adaptarse a las nuevas características que ofrece la capa física, que es la que ha tenido que modificarse más para mejorar el rendimiento y la tasa de datos.

Uno de los grandes cambios a los que la capa MAC ha tenido que adaptarse es a la compartición del medio por dispositivos con distintos tipos de canales, unos de 20 MHz, otros de 80 MHz,...

Para permitir un uso más eficiente del espectro, se añaden nuevas reglas para permitir a los dispositivos indicar su consumo de ancho de banda en intercambios RTS/CTS.

3.3.1 Clear Channel Assessment (CCA)

En todos los estándares 802.11, siempre se ha seguido un procedimiento para acceder al medio compartido por

varios dispositivos que ha consistido en escuchar antes que transmitir, en el que los huecos disponibles para realizar la transmisión han sido lo más importante.

Para dividir el canal disponible (aire) en canales para transmitir el estándar 802.11ac introduce los conceptos de “canal primario” y “canal secundario”. El canal primario es el utilizado para transmitir algo en su ancho de banda original. Este concepto se puede observar en la Figura 3-8.

Para cada ancho de banda de canal existe un canal primario que será utilizado para transmitir tramas por ese canal siempre que esté libre. Por ejemplo, como se puede observar en la Figura 3-8, para poder transmitir con un ancho de banda de 40 MHz en el canal primario deben estar libres tanto el canal 60 como el 64.

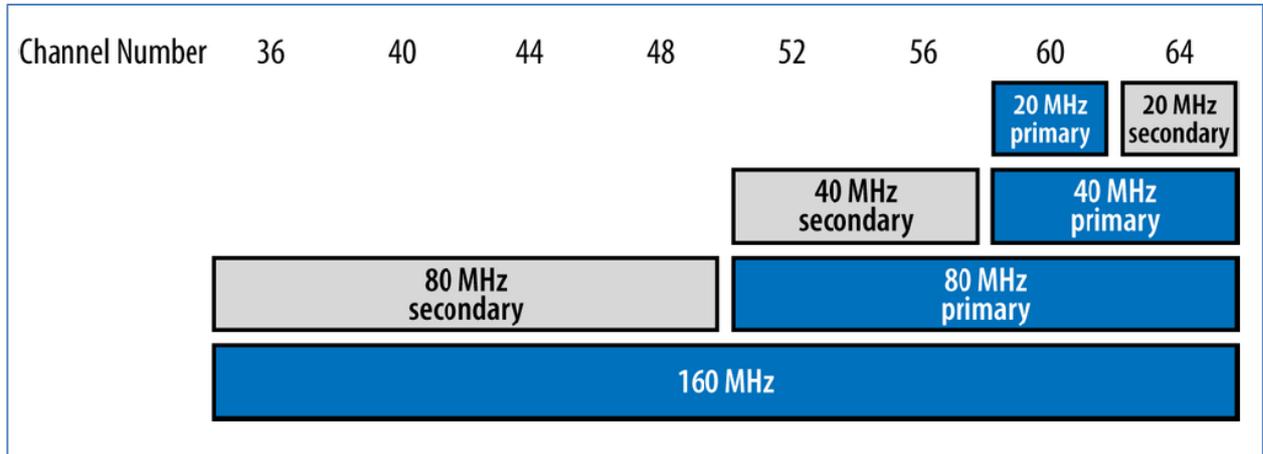


Figura 3-8 Canales primarios y secundarios

Una de las razones para dividir los canales en primarios y secundarios es la de posibilitar la coexistencia de distintas redes. Debido a la variedad de dispositivo y a la cantidad de datos en curso, la mayoría de las redes no utilizan los 160 MHz. Para poder compartir los canales más anchos entre distintas redes, los dispositivos deben tener la capacidad de detectar cuando se está transmitiendo por un canal, tanto si es primario como si es secundario. Este comportamiento se puede observar en la Figura 3-9.

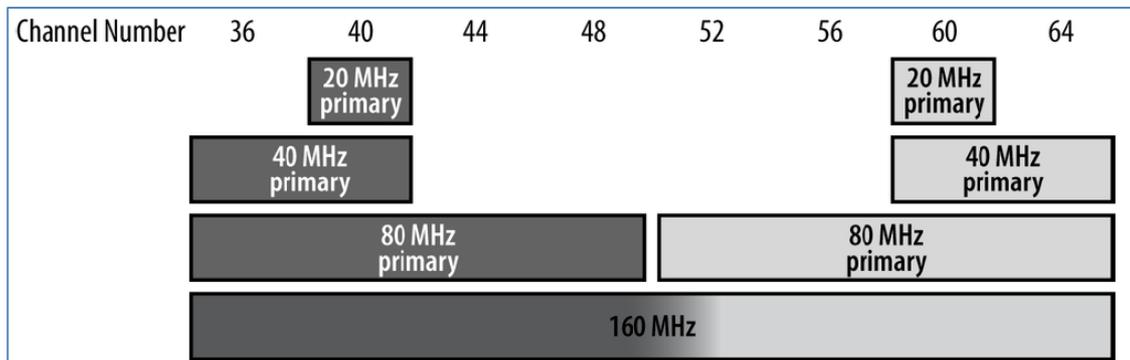


Figura 3-9 Coexistencia de varias redes en una misma frecuencia

3.3.1.1 Reglas de acceso básicas

Una trama se puede enviar si el medio no está ocupado. Si el canal está ocupado, depende de cuánto ancho de banda esté utilizándose para la transmisión. Cuando se ha detectado que el canal está libre, el dispositivo puede:

- Transmitir una trama de 20 MHz en su canal primario de 20 MHz.
- Transmitir una trama de 40 MHz en su canal primario de 40 MHz. Para que sea posible, el canal secundario debe estar libre.
- Transmitir una trama de 80 MHz en su canal primario de 80 MHz. El canal secundario y el primario de 40 MHz deben estar libres.
- Transmitir una trama de 160 MHz en el canal de 160 MHz, solo si tanto el canal primario como el secundario de 80 MHz están libres.

Si algunos de los canales necesarios para iniciar la transmisión no está libre, el dispositivo debe notificarlo y comenzar el proceso de *back-off* para volver a intentar transmitir por el canal. El dispositivo espera a que pase un tiempo DIFS (*Distributed Interframe Space*), después de que este tiempo pasa, se retransmite la trama. El transmisor debe seleccionar un número aleatorio que será la posición dentro de la ventana de contención. El “ganador” de la retransmisión será el que haya obtenido el valor más bajo en la contienda.

3.3.1.2 Sensibilidad requerida

Para detectar que el canal está ocupado se tienen dos métodos, “detección de la señal” y “detección de la energía”. Para el método de detección de la señal se requiere que el receptor encuentre y decodifique la señal 802.11 mientras que el método de detección de energía únicamente se fija en la energía del canal, si es más alta que un valor umbral el canal se califica como ocupado. A continuación se muestra en la Tabla 3-7 el valor umbral de señal y el valor umbral de energía utilizados en ambos métodos para determinar la ocupación del canal.

Ancho del canal	Umbral de la señal (canal primario)	Umbral de la señal (canal secundario)	Umbral de energía (canal secundario)
20 MHz	-82 dBm	-72 dBm	-62 dBm
40 MHz	-79 dBm	-72 dBm	-59 dBm
80 MHz	-76 dBm	-69 dBm	-56 dBm
160 MHz	-73 dBm	No hay canales secundarios	No hay canales secundarios

Tabla 3-7 Umbrales para ambos métodos

3.3.2 Ancho de banda de operación dinámico (RTS/CTS)

RTS y CTS se utilizan únicamente para gestionar el acceso al medio. El iniciador del proceso CTS transmite la trama CTS, que es entendida por todos los receptores. Tras recibirla, todos los receptores conocen la duración de la trama aunque no decodifiquen los datos y se dan cuenta de que tienen que esperar para transmitir tanto como indique la trama CTS. Este procedimiento se puede observar en la Figura 3-10.

Para gestionar el acceso a canales más anchos hay que utilizar una transmisión denominada *non-HT duplicate frame*. Hay dos atributos que van dentro de este tipo de tramas. En primer lugar, la trama se transmite utilizando métodos *non-HT* (*non-High Throughput*) utilizando el estándar 802.11a. En segundo lugar, la trama CTS se duplica en múltiples canales, como se puede observar en la Figura 3-10(b) para una transmisión de 40 MHz. Para una transmisión de 80 o 160 MHz habría que enviar 3 y 7 tramas CTS respectivamente. El envío duplicado de las tramas CTS se utiliza para señalar el ancho de banda dinámico.

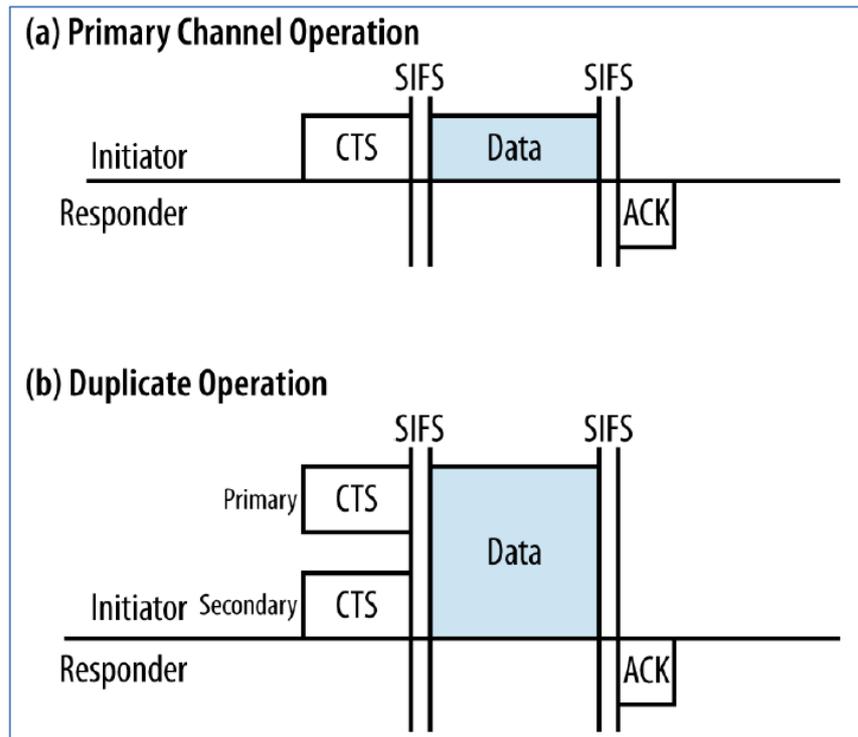


Figura 3-10 Proceso de acceso al canal

Las tramas CTS y RTS trabajan para dejar libre el canal sobre el que se desea transmitir.

En la Figura 3-11 se observa cómo RTS y CTS trabajan conjuntamente para negociar el ancho de banda. El iniciador del proceso tiene una trama que transmitir en un canal de 80 MHz. Por lo tanto, envía una trama RTS a través de los 4 canales de 20 MHz indicando que quiere transmitir por el canal. En la Figura 3-11(a) se muestra un acceso exitoso al canal. Los 4 canales estaban disponibles y el dispositivo ha podido utilizar los 80 MHz deseados. Por el contrario, en la Figura 3-11(b) el iniciador del proceso envía una trama RTS solicitando 80 MHz para transmitir, con la diferencia de que hay dos canales de 20 MHz ocupados, por lo que el ancho de banda disponible que podrá utilizar el dispositivo será de 40 MHz y se comunica con el envío de la trama CTS.

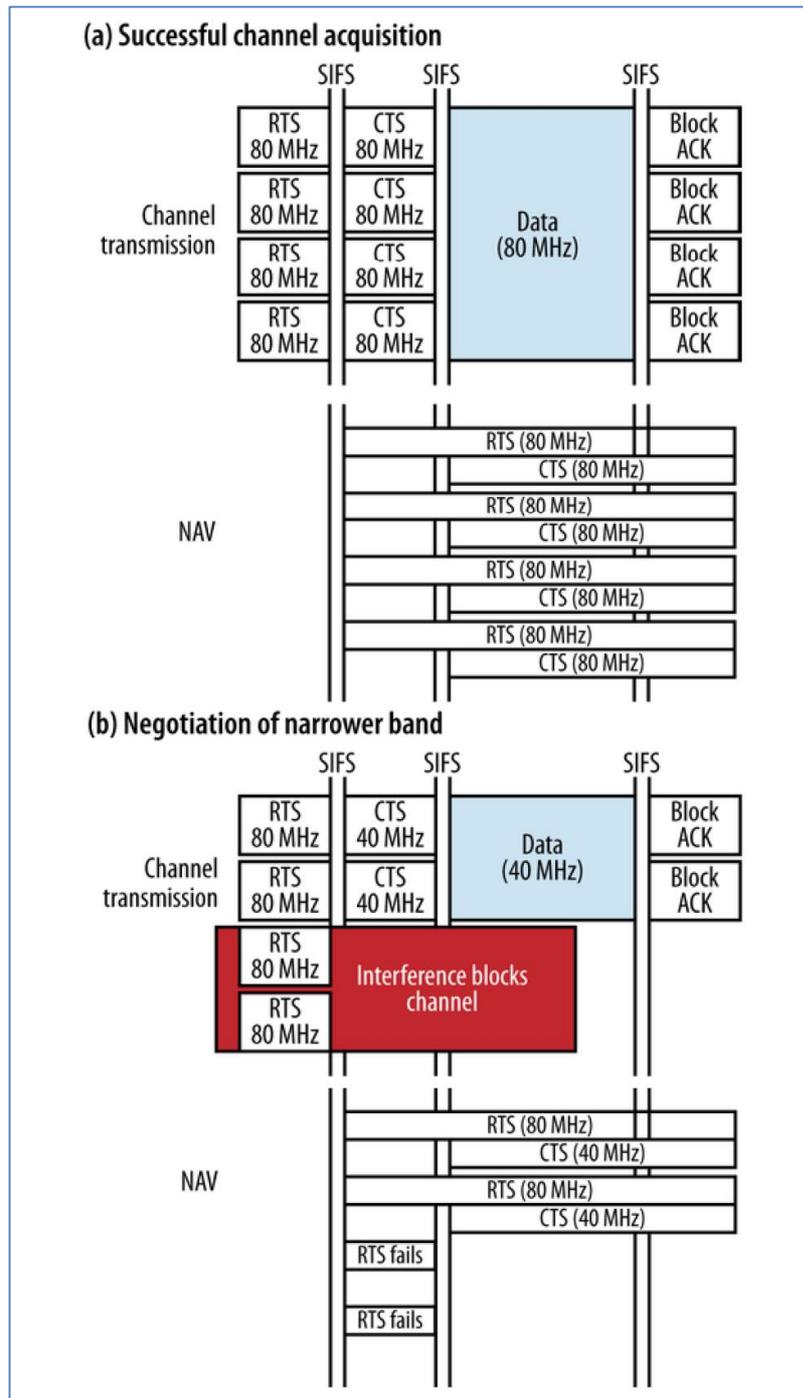


Figura 3-11 RTS y CTS trabajando conjuntamente

Varias redes pueden utilizar ancho de banda dinámico para acceder al mismo ancho de banda del canal. En la Figura 3-12(a) se observa la compartición de la misma frecuencia por dos redes 802.11ac. No necesitan compartir sus canales primarios de 20 o 40 MHz, pero si el de 80 MHz. Por lo tanto, si desean transmitir utilizando un ancho de banda de 80 MHz deberán esperar un tiempo hasta que el canal se quede libre. En la Figura 3-12(b) se muestra un ejemplo de cómo podría ser el esquema de transmisión utilizado por ambas redes. Por otra parte, si desean transmitir utilizando canales de 20 o 40 MHz, lo pueden hacer independientemente de lo que esté transmitiendo la otra red.

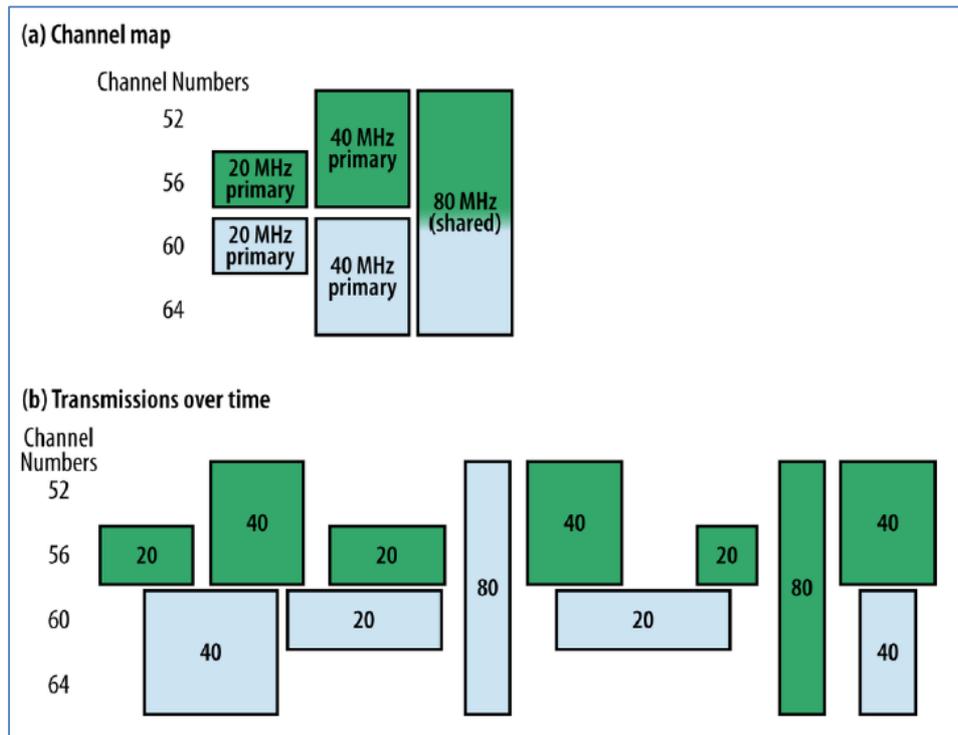


Figura 3-12 Canal compartido por varias redes

4 ILUSTRACIÓN DE PRESTACIONES DEL 802.11AC EN CUANTO A COBERTURA Y TASA

La función principal de este capítulo es definir e ilustrar mediante un caso práctico los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de dimensionar una red WiFi 802.11ac. En una primera parte, se definirán conceptos claves como velocidad, capacidad y latencia, y en una segunda parte, se realizará un estudio sobre una red 802.11ac haciendo hincapié en cada uno de los conceptos vistos en la primera parte. Para esta simulación, se utilizará un software de planificación radio llamado “*Eka*hau”.

4.1 Conceptos claves para el despliegue de una red WiFi

El estándar 802.11ac se desarrolla para dar solución a los problemas que aparecen con la evolución de las redes inalámbricas:

- Necesidad de **más ancho de banda** para cada usuario y más velocidad.
- Necesidad de atender a **más usuarios simultáneos** (alta densidad) en cada Punto de Acceso (AP).

El estándar 802.11ac ofrece las siguientes mejoras para cubrir las necesidades anteriores y adaptarse al mercado:

- **Aumento de la capacidad.** Se puede llegar hasta un ancho de banda de 80 MHz (en los equipos disponibles actualmente) frente a los 40 MHz que permitía el estándar 802.11n como máximo.
- **Aumento de la cantidad de flujos binarios.** El estándar 802.11ac permite tener MIMO 8x8 frente a MIMO 4x4 que permitía el 802.11n, aumentando así la capacidad ofrecida por la red.
- **Velocidad y rendimiento.** La velocidad es el principal aspecto de mejora con el estándar 802.11ac. El aumento de las aplicaciones multimedia ha incrementado la demanda de ancho de banda y la necesidad de transmitir los datos a gran velocidad.
- **Uso de la banda de 5 GHz.** Como se ha comentado anteriormente, los dispositivos 802.11ac existentes en el mercado poseen la característica *Dual-Band*, es decir, pueden emitir y recibir tanto en la banda de 2,4 GHz como en la de 5 GHz. De esta forma, cuando estos APs trabajan en la banda de 2,4 GHz, siguen utilizando la misma tecnología que se ha estado utilizando durante los últimos años, por tanto, los equipos 802.11ac son compatibles con los estándares anteriores.

La mayoría de las redes WiFi existentes actualmente trabajan en la banda de 2,4 GHz, por lo que esta banda está bastante congestionada. Además, la banda de 5 GHz permite tener hasta 19 canales no solapados, frente a los 3 que tendría si trabajara en la banda de 2,4 GHz. De esta forma, se aumenta el número de APs que pueden estar trabajando en la misma ubicación sin interferirse.

- **Latencia.** En el mercado existen actualmente gran cantidad de aplicaciones que necesitan un objetivo de latencia muy bajo debido a que son aplicaciones en tiempo real como por ejemplo la voz o la videoconferencia. Para mejorar la latencia, el primer paso es mejorar la red sobre la que viaja la aplicación en cuestión, ya sea con una red más eficiente o reduciendo el tiempo de uso acelerando el nivel físico. MIMO también reduce la carga de la red ya que permite realizar transmisiones en paralelo.

Cualquier proyecto que se realice para desplegar una red inalámbrica debe cumplir con los requisitos específicos de cada escenario.

Los aspectos generales a tener en cuenta a la hora de diseñar cualquier proyecto de despliegue de una red inalámbrica son los siguientes:

- Cálculo de cobertura dentro de la zona geográfica a la que se desea dar servicio.
- Dimensionamiento de la red basado en los requisitos de capacidad que necesita cada usuario y el número de usuarios.
- Elección justificada de los distintos equipos utilizados para la elaboración del proyecto.

- Especificación de los distintos servicios para los que se va a utilizar la red.

A lo largo de este apartado se va a ilustrar mediante un caso real el desarrollo del diseño teórico y su replanteo práctico de un proyecto para el despliegue de una red inalámbrica en un entorno de alta densidad.

4.2 Software para el diseño de una red inalámbrica



La herramienta de simulación que se utiliza a lo largo de este documento es el software Ekahau. Este software permite realizar tanto un estudio teórico de cobertura como un *site survey*, permitiendo así corroborar los resultados obtenidos en el estudio teórico. Se trata de un software para planificación y análisis de redes WiFi.

Esta herramienta de simulación realiza un dimensionamiento atendiendo tanto a los requisitos de cobertura del área física como a los requisitos de conectividad y caudales de los distintos dispositivos.

Para comenzar a trabajar sobre un diseño nuevo en primer lugar hay que cargar los mapas del edificio o zona que se quiere cubrir con conectividad WiFi.

La interfaz del programa es la siguiente:

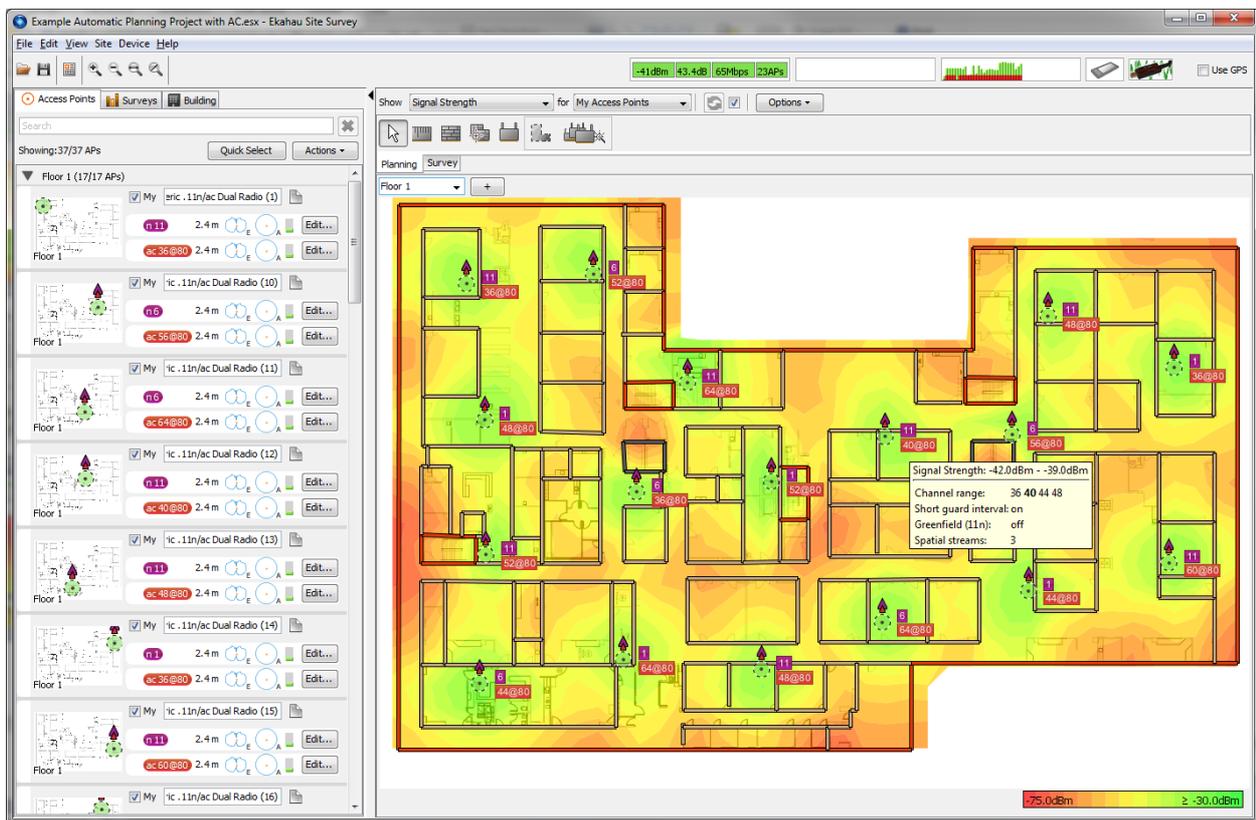


Figura 4-1 Interfaz Ekahau

En la Figura 4-1 Interfaz Ekahau se muestra la interfaz gráfica del programa de simulación Ekahau. A la derecha de la imagen se observa el plano del recinto al que se desea dar cobertura y a la izquierda se tienen 3 opciones:

- Puntos de acceso: se muestran los puntos de acceso que se han colocado sobre el plano.
- Edificio: se pueden añadir planos de las distintas plantas, en el caso de que se trate de un edificio, y alinearlas de forma que se pueda utilizar la cobertura de los puntos de acceso de plantas inferiores en las superiores y viceversa.
- Distintos tipos de estudio.

Una vez se ha cargado el mapa deseado sobre el que se desea instalar la infraestructura inalámbrica, el siguiente paso es establecer la escala adecuada, de forma que las distancias sean reales y se tenga una aproximación de la cobertura lo más certera posible.

Posteriormente, como se observa en la Figura 4-1, hay que añadir el tipo de muros, puertas, ventanas, armarios, escaleras, ... que se muestran en el plano para saber cuánto se atenúa la señal en su recorrido a través del edificio en cuestión y cuál es la mejor localización de APs y antenas. Según el tipo de obstáculo elegido, la señal sufrirá más o menos atenuación. En la Figura 4-2 se muestran ejemplos de tipos de obstáculos que se pueden seleccionar y la atenuación que provoca cada uno de ellos a la señal.

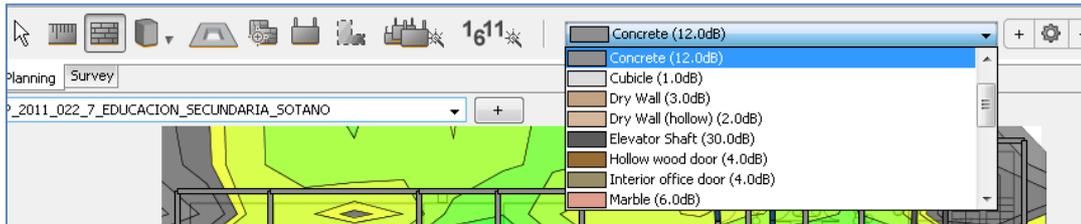


Figura 4-2 Distintos tipos de obstáculos

Los siguientes factores son muy importantes a la hora de realizar un estudio teórico:

- **Diagrama de radiación:** un diagrama de radiación es una representación gráfica de cómo se propaga la señal en todas las direcciones a través de esa antena. Para simplificar la interpretación de este diagrama, se separa en dos: “Diagrama vertical” y “Diagrama horizontal”, simplemente se trata de la proyección vertical y la horizontal del diagrama de radiación. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de los diagramas de radiación vertical y horizontal de una antena.

