

Trabajo Final

Alumno: Higinio Alberto Facchini

(higiniofac@frm.utn.edu.ar)

**Especialización en Interconexión de
Redes y Servicios**

Director: Luis Marrone

**Título: “RENDIMIENTO DEL
ESTÁNDAR 802.11n – ESTRATEGIAS
DE MIGRACIÓN”**

Julio 2010

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 6 |
| 2. Desarrollo..... | 7 |
| 2.1. Historia de 802.11n..... | 7 |
| 2.2. Beneficios de 802.11n..... | 9 |
| 2.3. Funcionamiento general del estándar 802.11..... | 9 |
| 2.3.1. Arquitectura general y componentes..... | 9 |
| 2.3.2. Descripción de las capas del modelo OSI involucradas..... | 10 |
| 2.3.3. Funcionamiento capa MAC..... | 12 |
| 2.3.3.1. Función de Coordinación distribuida..... | 12 |
| 2.3.3.2. Función de Coordinación Puntual..... | 15 |
| 2.3.4. Funcionamiento capa Física..... | 16 |
| 2.4. Características de 802.11n..... | 18 |
| 2.4.1. Mejoras en la Capa Física..... | 19 |
| 2.4.1.1. MIMO..... | 19 |
| 2.4.1.1.1. Beamforming..... | 20 |
| 2.4.1.1.2. Multiplexación espacial y Diversidad espacial..... | 22 |
| 2.4.1.2. Esquemas de Codificación y Modulación (MCS)..... | 28 |
| 2.4.1.3. Intervalo de Guarda..... | 36 |
| 2.4.1.4. Ancho de Canal..... | 37 |
| 2.4.1.5. Formato de Trama..... | 38 |
| 2.4.1.6. Codificación Convolutiva..... | 41 |
| 2.4.2. Mejoras en la Capa MAC..... | 41 |
| 2.4.2.1. Agregación de Tramas..... | 41 |
| 2.4.2.1.1. Formato A-MSDU..... | 43 |
| 2.4.2.1.2. Formato A-MPDU..... | 44 |
| 2.4.2.2. Confirmación de Bloque..... | 45 |
| 2.4.2.2.1. ACK Inmediato y Retrasado..... | 45 |
| 2.4.2.2.2. ACK Inmediato de Alto Rendimiento..... | 46 |
| 2.4.2.3. Espacio Intertrama Reducido (RIFS)..... | 47 |
| 2.4.2.4. Ahorro de Energía..... | 48 |
| 2.4.2.4.1. Por Multiplexado Espacial..... | 48 |
| 2.4.2.4.2. Multiconsulta o PSMP..... | 48 |

| | |
|---|----|
| 2.4.2.5. Operación de Coexistencia de Fases..... | 50 |
| 2.4.2.6. Mecanismos de Protección..... | 52 |
| 2.4.2.7. Arquitectura de servicios capa de MAC..... | 53 |
| 2.4.3. Uso de 802.11n en la banda de 20 MHz..... | 54 |
| 2.4.4. Uso de 802.11n en la banda de 40 MHz..... | 55 |
| 2.5. Capacidad real de 802.11n..... | 56 |
| 2.6. Estrategias de Migración..... | 63 |
| 2.6.1. Consideraciones de Diseño..... | 66 |
| 3. Conclusiones..... | 71 |
| 4. Bibliografía..... | 75 |
| 5. Glosario..... | 77 |
| 6. Abreviaturas..... | 79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Esquema de Arquitectura y componentes 802.11..... | 10 |
| Figura 2: Comparación modelo OSI y capas involucradas en 802.11..... | 11 |
| Figura 3: Funciones de Coordinación de la capa MAC y sus relaciones..... | 13 |
| Figura 4: Formato general de la trama MAC en 802.11..... | 15 |
| Figura 5: Arquitectura de plano de datos capa MAC en 802.11..... | 16 |
| Figura 6: Formato PDU capa Física..... | 17 |
| Figura 7: Interferencia destructiva..... | 21 |
| Figura 8: Interferencia constructiva..... | 21 |
| Figura 9: Beamforming..... | 22 |
| Figura 10: Señales Multitrayecto..... | 23 |
| Figura 11: Entorno Multipaso..... | 24 |
| Figura 12: Ejemplo de aprovechamiento de múltiples señales..... | 25 |
| Figura 13: Implementación MIMO..... | 25 |
| Figura 14: Esquema MIMO 2x3..... | 27 |
| Figura 15: MIMO con Multiplexación de Diversidad espacial..... | 28 |
| Figura 16: Transmisión Beamforming..... | 28 |
| Figura 17: Diversidad espacial en la recepción..... | 28 |
| Figura 18: Multiplexación de Diversidad espacial con diversidad de antena..... | 28 |
| Figura 19: Interferencia multitrayecto..... | 36 |
| Figura 20: Símbolo OFDM..... | 37 |
| Figura 21: Canales de 20 y 40 MHz..... | 38 |
| Figura 22: Formato de trama Legado – no HT..... | 39 |
| Figura 23: Formato de trama Mixto..... | 39 |
| Figura 24: Formato de trama Greenfield..... | 40 |
| Figura 25: Overhead en las tramas..... | 42 |
| Figura 26: Agregación de tramas..... | 43 |
| Figura 27: A-MSDU..... | 44 |
| Figura 28: A-MPDU..... | 44 |
| Figura 29: ACK inmediato y retrasado..... | 46 |
| Figura 30: ACK inmediato de alto rendimiento..... | 47 |
| Figura 31: PSMP no programado..... | 49 |
| Figura 32: PSMP programado..... | 50 |
| Figura 33: Coexistencia en fase..... | 51 |
| Figura 34: Mecanismos de Protección..... | 53 |
| Figura 35: Arquitectura de servicios de datos MAC..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 36: Canales definidos para la banda de 2,4 GHz..... | 55 |
| Figura 37: Canales definidos para la banda de 5 GHz..... | 56 |
| Figura 38: Rendimiento esperado en 802.11n respecto a normas anteriores..... | 60 |
| Figura 39: velocidad de datos en 802.11n..... | 60 |
| Figura 40: velocidad de datos reales en 802.11n..... | 61 |
| Figura 41: comparación de velocidad en equipos reales en 802.11n..... | 63 |
| Figura 42: Área de cobertura de un AP 802.11n..... | 66 |
| Figura 43: plan de canales de 20MHz en 2,4GHz en 802.11n vs 802.11b/g..... | 67 |
| Figura 44: cobertura 802.11n usando microceldas de 5GHz..... | 67 |
| Figura 45: El uso de dos canales en un área congestionada..... | 71 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Relación capa MAC y física 802.11 original..... | 12 |
| Tabla 2: Relación capa MAC y física 802.11 ampliado..... | 12 |
| Tabla 3: Comparación estándares 802.11..... | 17 |
| Tabla 4: Parámetros para modo Mandatorio 20 MHz, NSS =1 (NES = 1)..... | 30 |
| Tabla 5: Parámetros para modo Mandatorio 20 MHz, NSS =2 (NES = 1)..... | 30 |
| Tabla 6: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos NSS =3 (NES = 2)..... | 31 |
| Tabla 7: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos NSS =4 (NES = 2)..... | 31 |
| Tabla 8: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos NSS =1 (NES = 1)..... | 31 |
| Tabla 9: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos NSS =2 (NES = 1)..... | 32 |
| Tabla 10: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos NSS =3 (NES = 2)..... | 32 |
| Tabla 11: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos NSS =4 (NES = 2)..... | 32 |
| Tabla 12: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos $N_{SS} = 2$ ($N_{ES} = 1$)..... | 33 |
| Tabla 13: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos $N_{SS} = 3$ ($N_{ES} = 2$)..... | 33 |
| Tabla 14: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos $N_{SS} = 4$ ($N_{ES} = 2$)..... | 34 |
| Tabla 15: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos $N_{SS} = 2$ ($N_{ES} = 1$)..... | 34 |
| Tabla 16: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos $N_{SS} = 3$ ($N_{ES} = 2$)..... | 35 |
| Tabla 17: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos $N_{SS} = 4$ ($N_{ES} = 2$)..... | 35 |
| Tabla 18: Rendimiento relativo 802.11n frente a anteriores..... | 58 |
| Tabla 19: Velocidades de datos en Mbps para 802.11 a/b/g/n..... | 59 |
| Tabla 20: Características OBLIGATORIAS para ser Wi-Fi Certified 802.11n..... | 72 |
| Tabla 21: Características OPTATIVAS para ser Wi-Fi Certified 802.11n..... | 73 |

1. INTRODUCCIÓN:

No es ningún secreto que durante los últimos años, las redes LAN inalámbricas ha transformado la manera que la gente se conecta, ya sea en el trabajo y/o en el hogar, con Internet, su Intranet y Extranet.