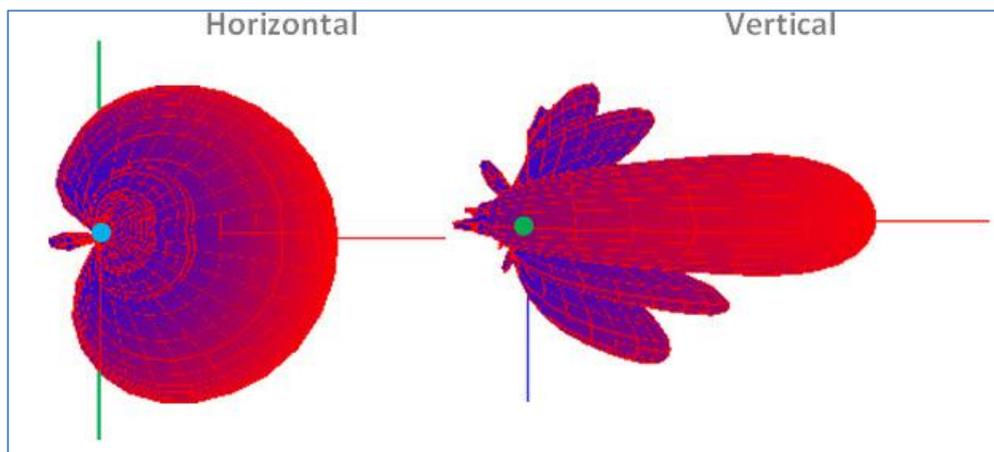


Figura 4-3 Diagramas de radiación horizontal y vertical

Para entenderlo mejor, en la Figura 4-4 se muestran de forma más detallada los diagramas anteriores:

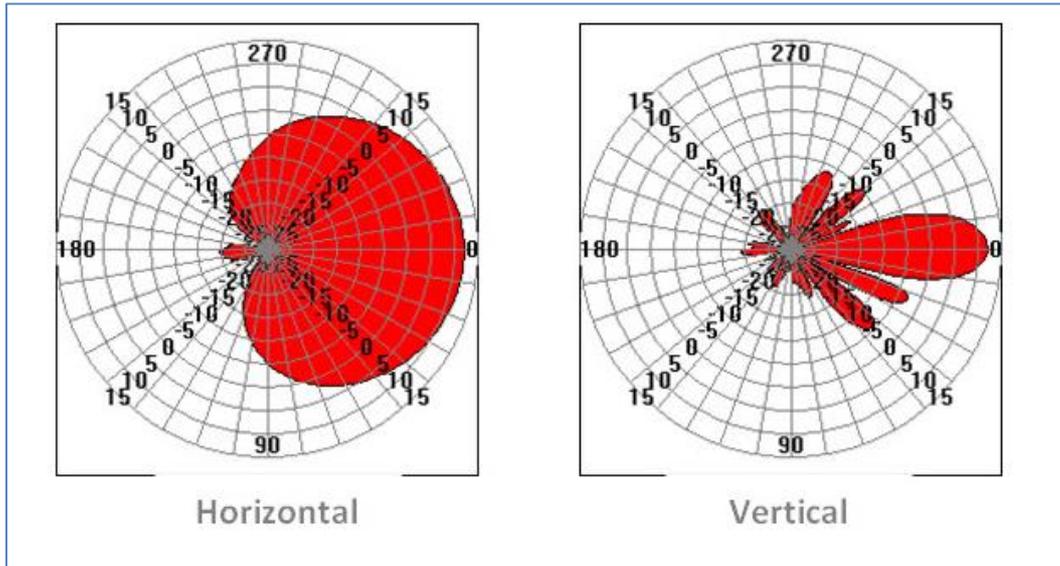


Figura 4-4 Diagramas de radiación con escalas

Los parámetros más importantes de un Diagrama de Radiación son:

- Dirección de apuntamiento: es la dirección de máxima radiación, en la que la antena radia su máxima potencia.
- Lóbulo principal: es el margen angular alrededor de la dirección de apuntamiento.
- Lóbulos secundarios: resto de máximos relativos de valor inferior al principal.

Los diagramas de radiación que aparecen en la Figura 4-44 son más fáciles de interpretar. Los ejes radiales representan el azimut de la antena y las circunferencias circunscritas representan la ganancia de la antena en un azimut determinado. Se observa que la mayor ganancia se obtiene en el lóbulo principal.

- **Tilt de las antenas:** ajuste de la inclinación de las mismas con respecto a un eje. Se puede dirigir la señal más arriba o más abajo, concentrando la energía en la dirección deseada. Cuando la antena se inclina hacia arriba se llama *uptilt* y cuando se inclina hacia abajo *downtilt*. En la Figura 4-55 se observa el efecto que provoca el *tilt*. Para dar cobertura a la zona deseada se modifica el ángulo de inclinación de la antena (señal amarilla) para apuntar a la zona deseada con el lóbulo principal y tener una señal de más potencia. A la zona no deseada llega señal por los lóbulos laterales, con menos potencia.

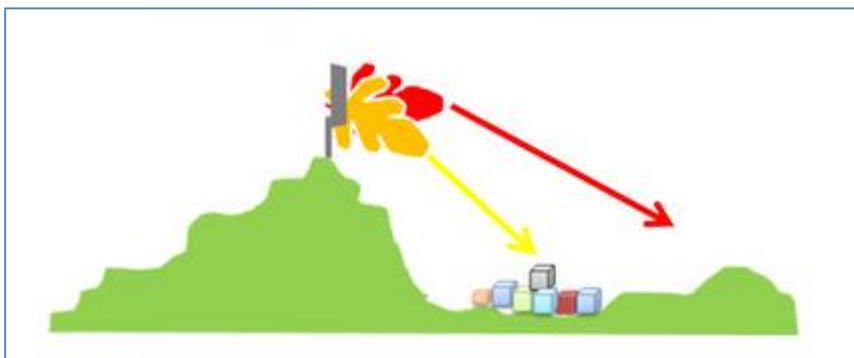


Figura 4-5 Tilt de las antenas

- **Altura de los APs:** en función de la distancia a la que se quiera llegar, se tendrán antenas más altas o más bajas.
- **Potencia de emisión:** la máxima potencia a la que pueden emitir los APs está regulada en el CNAF. Dependiendo de la banda en la que trabajen, los APs pueden transmitir a mayor o menor frecuencia. La

banda de 2,4 GHz está limitada por una PIRE de 100 mW y la de 5 GHz por una PIRE de 200 mW. Aparece esta gran diferencia debido a que en la banda de 2,4 GHz hay muchos servicios funcionando de forma paralela y se necesita limitar la potencia para no interferir unos a otros. Sin embargo, la banda de 5 GHz está más desocupada permitiendo así una mayor potencia de emisión. La PIRE (Potencia Isótropa Radiada Equivalente) incluye a la potencia de transmisión y a la ganancia de la antena.

- **Canal de transmisión:** como se ha mencionado anteriormente, dependiendo de la banda en la que trabaje cada AP habrá más o menos canales sin solapamiento. Para tener un diseño correcto se deben utilizar canales que no se solapan entre sí para el diseño.

En los siguientes apartados se realiza un estudio de un escenario de alta densidad con la finalidad de ilustrar de forma práctica los conceptos que se han ido revisando a lo largo del documento. Se ha elegido este tipo de escenario porque es el que mejor ilustra las prestaciones del estándar 802.11ac: mayor capacidad, mayor cantidad de flujos binarios, mayor rendimiento y menor latencia.

4.3 Electrónica de red utilizada

A continuación se describen las características de los equipos utilizados, tanto del AP como de las antenas externas.

El AP utilizado es el Aironet 2702 de la serie 2700 del fabricante Cisco. Este AP se caracteriza por ser *Dual-Band*, es decir, puede trabajar tanto en la banda de 2,4 GHz como en la de 5 GHz. Actualmente, debido a que se está produciendo una transición entre los dispositivos 802.11n y los 802.11ac, se considera imprescindible que el AP pueda trabajar en ambas bandas para poder dar servicio a todo tipo de dispositivos.



Figura 4-6 AP Cisco 2702

Este AP está especialmente diseñado para entornos de alta densidad, adaptándose a la nueva generación de *Tablets*, *Smartphones* y PCs de alto rendimiento que funcionan con el estándar 802.11ac. Estos APs cubren las necesidades de conexión de los usuarios, siendo capaces de ofrecerse como única alternativa de conexión apartando a un lado cada vez más a los usuarios cableados de Ethernet. Su alto rendimiento ha conseguido lograr tasas aún más elevadas que las que se obtienen mediante la conexión por cable.

En la siguiente tabla se muestran las características principales de este AP:

Número máximo de usuarios	100 usuarios concurrentes asociados al mismo AP.
Tasa de datos soportada	Hasta 1,3 Gbps para 802.11ac y 450 Mbps si se trata de 802.11n.
MIMO	3x4 MIMO (3 flujos de datos).
Ecuación MIMO	Optimiza el rendimiento y la fiabilidad del enlace ascendente reduciendo el impacto del desvanecimiento de la señal.
Roaming optimizado	Asegura que los clientes asociados a un AP tienen la máxima tasa de datos permitida en su zona de cobertura, en el momento en que no se cumpla se asocia a otro AP.
Estándares soportados	802.11a/b/g/n/ac.

Frecuencia de trabajo	Equipo <i>Dual-Band</i> , trabaja en 2,4 y 5 GHz.
PoE	El dispositivo se puede alimentar a través del cable de red Ethernet.
Antenas	Antenas externas de hasta 6 dBi.

Finalmente, queda presentar la parte más importante de la red, las antenas que se colocarán en los APs. Para este diseño se han elegido antenas de panel del fabricante Cisco. Se colocarán 4 en cada AP utilizando MIMO para obtener el mayor rendimiento posible.

La antena elegida se muestra en la Figura 4-7:



Figura 4-7 Antena de panel utilizada para el diseño

Las características de la antena son las siguientes:

Frecuencia de trabajo	Los rangos de trabajo son los siguientes: 2.400-2.484 MHz y 5.150-5.850 MHz.
MIMO	4 antenas de panel.
Ganancia	6 dBi para ambas bandas de frecuencia.
Polarización	Lineal, vertical.
Ancho de banda a 3 dB en el plano horizontal	Banda de 2,4 GHz: 105°.
	Banda de 5 GHz: 110°.
Ancho de banda a 3 dB en el plano vertical	Banda de 2,4 GHz: 65°.
	Banda de 5 GHz: 55°.
Tipo de antena	Sirve tanto para exteriores como para interiores.

Por último, la característica más importante de las antenas, su diagrama de radiación:

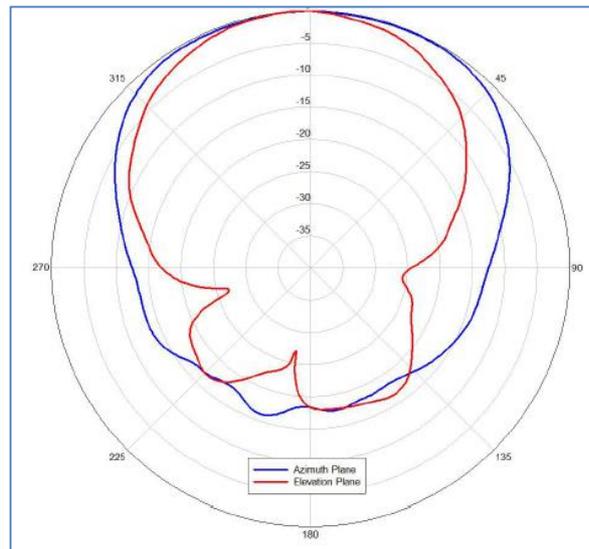


Figura 4-8 Diagramas de radiación banda 2,4 GHz

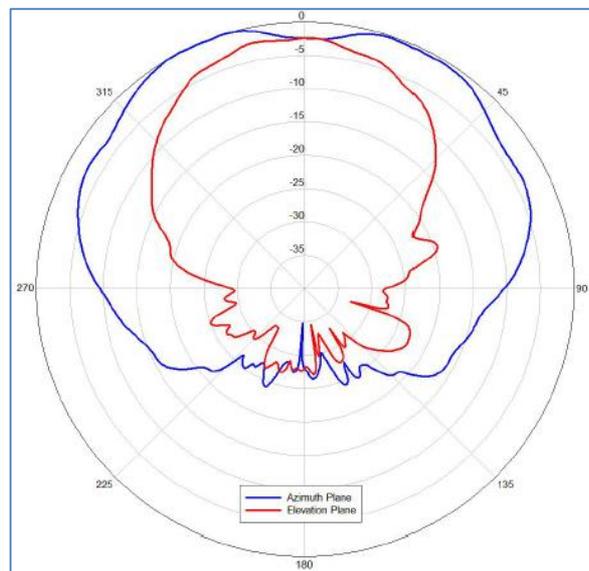


Figura 4-9 Diagrama de radiación banda 5 GHz

Como se puede observar en las Figura 4-9 y Figura 4-8, el diagrama de radiación no es muy directivo. Se concentra la mayor parte de potencia en la parte delantera pero el haz no es estrecho y focal. Se ha elegido una antena de estas características porque se necesita que abarque una zona amplia, después, jugando con el *tilt* y la altura de las antenas se enfocará la zona que se desee con cada antena.

Al final de este documento, en el Anexo, se han incluido los *datasheets* completos tanto de las antenas externas como del AP utilizado.

4.4 Presentación del escenario

La red a desplegar debía dotar de conectividad WiFi a los asistentes a un congreso internacional realizado en un conocido teatro de Sevilla. Se esperaba que el congreso tuviera una afluencia de 1200 asistentes. Entre ellos se encontraban personas de mucho prestigio, de las empresas Google, Apple,... y estudiantes interesados en las materias de las que se iba a hablar.

De las características expuestas anteriormente, se deduce que se trata de un entorno de alta densidad.

A la hora de dar cobertura en un escenario como el descrito, hay que tener en cuenta otros aspectos adicionales

a los ya mencionados en el punto anterior:

- Se trata de un espacio reducido, en el que se concentran gran cantidad de clientes que necesitan conectividad WiFi. Cada persona, además de su portátil o *Tablet*, llevaría su teléfono móvil con conectividad WiFi, por lo que el número de clientes al que se debe dar servicio se duplica. Un mayor número de clientes hace necesario aumentar el número de APs, debido a que cada AP puede dar servicio a un número limitado de clientes.
- Al tener un mayor número de APs en la misma ubicación se necesita realizar un buen estudio, asignando los canales a cada AP de forma conveniente para no interferir a APs adyacentes. Se deben elegir canales no solapados para el diseño de la red y asignarlos de forma conveniente para que dos APs adyacentes no estén configurados para trabajar en el mismo canal.
- Se considera una buena práctica en entornos en los que se concentran muchos APs transmitiendo de forma simultánea reducir la potencia de emisión, emitiendo en “focos” dirigidos a cada grupo de usuarios al que se desea dar servicio, para no interferir en la zona de cobertura de otro AP que trabaja en el mismo canal. Para conseguirlo se juega con la potencia de emisión y el *tilt* de las antenas.
- En la práctica, existen más mecanismos para mejorar el diseño. Se puede configurar el máximo número de clientes asociados a un AP, de forma que no se puedan asociar al AP clientes que no deberían estarlo (porque, por ejemplo, reciban mejor nivel de señal de otro AP que tienen más cerca).

En la Figura 4-10, se pueden observar las diferencias entre un escenario de cobertura WiFi típico y un escenario de cobertura WiFi de alta densidad. Se entiende por entorno de alta densidad aquel en el que en un espacio reducido se debe dar cobertura a multitud de personas y, a su vez, consumiendo éstas una alta tasa de transmisión de datos.

A continuación, se van a enumerar cada uno de los parámetros adicionales a tener en cuenta en entornos de este tipo:

- **Solapamiento entre canales:** en los despliegues de alta densidad hay gran cantidad de APs emitiendo de forma paralela en canales no solapados en células adyacentes.
- **Potencia de emisión:** Para evitar el solapamiento entre canales se configuran los APs para que emitan a menos potencia, reduciendo así el alcance. A su vez, se utilizan antenas directivas para enfocar una zona en concreto y no interferir en células adyacentes.
- **Puntos de acceso necesarios:** para permitir gran cantidad de usuarios conectados a la red WiFi, se necesita aumentar el número de APs debido a que el número de dispositivos conectados a un AP es limitado y varía en función del AP utilizado.

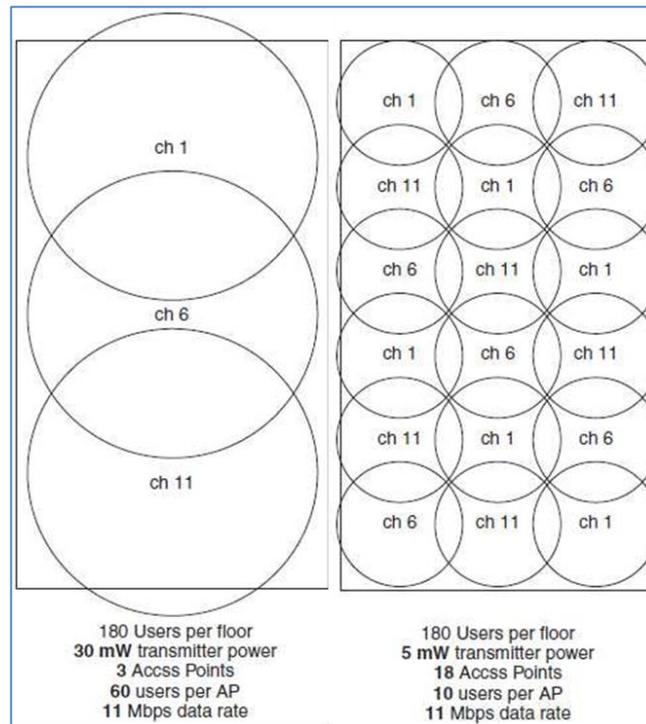


Figura 4-10 Diferencia entre entorno típico y entorno de alta densidad

Una vez aclarados los conceptos que hay que conocer para entender bien el diseño elegido, comienza el diseño de la red inalámbrica. La principal zona a cubrir es el Patio de butacas del teatro, debido a su estructura no se puede considerar que una planta esté bajo la otra, sin embargo, sí que hay que tener en cuenta que se trata de un plano inclinado y que, por ejemplo, la última fila tiene una diferencia de altura de 10 metros con la fila primera. La principal región a cubrir se puede observar en las siguientes imágenes:

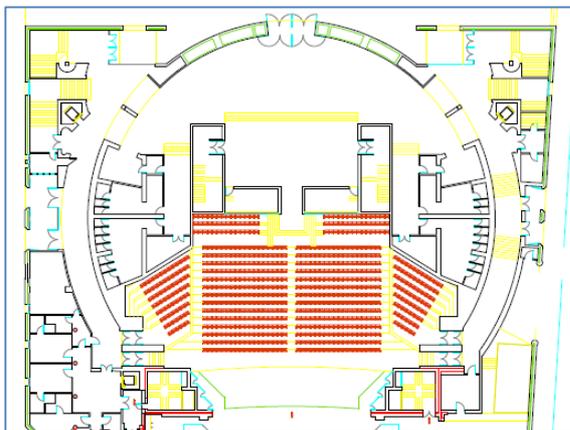


Figura 4-11 Plano planta inferior

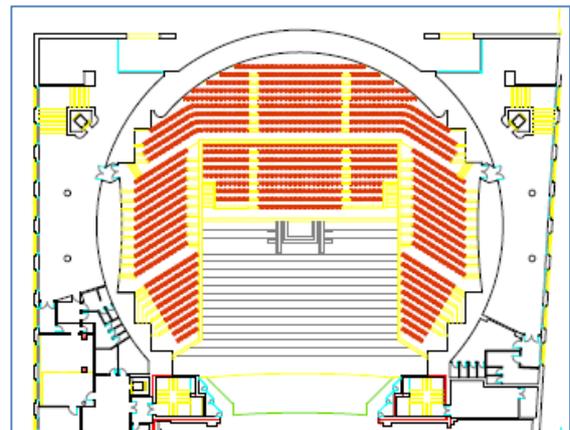


Figura 4-12 Plano planta superior

Adicionalmente, había que cubrir otras dos zonas, la zona que ocupa la Sala de Prensa y el catering. Estas zonas no necesitan tanta capacidad como el Patio de butacas debido a que los usuarios que se encuentran en ella estarán hablando, comiendo, haciéndose fotos, estrechando relaciones con compañeros de trabajo,... y en rara ocasión utilizarán su dispositivo móvil para acceder a Internet.

En las Figura 4-13 y Figura 4-14 se pueden observar las regiones a cubrir:

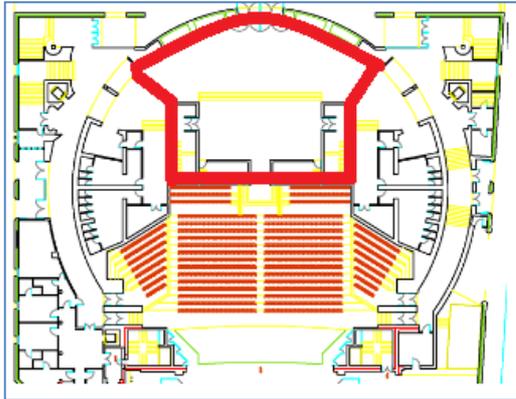


Figura 4-13 Zona de prensa

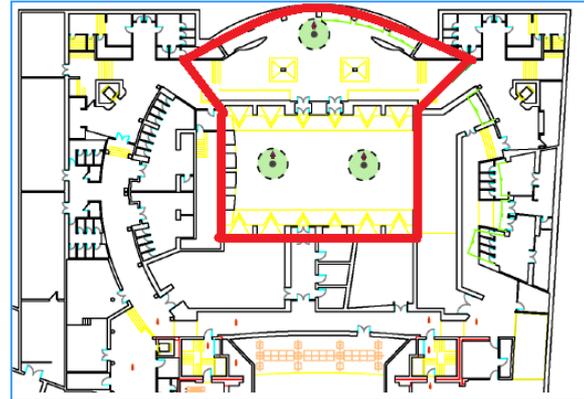


Figura 4-14 Zona de catering

La Zona de prensa se encuentra en la misma planta que el patio de butacas y la Zona de catering en el sótano.

Los requisitos de conectividad que se establecen para el Patio de butacas son los siguientes:

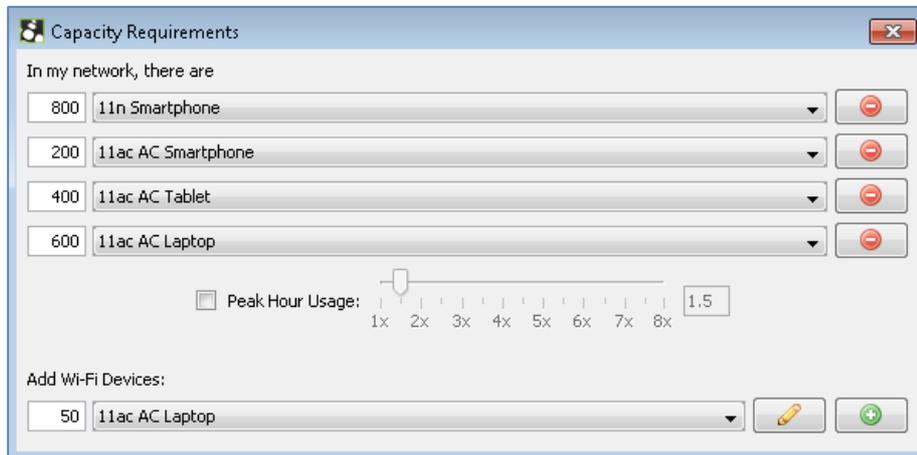


Figura 4-15 Requisitos de conectividad para patio de butacas

Y para la zona de catering:

Amount	Device
300	11ac Smartphone

Figura 4-16 Requisitos de conectividad para zona de catering

Y para la Zona de prensa:

Amount	Device
400	11ac Smartphone
50	11ac AC Laptop

Figura 4-17 Requisitos de conectividad para Zona de prensa

Para poder tener conectividad, se ha considerado un nivel de señal por encima de -65 dBm aproximadamente (dependiendo del dispositivo), por lo que en el plano se marcarán zonas donde en teoría habrá conectividad para todo tipos de dispositivos (PC, smartphones, tablets, etc.) aunque en función de las características de los equipos suscriptores pueden recibir la señal con diferente calidad.

Los requerimientos que se han puesto para realizar el estudio son los que se indican a continuación:

	Signal Strength <i>Min</i>	-65.0 dBm	
	Signal-to-noise Ratio <i>Min</i>	20.0 dB	
	Data rate <i>Min</i>	20 Mbps	
	Number of Access Points <i>Min</i>	1	at min. -65.0 dBm
	Channel Overlap <i>Max</i>	2	at min. -80.0 dBm
	Round Trip Time (RTT) <i>Max</i>	200ms	
	Packet Loss <i>Max</i>	2.0 %	

Figura 4-18 Requerimientos para el estudio

Como puede apreciarse se tienen en cuenta los niveles de señal mínimos requeridos, el nivel SNR y, lo que es más importante, el solapamiento de canales, que puede ser la problemática más común en ambientes de alta densidad de usuarios. Se ha realizado un diseño que minimice todos los posibles inconvenientes que se puedan detectar en una red de estas características.

4.5 Diseño de la red inalámbrica

En este apartado se plasma el diseño teórico de la red. Se han diferenciado tres zonas que habrá que cubrir, la zona principal, la zona de prensa y la zona de catering. En los siguientes apartados se explica detalladamente el diseño que se ha realizado en cada una de ellas.

4.5.1 Zona principal, patio de butacas

Se trata de la zona de butacas donde se situarán los asistentes al evento. Es, por lo tanto, la zona principal a cubrir y en la que hay que prestar especial atención.

Esta zona va a ser la de más afluencia y tráfico de datos por lo que es donde se ha tenido especial cuidado a la hora del dimensionamiento de la solución. Ambas plantas se pueden observar en las Figura 4-11 y Figura 4-12. Debido a la complejidad del edificio en el que se realiza el evento, se van a tratar ambas plantas como si fuera una sola. La arquitectura del edificio permite abarcar ambas plantas debido a que la planta alta es un aro sobre la planta baja, sin solaparse con ésta.

A continuación se muestra la ubicación de los APs que serán necesarios para dar cobertura en la zona principal. Esta ubicación se mostrará con el siguiente símbolo: .

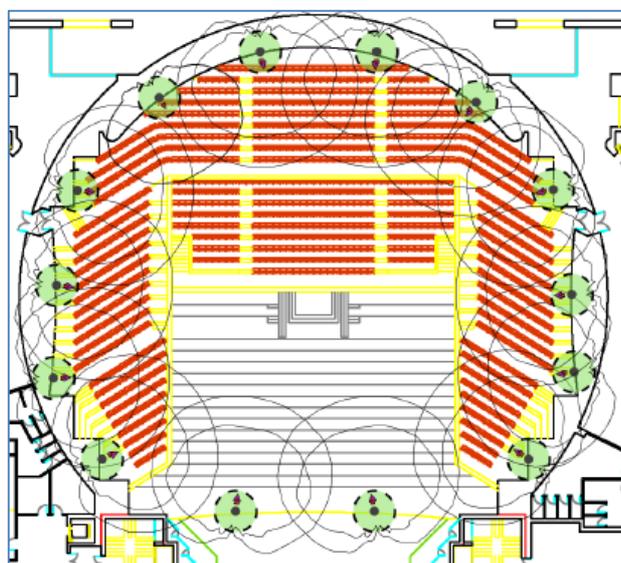


Figura 4-19 Posición de los APs en la zona principal

Como se observa en la Figura 4-19, se ha elegido una distribución circular en la zona más alta del teatro para alcanzar mejor todo el área del recinto. Para evitar que estos APs se interfirieran unos a otros, se ha jugado con la altura de las antenas y con el *tilt* y la potencia de emisión.

A continuación se muestran las alturas, potencia de emisión y *tilt* de los APs:

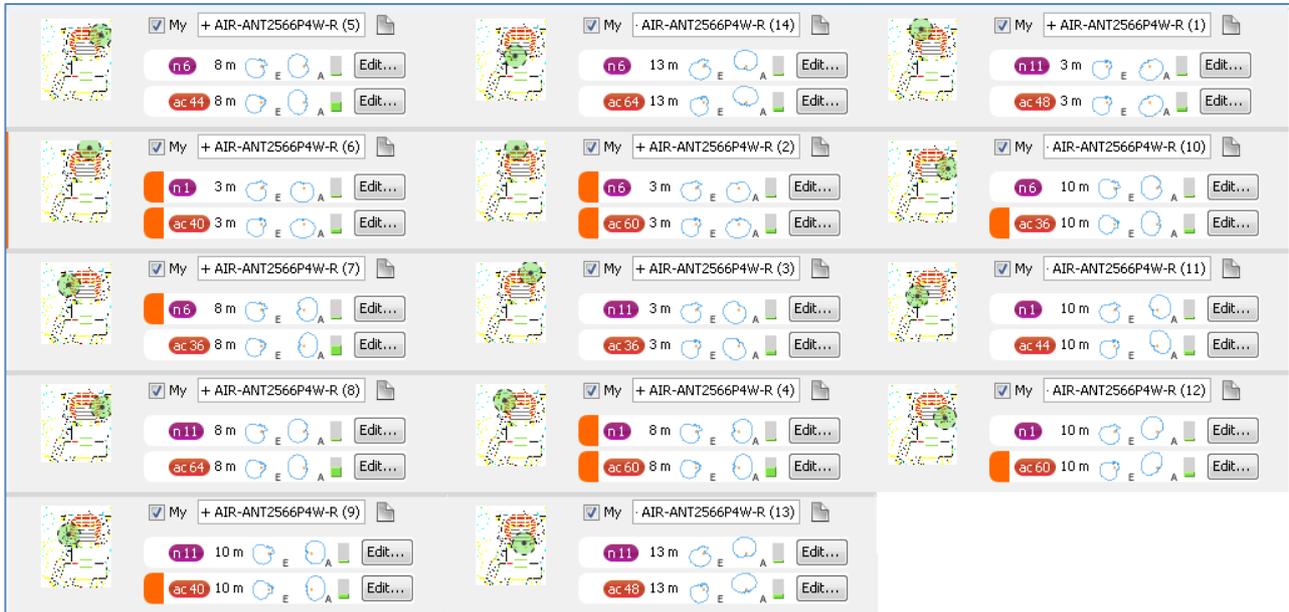


Figura 4-20 Posición de los APs

Los datos que aparecen en la imagen se explican a continuación:

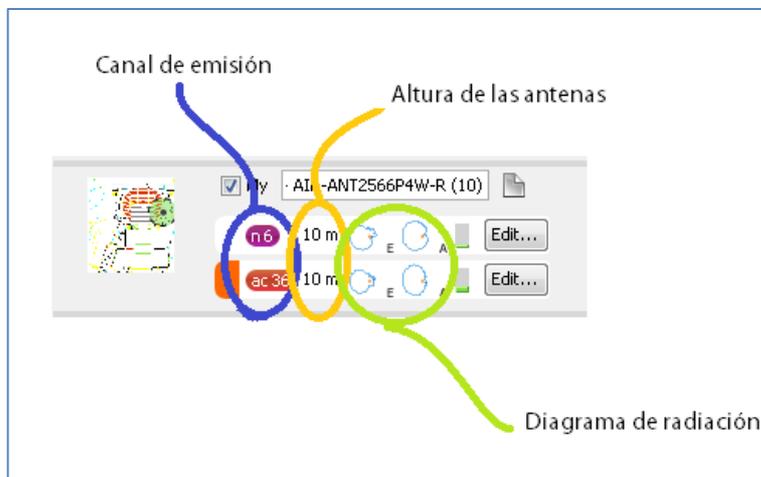


Figura 4-21 Datos de los APs

En la Figura 4-21 se observa un botón “Edit”, pulsando este botón aparece un menú en el que se puede modificar la potencia de emisión, la altura de la antena y el *tilt*.

En la Figura 4-22 se muestra un ejemplo de los parámetros configurados. La altura de la antena y el *tilt* marcarán la zona de cobertura que cubrirá el AP, por lo que será muy importante definirlos bien. Para el diseño se ha elegido un *tilt* de -45° y -15° en las antenas. El mayor ángulo de inclinación se ha asignado a las antenas que tienen debajo una amplia zona de cobertura a cubrir mientras que el menor ángulo se ha asignado a las antenas que tienen la zona de cobertura a cubrir lejos, por lo que necesitan un alcance a mayor distancia.

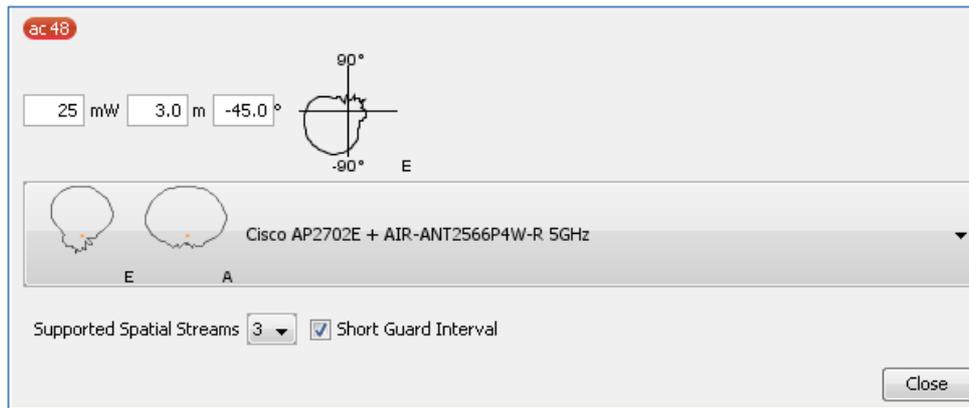


Figura 4-22 Parámetros configurables de la antena

A continuación, se muestra la forma en que se modifican los canales de transmisión de los APs. Una buena elección de los canales es muy importante debido a que el solape entre canales reduce drásticamente la capacidad.

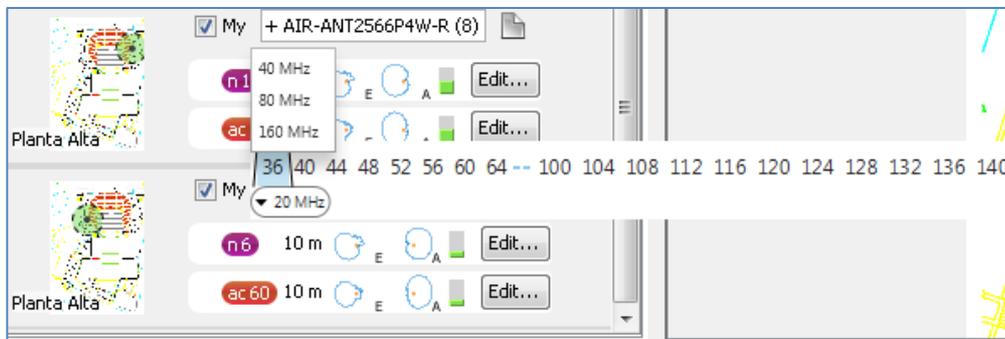


Figura 4-23 Cambio de canal y ancho de banda 802.11ac

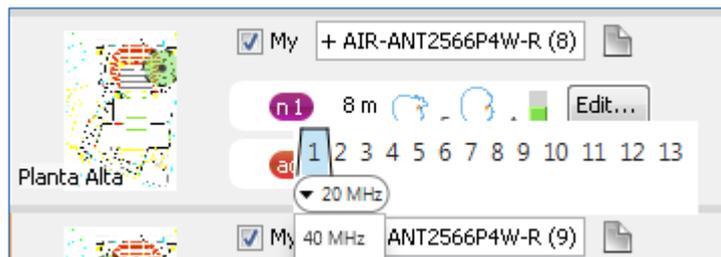


Figura 4-24 Cambio de canal y ancho de banda 802.11n

A continuación, se muestra una tabla resumen de la distribución de los APs y el canal en el que está funcionando cada uno, tanto para la banda de 2,4 GHz como para la de 5 GHz. Se puede observar en la Figura 4-25 como se han seleccionado canales no solapados en zonas adyacentes para evitar la interferencia.



El símbolo que representa los canales utilizados es , el cuadro superior representa el canal seleccionado en la banda de 2,4 GHz mientras que el inferior representa el canal seleccionado en la banda de 5 GHz.

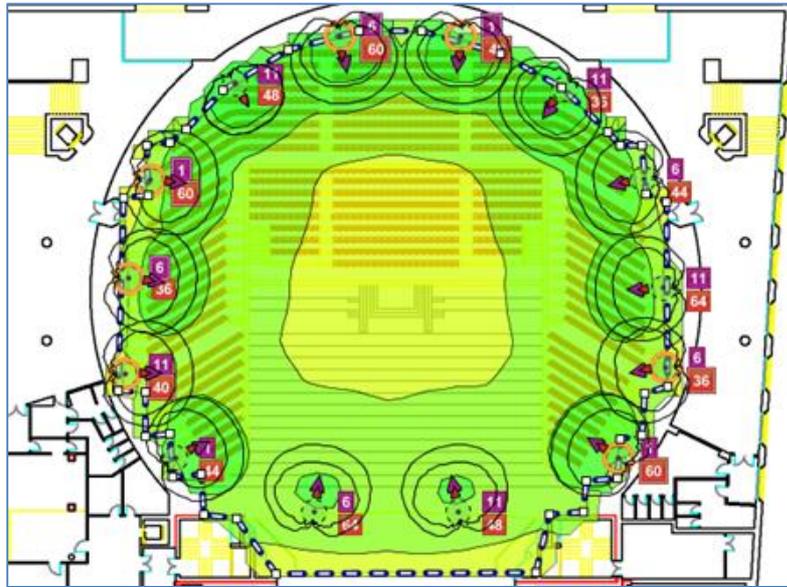


Figura 4-25 Distribución de los canales en ambas bandas

4.5.1.1 Nivel de señal y ancho de banda

A continuación se muestra el nivel de señal ofrecido en cada una de las zonas objetos del proyecto así como el ancho de banda estimado para las mismas. Como puede apreciarse se cubre casi el 100% de las zonas con un nivel mínimo de -65 dBm.

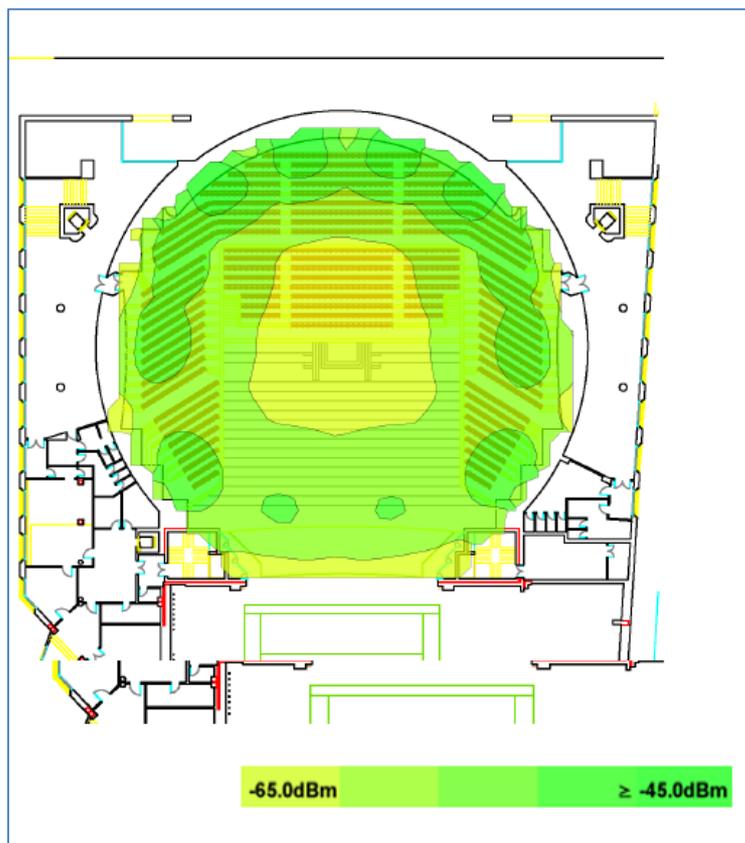


Figura 4-26 Nivel de señal en el Patio de Butacas

El nivel de potencia necesario para que el equipo funcione correctamente varía en función de cada dispositivo. Para voz, se necesita una potencia de -65 dBm mientras que para datos es de unos -78 dBm, variando estos valores en función de la sensibilidad del equipo en cuestión.

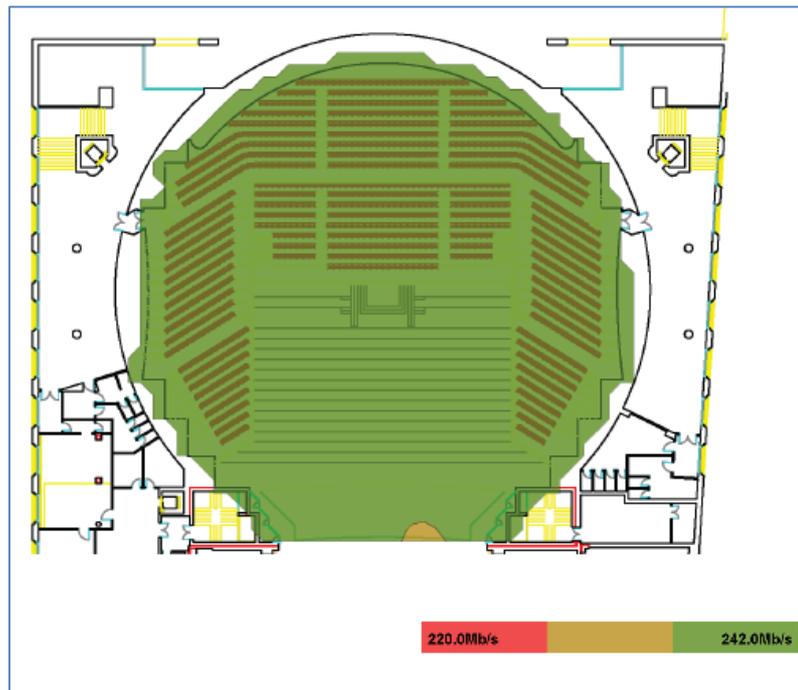


Figura 4-27 Ancho de banda en el Patio de Butacas

Se concluye de este modo que para esta zona no habrá problemas en cuanto a cobertura ni a ancho de banda.

4.5.1.2 Estudio de SNR

Otro estudio muy importante es el estudio de la SNR (*Signal to Noise Ratio*). La SNR mide el margen entre la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido existente, indica cuánto está por encima la señal del ruido. Se mide en decibelios y para que una red funcione correctamente, el valor de SNR debe ser mayor a 0 dB. En el caso que estamos tratando, se obtiene un valor de SNR > 30 dB en el 100% de la zona. Se trata de un valor muy bueno que permitirá una correcta transferencia de la información a través de la red.

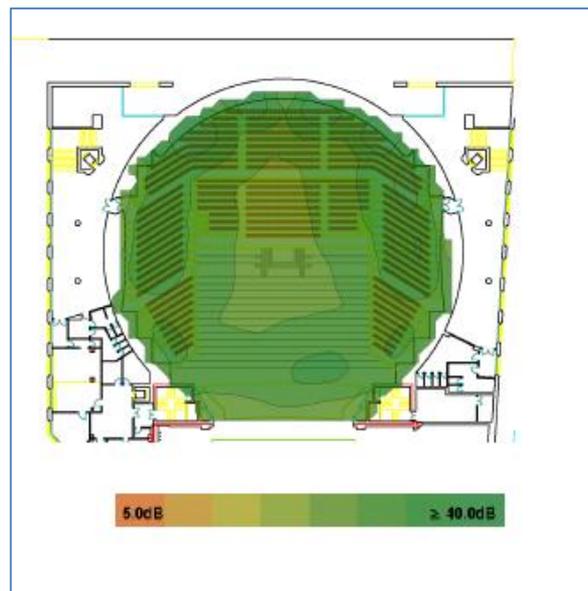


Figura 4-28 Valor de SNR en el Patio de Butacas

4.5.1.3 Zona cubierta por cada AP

En la siguiente imagen, se muestra la zona que abarca cada uno de los APs

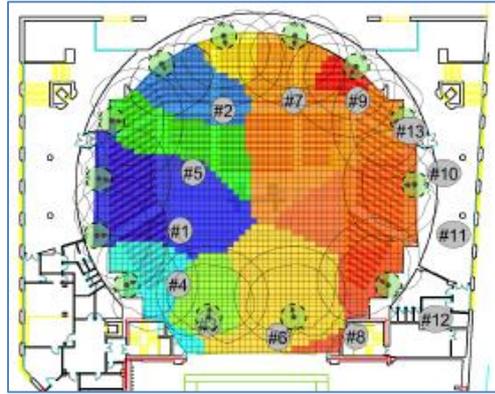


Figura 4-29 Zona que abarca cada AP en el Patio de Butacas

4.5.1.4 Salud de la red

Para realizar un diseño óptimo y que se produzcan el menor número de interferencias se han establecido unos valores mínimos para que el funcionamiento de la red sea el correcto y no se produzca ningún tipo de problema a la hora de su puesta en marcha. Estos requisitos se detallaron anteriormente en la Figura 4-18. Atendiendo a estos requisitos, se realiza un estudio de la “Salud de la Red”. El resultado obtenido se muestra en la siguiente imagen:

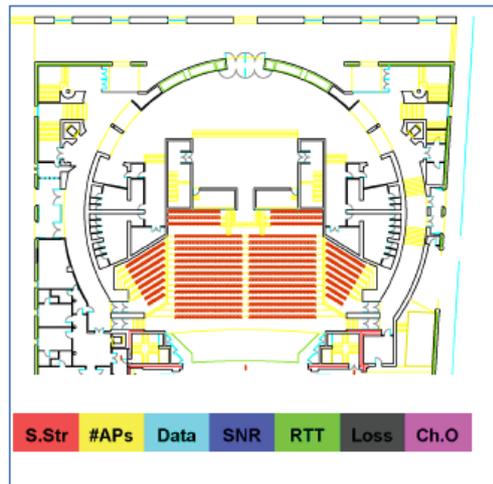


Figura 4-30 Salud de la red

Se observa en la Figura 4-301 que se cumplen todos los requisitos que se establecieron al inicio del diseño. Si alguno de los requisitos no se cumpliera aparecería en el plano la zona en cuestión del color que pertenece al tipo del problema. Por ejemplo, si en el centro no se cumplieran los requisitos para el solapamiento de canales aparecería una mancha morada en el plano.

Al final del presente documento, en el Anexo, se muestra el *Report* obtenido al completo.

4.5.2 Zona de prensa

Se trata de una zona con carga media, debido a que los medios de comunicación que se encuentren allí utilizarán la conexión WiFi pero, sin embargo, los asistentes al evento estarán siendo entrevistados y no harán uso de la conexión a Internet.

Para cubrir toda la zona se han utilizado 3 APs:

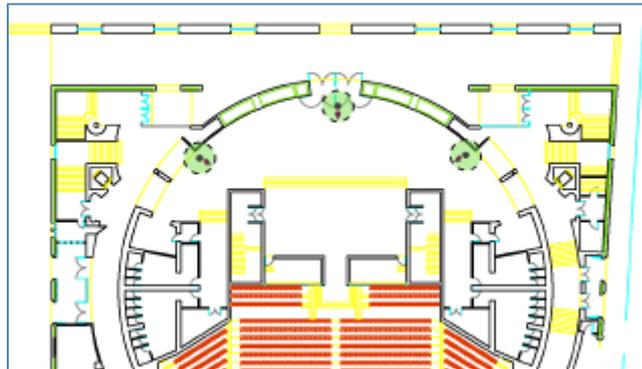


Figura 4-31 Distribución de los APs en la Sala de Prensa

A continuación se muestra el nivel de señal ofrecido en la Sala de Prensa así como el ancho de banda estimado para la misma.

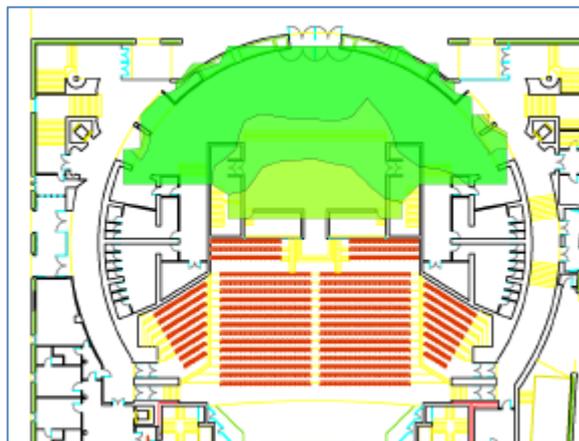


Figura 4-32 Nivel de señal en Sala de Prensa

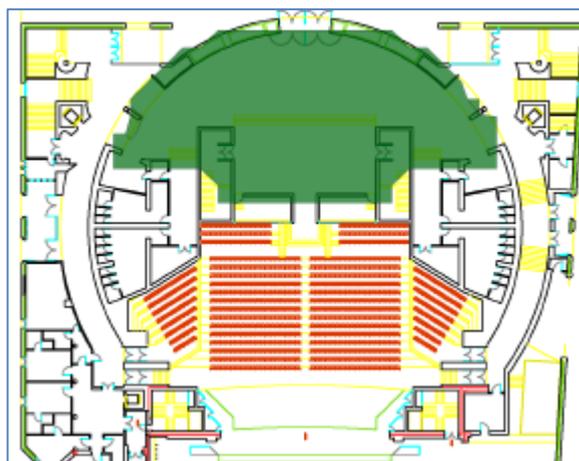


Figura 4-33 Ancho de banda en Sala de Prensa



Como se puede observar en las imágenes anteriores, se obtienen valores muy buenos tanto de cobertura como de capacidad. Con 3 APs se cumplen los requisitos establecidos para esta zona.

4.5.3 Zona de catering

Se trata de la zona que menos carga soportará. Cuando los asistentes hagan uso de esta zona estarán comiendo o haciendo cualquier otra cosa distinta a navegar por Internet.

Para cubrir la zona, se ha propuesto la siguiente distribución de APs:

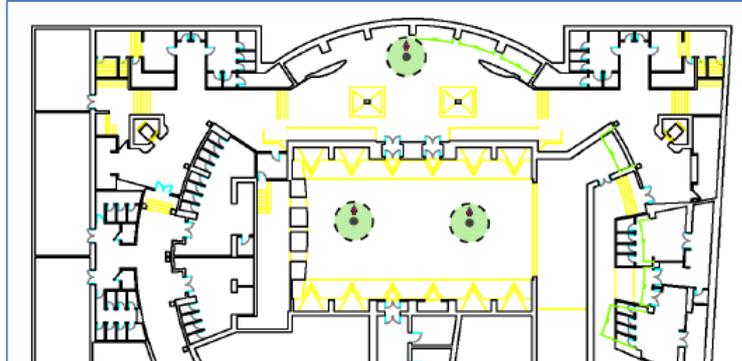


Figura 4-34 Distribución de los APs

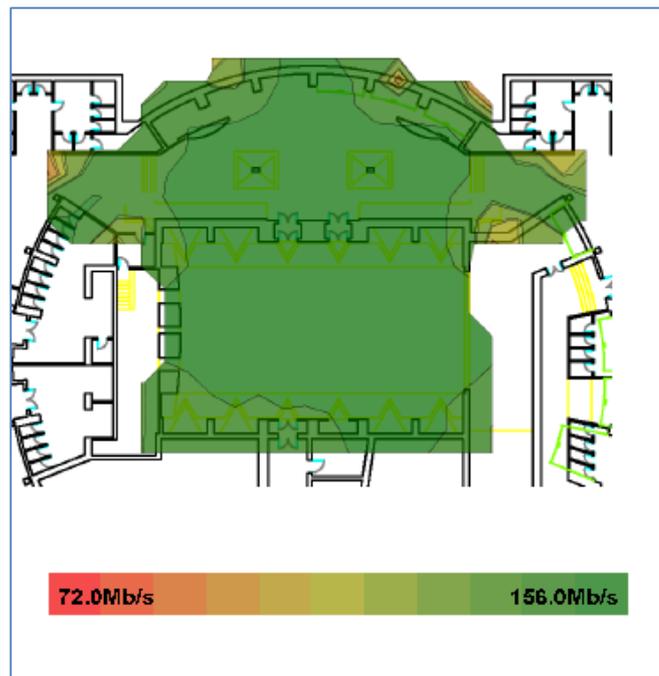


Figura 4-35 Ancho de banda en zona catering

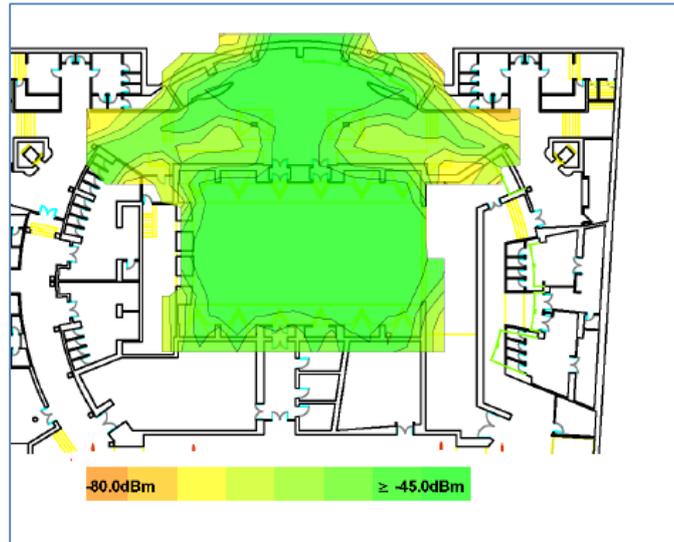


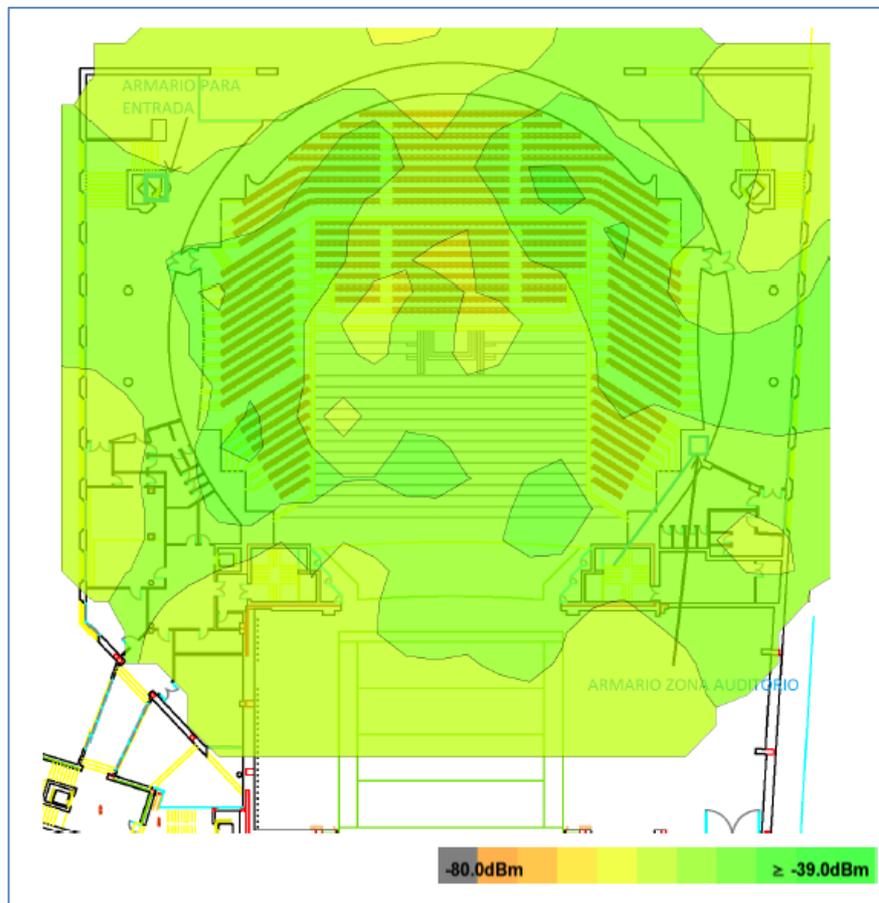
Figura 4-36 Cobertura en zona de catering

4.6 Site Survey

Un *Site Survey* es un estudio en profundidad que se realiza en las instalaciones en las que se desea desplegar la nueva red. Se trata de un estudio in situ que permite corroborar los resultados teóricos obtenidos con herramientas de simulación Software.