La demanda de hardware de red LAN inalámbrica ha experimentado un crecimiento fenomenal durante los últimos años, pasando de lo que era una novedad a una necesidad creciente. Hasta ahora, la demanda ha sido impulsada principalmente por los usuarios que desean conectar un ordenador personal a las redes de ordenadores en el trabajo y la Internet en el hogar, así como en el café, tiendas, aeropuertos, hoteles y otros lugares de reunión móviles. Como resultado, la tecnología Wi-Fi® se encuentra más comúnmente en computadoras portátiles y en dispositivos de acceso a Internet tales como routers y módems DSL o de cable. De hecho, actualmente, todos los ordenadores portátiles ahora vienen con WLAN integrado.

La penetración creciente de Wi-Fi está ayudando a extender la tecnología más allá de la de PC y en aplicaciones de electrónica de consumo, como la telefonía por Internet, la música, juegos y visualización de fotos e incluso en la transmisión de vídeo en casa.

Las tecnologías móviles también han demostrado madurez en las grandes empresas, facultar a los trabajadores y aumentar la productividad, al aumentar enormemente el acceso a herramientas e información. Estos nuevos usos, así como el creciente número de usuarios de LAN inalámbrica convencional, conllevan a pedir mejores características de transmisión en redes Wi-Fi. Afortunadamente, una solución ya está a mano. La IEEE finalmente aprobó un nuevo estándar inalámbrico (**802.11n**) que promete tanto mayores tasas de datos como de mayor confiabilidad. La norma 802.11n es una tecnología que permite a las redes de Wi-Fi hacer una conexión más rápida y sobre un área más grande. 802.11n proporciona la mejor conexión disponible para los usos del establecimiento de una red, entregando la gama y el ancho de banda necesarios para los productos de tráfico de distintos tipos de datos (voz, video, etc) y las aplicaciones multimediales que se exigen en la actualidad. [1]

El propósito de este descriptivo es explicar el funcionamiento y las mejoras introducidas en el estándar 802.11n de la IEEE, para comprender las nuevas características tecnológicas que le permiten entregar hasta cinco veces el rendimiento de procesamiento y de velocidad de datos comparado con las tecnologías de Wi-Fi de la

anterior generación. Además se consideran distintas estrategias de migración de las tecnologías anteriores a este nuevo estándar.

2. DESARROLLO:

2.1 HISTORIA 802.11n:

El estándar original de este protocolo data de 1997, denominado IEEE 802.11, que tenía velocidades de 1 hasta 2 Mbps y trabajaba en la banda de frecuencia de 2,4 GHz El término IEEE 802.11 se utiliza también para referirse a este protocolo, y actualmente se conoce como "802.11 legacy".

La siguiente modificación apareció en 1999 y es designada como IEEE 802.11b. Esta especificación tiene velocidades de 1 hasta 11 Mbps y trabaja en la frecuencia de 2,4 GHz También se realizó una especificación sobre una frecuencia de 5 Ghz que alcanzaba los 54 Mbps utilizando OFDM, denominada 802.11a y resultaba incompatible con los productos de 802.11b.

En el año 2003 se incorporó un estándar que alcanzaba, utilizando OFDM, la misma velocidad que 802.11a pero en la banda de 2.4Ghz que además es compatible con 802.11b y que recibe el nombre de 802.11g.

Mientras tanto, algunos grupos interesados en obtener una extensión a las velocidades dadas en 802.11a, en enero de 2002 presentaron un grupo denominado WNG SC (siglas en inglés de Wireless Next Generation Standing Committee) o Comité Permanente de la Siguiete Generación de redes Inalámbricas. El mismo realizó varias presentaciones, donde se mencionaba la posibilidad de tomar nuevas técnicas de multiplexación espacial e incluso incrementar el ancho de banda para de esta manera aumentar la velocidad de transmisión.

Luego de varias presentaciones se forma en septiembre del mismo año el grupo HTSG (High Throughput Study Group) de estudios de alto rendimiento, cuyo objetivo era completar 2 documentos para la posterior creación del grupo de trabajo TGn (Throughput Group) de alto rendimiento, llevándose a cabo su primera reunión en septiembre de 2003. Este momento se considera el momento de arranque de la norma 802.11n, cuyos objetivos eran:

- Obtener un rendimiento mayor en la transmisión de datos, de por lo menos 100 Mbps, como alternativa frente a FastEthernet; aunque ya se hablaba de velocidades superiores a los 300 Mbps.
- Ser compatible con las normas anteriores.

- Mejoras en los aspectos de seguridad y de confiabilidad en la transmisión.

El TGn realizó una convocatoria a propuestas para lograr estos objetivos en mayo de 2004. Finalmente se analizaron 32 propuestas, de las cuales sólo 4 se llevaron a votación, que fueron:

- MITMOT (Mac and mImo Technologies for More Throughput), grupo compuesto por Motorola y Mitsubishi, entre otros.
- TGnSync (Task Group n Synchronization), grupo compuesto por Cisco, Intel, Nortel, Sony, Toshiba, entre otros.
- WWiSE (World Wide Spectrum Efficiency), grupo compuesto por Nokia, Motorola, Texas Instruments, NTT, Broadcom, entre otros.
- Qualcomm

En la siguiente reunion de Enero de 2005, solo se presentaron las tres primeras propuestas (MITMOT, TGnSync y WWiSE) como soluciones completas; y al final de la reunión se descartó finalmente MITMOT.

En Marzo de 2005 se votó finalmente por el Grupo TGnSync, aunque no se llegó a la mayoría necesaria. En Mayo de 2005 se realizó una nueva votación que tampoco alcanzó la mayoría; por lo que el TGn sugiere la presentación nuevamente de los tres grupos originales (MITMOT, TGnSync y WWiSE).

En Julio de 2005 se recomienda que los tres grupos elegidos deben trabajar juntos para elevar una propuesta común. Después de varias revisiones y esfuerzos de fusionar las distintas propuestas, en Marzo de 2006 se produce el primer borrador oficial llamado **802.11n draft 1.0**.

Este borrador incluye lo siguiente:

- El uso de la tecnología de multiplexación espacial llamada MIMO
- La agregación de paquetes en tramas tipo “jumbo” (tramas de mayor longitud)
- Permitir canales de mayor ancho de banda (40 MHz en lugar de 20 MHz)
- Mejorar la codificación de la señal para aumentar la eficiencia

El TGn Draft 1.0 fue puesto a votación en marzo de 2006 pero no alcanzó el 75% necesario para su aprobación y tuvo cerca de 6000 comentarios técnicos, por lo que se sugiere que no sea una base para la fabricación de equipos comerciales.

Después de varias revisiones, se creó el **TGn Draft 2.0** el cual se puso en carta de votación (Letter ballot) en marzo de 2007, la cual obtuvo el 83% de los votos favorables; y, a pesar, de tener alrededor de 3000 comentarios técnicos y de editorial, se comenzaron a fabricar comercialmente equipos basados en **802.11n draft 2.0**, razón por

la cual se la denomina también como pre-802.11n. Esto se basa en la consideración que ya no habrá modificaciones sustanciales de hardware en sus características obligatorias (mandatory), y las posibles correcciones estarán basadas en actualizaciones del firmware de los equipos.