Para el caso que se trata en este documento, se ha realizado un replanteo in situ utilizando el Software Ekahau y una antena física como la propuesta en el diseño teórico.

Los resultados obtenidos en cuanto a cobertura son los siguientes:

Figura 4-37 Resultado cobertura *Site Survey*

Se comprueba que con los APs contemplados en el diseño emitiendo a la potencia que hemos establecido se cubre perfectamente el área necesaria. Este resultado es similar al que se obtuvo en la simulación teórica.

Por otra parte, atendiendo a las especificaciones de solapamiento de canales, se observa en la Figura 4-38 que en el estudio in situ no se cumplen los requerimientos de solapamiento de canal. Se observa en la zona central que hay señal de más de 10 APs llegando a esta zona. Frente a este problema detectado hay que cambiar cosas para solucionarlo:

- Cambiar la potencia de emisión para reducir el alcance de los APs.
- Variar el *tilt* de las antenas para que sus diagramas de radiación se hagan más directivos.

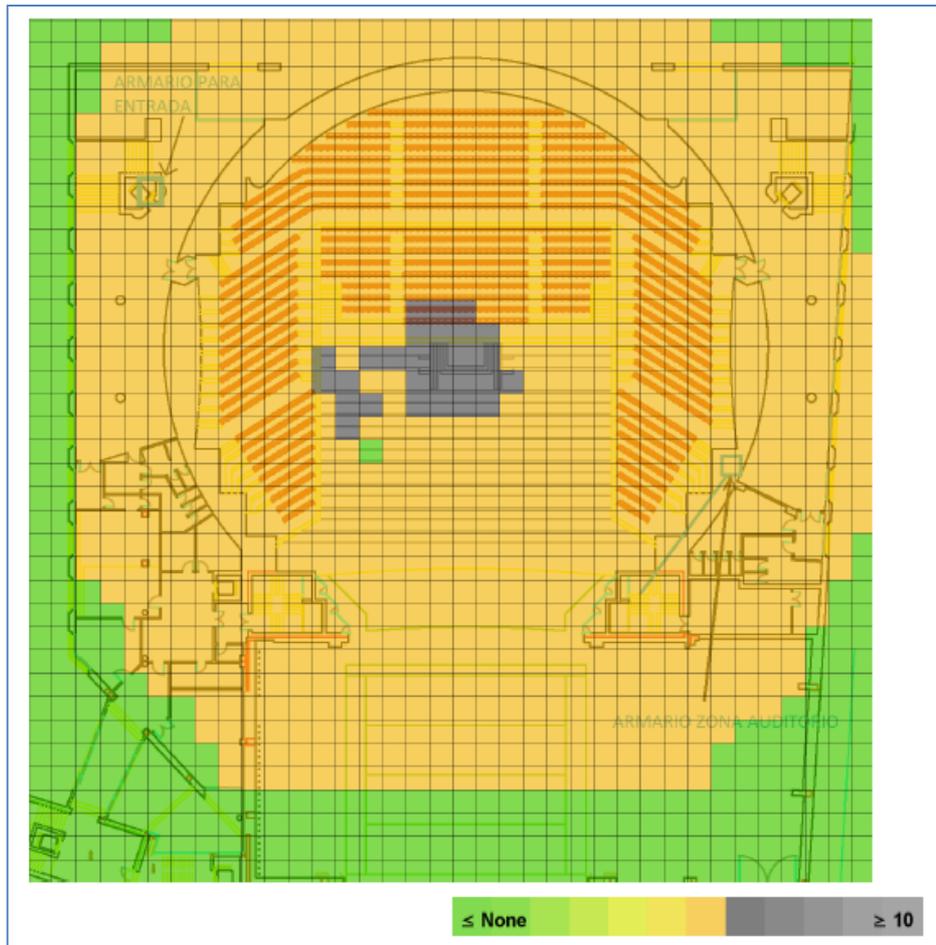


Figura 4-38 Solapamiento de canales *Site Survey*

Otro problema que aparece en el replanteo in situ es la pérdida de paquetes. Como se puede observar en la Figura 4-39, en la zona central se produce una pérdida de paquetes $> 30\%$. Esta pérdida puede deberse al solapamiento de canales, ya que se observa en la Figura 4-38 que se produce en esa misma zona. De igual forma que en el caso anterior, este problema no aparecía en el estudio teórico.

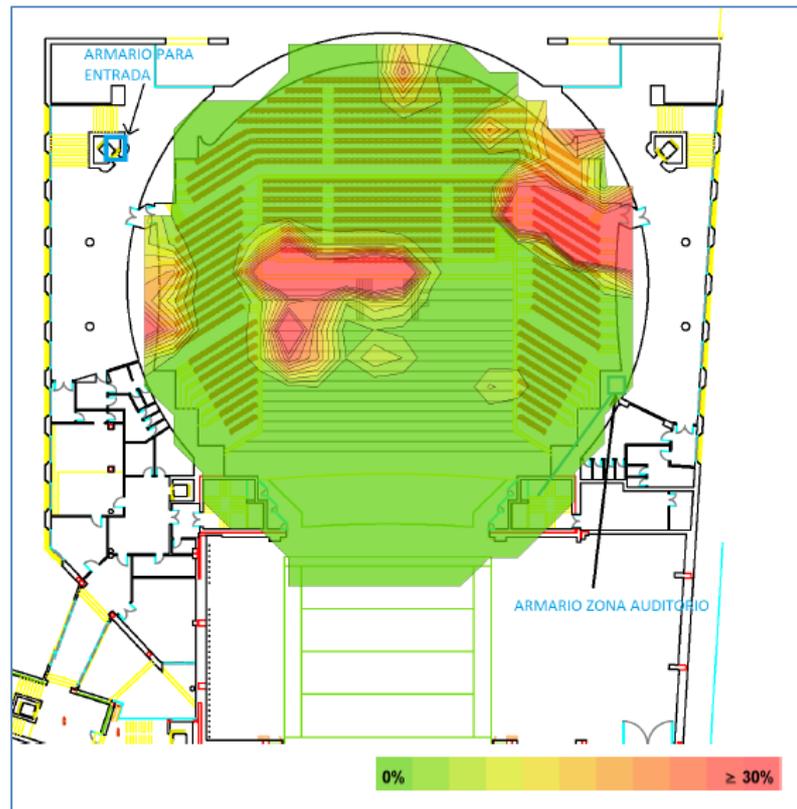


Figura 4-39 Pérdida de paquetes

Con los resultados obtenidos del *Site Survey* hay que realizar modificaciones en el diseño de forma que se solucionen los problemas detectados. Se deja para el momento de la instalación el ajuste fino que permita eliminar por completo esas zonas, mediante mayor inclinación de antenas (*tilt*) o mediante ajuste de potencias de los diferentes APs.

5 BEAMFORMING

En este capítulo se va a realizar un estudio detallado de las técnicas de *beamforming* empleadas en la versión 802.11ac del estándar 802.11. En un primer lugar, se va a realizar una introducción, posteriormente se explicará el *beamforming* para un único usuario y se terminará el capítulo con el *beamforming* multiusuario.

El *beamforming* es un procedimiento a partir del cual el transmisor puede dirigir su energía hacia una dirección en particular para aumentar la SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) y, por tanto, la velocidad de transmisión. Esto se consigue utilizando un *array* de elementos separados una distancia en particular. Las señales que se encuentran separadas un ángulo determinado sufren interferencia constructiva y las demás interferencia destructiva. Se puede utilizar tanto en el lado transmisor como en el receptor, de forma que se puede conseguir tener diversidad espacial

La aplicación del *beamforming* en forma de MIMO multiusuario al 802.11ac está cambiando la idea de cómo se construyen las redes. A su vez, aumenta la capacidad más allá de la tasa del equipo.

MIMO multiusuario funciona utilizando *beamforming* para enviar tramas a diferentes localizaciones (diversidad espacial) en el mismo instante de tiempo.

Por tanto, el uso del *beamforming* en la comunicación desde el AP hasta el cliente es una de las áreas en desarrollo más importante del estándar 802.11ac.

5.1 Introducción

Tradicionalmente, los APs venían equipados con antenas omnidireccionales que enviaban la misma energía en todas las direcciones. La cobertura omnidireccional se muestra como un círculo alrededor del AP, como se ha visto en capítulos anteriores. Las antenas omnidireccionales son muy baratas y, lo más importante, envían las señales en todas las direcciones. Esto ayuda al AP, ya que no tiene que monitorizar a todos los clientes. En el momento en que el cliente está dentro de la zona de cobertura, la señal del AP llega hasta él. Como consecuencia, el canal está ocupado en todas las direcciones, independientemente de si hay clientes utilizando la señal en algún punto o no, ese punto tiene conectividad inalámbrica, como se puede observar en Figura 5-1.

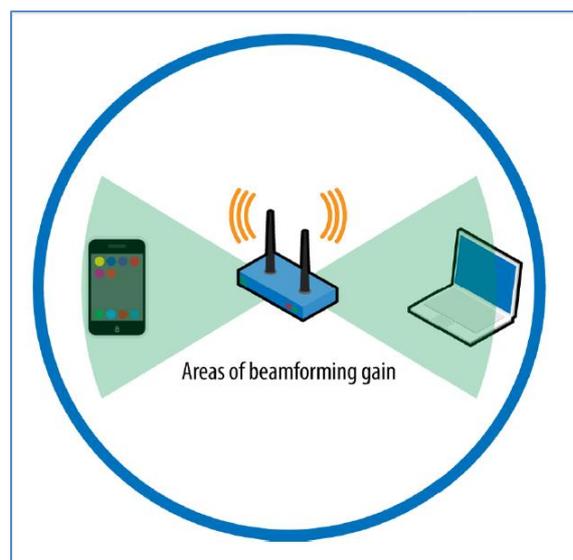


Figura 5-1 Cobertura omnidireccional

Una alternativa a la cobertura omnidireccional mencionada anteriormente es focalizar la energía hacia un

receptor. Este proceso se llama *beamforming*.

Cuando la energía se focaliza en una única dirección, se puede llegar más lejos. El *beamforming* aumenta el rendimiento de las redes inalámbricas en distancias medianas. A distancias cortas, la potencia de la señal es tan elevada que la SNR soporta la máxima tasa de datos. A largas distancias, el *beamforming* no ofrece grandes beneficios y la tasa de datos es idéntica a la que se tiene en transmisiones que no utilizan el *beamforming*.

El *beamforming* trabaja mejorando lo que se conoce como “*rate over range*”. Este término indica que, dada una distancia hasta el AP, un dispositivo cliente tendrá mejor rendimiento si utiliza *beamforming*.

Antes de que se desarrollara el estándar 802.11n, todos los AP del mercado utilizaban antenas con diagramas de radiación estáticos. Los APs que poseían antenas internas tenían un diagrama de radiación omnidireccional que no se podía modificar. Fue con las antenas externas cuando empezaron a aparecer otros tipos de diagramas de radiación. Las personas encargadas del diseño de las redes podían elegir el tipo de antena que deseaban para sus equipos, pero una vez elegida la antena el diagrama de radiación no se podía modificar. El *beamforming* utiliza un *array* de antenas de manera que el diagrama de radiación se pueda modificar de forma dinámica. Para el caso de que el tráfico a transmitir por el AP sea de *Broadcast*, el AP utilizará métodos de transmisión omnidireccionales para que la señal llegue a todos los clientes del área de cobertura de igual forma.

El proceso simplificado del *beamforming* se observa en la Figura 5-2.

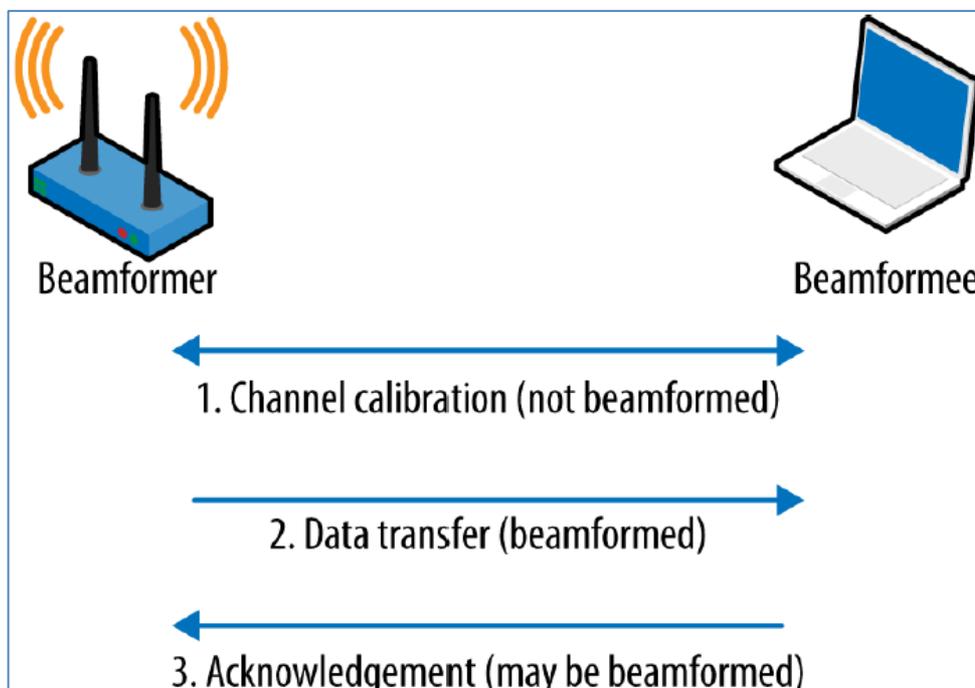


Figura 5-2 Proceso de *beamforming* simplificado

Cualquier dispositivo que utiliza técnicas de *beamforming* se llama *beamformer*. El receptor de estas señales se llama *beamformee*. Se utilizan palabras distintas para diferenciar entre el emisor y el receptor porque una misma estación puede ser tanto *beamformer* como *beamformee*.

En la Figura 5-2 se observa como el AP y el PC inician un intercambio de tramas en el que se mide el canal. El resultado de esta medición es una descripción matemática de cómo dirigir la energía transmitida hacia el receptor, se establece cómo se debe configurar cada elemento del sistema de la antena transmisora para utilizar el *beamforming* y poder aumentar su alcance.

Después de medir el canal, el AP funciona como un *beamformer* enviando tramas focalizadas hacia el PC. Como marca el estándar 802.11, el PC debe enviar un acuse de recibo. Este acuse de recibo puede ser *beamformed*, por lo que el PC puede ser también *beamformer* en el caso de la transmisión de asentimientos. Cuando dos dispositivos se intercambian tramas que llevan una gran cantidad de datos, la norma les permite utilizar técnicas de *beamforming* y calibrar el canal para dirigir el haz desde un equipo hacia el otro.

Para dirigir la transmisión en una dirección en particular, el *beamformer* modifica sutilmente lo que se envía por cada *array*. En la Figura 5-3 (a) todas las antenas transmiten al mismo tiempo, por lo que la radiación resultante

tiene la misma potencia en todas las direcciones. La transmisión de cada antena tiene el mismo alcance y la misma velocidad. Sin embargo, en la Figura 5-3 (b) se observa cómo se aplica un desfase entre cada *array*. El equipo de la derecha transmite el primero y el de la izquierda el último. Como se puede observar en la imagen, la radiación tiene una dirección hacia la izquierda.

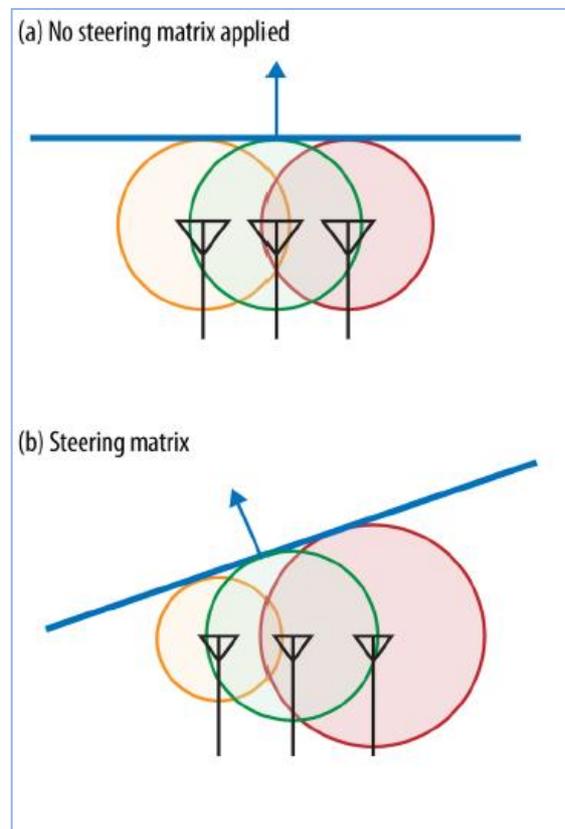


Figura 5-3 Desfase entre *arrays*

La matriz de apuntamiento es una descripción matemática precisa de cómo el *array* debe usar cada elemento para seleccionar una ruta en concreto para la transmisión.

Los beneficios del *beamforming* dependen del entorno radio, de la calidad del *array* de antenas, el movimiento de los dispositivos a ambos lados del enlace,...

5.1.1 Potencia de transmisión

La potencia de transmisión está regulada en el estándar 802.11ac. Cuando comenzó a desarrollarse MIMO, se fijó un límite para la ganancia del *array*. Los sistemas MIMO mejoran el rendimiento analizando las señales a través del *array* de antenas, el cual ofrece una ganancia de procesamiento que es equivalente a la ganancia que se tendría si se utilizara una antena más grande.

La ganancia del *array* está relacionada con el número de antenas que forman el *array*, tomando el valor $10 \cdot \log(N)$, siendo N el número de antenas dentro del *array*. Por ejemplo, para un *array* de 2 antenas la ganancia sería 3 dB.

La regulación en cuanto a potencia se establece en el valor de ERP (*Effective Radiated Power*). Este parámetro incluye la ganancia del *array*. Su valor es la suma de la potencia de transmisión de la antena y la ganancia del *array*.

5.1.2 NDP (*Null Data Packet*)

El *beamforming* se introdujo en el estándar 802.11n, pero debido a que no estaba regulada la forma en la que se conformaban los haces, no llegó a implementarse en ningún producto. Como consecuencia de esta problemática,

a la hora de desarrollar los métodos de *beamforming* para el 802.11ac se da solución a este problema para que puedan comercializarse productos 802.11ac que incluyan esta funcionalidad. Se especificó un único método de *beamforming*, que se llama NDP.

5.1.2.1 Medida del canal

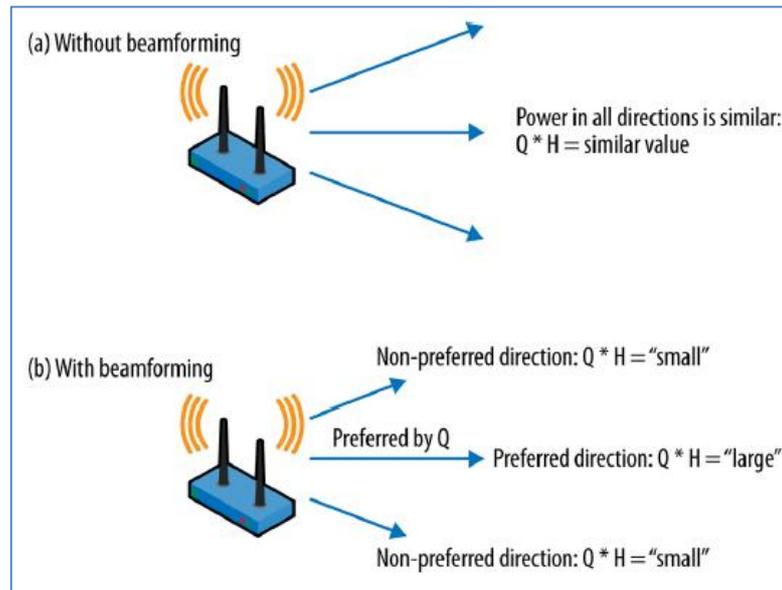
La calibración del canal depende en gran parte de un proceso llamado “Sondeo del canal”. Este proceso determina cómo radiar energía en una dirección en concreto. El *beamforming* permite a los usuarios finales conseguir el máximo rendimiento seleccionando los canales adecuados y dejando a un lado aquellos canales que tienen peor rendimiento.

Se utiliza la Matriz de dirección (se representa con la letra Q en el estándar 802.11ac) para representar matemáticamente la capacidad para enviar energía en una dirección u otra. Este tipo de representación es muy útil para representar la respuesta en frecuencia de cada flujo de transmisión del *array*. Trabajar con matrices facilita las operaciones, de esta forma se facilita que el correlacionador espacial pueda alterar la señal a transmitir para cada subportadora OFDM sobre cada ruta realizando una sencilla operación. Después de aplicar este sencillo proceso el diagrama de radiación habrá dejado de ser omnidireccional.

El proceso de medida del canal consta de 4 pasos principales:

- 1°. Se transmite una trama de aviso de NDP (*Null Data Packet Announcement*). Esta trama se utiliza para tomar el control y poder identificar a los usuarios hacia los que hay que dirigir las señales (como se ha definido anteriormente, usuarios *beamformees*). Estos usuarios responden a la trama de aviso NDP mientras que las demás estaciones esperan hasta que el proceso ha finalizado.
- 2°. Seguidamente, se envía un paquete NDP para facilitar que el receptor pueda calcular la respuesta del canal y la matriz de dirección. En el caso de transmisiones multiusuario, se envían múltiples NDPs.
- 3°. El equipo de usuario, *beamformee*, analiza la trama recibida y calcula la matriz de *feedback*, que se denota con la letra V . La matriz de *feedback* sirve para que el equipo *beamformer* calcule la matriz de dirección.
- 4°. El equipo *beamformer* utiliza la matriz de *feedback* para calcular la matriz de dirección y dirigir la transmisión hacia el usuario deseado.

Gracias a la matriz de dirección, el *beamformer* puede transmitir tramas en direcciones particulares. Si no se utilizara *beamforming* la energía se radiaría en todas las direcciones de igual forma. Cuando el transmisor utiliza una matriz de dirección, el *array* enviará la señal de forma que la energía tendrá una ruta predeterminada por la que viajar. Por esta ruta, que será la ruta preferida, la señal se hace más fuerte. Sin embargo, por el resto de rutas, las transmisiones interfieren entre sí y se hacen cada vez más débiles. Los encargados de determinar qué señal se hace más fuerte y cuál se atenúa más serán el canal y la matriz de dirección. Este proceso se puede observar en la Figura 5-4.

Figura 5-4 Transmisiones con *beamforming* y sin *beamforming*

5.1.2.2 La matriz de *feedback* (realimentación)

La clave del *beamforming* es calcular la matriz de dirección, Q , para el canal formado entre el *beamformer* y el *beamformee*. El sondeo del canal tiene un coste en la ocupación del canal, y es que se debe completar antes de comenzar la transmisión de tramas *beamformed*. Si el aumento de velocidad no es suficiente para compensar este retraso, la velocidad total será más lenta.

Para calcular la matriz de *feedback* se sigue el siguiente procedimiento:

- 1°. Se debe haber recibido la trama NDP del *beamformer*. Cada subportadora OFDM se procesa independientemente en una matriz que muestra el rendimiento de cada subportadora en función del elemento transmisor y del elemento receptor. La matriz contiene la potencia recibida y el cambio de fase entre cada par de antenas.
- 2°. En este paso se transforma la matriz de *feedback* a través de una multiplicación de matrices, que se denomina *Givens Rotation*. Una *Givens Rotation* representa una rotación en el plano en dos dimensiones, esta matriz tiene la siguiente forma:

$$G(i, j, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & c & \dots & -s & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & s & \dots & c & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 5-5 *Givens Rotation*

Donde $c = \cos \theta$ y $s = \sin \theta$ aparecen en la intersección de las filas y columnas i -ésimas y j -ésimas respectivamente.

En lugar de transmitir completamente la matriz de *feedback*, el *beamformee* calcula la matriz de rotación, enviando así los ángulos de transmisión.

- 3°. Después de calcular los ángulos, el *beamformee* los agrupa en la matriz de *feedback* y los envía al *beamformer*. Únicamente se necesita un pequeño conjunto de ángulos para definir el rendimiento del enlace radio para todas las subportadoras OFDM.

- 4°. El *beamformer* recibe la matriz de *feedback* y la utiliza para calcular la matriz de dirección y poder enviar tramas a los usuarios *beamformee*.

Cada *beamformee* envía su matriz de *feedback*. En el modo *single-user* hay una matriz de *feedback* y una matriz de dirección. En el modo multiusuario, el *beamformer* recibe una matriz de *feedback* de cada usuario y debe construir una matriz de dirección correspondiente a cada uno de ellos.

Existen 3 factores para determinar el tamaño de la matriz de *feedback*:

- Número de subportadoras OFDM. Los canales más anchos tienen mayor número de subportadoras, por lo que la matriz de *feedback* debe tener mayor dimensión para que quepan todas.
- Número de antenas transmisoras y receptoras. Mientras mayor sea el número de antenas de transmisión y recepción, mayor será la dimensión de la matriz.
- Modo de funcionamiento. El modo multiusuario necesita 12 o 16 bits para la resolución y el modo monousuario necesita 6 o 10 bits.

Número de subportadoras	Número de ángulos por subportadora	Tamaño del campo ángulo
Canal de 20 MHz: 52 subportadoras	2 x 2: 2 ángulos	Modo monousuario: 6 o 10 bits/ángulo
Canal de 40 MHz: 108 subportadoras	3 x 3: 6 ángulos	Modo multiusuario: 12 o 16 bits/ángulo
Canal de 80 MHz: 234 subportadoras	4 x 4: 12 ángulos	
Canal de 160 MHz: 486 subportadoras	6 x 6: 30 ángulos	
	8 x 8: 56 ángulos	

Tabla 5-1 Parámetros de la matriz de *feedback*

Para conocer la dimensión de la matriz basta con multiplicar los resultados obtenidos de cada una de las 3 columnas. Por ejemplo, si se dispone de un canal de 40 MHz de ancho, utilizando MIMO 4 x 4 y el modo multiusuario, la cantidad de bits sería:

$$\text{Número de bits} = 108 \text{ subportadoras} * 12 \frac{\text{ángulos}}{\text{subportadora}} * 6 \frac{\text{bits}}{\text{ángulo}} = 7.776 \text{ bits} = 972 \text{ bytes}$$

5.2 Beamforming monousuario

Este escenario consta de un único transmisor y un único receptor. El equipo *beamformer* envía un paquete NDP. Como se ha visto en el punto anterior, el *beamformee* recibe el paquete NDP y, analizándolo, calcula la matriz de *feedback* que envía al *beamformer* en la trama de respuesta. Este procedimiento se observa en la Figura 5-6.

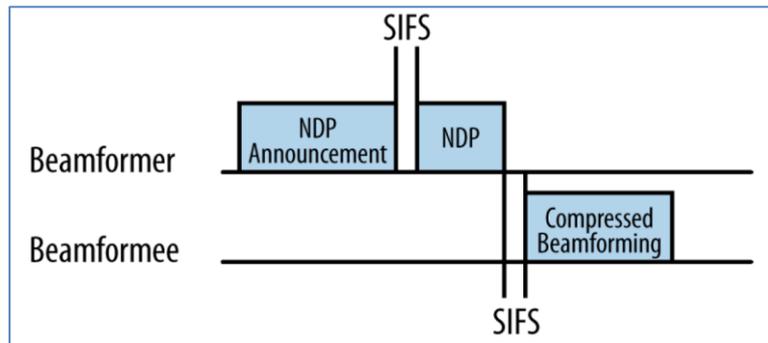


Figura 5-6 Calibración del canal

5.2.1 Calibración del canal

El *beamformer* y el *beamformee* trabajan conjuntamente para obtener la matriz de dirección.

El proceso de sondeo del canal se realiza con una ráfaga. La trama de anuncio NDP retransmite el tamaño de la matriz de *feedback*, mostrando el número de columnas que contiene la matriz. Se puede observar el formato de la trama de anuncio NDP en la Figura 5-7.

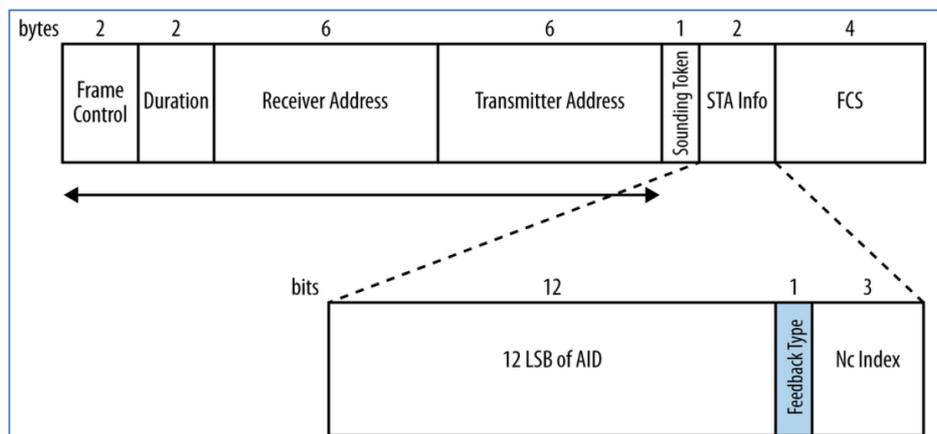


Figura 5-7 Formato trama de anuncio NDP

El principal objetivo de la trama de anuncio NDP es llevar un campo STA info destinado al *beamformee*. El campo STA info contiene 3 bytes con la siguiente información:

- Campo 12 LSB (*Least Significant Bits*) de AID (*Association ID*). Cuando un dispositivo se asocia a un AP 802.11ac, se le asigna un ID de asociación, incluyéndose en este campo los 12 bits menos significativos de esta ID. Si es el dispositivo WiFi el que actúa como *beamformer*, este campo se pone a 0 debido a que el AP no tiene ID de asociación.
- Tipo de *feedback*. Este campo está siempre a 0 en la trama de anuncio NDP para el modo monousuario.
- Índice Nc. Este campo contiene el número de columnas de la matriz de *feedback* menos 1. Existe una columna para cada flujo de datos. Se trata de un campo de 3 bits, por lo que puede tomar 8 valores distintos.

5.2.2 Trama NDP

Después de transmitir la trama de anuncio NDP, el *beamformer* transmite una trama NDP como la que se muestra en la Figura 5-8.

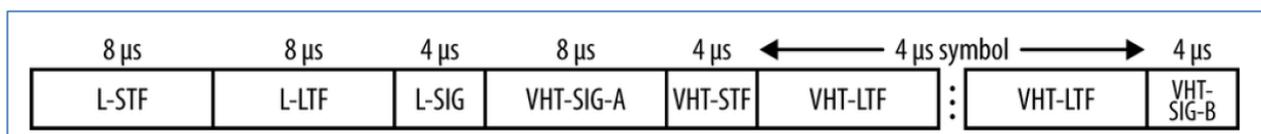


Figura 5-8 Formato trama NDP

La trama NDP (*Null Data Packet*) toma ese nombre porque no contiene datos, es decir, no hay trama MAC encapsulada dentro de ésta.

5.2.3 Trama de acción VHT comprimida

Después de recibir la trama NDP, el *beamformee* responde con la matriz de *feedback*. La matriz de *feedback* indica al *beamformer* de cómo el *beamformee* recibió los símbolos y, por tanto, cómo debe ser la matriz de dirección.

La trama de acción tiene el siguiente formato:

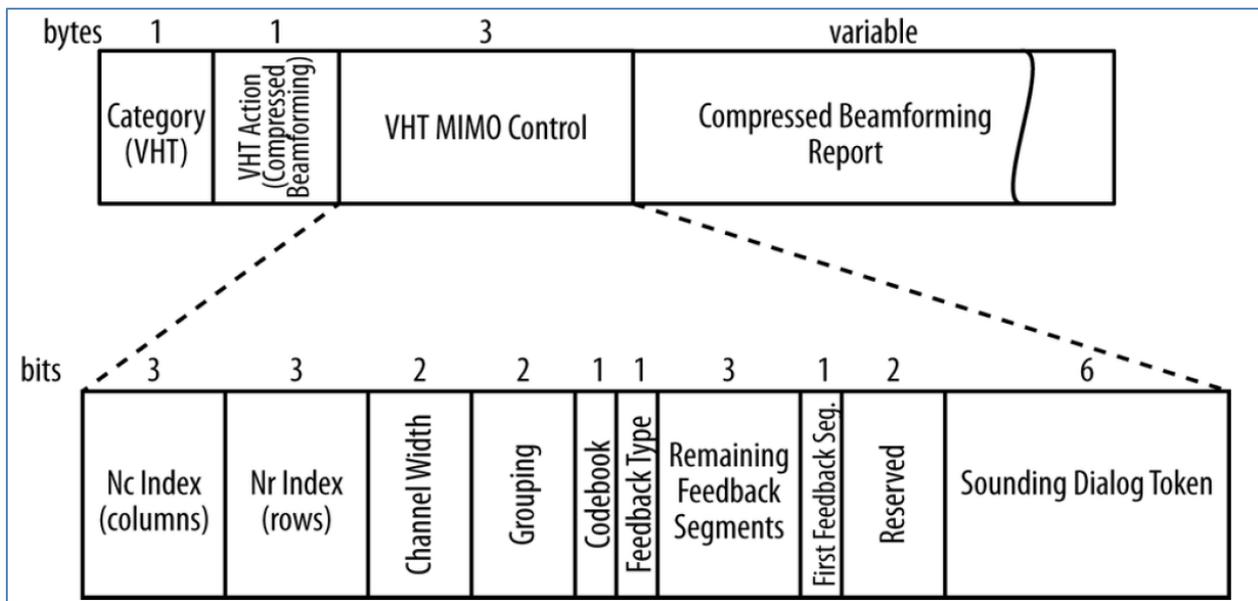


Figura 5-9 Formato de la de la matriz de acción

El campo VHT MIMO Control permite que el *beamformer* pueda interpretar la matriz de *feedback*, gracias a los siguientes campos:

- Tamaño de la matriz de *feedback*. Viene determinado por el número de filas y el número de columnas.
- Ancho del canal: el tamaño de la matriz de *feedback* depende del tamaño del canal. En el caso de que el canal sea más ancho se tendrán más subportadoras y por tanto la matriz será mayor.
- Agrupamiento. Cuando partes de la matriz de *feedback* se repiten, el *beamformee* las agrupa para reducir el tamaño de la matriz transmitida.
- Código cifrado. La matriz de *beamforming* se utiliza para especificar los cambios de fase que requiere cada *array*. En el estándar 802.11ac esta información se transmite como una cadena de bits. El receptor de la matriz de dirección necesita conocer dónde empieza y termina la parte correspondiente a un *array*. Para eso se utiliza este bit.
- Tipo de *feedback*. Monousuario o multiusuario.
- Control de flujo. Se realiza utilizando los campos *Remaining Feedback Segments* y *First Feedback Segments* junto con el campo *Sounding Dialog Token*, que se pueden observar en la Figura 5-9. Se utiliza para relacionar la respuesta del *beamformee* con la petición del *beamformer*.

5.3 Beamforming Multiusuario

Antes de que apareciese el *beamforming* multiusuario, cada dispositivo solo podía enviar datos a un usuario a la vez. Un AP puede transmitir a múltiples usuarios utilizando MU-MIMO (*Multi-User MIMO*).

MU-MIMO solo se puede utilizar en el canal descendente, desde el AP hasta el dispositivo WiFi, debido a que se necesita una antena de mayor calidad.

5.3.1 Calibración del canal

La calibración del canal multiusuario necesita que todos los dispositivos *beamformees* respondan al mensaje de calibración del canal. Cada *beamformee* genera su matriz de *feedback* y la envía al *beamformer* para que genere la matriz de dirección, como se ha visto anteriormente.

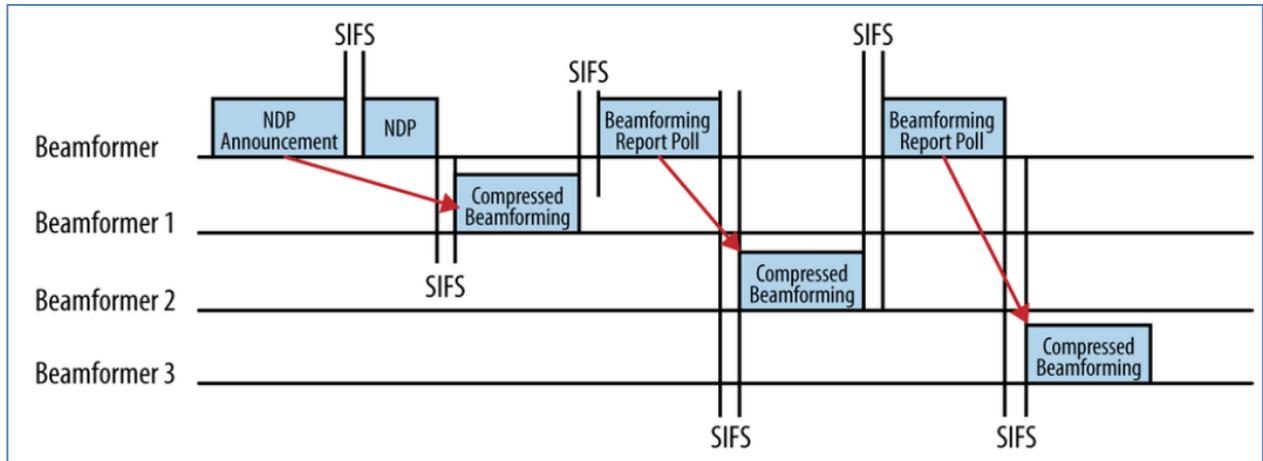


Figura 5-10 Procedimiento de calibración del canal

El procedimiento de calibración del canal comienza exactamente igual que lo hacía en el modo monousuario. Sin embargo, para recuperar la matriz de *feedback* de cada *beamformee* se necesita una nueva trama, *Beamforming Report Poll*, para asegurar que todas las respuestas de los *beamformees* se reciben correctamente. El escenario mostrado en la imagen consta de un *beamformer* y 3 *beamformees*, por lo que para obtener las matrices de *feedback* de los 2 *beamformees* adicionales el *beamformer* deberá enviar 2 tramas *Beamforming Report Poll*. Una vez recibidas todas las respuestas, el *beamformer* debe integrarlas todas para formar la matriz de dirección.

5.3.2 Trama de anuncio NDP

Al igual que ocurría en el caso monousuario, el proceso de calibración del canal comienza con el envío de una trama de anuncio NDP. La trama de anuncio NDP para el modo multiusuario es muy similar a la del modo monousuario. La diferencia entre una y otra es que en el caso multiusuario se incluye un campo *Station Information* por cada *beamformee*. Cuando se envía una trama de anuncio NDP a múltiples receptores la dirección del receptor es la dirección de difusión. El formato de la trama se puede observar en la Figura 5-11

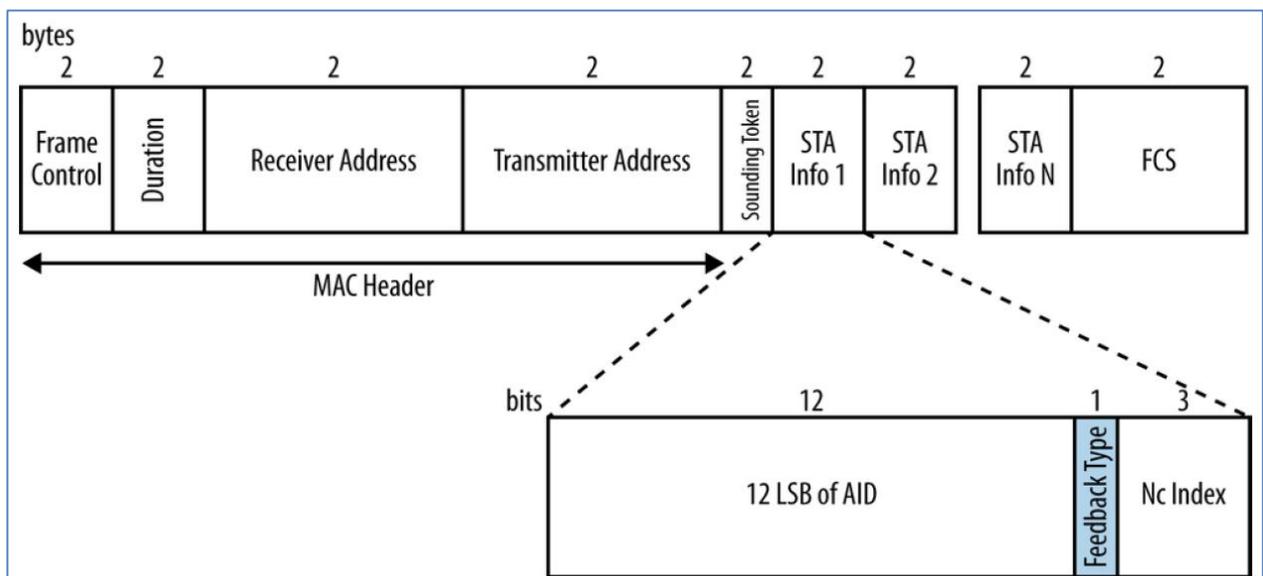


Figura 5-11 Trama de anuncio NDP Multiusuario

5.3.3 Trama NDP

Después del envío de la trama de anuncio NDP, el *beamformer* transmite una trama NDP. En el modo multiusuario la trama es igual a la del modo monousuario, que se mostró en la Figura 5-8. Una trama NDP no tiene cabecera MAC, por lo que será recibida por todos los dispositivos. Cada uno de estos dispositivos utilizará las tramas recibidas para calcular su matriz de *feedback*.

5.3.4 Trama de acción comprimida

Esta trama tiene el mismo propósito en el modo multiusuario que el que tenía en el modo monousuario. En el modo multiusuario tiene un campo adicional, *MU Exclusive Beamforming Report*. Este campo se utiliza para llevar la SNR entre subportadoras y para actualizar la matriz de dirección en el modo multiusuario. Estos campos tienen una longitud variable ya que dependen del número de *beamformees* y del ancho de banda. El formato de la trama se muestra en Figura 5-12.

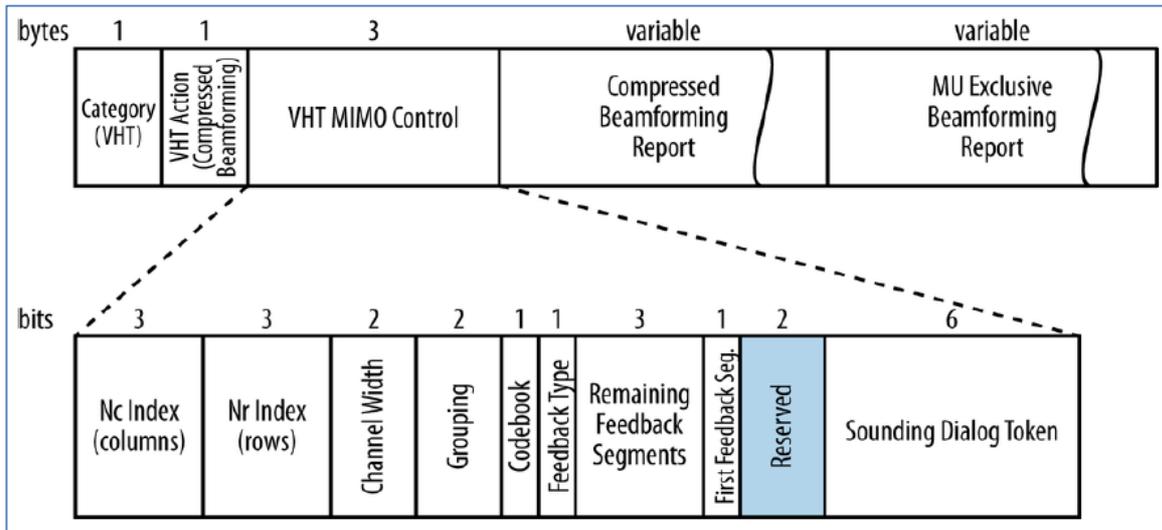


Figura 5-12 Trama de acción comprimida

5.3.5 Trama *Beamforming Report Poll*

Para obtener la información de *feedback* del Segundo y los posteriores *beamformees* se debe utilizar la trama *Beamforming Report Poll*. El formato de esta trama se puede observar en la Figura 5-13.

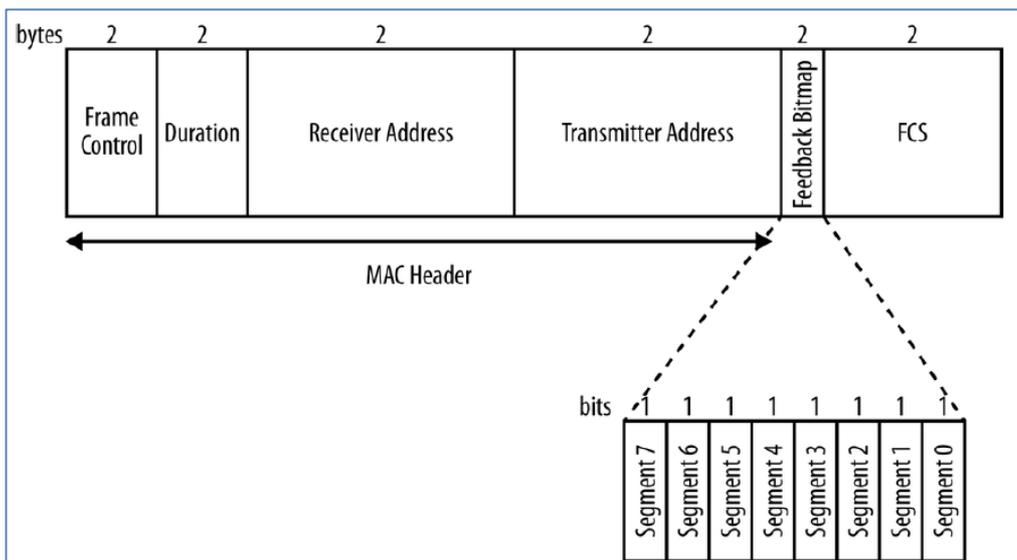


Figura 5-13 Trama *Beamforming Report Poll*

En el campo *Feedback Bitmap*, cada uno de los bits sirve para realizar la petición de la transmisión de la matriz de *feedback* a los *beamformees*.

5.3.6 Transmisión MIMO multiusuario

Una vez que el canal se ha calibrado correctamente, el AP puede comenzar a enviar transmisiones multiusuario. El estándar 802.11ac permite transmisiones multiusuario de hasta 4 usuarios a la vez, encargándose la capa MAC de negociar las capacidades para cada una de las transmisiones simultáneas. Cada transmisión MIMO multiusuario puede tener un número distinto de flujos espaciales, velocidad de modulación y codificación.

En la Figura 5-14 se muestran las distintas rutas que existen en la transmisión MIMO multiusuario. A diferencia del caso monousuario, el número de rutas que deben ser representadas en la matriz de dirección aumenta considerablemente con el número de dispositivos a los que hay que dar servicio. Todas las rutas disponibles entre las antenas transmisoras y las receptoras deben quedar representadas en la matriz de dirección. Cada transmisión de un usuario debe modularse de forma independiente.

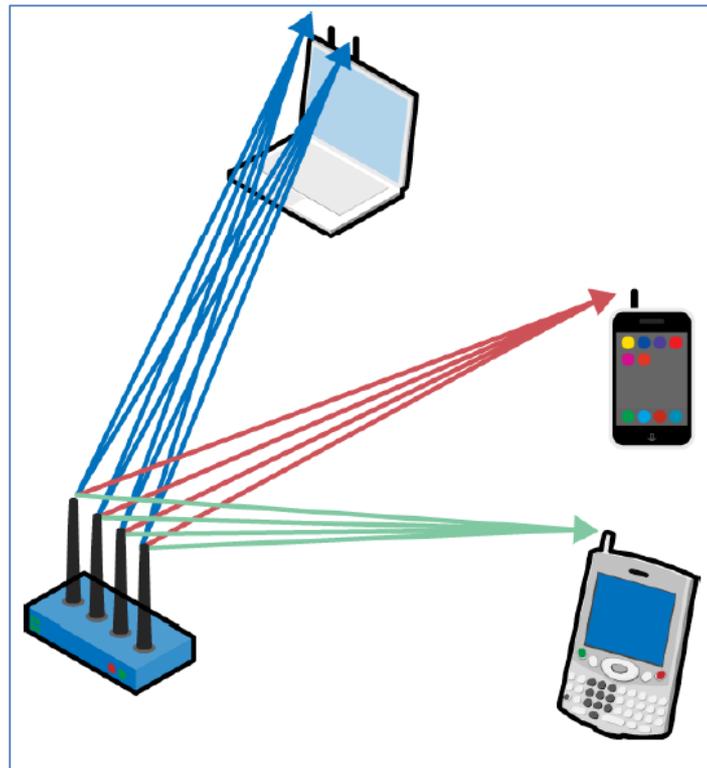


Figura 5-14 Distintas rutas MIMO multiusuario

Para reducir la complejidad del sistema, se limita el número de flujos espaciales a 4 aunque el estándar actualmente permite hasta 8 flujos espaciales. Una de las desventajas de los sistemas MIMO multiusuarios es que tienen menos ancho de banda debido a que el número de flujos espaciales está limitado a 4. Si se quisiera tener el máximo de ancho de banda, habría que optar por MIMO monousuario.

5.3.7 Cambios en la capa física (PHY) para MIMO multiusuario

Para transmitir múltiples flujos espaciales, hay que realizar algunos cambios en la PLCP (*Physical Layer Convergence Protocol*, que se estudió anteriormente).

El formato de la trama se puede ver en la Figura 5-15.

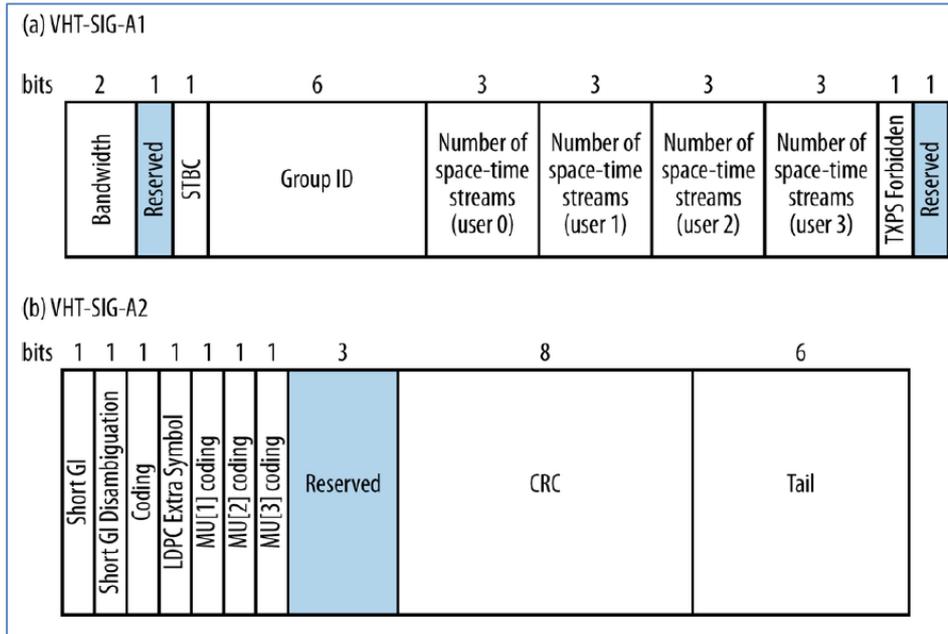


Figura 5-15 Formato de la trama de acción para el caso multiusuario

Los cambios que se producen en el modo multiusuario son los siguientes:

- El campo *Group ID* permite que el receptor de una transmisión multiusuario determine si en la trama multiusuario aparece información destinada a él.
- *Number of space-time streams for users 0-3* (12 bits, 3 para cada usuario). Este campo se utiliza para informar a los receptores de cuántos flujos espaciales tiene su transmisión.
- *Multuser coding for users 1-3*. Estos bits se utilizan para indicar si se utilizan códigos convolucionales o LDPC (*Low Density Parity Check*) en los *beamformees* adicionales (del 1 al 3).

5.3.8 Implementación MIMO multiusuario

Una de las mayores limitaciones en MIMO multiusuario es la interferencia interusuario, provocada por *beamformees* que están situados unos muy próximos a otros. El principal objetivo de MIMO multiusuario es reducir la interferencia multiusuario.

En la Figura 5-16 se muestra el procedimiento utilizado para mitigar la interferencia interusuario.

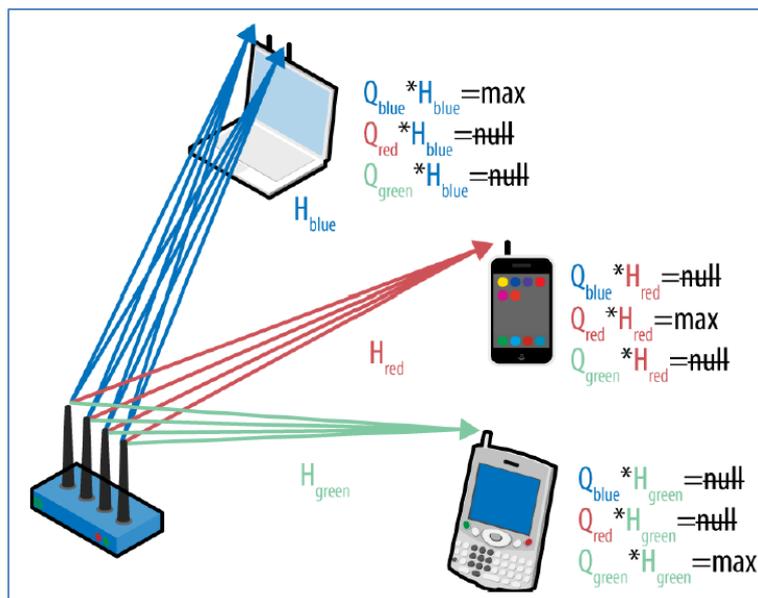


Figura 5-16 Interferencia interusuario

Como se puede observar en la imagen anterior, el *beamforming* focaliza la energía en una dirección y fuera de esa dirección la señal es más débil. En esta imagen, se observan 3 transmisiones simultáneas. El AP ha calculado la matriz de dirección, Q , para estos dispositivos basándose en los procesos de medida del canal que se ha visto anteriormente. La matriz H es la encargada de medir el efecto del canal en cada una de las transmisiones. En un modo de transmisión ideal, el AP transmitiría la señal en la dirección deseada con mucha potencia y no transmitiría nada en las otras dos direcciones. Matemáticamente, para tener una dirección en la que la transmisión es nula se necesitan muchos grados de libertad en la matriz de dirección. Si pasamos esto al mundo físico se traduce en un aumento en el número de antenas necesarias para el diseño de los equipos. Al aumentar el número de antenas se dota al AP de una mayor precisión a la hora de enviar datos en una dirección deseada y, por otra parte, favorece el envío de la información únicamente en la dirección deseada.