Finalmente, y después de varias revisiones adicionales, se aprueba la norma **802.11n** el 11 de Septiembre de 2009. [2] [3] [4] [5] [18]

Como consecuencia de la aprobación del borrador 2.0, la organización WiFi Alliance (www.wi-fi.org) comenzó a certificar productos basados en **802.11n draft 2.0** a partir de Junio del 2007. [6]

Actualmente certifica los equipos ya basados en el estándar aprobado, considerando que todos los equipos certificados anteriormente cumplen todos los requisitos de la norma, de acuerdo a lo que el mismo Director Ejecutivo Edgar Figueroa de la Wi-Fi Alliance expresó “*Draft 2.0 products will be allowed to claim to be fully 802.11n certified now.*”

2.2 BENEFICIOS DE 802.11n:

Se considera que esta nueva norma debe lograr los siguientes beneficios:

- Mayor velocidad de transferencia de datos.
- Mayor Rango de alcance
- Mayor Capacidad a la red
- Bajo consumo
- Uso eficiente del espectro
- Cobertura más uniforme, reduciendo el efecto de las trayectorias multipasos
- Compatibilidad con equipamientos anteriores de las normas IEEE 802.11 a/b/g: utiliza las mismas frecuencias (2,4 y 5 GHz) y los mismos sistemas de modulación.
- Costos de red más bajos: al tener mayor cobertura se necesitan menos Access Points y por lo tanto menores costos de instalación. Se puede utilizar todo el equipamiento existente.

2.3 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL ESTÁNDAR 802.11

En este punto se describe brevemente el funcionamiento del estándar 802.11 para poder, posteriormente, explicar todas las mejoras introducidas en el nuevo estándar 802.11n.

2.3.1 Arquitectura General y Componentes

Una red LAN inalámbrica 802.11 está basada en una arquitectura celular donde el sistema se subdivide en celdas, donde cada celda (llamada Basic Service Set, o BSS) se controla por una estación base (llamada Access Point o AP). (Figura 1)

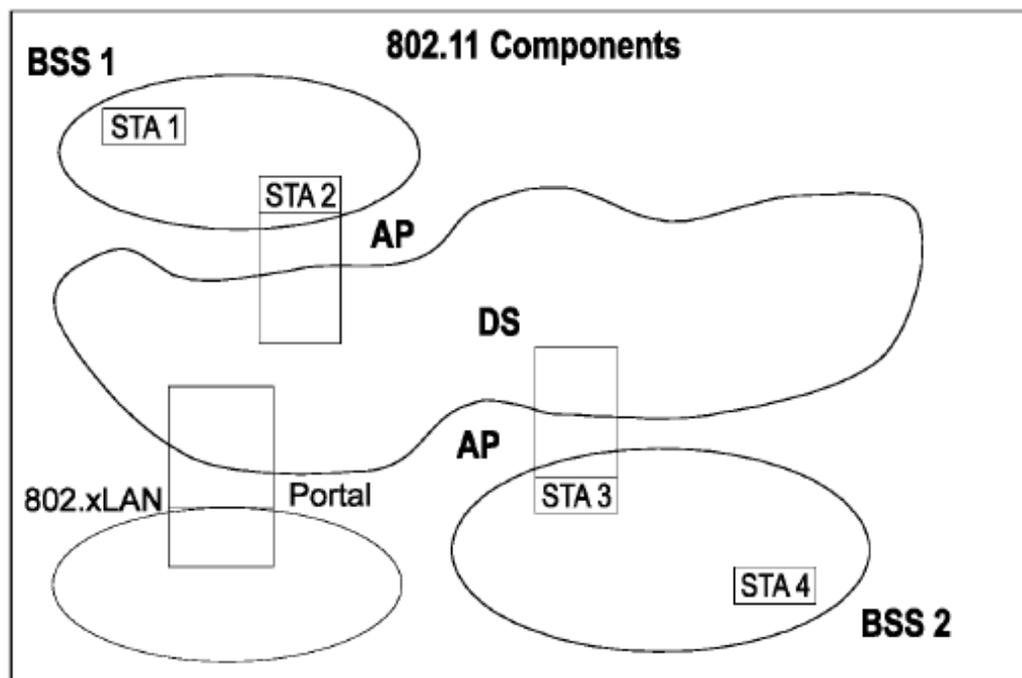


Figura 1: Esquema de Arquitectura y componentes 802.11

El sistema puede estar formado por una única celda con un único AP (un BSS) o, más comúnmente, por varias celdas donde los APs están unidos por un tipo de enlace troncal (o backbone), siendo una red Ethernet la más utilizada. Este sistema en su conjunto se llama Sistema de Distribución (Distribution System o DS)

Esta red inalámbrica, en su conjunto, formada por las celdas, sus respectivos APs y el DS, es visto por las capas superiores del modelo OSI, como una única red 802.11 y se llama Conjunto de Servicios Extendidos (Extended Service Set o ESS).

Otro componente es el Portal, que es aquel que permite la conexión entre una red 802.11 y una red 802.1x

2.3.2 Descripción de las capas del modelo OSI involucradas:

Como cualquier protocolo 802.1x, el protocolo 802.11 involucra las capas Física y de Enlace de Datos (subcapas MAC y LLC) del modelo OSI. (Figura 2)

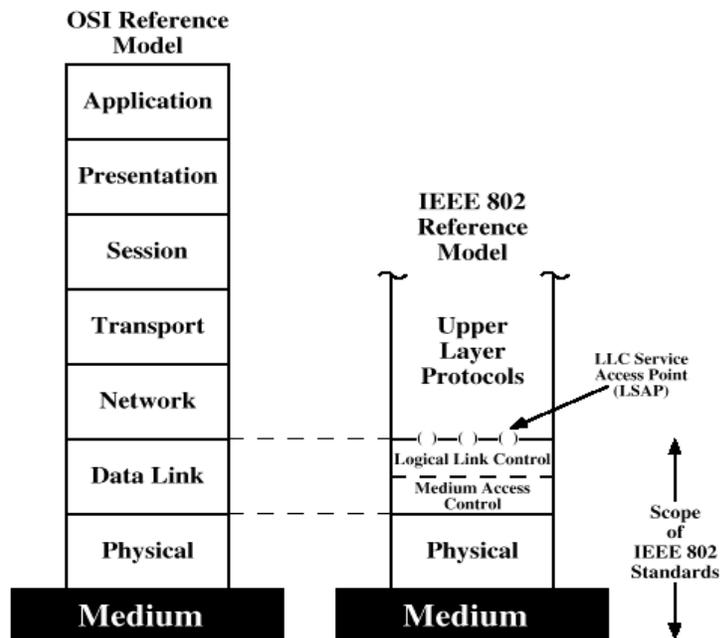


Figura 2: Comparación modelo OSI y capas involucradas en 802.11

Las funciones de cada capa son:

- Funciones de la capa física:
 - Codificación/decodificación de las señales
 - Generación y remoción del Preámbulo (para sincronización)
 - Transmisión/recepción de bits
 - Incluye especificaciones del medio de transmisión
- Funciones de la capa del Control de Acceso al Medio (MAC):
 - En transmisión, ensamblado de datos en una trama con campos de direccionamiento y detección de errores
 - En recepción, desensamblado de trama y reconocimiento de direcciones y detección de errores
 - Administra el acceso al medio de transmisión LAN
- Funciones de la capa de Control de Enlace Lógico (LLC):
 - Provee una interface hacia las capas superiores y realiza control de errores y de flujo

El estándar original plantea una capa MAC interactuando con 3 capas físicas: (Tabla 1) [7]

- Espectro Expandido con Salto de Frecuencias (FHSS) en la banda de frecuencias de 2,4 GHz

- Espectro Expandido de Secuencia Directa (DSSS) en la banda de frecuencias de 2,4 GHz (y, posteriormente, 5 GHz)
- Infrarrojo (IR).

| | | | |
|------------|------|----|-------------------------|
| 802.2 | | | Capa de Enlace de Datos |
| 802.11 MAC | | | |
| FHSS | DSSS | IR | Capa Física |

Tabla 1: Relación capa MAC y física 802.11 original

Mientras que, actualmente, se amplía ese espectro de acuerdo a las distintas normas que le siguieron al estándar inicial. (Tabla 2)

| | | | | | | |
|----------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| 802.2 LLC | | | | | | Capa de Enlace de Datos |
| 802.11 MAC | | | | | | |
| FHSS 802.11 | DSSS 802.11 | IR 802.11 | DSSS 802.11b | DSSS 802.11a | DSSS 802.11g | Capa Física |

Tabla 2: Relación capa MAC y física 802.11 ampliado

La capa MAC, además de las funciones estándares definidas para cualquier norma 802.x, realiza otras funciones que, típicamente, están reservadas para protocolos de capas superiores, tales como Fragmentación, Retransmisión de Paquetes y Confirmaciones de Recepción de Paquetes.

2.3.3 Funcionamiento capa MAC:

La capa MAC define dos métodos de acceso: (Figura 3)

- Función de Coordinación distribuida
- Función de coordinación puntual.

2.3.3.1 El método básico es el de Función de Coordinación Distribuida y se basa en una modificación del método de Ethernet (CSMA/CD). En lugar de detectar las colisiones que se producen en un medio compartido, trata de evitarlas, dando lugar al nombre de CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

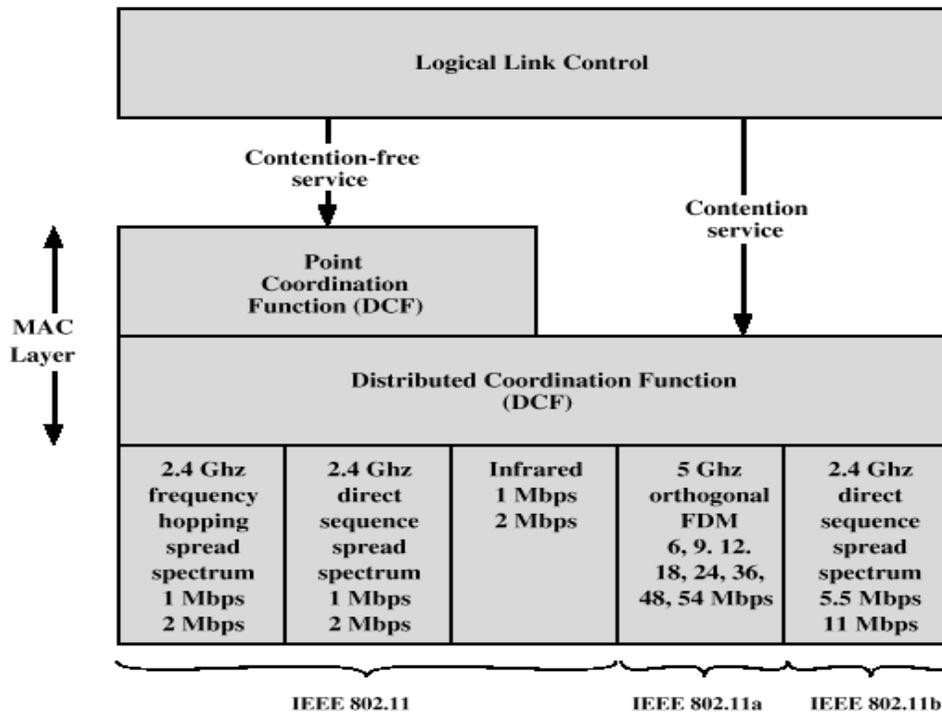


Figura 3: Funciones de Coordinación de la capa MAC y sus relaciones.

El protocolo CSMA funciona considerando que una estación que desea transmitir, sensa el medio, si el medio está ocupado (por ejemplo otra estación está transmitiendo), entonces, la estación difiere su transmisión por un tiempo determinado; si el medio sensado está libre, se produce la transmisión.

Estos protocolos son muy efectivos cuando el medio no tiene excesiva carga, dado que permite que las estaciones transmitan con mínimo retardo; pero siempre está la posibilidad de que dos estaciones transmitan a la vez y se produzca una colisión. Estas situaciones de colisión deben identificarse, de modo que la capa MAC pueda retransmitir la trama y no las capas superiores, lo que significaría un retardo importante. En el caso de Ethernet, las colisiones se reconocen por las estaciones transmisoras, las cuales pasan a una fase de espera basada en un algoritmo de *exponential random backoff*.

Este mecanismo es bueno para una red cableada, pero no en un entorno inalámbrico debido a:

- En este entorno no se puede asumir que todas las estaciones se escuchan entre sí (lo que es la característica básica de un esquema de detección de colisiones) y, por lo

tanto, cuando una estación sensa el medio como libre en su área de transmisión, no significa efectivamente que esté libre alrededor del área de recepción.

- Debido a lo anterior, podría ser necesario implementar un radio con capacidad Full Duplex, que sea capaz de transmitir y recibir simultáneamente, lo que podría incrementar el precio significativamente.

Para evitar estos problemas, 802.11 usa un mecanismo de “evitar las colisiones” junto con un esquema de “Confirmación de tramas Positivo”, que funciona de la siguiente manera:

Una estación, que desea transmitir, sensa el medio, si el medio está ocupado se difiere la transmisión. Si el medio está libre por un tiempo especificado (llamado DIFS, *Distributed Inter Frame Space*) entonces la estación puede transmitir; la estación receptora comprobará el campo CRC de la trama recibida y enviará una trama de confirmación (ACK). La recepción de esta trama le indicará al transmisor que no ocurrió ninguna colisión. Si el equipo transmisor no recibe la confirmación, retransmitirá el fragmento hasta que reciba el ACK o haya intentado un número dado de retransmisiones.

Los protocolos de LAN típicos usan tramas de varios cientos de bytes (ej. Ethernet hasta 1518 bytes), mientras que en entornos inalámbricos hay razones por las cuales se prefiera usar tramas más pequeñas:

- Debido la mayor tasa de error de un enlace de radio, la probabilidad de una trama con error se incrementa con el tamaño de la misma.
- En el caso de tramas con error (por colisión o por ruido), a trama más pequeña es menor el costo de su retransmisión.

También es posible que un protocolo no pueda enviar tramas tipo Ethernet de 1518 bytes, de modo que se decidió resolver el problema agregando un mecanismo simple de fragmentación/reensamblado en la capa MAC. El mecanismo es un algoritmo tipo Send-and-Wait, donde la estación transmisora no puede transmitir un nuevo fragmento hasta que suceda una de las siguientes cosas:

- Recibe un ACK por ese segmento enviado, o
- Decide que el fragmento fue retransmitido demasiadas veces y descarta la trama completa.

Debe notarse que el estándar permite que la estación transmita a diferentes direcciones destino entre retransmisiones de un fragmento dado; y esto es muy útil cuando un AP tiene tramas a transmitir a diferentes destinos y uno de ellos no responde.

Hay tres tipos de tramas principales MAC para el funcionamiento de 802.11:

- de Datos: que se usan para transmitir los datos propiamente dichos.
- de Control: que se usan para controlar el acceso al medio (ej. RTS, CTS, y ACK), y
- de Administración: que se transmiten como tramas de datos para intercambiar información de administración y configuración, pero no se envían a las capas superiores.

Cada uno de estos tipos, se pueden dividir en subtipos, de acuerdo a su función específica. [7] [8]

El formato general de una trama MAC es: (Figura 4)

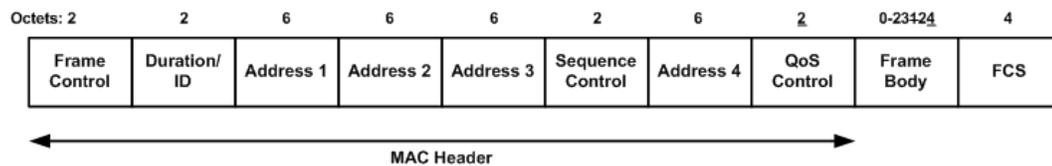


Figura 4: Formato general de la trama MAC en 802.11

2.3.3.2 Además del método DCF, hay uno opcional, llamado Función de Coordinación Puntual (PCF), que se puede usar para implementar servicios con restricciones de tiempo, tales como transmisiones de voz y video. Esta función hace uso de una mayor prioridad para que el AP use el menor espacio intertrama (Point Inter Frame Space - PIFS). Usando este acceso por prioridad, el AP envía consultas a las estaciones para que transmitan datos y así controlar el acceso al medio. Además para permitir que las estaciones comunes mantengan la capacidad de acceder al medio, hay una previsión que el AP debe dejar suficiente tiempo para el Acceso Distribuido entre los accesos PCF.