6 CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

En este capítulo se van a exponer las conclusiones extraídas tras finalizar el proyecto. Además, se incluyen futuras líneas de trabajo para continuar el proyecto y algunas mejoras sobre el mismo para conseguir mejores prestaciones.

6.1 Conclusiones

Tras la realización del proyecto se puede concluir que la simulación práctica de la red 802.11ac a través de la herramienta teórica *EKahau* ha servido en gran medida para comprender algunos de los aspectos más importantes en la planificación de redes inalámbricas como pueden ser la distribución de los canales, la potencia de emisión o el *tilt* de las antenas. Gracias a la simulación realizada con esta herramienta se han puesto de manifiesto las prestaciones del estándar en un escenario real y los problemas que pueden aparecer en el despliegue de la red.

Se ha realizado un recorrido a través de todas las versiones del estándar, posibilitando tener una idea generalizada de la evolución y el estado de desarrollo en que se encuentra actualmente.

Asimismo, se han estudiado de manera pormenorizada todos los aspectos de la capa física de cada uno de los estándares, comparando unos con otros para permitir ilustrar de mejor forma el progreso realizado en el salto de un estándar al otro, el por qué y las necesidades que se han cubierto.

Finalmente, se han analizado las técnicas de *beamforming* utilizadas en el estándar 802.11ac y se han comparado con las del estándar 802.11n, comentando algunas ventajas que se han obtenido con la última versión de este estándar.

6.2 Líneas futuras de trabajo

Tal como se ha podido comprobar las características de este estándar posibilitan el despliegue de aplicaciones que permiten conocer las tendencias de la red. Este conocimiento de la red permite a las empresas el desarrollo de aplicaciones y programas que, aprovechándose de estos datos, permita mejorar su actividad aumentando los ingresos. Por ejemplo, si una empresa de alimentación conoce el recorrido más transitado que realizan los consumidores al entrar al establecimiento, puede aprovecharlo para colocar en estas posiciones los productos claves que más interesan vender.

El estándar 802.11ac es una evolución de las versiones anteriores que se adapta cada vez más a las necesidades del cliente. Se ha pasado de la mentalidad de que el WiFi permitía conectar un PC a Internet sin necesidad de cable, reduciendo la velocidad que este ofrecía a pensar en que WiFi es un medio a través del cual se puede estar conectado a un mundo de aplicaciones y utilidades desde un *Smartphone*, *Tablet*, *Smartwatch*,...a gran velocidad, consiguiendo velocidades que se asemejan a las que se obtenían a través del cable.

Por tanto, las aplicaciones más importantes que están surgiendo actualmente son:

- La localización en interiores. Esta aplicación se consigue gracias a la medida del retardo en la propagación de la señal WiFi. Se estudia la señal WiFi que se refleja en los obstáculos, pudiendo medir, gracias a la fórmula $v = e/t$, el espacio existente entre el AP y el obstáculo con una precisión de 2 cm.
- La identificación de actividad. Se trata, sin duda, de la aplicación más importante que ha surgido junto al desarrollo de las redes inalámbricas. Esta nueva funcionalidad, que se puede encontrar en los nuevos equipos inalámbricos, permite mejorar tareas de la vida cotidiana como pueden ser el cuidado de ancianos o la seguridad de los más pequeños. Anteriormente se podían conseguir estas utilidades mediante el uso de sensores y electrónica adicional. La gran ventaja que surge con el estándar 802.11ac es que se pueden reutilizar los equipos WiFi existentes en la red inalámbrica para disfrutar de estas funcionalidades.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] José María Hernando-Rábanos. *Transmisión por radio, 7ª ed, Ed. Ramón Areces, 2013.*
- [2] Matthew S. Gast. *802.11ac: A Survival Guide, Ed. O'Reilly Media, Inc., 2013.*
- [3] Apuntes de la asignatura *Sistemas Emergentes de Comunicaciones* impartida por María José Madero ayora en 2013.
- [4] Ekahau. *Ekahau Wi-Fi RTLS, Active RFID Tracking Solutions, and Wi-Fi Site Survey, WLAN Planning Tools: <http://www.ekahau.com/>.*
- [5] ITU. *UIT: Comprometida para conectar el mundo: <http://www.itu.int/es/Pages/default.aspx>.*
- [6] Wikipedia. *Wikipedia, la enciclopedia libre: <https://es.wikipedia.org/>.*

En este capítulo se añadirán documentos e información que no se ha incluido en capítulos anteriores para agilizar la lectura.

8.1 Datasheet de los APs



Data Sheet

Cisco Aironet 2700 Series Access Points



Dual-band 2.4 GHz and 5 GHz access points (APs) with 802.11ac Wave 1 support on the integrated 5-GHz radio

Cisco Aironet 2702i Access Point

- Sleek design with internal antennas
- Ideal for office environments
- Classify over 20 different types of interference, including non-Wi-Fi interference, within 5 to 30 seconds
- Automatic remedial action and less manual intervention
- UL 2043 plenum-rated for above-ceiling installation or for suspending from drop ceilings

Cisco Aironet 2702e Access Points

- Rugged metal housing and extended operating temperature
- Ideal for factories, warehouses, and other indoor industrial environments
- Versatile RF coverage with external antennas
- UL 2043 plenum-rated for above-ceiling installation or for suspending from drop ceilings
- Classification of over 20 different types of interference, including non-Wi-Fi interference, within 5 to 30 seconds
- Automatic remedial action and less manual intervention

Troubleshooting Forensics for Faster Interference Resolution and Proactive Action

- Historic interference information for back-in-time analysis and faster problem solving
- 24x7 monitoring with remote access for reduced travel and speedier resolution
- Air quality index in Cisco CleanAir[®] technology provides a snapshot of network performance and the impact of interference

Robust Security and Policy Enforcement

- Industry's first AP with non-Wi-Fi detection for off-channel rogues
- Supports rogue AP detection and detection of denial-of-service attacks
- Management frame protection detects malicious users and alerts network administrators
- Enables policies to prohibit devices that interfere with the Wi-Fi network or jeopardize network security

Secure Interoperability

- Controller-based deployment and standalone deployments



The Cisco[®] Aironet[®] 2700 Series of Wi-Fi access points (APs) delivers industry-leading 802.11ac performance at a price point ideal for plugging capacity and coverage gaps in dense indoor environments. The Aironet 2700 Series extends 802.11ac speed and features to a new generation of smartphones, tablets, and high-performance laptops now shipping with the faster, 802.11ac Wi-Fi radios.

The Aironet 2700 series supports 802.11ac "Wave 1" in its first implementation, providing a theoretical connection rate of up to 1.3 Gbps. That's roughly triple the rates offered by today's high-end 802.11n APs. The boost helps you stay ahead of the performance and bandwidth expectations of today's mobile worker, who usually uses multiple Wi-Fi devices instead of just one. As such, users are adding proportionally larger traffic loads to the wireless LAN, which has outpaced Ethernet as the default enterprise access network.

High Density Experience (HD Experience)

Building on the Cisco Aironet heritage of RF excellence, the 2700 Series APs run on a purpose-built, innovative chipset with a best-in-class RF architecture. This chipset provides a high-density experience for enterprise networks designed for mission-critical, high-performance applications. The 2700 is a component of a Cisco series of flagship, 802.11ac-enabled APs that delivers a robust mobility experience based on the following product features:

- 802.11ac with 3x4 multiple-input multiple-output (MIMO) technology supporting three spatial streams. This architecture offers a sustained 1.3-Gbps rates over a greater range for more capacity and reliability than competing APs.

- **Cross-AP Noise Reduction**, a Cisco innovation that enables APs to intelligently collaborate in real time about RF conditions so that users connect with optimized signal quality and performance.
- **Optimized AP Roaming** to ensure that client devices associate with the AP in their coverage range that offers the fastest data rate available.
- **Cisco ClientLink 3.0** technology to improve downlink performance to all mobile devices, including one-, two-, and three-spatial-stream devices on 802.11ac. At the same time, the technology improves battery life on mobile devices.
- **Cisco CleanAir** technology enhanced with 80MHz channel support. CleanAir delivers proactive, high-speed spectrum intelligence across 20-, 40-, and 80-MHz-wide channels to combat performance problems due to wireless interference.
- **MIMO equalization** capabilities, which optimize uplink performance and reliability by reducing the impact of signal fade.

The Cisco Aironet 2700 Series sustains higher-speed connections farther from the AP than competing solutions. The result is up to three times greater availability of 1.3-Gbps rates in the Cisco environment for optimum mobile device performance and user experiences.

Cisco also offers the industry's broadest selection of [802.11n and 802.11ac antennas](#), delivering optimal coverage to different deployment scenarios.

Scalability

The Cisco Aironet 2700 Series is a component of the Cisco Unified Wireless Network, a foundation for operating both wired and wireless LANs in an integrated manner. The Unified Wireless Network can scale to as many as 18,000 APs with full Layer-3 mobility across locations on the enterprise campus, in branch offices, and at remote sites. The Cisco Unified Wireless Network delivers highly secure access to mobility services and applications. It offers the lowest total cost of ownership (TCO) and investment protection by integrating smoothly with existing wired networks.

Product Specifications

Table 1 lists the specifications for the Cisco Aironet 2700 Series Access Points.

Table 1. Aironet 2700 Access Point Product Specifications

Item	Specification
Part numbers	<p>Cisco Aironet 2700i Access Point: Indoor environments, with internal antennas</p> <ul style="list-style-type: none"> • AIR-CAP2702I-x-K9: Dual-band, controller-based 802.11a/g/n/ac • AIR-CAP2702I-xK910: Eco-pack (dual-band 802.11a/g/n/ac) 10 quantity access points <p>Cisco Aironet 2700e Access Point: Indoor, challenging environments, with external antennas</p> <ul style="list-style-type: none"> • AIR-CAP2702E-x-K9: Dual-band controller-based 802.11a/g/n/ac • AIR-CAP2702E-xK910: Eco-pack (dual-band 802.11a/g/n/ac), 10 quantity access points <p>Cisco SMARTnet[®] Service for the Cisco Aironet 2700i Access Point with internal antennas</p> <ul style="list-style-type: none"> • CON-SNT-C272Ix: SMARTnet 8x5xNBD for 2700i access point (dual-band 802.11a/g/n/ac) • CON-SNT-C272Ix10: SMARTnet 8x5xNBD for 10-quantity eco-pack 2700i access point (dual-band 802.11a/g/n/ac) <p>Cisco SMARTnet Service for the Cisco Aironet 2700e Access Point with external antennas</p> <ul style="list-style-type: none"> • CON-SNT-C272Ex: SMARTnet 8x5xNBD for 2700e access point (dual-band 802.11a/g/n/ac) • QCON-SNT-C272Ex10: SMARTnet 8x5xNBD for 1- quantity eco-pack 2700e access point (dual-band 802.11a/g/n/ac) <p>Regulatory domains: (x = regulatory domain)</p> <p>Customers are responsible for verifying approval for use in their individual countries. To verify approval and to identify the regulatory domain that corresponds to a particular country, visit http://www.cisco.com/go/aironet/compliance.</p> <p>Not all regulatory domains have been approved. As they are approved, the part numbers will be available on the Global Price List.</p>

Item	Specification																																																																																									
	<p>Cisco Wireless LAN Services</p> <ul style="list-style-type: none"> AS-WLAN-CNSLT: Cisco Wireless LAN Network Planning and Design Service AS-WLAN-CNSLT: Cisco Wireless LAN 802.11n Migration Service AS-WLAN-CNSLT: Cisco Wireless LAN Performance and Security Assessment Service 																																																																																									
Software	Cisco Unified Wireless Network Software Release 7.6MR2 or later																																																																																									
Supported wireless LAN controllers	<ul style="list-style-type: none"> Cisco 2500 Series Wireless Controllers, Cisco Wireless Controller Module for ISR G2, Cisco Wireless Services Module 2 (WiSM2) for Catalyst® 6500 Series Switches, Cisco 5500 Series Wireless Controllers, Cisco Flex® 7500 Series Wireless Controllers, Cisco 8500 Series Wireless Controllers, Cisco Virtual Wireless Controller Cisco 5760 Wireless LAN Controller, Cisco Catalyst 3850 Series Switches, Cisco Catalyst 3650 Series Switches 																																																																																									
802.11n version 2.0 (and related) capabilities	<ul style="list-style-type: none"> 3x4 MIMO with three spatial streams Maximal ratio combining (MRC) 802.11n and 802.11a/g beamforming 20- and 40-MHz channels PHY data rates up to 450 Mbps (40 MHz with 5 GHz) Packet aggregation: A-MPDU (Tx/Rx), A-MSDU (Tx/Rx) 802.11 dynamic frequency selection (DFS) Cyclic shift diversity (CSD) support 																																																																																									
802.11ac Wave 1 capabilities	<ul style="list-style-type: none"> 3x4 MIMO with three spatial streams MRC 802.11ac beamforming 20-, 40-, and 80-MHz channels PHY data rates up to 1.3 Gbps (80 MHz in 5 GHz) Packet aggregation: A-MPDU (Tx/Rx), A-MSDU (Tx/Rx) 802.11 DFS CSD support 																																																																																									
Data rates supported	<p>802.11a: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, and 54 Mbps</p> <p>802.11g: 1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, and 54 Mbps</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">MCS Index¹</th> <th colspan="2">GI² = 800 ns</th> <th colspan="2">GI = 400 ns</th> </tr> <tr> <th colspan="2">20-MHz Rate (Mbps)</th> <th colspan="2">20-MHz Rate (Mbps)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>6.5</td><td></td><td>7.2</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>13</td><td></td><td>14.4</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>19.5</td><td></td><td>21.7</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>26</td><td></td><td>28.9</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>39</td><td></td><td>43.3</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>52</td><td></td><td>57.8</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>58.5</td><td></td><td>65</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>65</td><td></td><td>72.2</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>13</td><td></td><td>14.4</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>26</td><td></td><td>28.9</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>39</td><td></td><td>43.3</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>52</td><td></td><td>57.8</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td>78</td><td></td><td>86.7</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td>104</td><td></td><td>115.6</td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td>117</td><td></td><td>130</td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td>130</td><td></td><td>144.4</td><td></td></tr> </tbody> </table>	MCS Index ¹	GI ² = 800 ns		GI = 400 ns		20-MHz Rate (Mbps)		20-MHz Rate (Mbps)		0	6.5		7.2		1	13		14.4		2	19.5		21.7		3	26		28.9		4	39		43.3		5	52		57.8		6	58.5		65		7	65		72.2		8	13		14.4		9	26		28.9		10	39		43.3		11	52		57.8		12	78		86.7		13	104		115.6		14	117		130		15	130		144.4	
MCS Index ¹	GI ² = 800 ns		GI = 400 ns																																																																																							
	20-MHz Rate (Mbps)		20-MHz Rate (Mbps)																																																																																							
0	6.5		7.2																																																																																							
1	13		14.4																																																																																							
2	19.5		21.7																																																																																							
3	26		28.9																																																																																							
4	39		43.3																																																																																							
5	52		57.8																																																																																							
6	58.5		65																																																																																							
7	65		72.2																																																																																							
8	13		14.4																																																																																							
9	26		28.9																																																																																							
10	39		43.3																																																																																							
11	52		57.8																																																																																							
12	78		86.7																																																																																							
13	104		115.6																																																																																							
14	117		130																																																																																							
15	130		144.4																																																																																							

¹ MCS Index: The Modulation and Coding Scheme (MCS) index determines the number of spatial streams, the modulation, the coding rate, and data rate values.

² GI: A guard interval (GI) between symbols helps receivers overcome the effects of multipath delays.

Item	Specification							
	16	19.5	21.7					
	17	39	43.3					
	18	58.5	65					
	19	78	86.7					
	20	117	130					
	21	156	173.3					
	22	175.5	195					
	23	195	216.7					
	802.11ac data rates (5 GHz):							
	MCS Index ³	Spatial Streams	GI ⁴ = 800ns			GI = 400ns		
			20-MHz Rate (Mbps)	40-MHz Rate (Mbps)	80-MHz Rate (Mbps)	20-MHz Rate (Mbps)	40-MHz Rate (Mbps)	80-MHz Rate (Mbps)
	0	1	6.5	13.5	29.3	7.2	15	32.5
	1	1	13	27	58.5	14.4	30	65
	2	1	19.5	40.5	87.8	21.7	45	97.5
	3	1	26	54	117	28.9	60	130
	4	1	39	81	175.5	43.3	90	195
	5	1	52	108	234	57.8	120	260
	6	1	58.5	121.5	263.3	65	135	292.5
	7	1	65	135	292.5	72.2	150	325
	8	1	78	162	351	86.7	180	390
	9	1	-	180	390	-	200	433.3
	0	2	13	27	58.5	14.4	30	65
	1	2	26	54	117	28.9	60	130
	2	2	39	81	175.5	43.3	90	195
	3	2	52	108	234	57.8	120	260
	4	2	78	162	351	86.7	180	390
	5	2	104	216	468	115.6	240	520
	6	2	117	243	526.5	130	270	585
	7	2	130	270	585	144.4	300	650
	8	2	156	324	702	173.3	360	780
	9	2	78	780	780	-	400	866.7
	0	3	19.5	40.5	87.8	21.7	45	97.5
	1	3	39	81	175.5	43.3	90	195
	2	3	58.5	121.5	263.3	65	135	292.5
	3	3	78	162	351	86.7	180	390
	4	3	117	243	526.5	130	270	585
	5	3	156	324	702	173.3	360	780
	6	3	175.5	364.5	-	195	405	-
	7	3	195	405	877.5	216.7	450	975

³ MCS Index: The Modulation and Coding Scheme (MCS) index determines the number of spatial streams, the modulation, the coding rate, and data rate values.

⁴ GI: A guard interval (GI) between symbols helps receivers overcome the effects of multipath delays.

Item	Specification							
	8	3	234	486	1053	260	540	1170
	9	3	260	540	1170	288.9	600	1300
Frequency band and 20-MHz operating channels	A (A regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.462 GHz; 11 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.500 to 5.700 GHz; 8 channels (excludes 5.600 to 5.640 GHz) • 5.745 to 5.825 GHz; 5 channels C (C regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.745 to 5.825 GHz; 5 channels D (D regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.462 GHz; 11 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.745 to 5.865 GHz; 7 channels E (E regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.500 to 5.700 GHz; 8 channels (excludes 5.600 to 5.640 GHz) F (F regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.500 to 5.700 GHz; 8 channels (excludes 5.600 to 5.640 GHz) H (H regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.150 to 5.350 GHz; 8 channels • 5.745 to 5.825 GHz; 5 channels I (I regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels K (K regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.500 to 5.620 GHz; 7 channels • 5.745 to 5.805 GHz; 4 channels 				N (N regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.462 GHz; 11 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.745 to 5.825 GHz; 5 channels Q (Q regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.500 to 5.700 GHz; 11 channels R (R regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.660 to 5.805 GHz; 7 channels S (S regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.472 GHz; 13 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.500 to 5.700 GHz; 11 channels • 5.745 to 5.825 GHz; 5 channels T (T regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.462 GHz; 11 channels • 5.280 to 5.320 GHz; 3 channels • 5.500 to 5.700 GHz; 8 channels (excludes 5.600 to 5.640 GHz) • 5.745 to 5.825 GHz; 5 channels Z (Z regulatory domain): <ul style="list-style-type: none"> • 2.412 to 2.462 GHz; 11 channels • 5.180 to 5.320 GHz; 8 channels • 5.500 to 5.700 GHz; 8 channels (excludes 5.600 to 5.640 GHz) • 5.745 to 5.825 GHz; 5 channels 			
Note: Customers are responsible for verifying approval for use in their individual countries. To verify approval and to identify the regulatory domain that corresponds to a particular country, visit http://www.cisco.com/go/aironet/compliance .								
Maximum number of nonoverlapping channels	2.4 GHz <ul style="list-style-type: none"> • 802.11b/g: <ul style="list-style-type: none"> ◦ 20 MHz: 3 • 802.11n: <ul style="list-style-type: none"> ◦ 20 MHz: 3 				5 GHz <ul style="list-style-type: none"> • 802.11a: <ul style="list-style-type: none"> ◦ 20 MHz: 21 • 802.11n: <ul style="list-style-type: none"> ◦ 20 MHz: 21 ◦ 40 MHz: 9 • 802.11ac: <ul style="list-style-type: none"> ◦ 20 MHz: 21 ◦ 40 MHz: 9 ◦ 80 MHz: 5 			
Note: This varies by regulatory domain. Refer to the product documentation for specific details for each regulatory domain.								

Item	Specification							
Receive sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> 802.11b (CCK) <ul style="list-style-type: none"> -102 dBm @ 1 Mbps -100 dBm @ 2 Mbps -93 dBm @ 5.5 Mbps -90 dBm @ 11 Mbps 		<ul style="list-style-type: none"> 802.11g (non HT20) <ul style="list-style-type: none"> -93 dBm @ 6 Mbps -93 dBm @ 9 Mbps -93 dBm @ 12 Mbps -92 dBm @ 18 Mbps -89 dBm @ 24 Mbps -86 dBm @ 36 Mbps -81 dBm @ 48 Mbps -80 dBm @ 54 Mbps 		<ul style="list-style-type: none"> 802.11a (non HT20) <ul style="list-style-type: none"> -93 dBm @ 6 Mbps -93 dBm @ 9 Mbps -93 dBm @ 12 Mbps -92 dBm @ 18 Mbps -89 dBm @ 24 Mbps -86 dBm @ 36 Mbps -81 dBm @ 48 Mbps -80 dBm @ 54 Mbps 			
	2.4 GHz <ul style="list-style-type: none"> 802.11n (HT20) <ul style="list-style-type: none"> -93 dBm @ MCS0 -93 dBm @ MCS1 -91 dBm @ MCS2 -88 dBm @ MCS3 -85 dBm @ MCS4 -80 dBm @ MCS5 -79 dBm @ MCS6 -78 dBm @ MCS7 -93 dBm @ MCS8 -91 dBm @ MCS9 -89 dBm @ MCS10 -86 dBm @ MCS11 -83 dBm @ MCS12 -79 dBm @ MCS13 -77 dBm @ MCS14 -76 dBm @ MCS15 -93 dBm @ MCS16 -90 dBm @ MCS17 				5 GHz <ul style="list-style-type: none"> 802.11n (HT20) <ul style="list-style-type: none"> -93 dBm @ MCS0 -93 dBm @ MCS1 -91 dBm @ MCS2 -88 dBm @ MCS3 -85 dBm @ MCS4 -81 dBm @ MCS5 -79 dBm @ MCS6 -78 dBm @ MCS7 -93 dBm @ MCS8 -91 dBm @ MCS9 -89 dBm @ MCS10 -86 dBm @ MCS11 -83 dBm @ MCS12 -78 dBm @ MCS13 -77 dBm @ MCS14 -75 dBm @ MCS15 -93 dBm @ MCS16 -90 dBm @ MCS17 		5 GHz <ul style="list-style-type: none"> 802.11n (HT40) <ul style="list-style-type: none"> -90 dBm @ MCS0 -89 dBm @ MCS1 -88 dBm @ MCS2 -85 dBm @ MCS3 -82 dBm @ MCS4 -77 dBm @ MCS5 -76 dBm @ MCS6 -75 dBm @ MCS7 -90 dBm @ MCS8 -88 dBm @ MCS9 -86 dBm @ MCS10 -83 dBm @ MCS11 -79 dBm @ MCS12 -75 dBm @ MCS13 -74 dBm @ MCS14 -72 dBm @ MCS15 -89 dBm @ MCS16 -87 dBm @ MCS17 	
	<ul style="list-style-type: none"> -88 dBm @ MCS18 -84 dBm @ MCS19 -82 dBm @ MCS20 -77 dBm @ MCS21 -76 dBm @ MCS22 -74 dBm @ MCS23 				<ul style="list-style-type: none"> -88 dBm @ MCS18 -85 dBm @ MCS19 -82 dBm @ MCS20 -77 dBm @ MCS21 -76 dBm @ MCS22 -75 dBm @ MCS23 		<ul style="list-style-type: none"> -85 dBm @ MCS18 -81 dBm @ MCS19 -79 dBm @ MCS20 -74 dBm @ MCS21 -73 dBm @ MCS22 -71 dBm @ MCS23 	
802.11ac Receive Sensitivity								
802.11ac (non HT80) <ul style="list-style-type: none"> -86 dBm @ 6 Mbps -75 dBm @ 54 Mbps 								
	MCS Index⁵	Spatial Streams	VHT20	VHT40	VHT80	VTH20-STBC	VHT40-STBC	VHT80-STBC
	0	1	-92 dBm	-89 dBm	-85 dBm	-92 dBm	-89 dBm	-85 dBm
	8	1	-74 dBm			-74 dBm		
	9	1		-69 dBm	-66 dBm		-69 dBm	-66 dBm
	0	2	-92 dBm	-88 dBm	-85 dBm			
	8	2	-72 dBm					
	9	2		-67 dBm	-63 dBm			
	0	3	-92 dBm	-88 dBm	-84 dBm			
	9	3	-68 dBm	-66 dBm	-62 dBm			

⁵ MCS Index: The Modulation and Coding Scheme (MCS) index determines the number of spatial streams, the modulation, the coding rate, and data rate values.