La arquitectura de plano de datos de la capa MAC es el esquema que representa los procesos que involucran el transporte de todas o parte de una MSDU, y se muestra en la siguiente figura. Durante la transmisión, una MSDU pasa por uno o todos de los siguientes procesos: envío de tramas diferidos durante el modo de ahorro de energía (power save mode), asignación de número de secuencia, fragmentación, encriptación, protección de integridad, y formateo de trama. De acuerdo al estándar IEEE 802.1X-2004 se puede bloquear la MSDU en el puerto Controlado (Controlled Port). En este punto, las tramas de datos que contienen todo o parte de la MSDU se encolan por AC/TS. Este encolado puede ser en cualquiera de los tres puntos indicados en la Figura. Durante la recepción, una trama de datos recibida pasa a través de los procesos de cabecera MPDU y validación del código de redundancia cíclica (CRC), remoción de

duplicados, posible reordenamiento si se usa el mecanismo de confirmación de bloque, descryptación, defragmentación, chequeo de integridad, y detección de reenvío. Después de la detección de reenvío (o defragmentación si se usa seguridad, la MSDU se envía a MAC_SAP o al DS. La IEEE 802.1X Controlled/Uncontrolled Ports descarta la MSDU si el Puerto controlado no está habilitado y si la MSDU no representa una trama IEEE 802.1X. El ordenamiento de tramas TKIP y CCMP MPDU ocurre después de la descryptación, pero previo a la defragmentación MSDU; por lo tanto, la defragmentación fallará si las MPDUs llegan fuera de orden. [8]

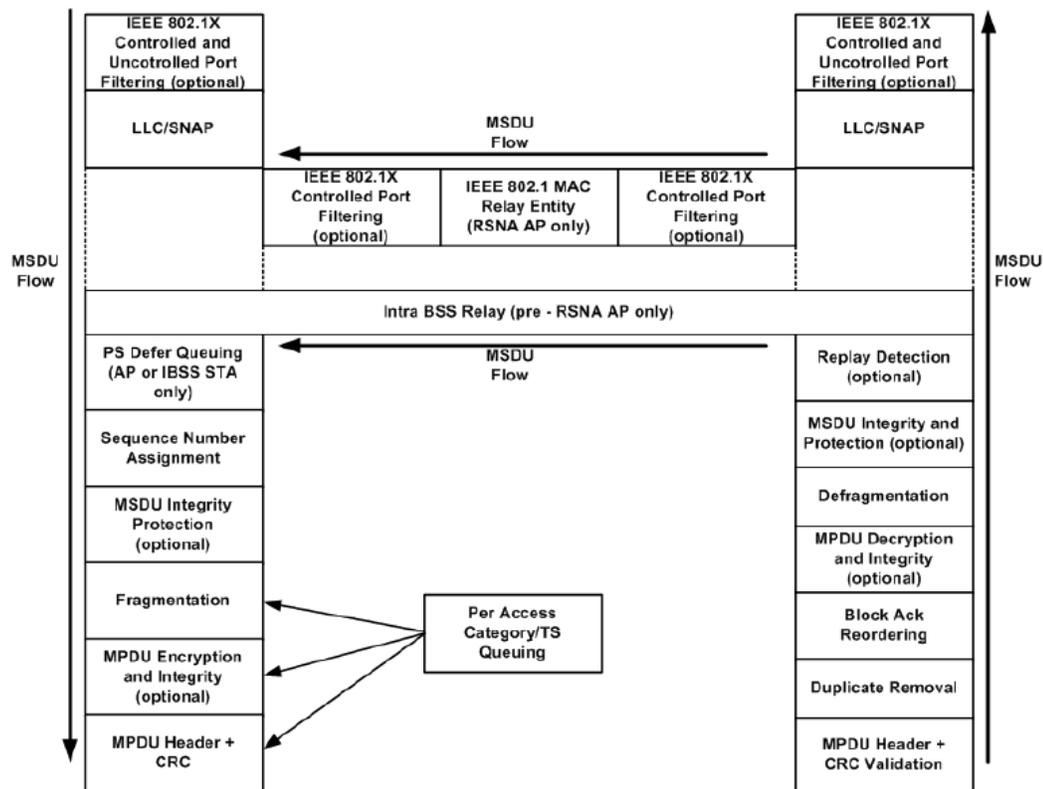


Figura 5: Arquitectura de plano de datos capa MAC en 802.11

2.3.4 Funcionamiento Capa física:

Anteriormente se dijo que las funciones básicas de la capa física son de codificar/decodificar señales, la generación de preámbulos para sincronización y la transmisión/recepción de los bits por el medio. Además incluye una especificación del medio de transmisión y la topología. Esto involucra una división de la capa física en dos subcapas: [9]

- Procedimiento de convergencia de capa física (PLCP): define un método de mapear las unidades de datos de protocolo MAC (MPDUs) en un formato de

trama compatible para enviar y recibir los datos de usuarios y la información de administración entre dos ó más estaciones usando la subcapa PMD

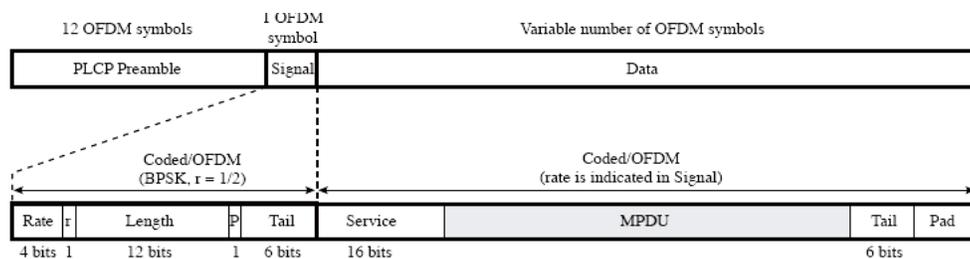
- Subcapa dependiente del medio físico (PMD): define las características de los datos de usuario y el método de transmitirlos y recibirlos a través de un medio inalámbrico entre dos ó más estaciones.

Los estándares de capa física definidos en 802.11x son (sin considerar 802.11n):

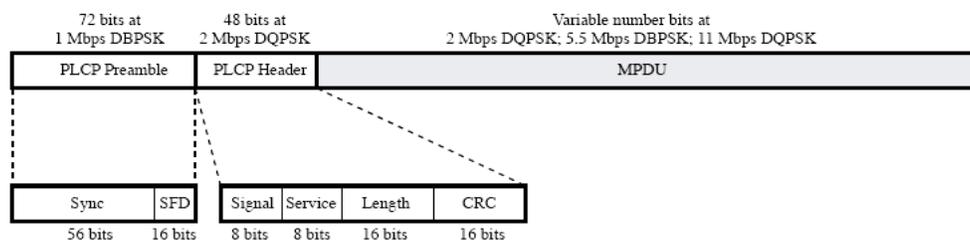
| | 802.11 | 802.11a | 802.11b | 802.11g |
|---|---------------------------------|--|--------------------------|--|
| Ancho de Banda | 83.5 MHz | 300 MHz | 83.5 MHz | 83.5 MHz |
| Frecuencia de funcionamiento no licenciada | 2,4 – 2,4835 GHz DSSS - FHSS | 5,15 – 5,35 GHz - OFDM 5,725 – 5,825 GHz - OFDM | 2,4 – 2,4835 GHz DSSS | 2,4 – 2,4835 GHz DSSS - OFDM |
| Número de canales sin solapamiento | 3 (interior/exterior) | 4 (interior/exterior) | 3 (interior/exterior) | 3 (interior/exterior) |
| Velocidad de datos por canal | 1, 2 Mbps | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps | 1, 2, 5.5, 11 Mbps | 1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps |

Tabla 3: Comparación estándares 802.11

En la capa física se toma la trama MAC y se le agrega información adicional para sincronización y manejo del medio. Como ejemplo se muestra el formato de trama de capa física para 802.11a y b:



(a) IEEE 802.11a physical PDU



(b) IEEE 802.11b physical PDU

Figura 6: Formato PDU capa Física

Hasta acá se realizó un breve descriptivo de las tecnologías anteriores a 802.11n, sin entrar en mayores detalles. Para mayor información ver [7][8][9]

2.4 CARACTERÍSTICAS DE 802.11n:

Para lograr los beneficios enumerados anteriormente, se introducen las siguientes mejoras:

En la capa física:

- Características necesarias: son aquellas características que deben obligatoriamente existir, ya sea por característica propia nueva en la norma 802.11n o que deban existir como compatibilidad con las normas anteriores 802.11 a/b/g:
 - Multiplexación por división Espacial a través de MIMO
 - 1 y 2 haces espaciales
 - Esquema de Modulación y Codificación (MCS).
 - Intervalo de Guarda de 800ns (GI - guard interval).
 - Ancho de canal de 20 MHz.
 - Formato de trama en modo mixto y hereditario (Legacy and Mixed).
 - Sondeo de canal (Channel Sounding).
 - Espacio intertrama reducido (RIFS - Reduced Interframe Space).
- Características optativas: son aquellas características sólo compatibles con equipamiento de norma n, y que logran las mayores velocidades y mejora de la distancia y la performance.
 - Hasta 4 haces espaciales.
 - Soporte de ancho de canal de 40/20 MHz.
 - Intervalo de Guarda corto (GI=400ns).
 - Mapeado espacial:
 - Formación del haz a transmitir (Beam forming).
 - Expansión Espacial.
 - STBC (Space-Time Block Code).
 - Formatos de trama GreenField.
 - Codificación avanzada.
 - Código de chequeo de paridad de baja densidad (Low Density Parity Check Code)

En la capa MAC:

- Características necesarias:
 - Agregación de tramas (Frame Aggregation)
 - A-MPDU (muchas tramas bajo una única cabecera física).
 - A-MSDU (muchas tramas bajo una cabecera Física/MAC).
 - Confirmación de Bloque (Block ACK).
 - ACK Inmediato
 - ACK Retrasado
 - Mecanismos de Protección.
 - Long NAV.
 - PHY level spoofing.
 - RIFS Protection.
 - Green Field Protection.
 - Ahorro de Energía MIMO (power save).
 - Coexistencia 20/40.
 - Open & CCMP Security Mode (WPA2).
- Características optativas:
 - Confirmación de Bloque (Block ACK).
 - ACK de bloque retrasado de alto rendimiento.
 - Mecanismos de Protección.
 - L-SIG TXOP protection.
 - Reverse Direction.
 - PSMP (Power Save Multi-poll).
 - PCO (Phased Coexistence Operation).
 - Fast Link Adaptation.
 - PHY related.
 - Transmit Beam forming.
 - ZLF (Zero Length Frame) Sounding.
 - Calibración.
 - Selección de antenas.
 - Control de tramas STBC.

2.4.1 Mejoras en la Capa Física:

2.4.1.1 MIMO

La sigla MIMO (Múltiple-entrada múltiple-salida) es el corazón de 802.11n. Esta técnica proporciona una base para comprender cómo 802.11n puede llegar a velocidades de transmisión de datos de 600 Mbps. [10]

Para entender las mejoras introducidas por la tecnología MIMO, es importante comprender algunos de los fundamentos que determinan la forma tradicional de funcionamiento de una señal de radio. En un esquema tradicional, de una sola señal de entrada y una sola señal de salida, la cantidad de información que puede ser transportado por una señal de radio recibida depende de la cantidad por la que la señal recibida supera el ruido en el receptor, llamada la relación señal-ruido, o SNR. SNR suele ser expresado en decibelios (dB). A mayor SNR, más información se puede llevar en la señal y ser recuperada por el receptor.

Una onda de radio se dispersa de manera uniforme a partir de su fuente; cuanto más lejano se encuentra el receptor del origen, menos potencia se recibe en el receptor. De hecho, la cantidad de energía recibida disminuye más rápidamente que el cuadrado de la distancia del origen. El ruido, por desgracia, es con frecuencia constante en el medio ambiente, debido tanto a causas naturales como aquellas provocadas por el hombre.

Por lo tanto es necesario tener una SNR mínima para conseguir el intercambio de información a una tasa de transmisión deseada. Si consigo una mayor (mejor) relación SNR, puedo aumentar la información enviada, aumentar la distancia de transmisión, o un poco de ambos.

MIMO aprovecha la tecnología de otras técnicas para mejorar la SNR en el receptor:

- Beamforming
- Multiplexación espacial y Diversidad espacial

2.4.1.1.1 Beamforming:

Una técnica es conformar varios haces de señal como si fuera uno solo, o *beamforming*. Cuando hay más de una antena de transmisión, es posible coordinar los envíos de las señales de cada antena para que la señal en el receptor sea mejorada. Esta técnica se utiliza generalmente cuando el receptor tiene una sola antena y cuando hay pocos obstáculos o superficies reflectantes de ondas de radio (por ejemplo, grandes depósitos de almacenamiento abiertos).

Para entender la transmisión beamforming, considere la posibilidad de una señal de radio como una forma de onda, con una longitud de onda que es específica de la frecuencia de la señal. Cuando dos señales de radio son enviados desde diferentes antenas, estas señales se suman en la antena del receptor. Dependiendo de la distancia

que cada señal de radio viaja, es muy probable que lleguen al receptor desfasadas una de la otra. Esta diferencia en la fase en el receptor afecta a la señal recibida, conformando lo que se llama una *Interferencia Destructiva*. (Figura 7).

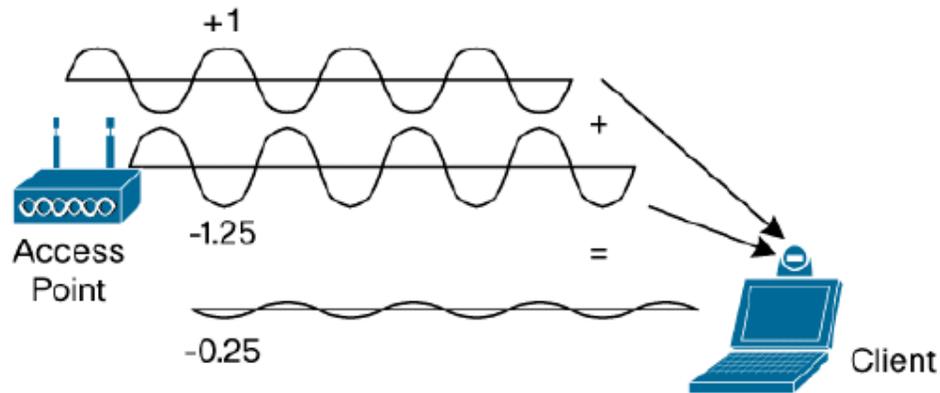


Figura 7: Interferencia destructiva

Pero, si cuidadosamente se realiza una adaptación de las fases de las señales de radio en el emisor, la señal recibida puede ser maximizada en el receptor, lo que aumenta la SNR. Esto es lo que realiza beamforming. (Figura 8)

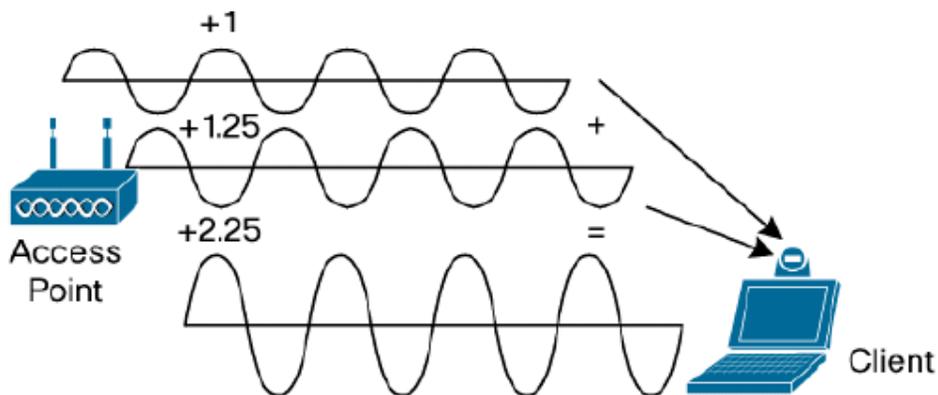


Figura 8: Interferencia constructiva

La transmisión de beamforming no es algo que se puede hacer fácilmente en el transmisor sin información del receptor acerca de la señal recibida. Esta información está disponible sólo a partir de dispositivos 802.11n, y no en dispositivos 802.11a/b/g. Para maximizar la señal en el receptor, información del receptor debe ser enviado al emisor a fin de que el transmisor pueda sintonizar cada señal que envía. Esta información no es inmediata y sólo es válida durante un corto período de tiempo. Cualquier movimiento físico realizado por el transmisor, receptor, o elementos en el medio ambiente rápidamente invalidan los parámetros utilizados para beamforming. La

longitud de onda de 2.4 GHz radio es sólo 120 mm, y sólo 55mm de 5-GHz radio. Por lo tanto, un movimiento de un paso normal de un metro por segundo, rápidamente sacará al receptor del lugar donde las características de transmisión del beamforming son más eficaces.