Item	Specification	
Maximum transmit power	2.4 GHz <ul style="list-style-type: none"> 802.11b <ul style="list-style-type: none"> 22 dBm, 3 antennas 802.11g <ul style="list-style-type: none"> 22 dBm, 3 antennas 802.11n (HT20) <ul style="list-style-type: none"> 22 dBm, 3 antennas 	5 GHz <ul style="list-style-type: none"> 802.11a <ul style="list-style-type: none"> 23 dBm, 4 antennas 802.11n (HT20) <ul style="list-style-type: none"> 23 dBm, 4 antennas 802.11n (HT40) <ul style="list-style-type: none"> 23 dBm, 4 antennas 802.11ac <ul style="list-style-type: none"> non-HT80: 23 dBm, 4 antennas VHT20 23 dBm, 4 antennas VHT40: 23 dBm, 4 antennas VHT80: 23 dBm, 4 antennas VHT20-STBC: 23 dBm, 4 antennas VHT40-STBC: 23 dBm, 4 antennas VHT80-STBC: 23 dBm, 4 antennas
Note: The maximum power setting will vary by channel and according to individual country regulations. Refer to the product documentation for specific details.		
Available transmit power settings	2.4 GHz <ul style="list-style-type: none"> 22 dBm (160 mW) 19 dBm (80 mW) 16 dBm (40 mW) 13 dBm (20 mW) 10 dBm (10 mW) 7 dBm (5 mW) 4 dBm (2.5 mW) 2 dBm (1.25 mW) 	5 GHz <ul style="list-style-type: none"> 23 dBm (200 mW) 20 dBm (100 mW) 17 dBm (50 mW) 14 dBm (25 mW) 11 dBm (12.5 mW) 8 dBm (6.25 mW) 5 dBm (3.13 mW) 2 dBm (1.56 mW)
Note: The maximum power setting will vary by channel and according to individual country regulations. Refer to the product documentation for specific details.		
Integrated antenna	<ul style="list-style-type: none"> 2.4 GHz, gain 4 dBi, internal omni, horizontal beamwidth 360° 5 GHz, gain 6 dBi, internal omni, horizontal beamwidth 360° 	
External antenna (sold separately)	<ul style="list-style-type: none"> Certified for use with antenna gains up to 6 dBi (2.4 GHz and 5 GHz) Cisco offers the industry's broadest selection of antennas, delivering optimal coverage for a variety of deployment scenarios 	
Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> 2x10/100/1000BASE-T autosensing (RJ-45) Management console port (RJ-45) 	
Indicators	<ul style="list-style-type: none"> Status LED indicates boot loader status, association status, operating status, boot loader warnings, boot loader errors 	
Dimensions (W x L x H)	<ul style="list-style-type: none"> Access point (without mounting bracket): 8.69 x 8.69 x 1.99 in. (22.1 x 22.1 x 5.1 cm) 	
Weight	<ul style="list-style-type: none"> 2.2 lb (1.0 kg) 	
Environmental	Cisco Aironet 2702i <ul style="list-style-type: none"> Nonoperating (storage) temperature: -22° to 158°F (-30° to 70°C) Nonoperating (storage) altitude test: 25°C, 15,000 ft. Operating temperature: 32° to 104°F (0° to 40°C) Operating humidity: 10% to 90% percent (noncondensing) Operating altitude test: 40°C, 9843 ft. Cisco Aironet 2700e <ul style="list-style-type: none"> Nonoperating (storage) temperature: -22° to 158°F (-30° to 70°C) Nonoperating (storage) altitude test: 25°C, 15,000 ft. Operating temperature: -4° to 122°F (-20° to 50°C) Operating humidity: 10% to 90% (noncondensing) Operating altitude test: 40°C, 9843 ft. 	
System memory	<ul style="list-style-type: none"> 512 MB DRAM 64 MB flash 	

Item	Specification
Input power requirements	<ul style="list-style-type: none"> AP2700: 44 to 57 VDC Power supply and power injector: 100 to 240 VAC; 50 to 60 Hz
Power draw	<ul style="list-style-type: none"> AP2700: 15W <p>Note: When deployed using a Power over Ethernet (PoE) specification, the power drawn from the power sourcing equipment will be higher by some amount dependent on the length of the interconnecting cable.</p>
Powering options	<ul style="list-style-type: none"> 802.3at PoE+ Enhanced PoE Cisco AP2700 power injectors (AIR-PWRINJ4=) Cisco AP2700 local power supply (AIR-PWR-B=) <p>Note: If 802.3af PoE is the source of power, the access point will dynamically shift from 3x4 to 3x3 and come up under PoE.</p>
Warranty	Limited lifetime hardware warranty
Compliance standards	<ul style="list-style-type: none"> UL 60950-1 CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1 UL 2043 IEC 60950-1 EN 60950-1 EN 50155 Radio approvals: <ul style="list-style-type: none"> FCC Part 15.247, 15.407 RSS-210 (Canada) EN 300.328, EN 301.893 (Europe) ARIB-STD 66 (Japan) ARIB-STD T71 (Japan) EMI and susceptibility (Class B) FCC Part 15.107 and 15.109 ICES-003 (Canada) VCCI (Japan) EN 301.489-1 and -17 (Europe) EN 60601-1-2 EMC requirements for the Medical Directive 93/42/EEC IEEE standards: <ul style="list-style-type: none"> IEEE 802.11a/b/g, 802.11n, 802.11h, 802.11d IEEE 802.11ac Draft 5 Security: <ul style="list-style-type: none"> 802.11i, Wi-Fi Protected Access 2 (WPA2), WPA 802.1X Advanced Encryption Standards (AES), Temporal Key Integrity Protocol (TKIP) Extensible Authentication Protocol (EAP) types: <ul style="list-style-type: none"> EAP-Transport Layer Security (TLS) EAP-Tunneled TLS (TTLS) or Microsoft Challenge Handshake Authentication Protocol Version 2 (MSCHAPv2) Protected EAP (PEAP) v0 or EAP-MSCHAPv2 EAP-Flexible Authentication via Secure Tunneling (FAST) PEAP v1 or EAP-Generic Token Card (GTC) EAP-Subscriber Identity Module (SIM) Multimedia: <ul style="list-style-type: none"> Wi-Fi Multimedia (WMM) Other: <ul style="list-style-type: none"> FCC Bulletin OET-65C RSS-102

Limited Lifetime Hardware Warranty

The Cisco Aironet 2700 Series Access Points come with a limited lifetime warranty that provides full warranty coverage of the hardware for as long as the original end user continues to own or use the product. The warranty includes 10-day advance hardware replacement and ensures that software media are defect-free for 90 days. For more details, visit <http://www.cisco.com/go/warranty>.

Cisco Wireless LAN Services

Realize the full business value of your technology investments faster with intelligent, customized services from Cisco and our partners. Backed by deep networking expertise and a broad ecosystem of partners, Cisco Wireless LAN Services enable you to deploy a sound, scalable mobility network that fosters rich media collaboration. At the same time, you can improve the operational efficiency gained from a converged wired and wireless network infrastructure based on the Cisco Unified Wireless Network. Together with partners, we offer expert plan, build, and run services to accelerate your transition to advanced mobility services. Then, we help you continuously optimize the performance, reliability, and security of that architecture after deployment. For more details, visit <http://www.cisco.com/go/wirelesslanservices>.

[For More Information](#)



Americas Headquarters
Cisco Systems, Inc.
San Jose, CA

Asia Pacific Headquarters
Cisco Systems (USA) Pte. Ltd.
Singapore

Europe Headquarters
Cisco Systems International BV Amsterdam,
The Netherlands

Cisco has more than 200 offices worldwide. Addresses, phone numbers, and fax numbers are listed on the Cisco Website at www.cisco.com/go/offices.

 Cisco and the Cisco logo are trademarks or registered trademarks of Cisco and/or its affiliates in the U.S. and other countries. To view a list of Cisco trademarks, go to this URL: www.cisco.com/go/trademarks. Third party trademarks mentioned are the property of their respective owners. The use of the word partner does not imply a partnership relationship between Cisco and any other company. (1110R)

Printed in USA

C78-730593-00 07/14

© 2014 Cisco and/or its affiliates. All rights reserved. This document is Cisco Public Information.

Page 9 of 9

8.2 Datasheet de las antenas externas



Cisco Aironet 2.4-GHz/5-GHz MIMO 4-Element Patch Antenna (AIR-ANT2566P4W-R)

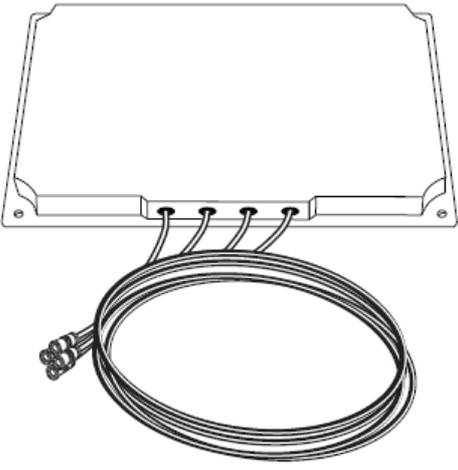
This document outlines the specifications for the Cisco Aironet 2.4-GHz/5-GHz MIMO 4-Element Patch Antenna (AIR-ANT2566P4W-R) and provides mounting instructions. The antenna operates in both the 2.4-GHz and 5-GHz frequency ranges and is designed for indoor and outdoor use.

The following information is provided in this document.

- [Technical Specifications, page 2](#)
- [System Requirements, page 5](#)
- [Safety Precautions, page 5](#)
- [Installation Notes, page 6](#)
- [Installing the Antenna, page 7](#)
- [Obtaining Documentation and Submitting a Service Request, page 8](#)

Technical Specifications

Table 1 AIR-ANT2566P4W-R 2.4-GHz/5-GHz MIMO 4-Element Patch Antenna Specifications

Antenna type	4-element dual-band MIMO	
Operating frequency range	2400 to 2484 MHz	
	5150–5850 MHz	
VSWR	2:1 or less	
Gain	6 dBi in both bands	
Polarization	Linear, vertical	
Azimuth Plane 3-dB Beamwidth	2.4 GHz band: 105°	
	5 GHz band: 110°	
Elevation Plane 3-dB Beamwidth	2.4 GHz band: 65°	
	5 GHz band: 55°	
Length	6.3 in. (16 cm)	
Width	11 in. (27.9 cm)	
Depth	1.2 in. (3.05 cm)	
Weight	1.4 lbs	
Cable length and type	3 ft. (91.4 cm) plenum rated	
Connector	RP-TNC	
Environment	Indoor/outdoor	
Water/Foreign Body Ingress	IP54	
Operating temperature range	-40° to 158° F	
	-40° to 70° C	

3300381

Figure 1 Azimuth and Elevation Radiation Patterns - 2.4 GHz Band

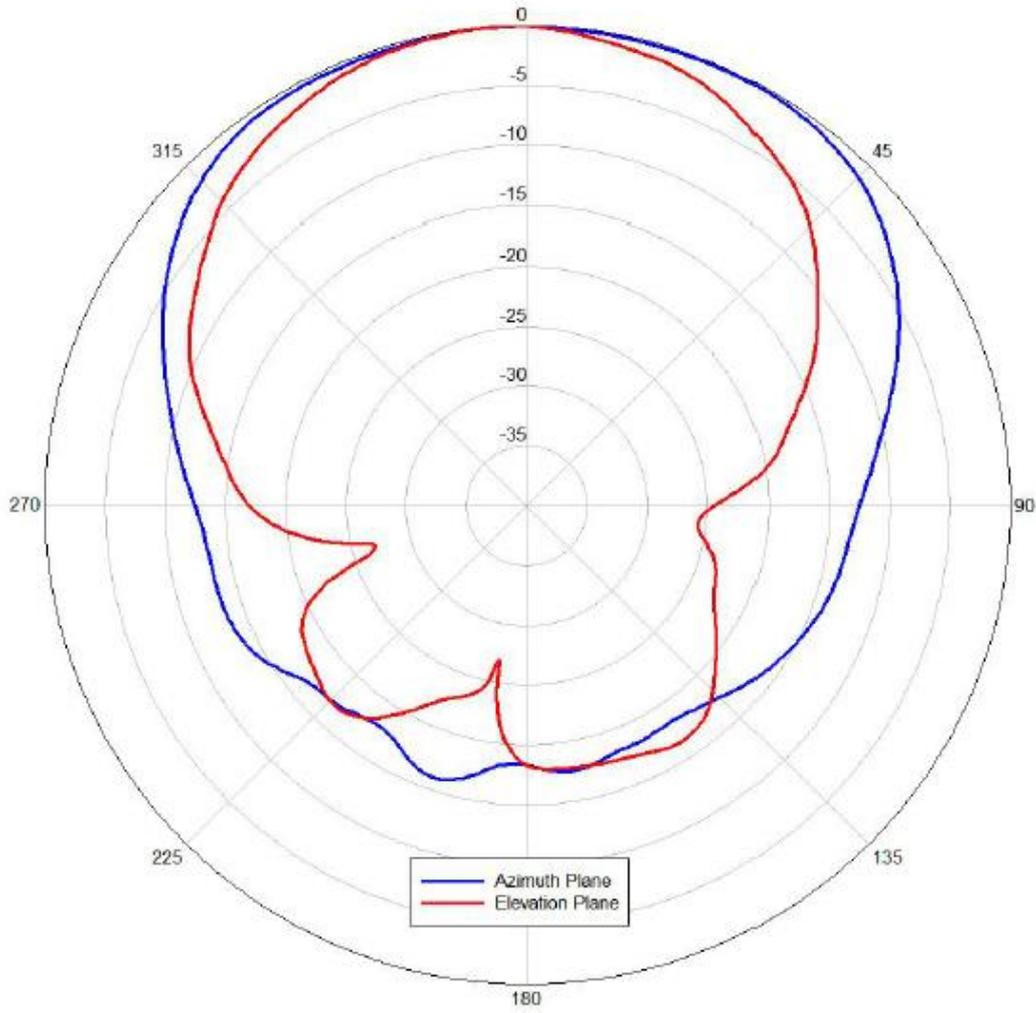
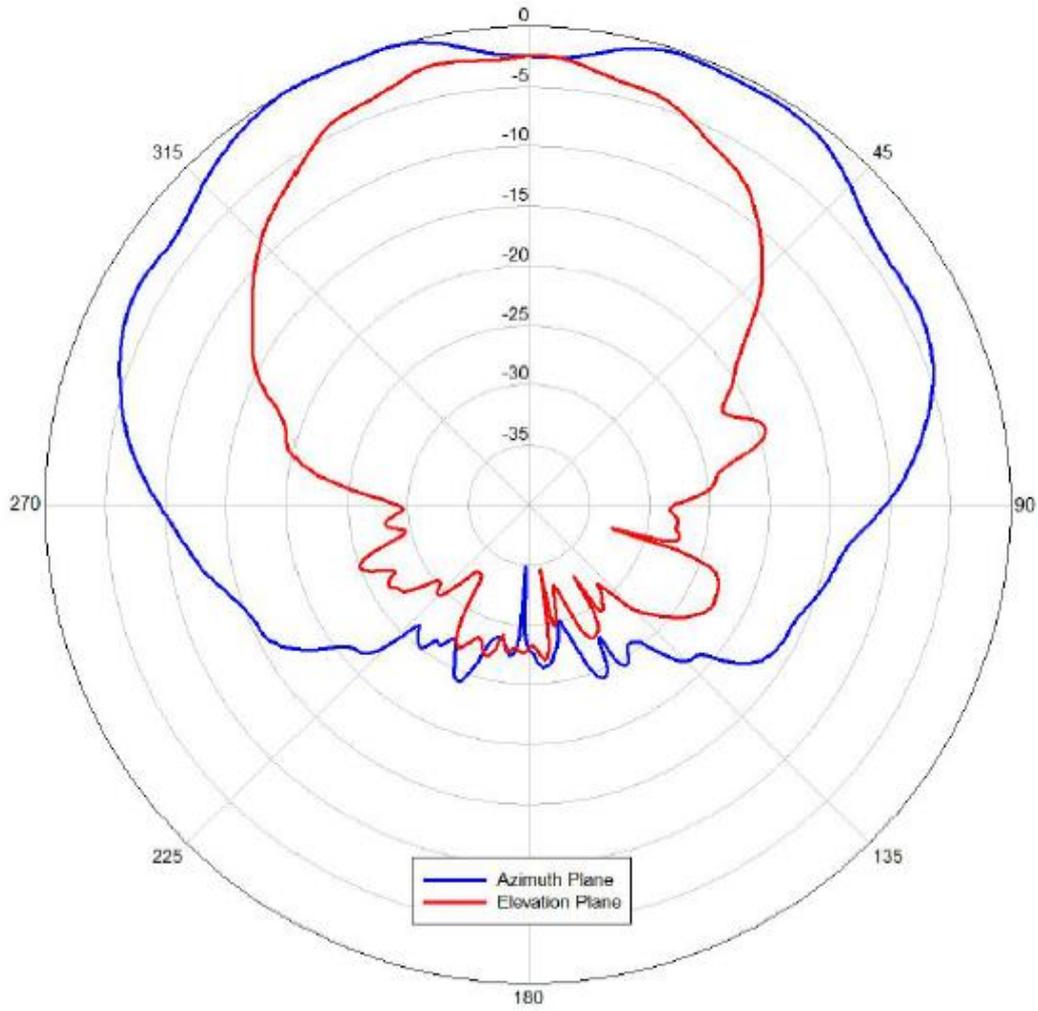


Figure 2 Azimuth and Elevation Radiation Patterns - 5 GHz Band



System Requirements

This antenna is designed for indoor and outdoor use with any Cisco Aironet access point that requires four (4) dual-band antennas.

Safety Precautions

Translated versions of the following safety warnings are provided in the *Safety Warnings for Cisco Aironet Antennas*, which is available at <http://www.cisco.com>.



Installation of this antenna near power lines is dangerous. For your safety, follow the installation directions.

Each year hundreds of people are killed or injured when attempting to install an antenna. In many of these cases, the victim was aware of the danger of electrocution but did not take adequate steps to avoid the hazard.

For your safety, and to help you achieve a good installation, please read and follow these safety precautions. **They may save your life!**

1. If you are installing an antenna for the first time, for your own safety as well as others, seek professional assistance. Your Cisco sales representative can explain which mounting method to use for the size and type antenna you are about to install.
2. Select your installation site with safety as well as performance in mind. Remember: electric power lines and phone lines look alike. For your safety, assume that any overhead line can kill you.
3. Call your electric power company. Tell them your plans and ask them to come look at your proposed installation. This is a small inconvenience considering your life is at stake.
4. Plan your installation carefully and completely before you begin. Successful raising of a mast or tower is largely a matter of coordination. Each person should be assigned a specific task, and should know what to do and when to do it. One person should be in charge of the operation to issue instructions and watch for signs of trouble.
5. When installing your antenna, remember:
 - a. **Do not** use a metal ladder.
 - b. **Do not** work on a wet or windy day.
 - c. **Do** dress properly—shoes with rubber soles and heels, rubber gloves, long sleeved shirt or jacket.
6. If the assembly starts to drop, get away from it and let it fall. Remember, the antenna, mast, cable, and metal guy wires are all excellent conductors of electrical current. Even the slightest touch of any of these parts to a power line completes an electrical path through the antenna and the installer: **You!**
7. If any part of the antenna system should come in contact with a power line, **don't touch it or try to remove it yourself. Call your local power company.** They will remove it safely.
8. If an accident occurs with the power lines, call for qualified emergency help immediately.

Installing the Antenna

You can install the antenna on any wall. If you intend to install your antenna on another surface, you must provide the appropriate hardware.

**Note**

Four mounting screws are provided to mount the antenna. To ensure a safe, reliable, and long-standing installation, you must use all four screws to mount the antenna.

Tools and Equipment Required

A mounting installation kit is shipped with the antenna and consists of the following hardware:

- Four #8 x 1¼ screws
- Four #8 plastic anchors
- Four end caps

You may need the following tools and equipment, which are not provided.

- A Phillips screwdriver
- A drill
- A #29 (0.136-in. (s.45 mm)) drill bit (for drywall installation, other surfaces may require a different size).
- A pencil
- A small mallet or hammer

Mounting on a Vertical Surface

Follow these steps to mount your antenna on a vertical surface. This procedure describes mounting the antenna on a drywall surface. If you are mounting the antenna on any other type of surface, your procedure may vary slightly.

- Step 1** Determine the location where you will mount the antenna.
- Step 2** Use the antenna as a template to mark the location of the four mounting holes.
- Step 3** Use a drill and #29 drill bit to drill four holes at the locations you marked in [Step 2](#).
- Step 4** Start a plastic anchor into each hole.
- Step 5** Use a mallet or small hammer to seat the anchors into the wall.
- Step 6** Align the antenna's mounting holes with the anchors.
- Step 7** Start a #8 x 1¼ screw into each antenna mounting hole.
- Step 8** Use a Phillips screwdriver to secure the antenna to the wall. Do not overtighten.
- Step 9** Install the end caps into the antenna mounting holes.
- Step 10** Remove the yellow outdoor installation warning label from the antenna radome.

Outdoor Installations

You can mount this antenna outdoors. If you mount the antenna outdoors, you must provide the mounting hardware. For outdoor installations, follow the instructions printed on the back of the antenna.

**Caution**

An orientation arrow is printed on the back of the antenna that indicates the proper orientation for the antenna for outdoor installations. You must install the antenna so the arrow points up to prevent any water intrusion and to provide a drain for any moisture that may accumulate inside the antenna.

Suggested Cable

Cisco recommends a high-quality, low-loss cable for use with the antenna.

**Note**

Coaxial cable loses efficiency as the frequency increases, resulting in signal loss. The cable should be kept as short as possible, because cable length also determines the amount of signal loss (the longer the run, the greater the loss).

Obtaining Documentation and Submitting a Service Request

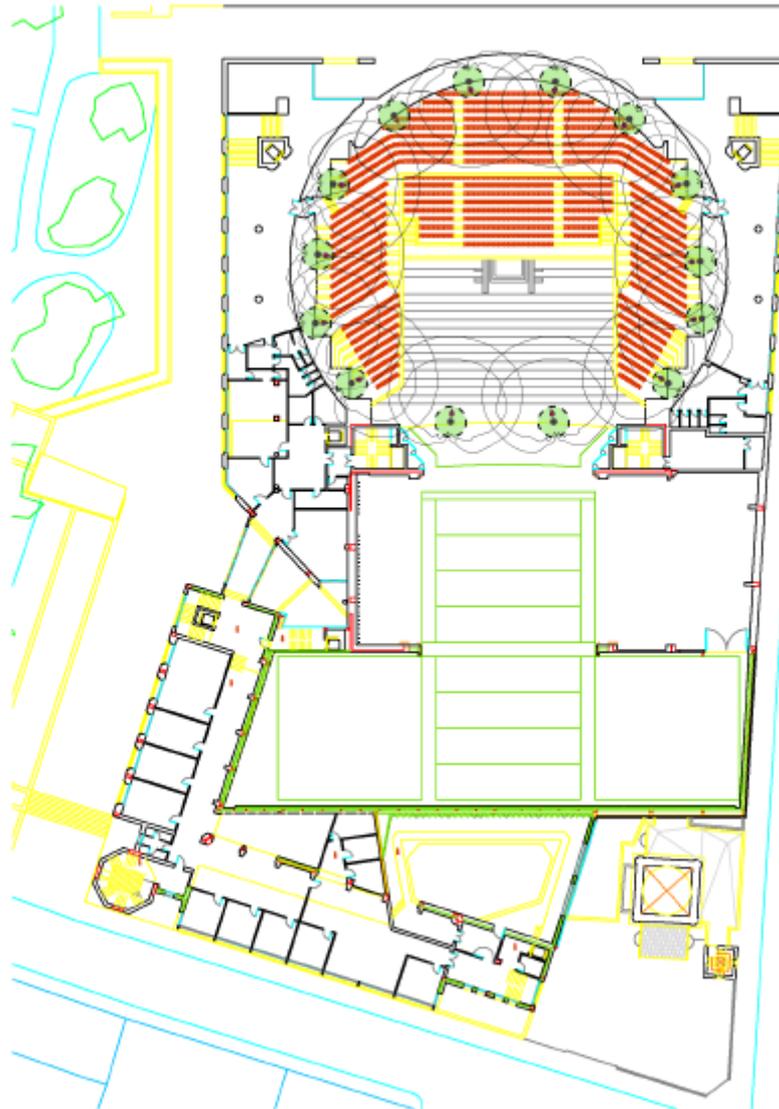
For information on obtaining documentation, using the Cisco Bug Search Tool (BST), submitting a service request, and gathering additional information, see *What's New in Cisco Product Documentation* at: <http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/general/whatsnew/whatsnew.html>.

Subscribe to *What's New in Cisco Product Documentation*, which lists all new and revised Cisco technical documentation as an RSS feed and delivers content directly to your desktop using a reader application. The RSS feeds are a free service.

8.3 Report obtenido con Ekahau

En este apartado se incluye el resultado completo del diseño realizado con Ekahau. Solo se ha incluido el de la Zona de Butacas porque el de catering y Sala de Prensa es análogo.

Survey routes and Access Points

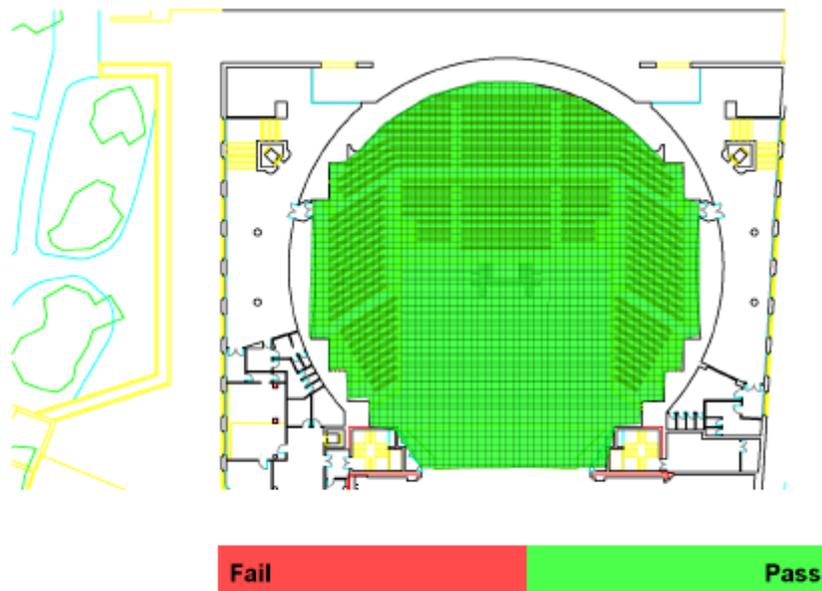


1.1. Requirements - Coverage and Performance Requirement criteria for My Network Requirements

	Signal Strength <i>Min</i>	-65.0 dBm	
	Signal-to-noise Ratio <i>Min</i>	20.0 dB	
	Data rate <i>Min</i>	24 Mbps	
	Number of Access Points <i>Min</i>	2	at min. -75.0 dBm
	Channel Overlap <i>Max</i>	10	at min. -80.0 dBm
	Round Trip Time (RTT) <i>Max</i>	300ms	

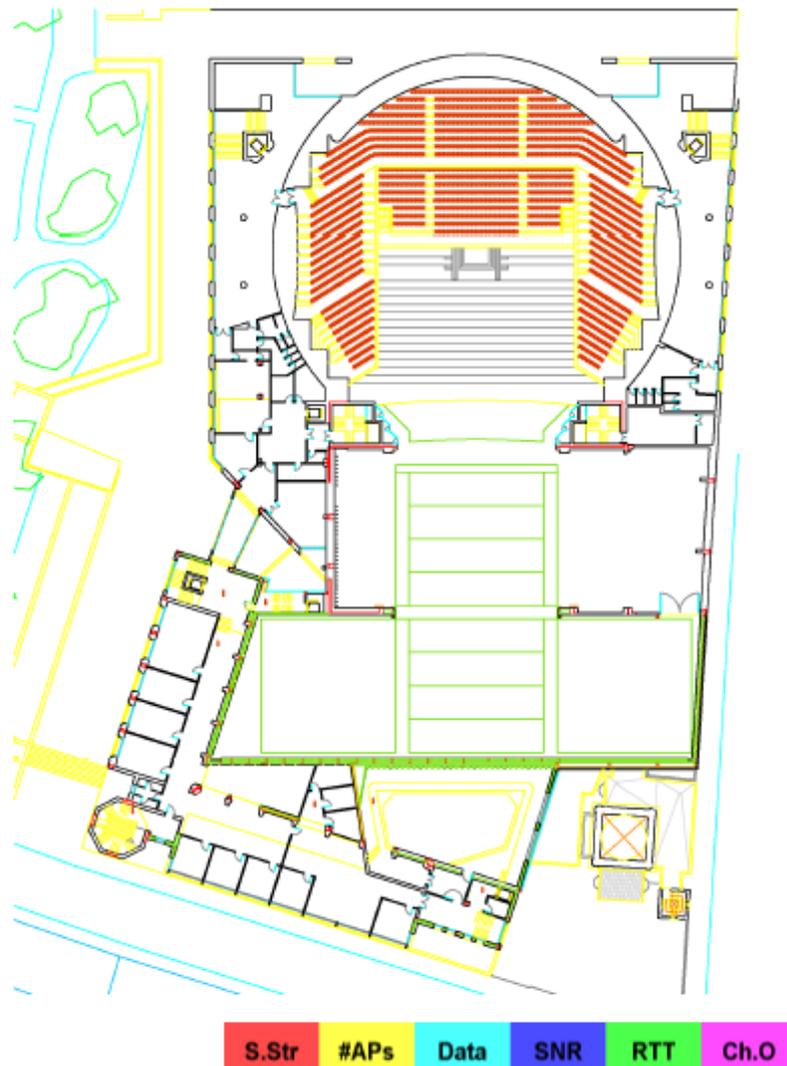
Network Health

Wi-Fi is typically built for a certain purpose or several purposes, such as VoIP, web browsing, or location tracking. With Network Health, you can, with a single visualization, display whether the network meets your requirements or not.