Transmitir beamforming es útil sólo cuando se transmite a un único receptor. No es posible optimizar las fases de las señales de transmisión cuando se envían señales de broadcast o multicast. Por esta razón, en general en las aplicaciones de redes, la utilidad de transmitir beamforming es limitada. Transmitir beamforming puede aumentar la velocidad de transmisión de datos disponibles a mayores distancias del AP. Sin embargo, no aumenta el área de cobertura de un punto de acceso, ya que es determinado, en gran parte, por la capacidad de recibir (por la estación receptora) de las tramas testigos (beacons) emitidas por el AP. (Figura 9) [11]

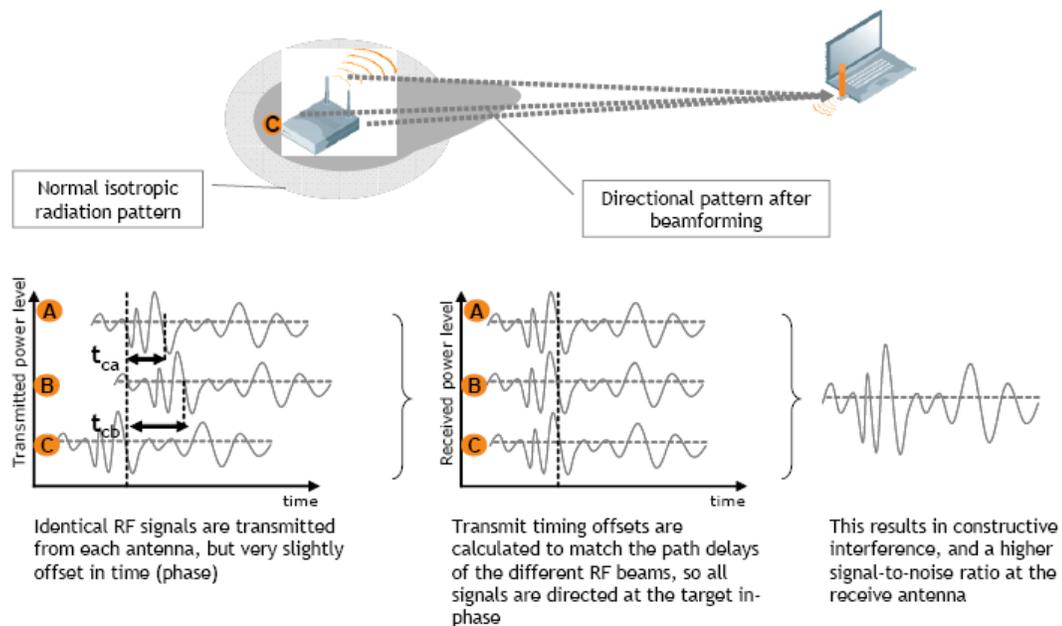


Figura 9: Beamforming

En 802.11n, beamforming permitirá que un AP enfoque su transmisión a un cliente en particular en el sentido de ese cliente (y viceversa para un cliente con múltiples antenas), lo que permite una mayor relación señal a ruido más altas y tasas de datos por lo tanto mayores.

2.4.1.1.2 Multiplexación espacial y diversidad espacial [10]

En los lugares típicos de uso de WLAN, por ejemplo, oficinas, hospitales y depósitos, la señal de radio rara vez toma el camino más corto, más directo desde el transmisor al receptor. Esto se debe a que no siempre hay "línea de vista" entre el transmisor y el

receptor. A menudo hay una pared, puerta, u otra estructura que oculta la línea de visión. Todos estos obstáculos reducen la fuerza de la señal de radio que pasa a través de ellos. Por suerte, la mayoría de estos ambientes están llenos de superficies, que reflejan la señal de radio, así como un espejo refleja la luz.

Imagine que todas las superficies metálicas, grandes y pequeñas, que están en un medio ambiente son en realidad espejos. Clavos y tornillos, marcos de puertas, el techo de suspensión, vigas estructurales son todos reflectores de las señales de radio. Sería posible ver el mismo punto de acceso WLAN en muchos de estos espejos simultáneamente. Algunas de las imágenes del punto de acceso sería un reflejo directo a través de un único espejo. Algunas imágenes serían un reflejo de una reflexión. Aún más, algunos podrían participar de un número mayor de reflexiones. Este fenómeno es denominado multitrayecto (*Figura 10*).

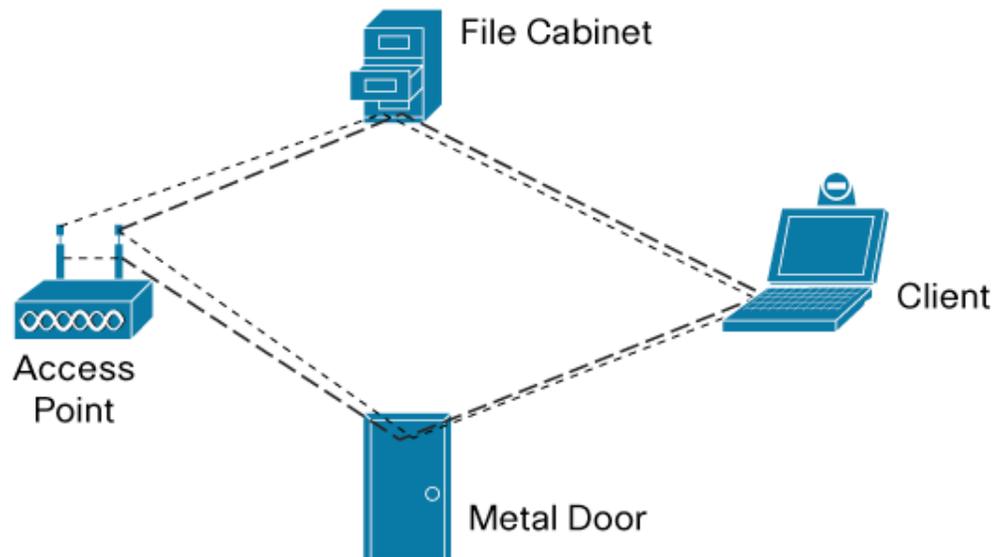


Figura 10: Señales Multitrayecto

Cuando una señal viaja por diferentes caminos a un solo receptor, el tiempo que la señal llega al receptor depende de la longitud de la ruta que recorrió. La señal que viaja el camino más corto llega en primer lugar, seguido de las copias o ecos de la señal ligeramente retrasado por cada uno de los caminos distintos que las copias viajaron. Como las señales de radio viajan a la velocidad de la luz, los retrasos entre la primera señal en llegar y sus copias es muy pequeño, sólo nanosegundos. (La distancia recorrida por la señal a la velocidad de la luz es de aproximadamente 30 cm por un nanosegundo.) Este retraso es suficiente para ser capaz de causar significativa degradación de la señal

en una sola antena porque todos los ejemplares interfieren con la primera señal en llegar.

Un radio MIMO envía múltiples señales de radio al mismo tiempo y se aprovecha de multitrayecto. Cada una de estas señales se denomina un flujo espacial. Cada secuencia espacial es enviada desde su propia antena, utilizando su propio transmisor. Porque hay algo de espacio entre cada una de estas antenas, cada señal sigue una trayectoria ligeramente diferente al receptor. Esto se llama *diversidad espacial*. Cada radio puede también enviar un flujo de datos diferentes de los otros radios. El receptor dispone de varias antenas como así, cada uno con su propia emisora de radio.