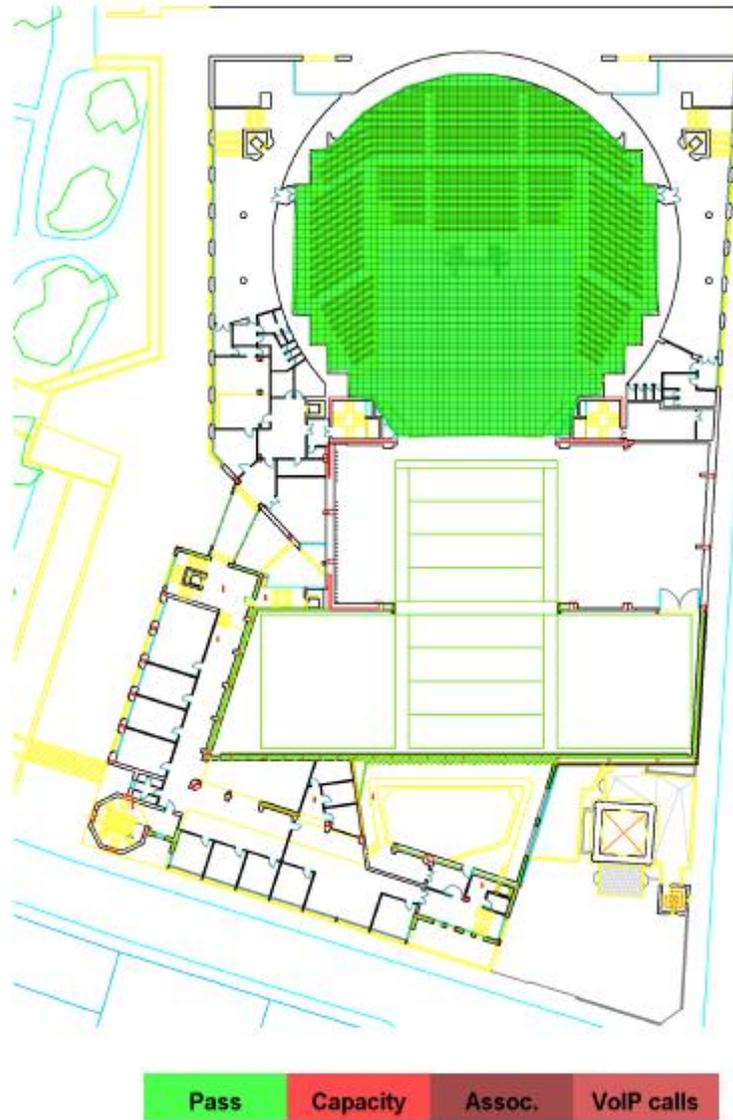
Network Issues

Network Issues complements Network Health by showing the requirement that is below the threshold level at each location. Whereas Network Health answers the question "Does it work?", Network Issues answers the question "If it doesn't work, why?".



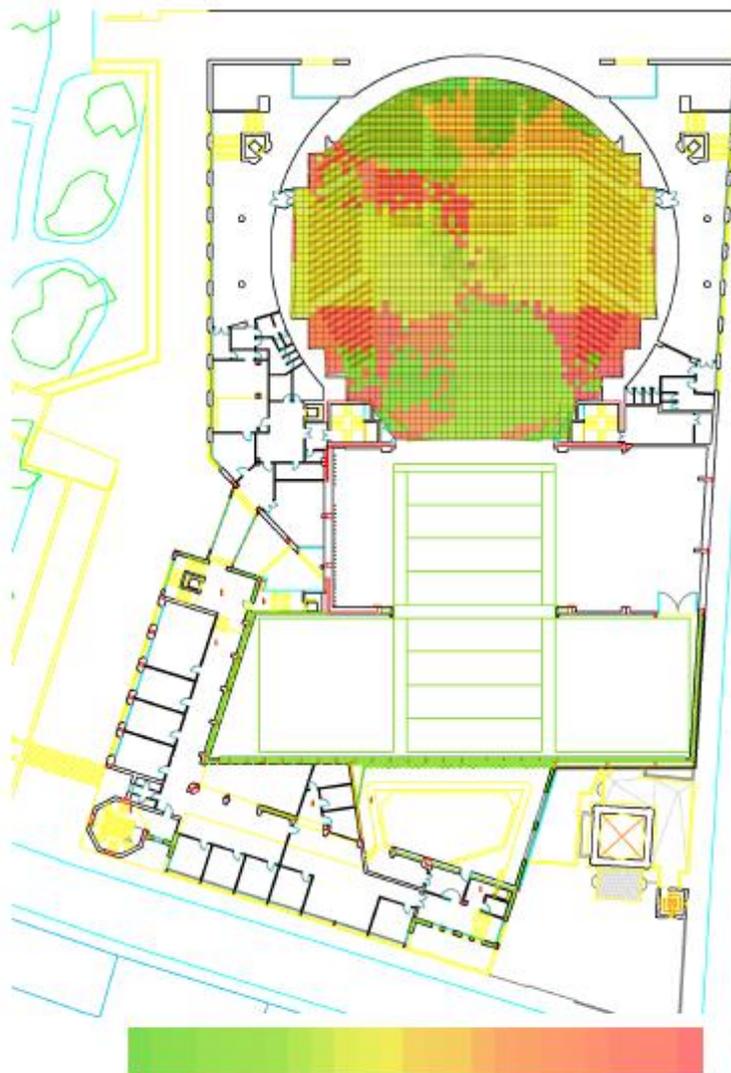
Capacity Health

Capacity Health displays if the network can handle the load of the configured Wi-Fi clients



Capacity: Clients per AP

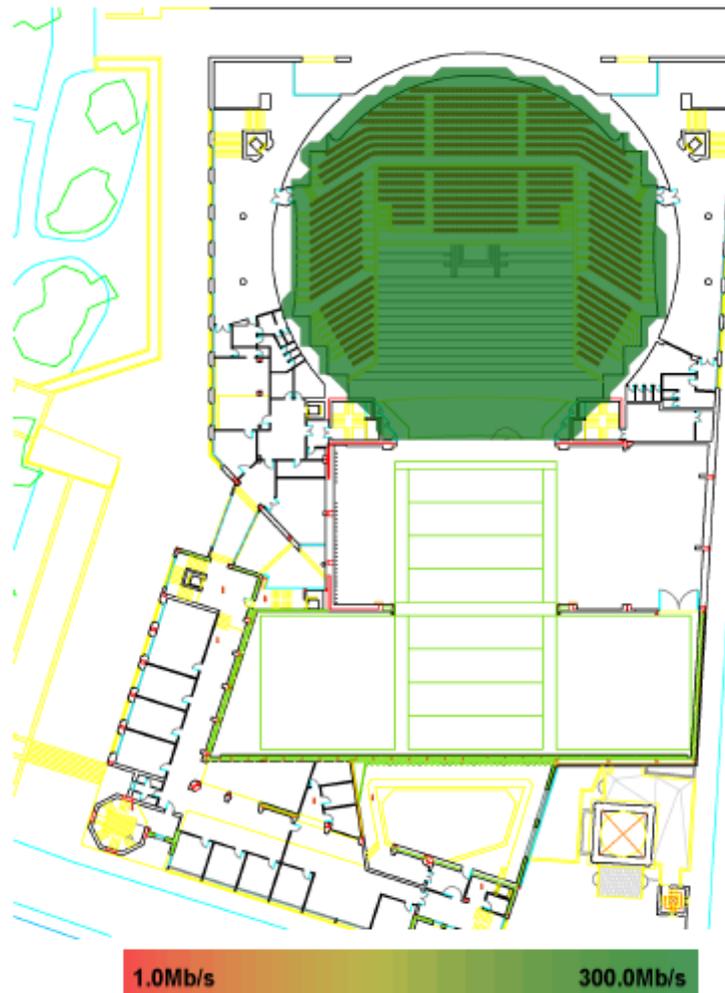
Shows how the Wi-Fi clients configured in your Capacity Requirement are distributed between the access points. The image shows Requested Associations



1.3. Coverage, Overlap and Performance

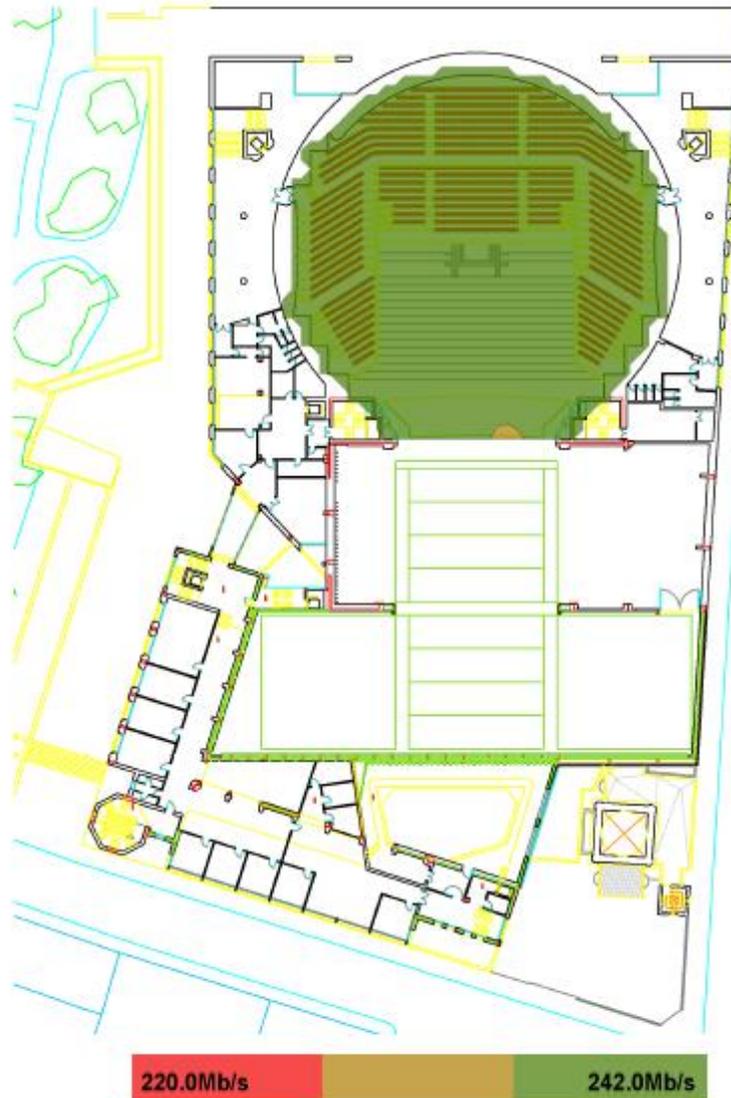
Data Rate

Data Rate is the highest possible speed (measured in megabits per second) at which the wireless devices will be transmitting data. Typically the true data throughput is about half of the data rate or less.



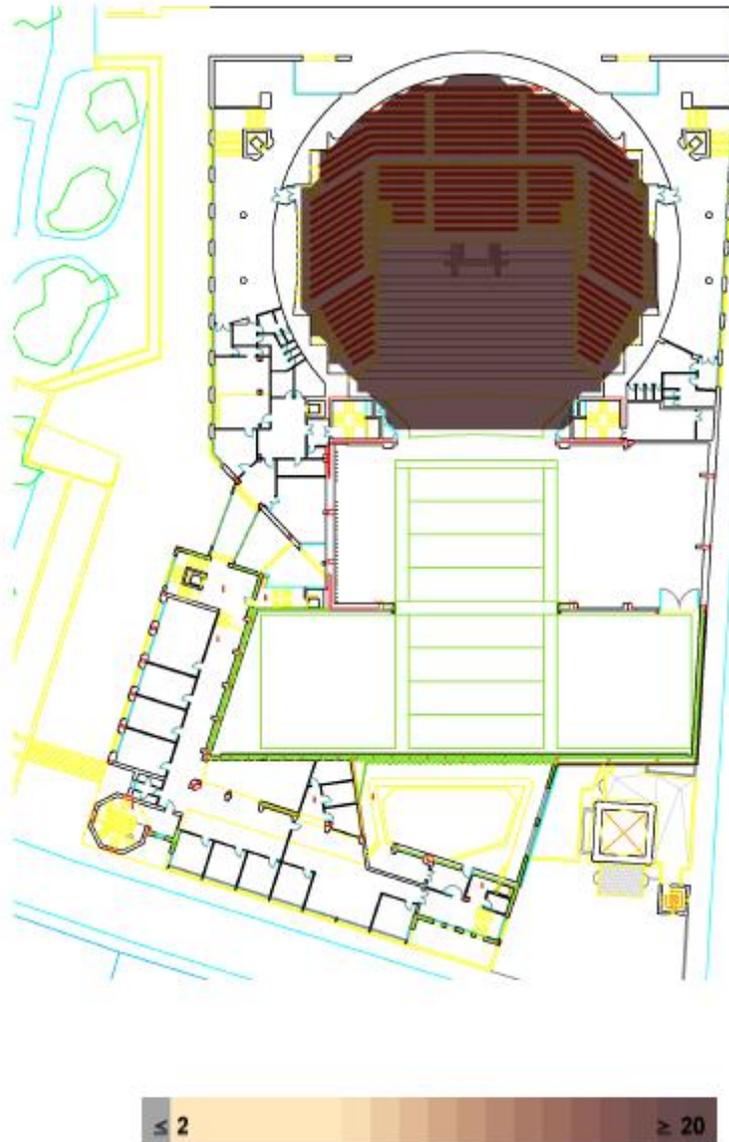
Throughput

Displays the measured throughput. If no measured throughput is available, then the estimated maximum throughput is shown instead.



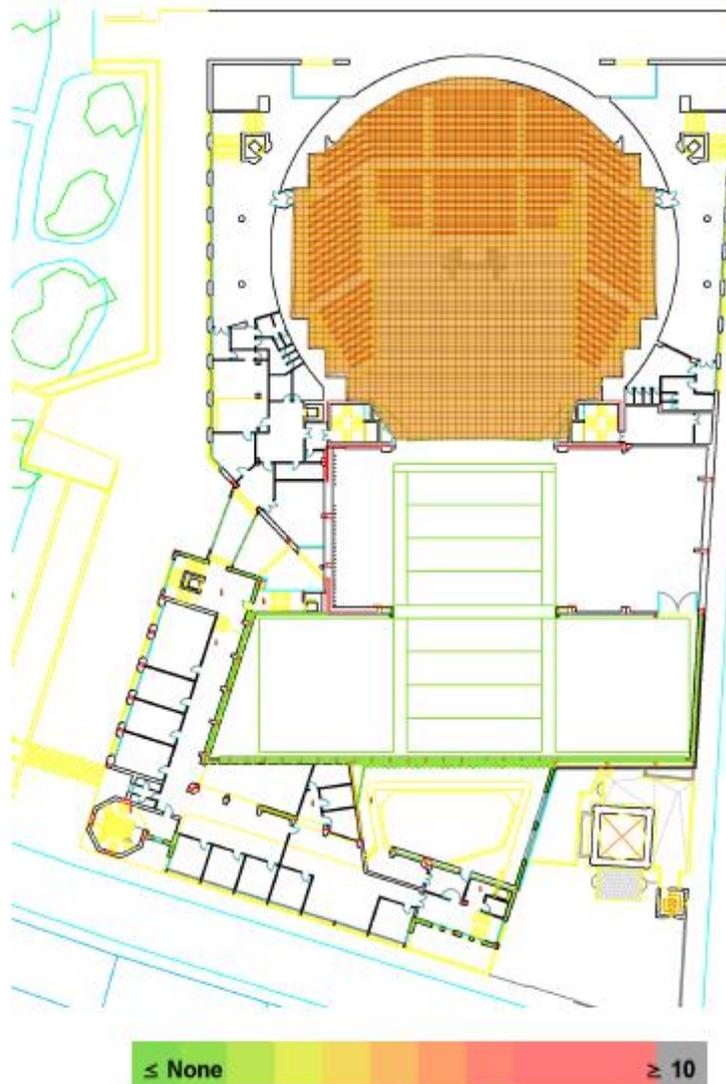
Number of APs

Number of Access Points indicates the number of access points audible at each location.



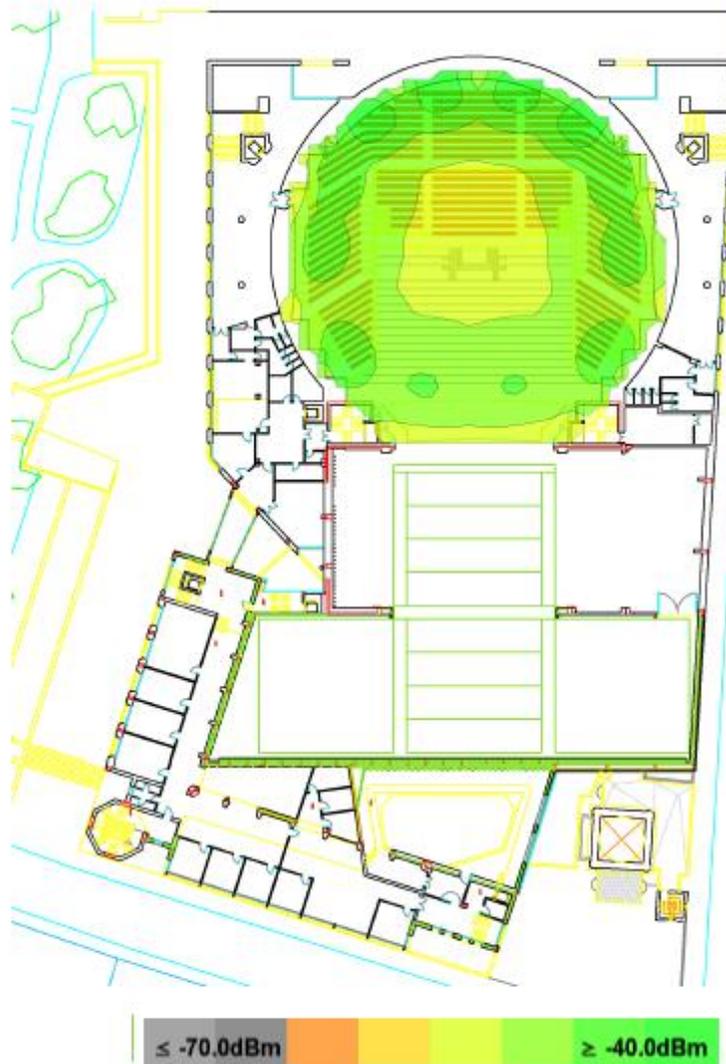
Channel Overlap

Channel overlap indicates the number of access points audible at each location in a single channel.



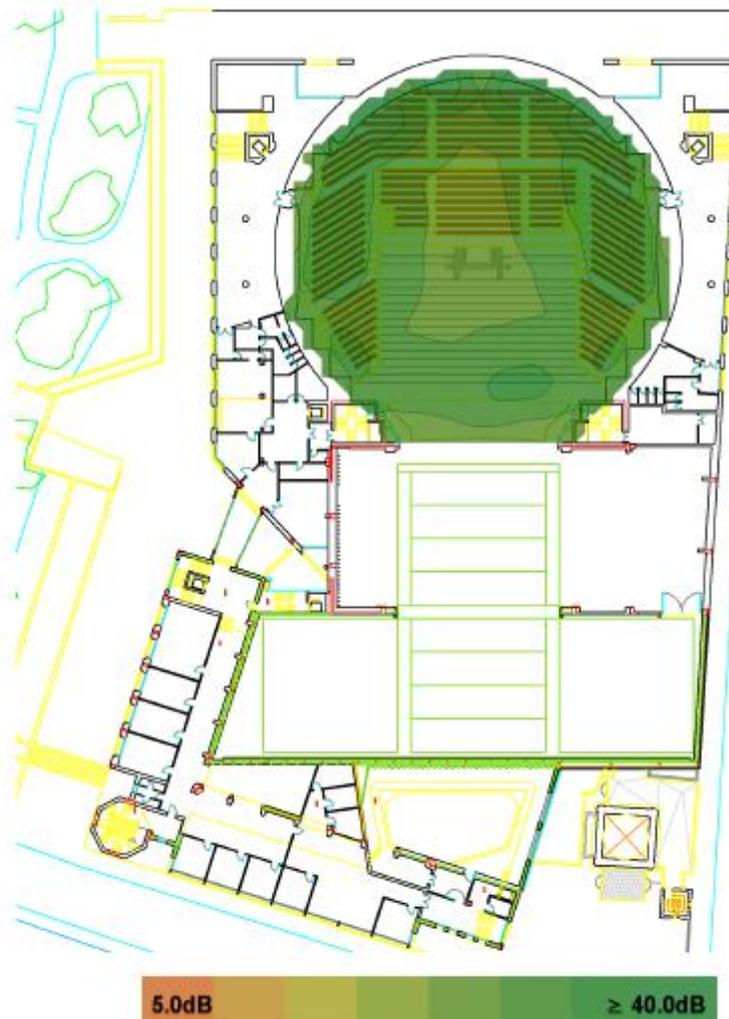
Signal Strength

Signal Strength - sometimes called coverage - is the most basic requirement for a wireless network. As a general guideline, low signal strength means unreliable connections, and low data throughput.



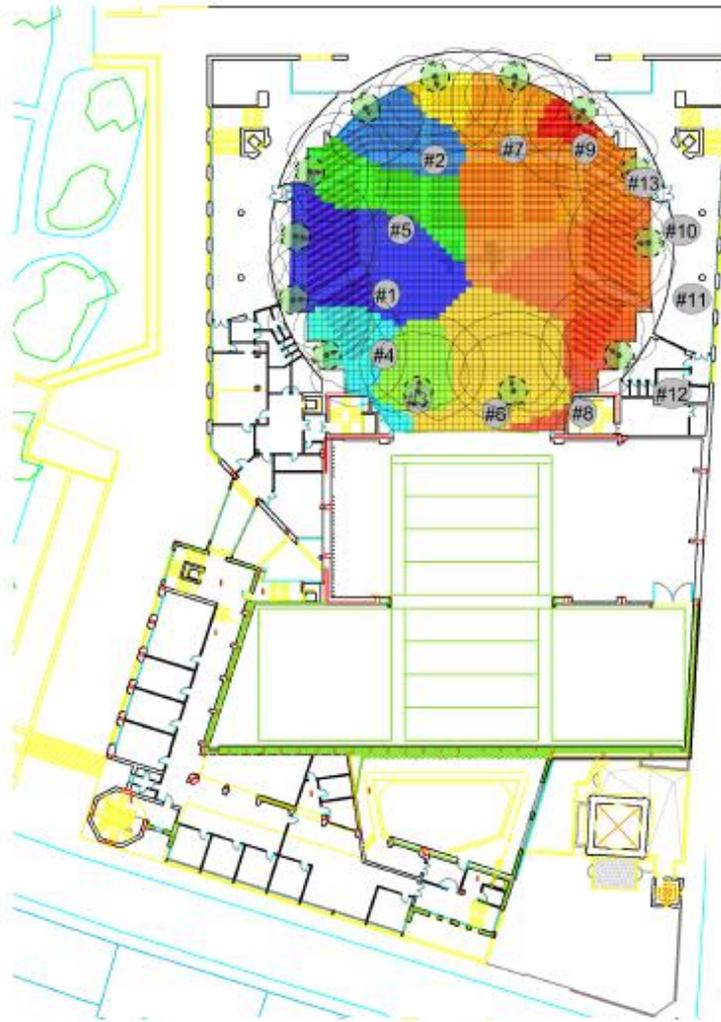
Signal To Noise Ratio (SNR)

Signal-To-Noise Ratio indicates how much the signal strength is stronger than the noise (co-channel interference). Signal must be stronger than noise (SNR greater than zero) for data transfer to be possible. If the signal is only barely stronger than noise, you may encounter occasional connection drop-offs.



Associated Access Point

Displays the access point the client device is associated with.
The image shows Predicted Association - Data Rate



AP #	Access Point			
1	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (7)			
	802.11n	6	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	36	50 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
2	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (1)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R

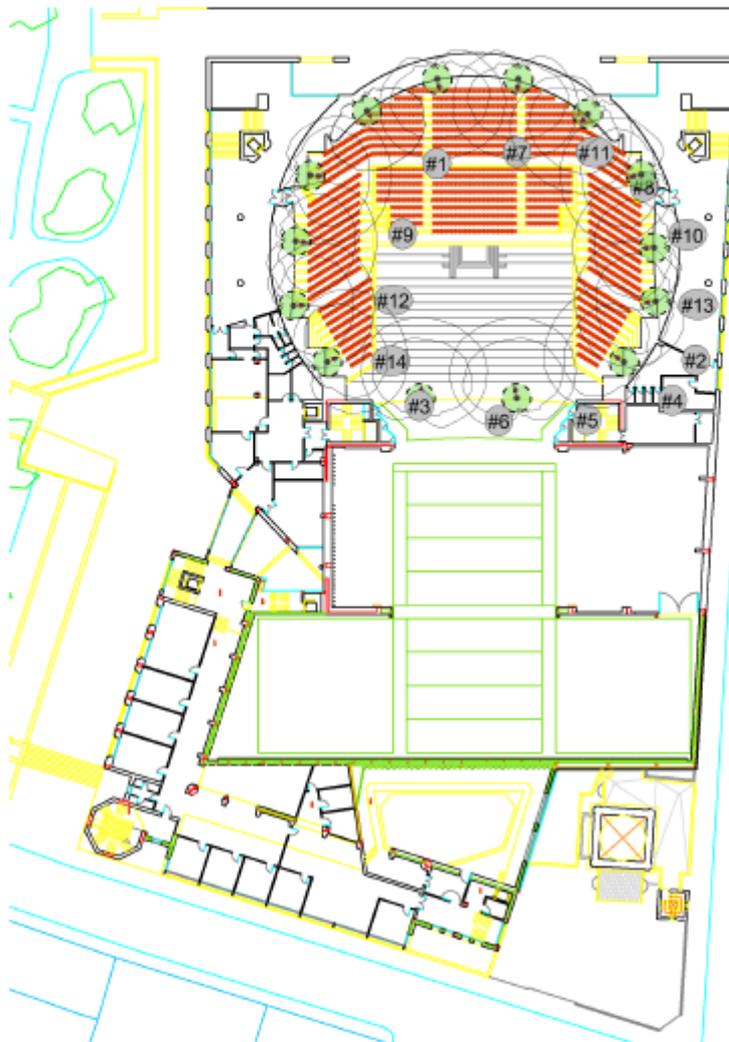
Wi-Fi Network Report

				5GHz
	 802.11ac	48	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
3	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (11)			
	802.11n	1	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	44	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
4	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (9)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	40	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
5	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (4)			
	802.11n	1	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	60	50 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
6	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (14)			
	802.11n	6	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	64	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
7	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (2)			
	802.11n	6	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	60	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
8	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (13)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	48	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
9	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (6)			
	802.11n	1	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	40	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
10	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (5)			

Wi-Fi Network Report

	802.11n	6	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	44	50 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
11	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (8)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	64	50 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
12	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (12)			
	802.11n	1	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	60	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
13	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (3)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	 802.11ac	36	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz

1.5. Access Points



1.5.1. My Access Points Simulated Access Points

#	Access Point			
1	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (1)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
	802.11ac	48	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
2	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (10)			
	802.11n	8	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	38	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
3	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (11)			
	802.11n	1	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz

	802.11ac	44	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
4	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (12)			
	802.11n	1	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	60	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
5	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (13)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	48	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
6	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (14)			
	802.11n	6	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	64	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
7	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (2)			
	802.11n	6	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	60	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
8	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (3)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	36	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
9	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (4)			
	802.11n	1	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	60	50 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
10	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (5)			
	802.11n	6	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	44	50 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
11	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (6)			
	802.11n	1	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	40	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
12	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (7)			
	802.11n	6	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	36	50 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
13	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (8)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	64	50 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz
14	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R (9)			
	802.11n	11	15 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 2.4GHz
	802.11ac	40	25 mW	Cisco AP2702E + AIR-ANT2566P4W-R 5GHz

1.5.3. Channel Bandwidth

Shows the maximum channel bandwidth available in each area.