Para comprender mejor su funcionamiento, tomemos el siguiente ejemplo de funcionamiento básico (sin MIMO - *Figura 11*): [11]

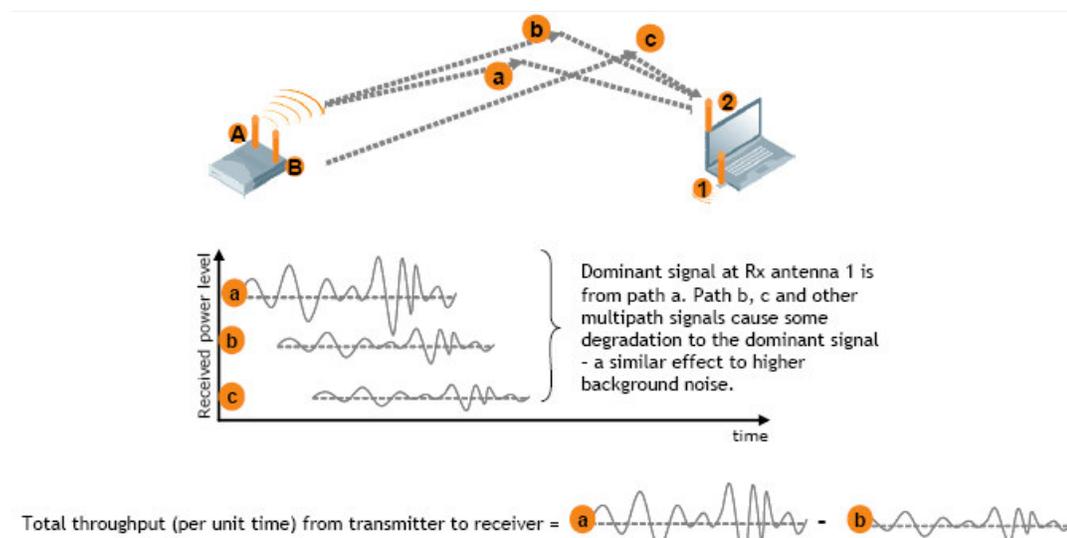


Figura 11: Entorno Multitrayecto

En este ejemplo, hay 3 señales multipasos que llegan a la antena 2. La señal más fuerte es la **a**, y la información transportada en esta señal será decodificada. Las demás señales son más débiles y están desplazadas en fase comparadas con **a**, de modo que ellas degradarán la relación señal-ruido asociada con **a**.

Sin embargo, cuando se consideran múltiples antenas, MIMO ofrece beneficios considerables en el rendimiento. En el ejemplo siguiente (*figura 12*) se muestra que cada antena receptora recibe la señal dominante de una antena de transmisión diferente: el receptor **1** utiliza el transmisor **A**, mientras que el receptor **2** utiliza el transmisor **B**.

Cuando el sistema se sincroniza, se puede aprovechar la transmisión de señales diferentes de cada antena, a sabiendas de cada una de ellas será recibida con poca interferencia de la otra. Aquí reside la genialidad de MIMO.

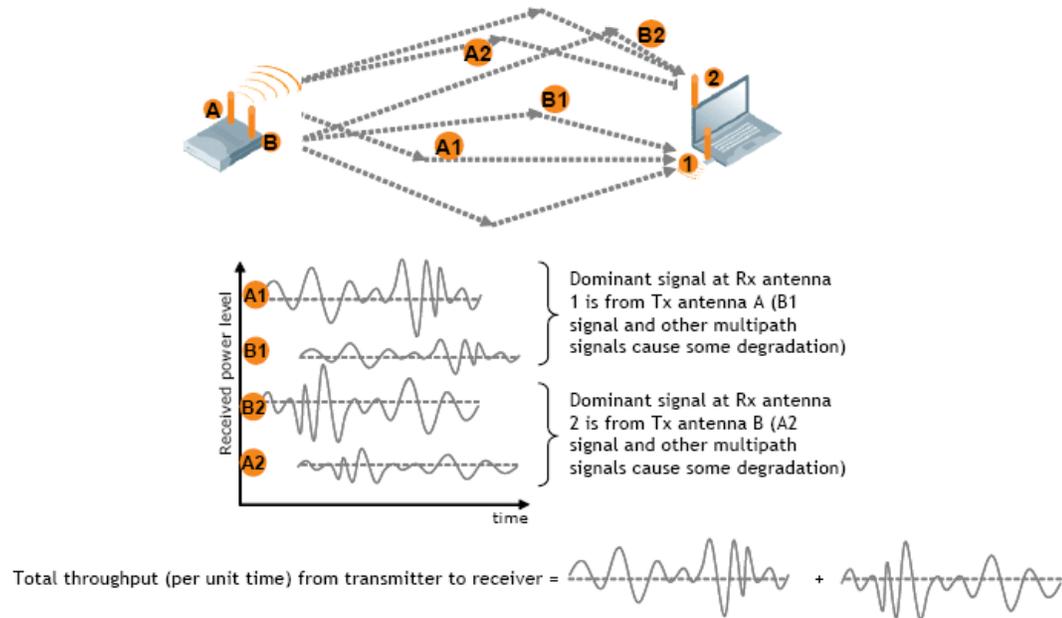


Figura 12: Ejemplo de aprovechamiento de múltiples señales

El diagrama siguiente (figura 13) muestra una explicación más detallada de la aplicación MIMO:

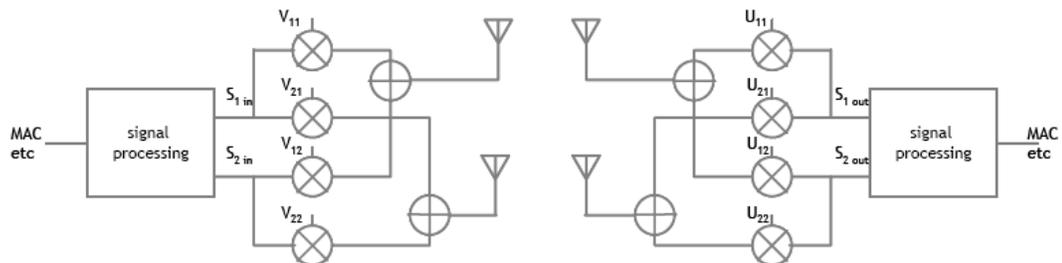


Figura 13: Implementación MIMO

En el lado transmisor, el procesamiento de señales provee salidas reales $S_{1\text{ in}}$ y $S_{2\text{ in}}$. Estas se mezclan con pesos diferentes, V_{11} etc, antes de que las señales se combinen y se envíen a las antenas de transmisión. Una función de mezcla similar procesa las señales recibidas en las antenas de recepción con pesos U_{11} etc. Siempre que las características de RF se conozcan, los pesos $V_{11\dots}$ y $U_{11\dots}$ se pueden calcular y fijar para un rendimiento óptimo, dadas las condiciones del canal de RF.

El caso más favorable sería que cada par de Transmisión-Recepción opere con una ruta de RF totalmente independiente: un sistema 2x2 (2 antenas en cada estación) tendrá que

duplicar el rendimiento de un sistema de única antena 1x1; y una configuración 3x3 podría extenderse a triplicar el rendimiento. 802.11n MIMO define configuraciones de 2:1 a 4x4 antenas y haces espaciales.

MIMO es el aspecto más difícil del 802.11n para entender: multipaso es normalmente el enemigo de rendimiento, pero con MIMO puede ser utilizado de forma constructiva. La línea de visión da normalmente el mejor rendimiento, pero con MIMO proporciona sólo las velocidades de datos básicas. (Nótese, sin embargo, que las señales reflejadas son generalmente mucho más débiles que la señal primaria o línea de vista. A pesar de perder la línea de visión puede permitir el uso de más rutas de acceso de RF y por lo tanto, el efecto aditivo MIMO, pero la relación señal-ruido de cada ruta puede ser mucho peor que antes. Es difícil predecir el peso relativo de estos dos efectos opuestos sin pruebas de campo.)

MIMO funciona mejor cuando las antenas se colocan más de la mitad de la longitud de onda de separación. De la frecuencia de 5,5 GHz, la mitad de la longitud de onda es de unos 2,7 cm o una pulgada. El estándar 802.11n manda al menos dos haces espaciales (antenas) para los APs y un flujo espacial para dispositivos cliente, con un máximo de 4 haces espaciales por dispositivo.

Una cuestión clave en los sistemas MIMO es la manera de ajustar la transmisión de señales en diferentes antenas para la recepción óptima en el receptor. La norma 802.11n ofrece dos métodos para ello:

- Realimentación Implícita
- Realimentación Explícita

La Realimentación Implícita requiere que el receptor MIMO transmita largos símbolos de sincronización, que son recibidos por el transmisor MIMO. Existe la presunción de que las características del canal de RF son recíprocas, y que la transmisión y recepción de los radios en cada extremo son idénticas, y en estas condiciones, las mediciones serán válidas en la dirección de transmisión MIMO. Este no se considera un método prometedor en la práctica.

En la Realimentación Explícita, el transmisor MIMO envía una larga serie de símbolos de sincronización que el receptor MIMO analiza con el fin de caracterizar la pérdida en el trayecto diferencial y de retardo para cada antena y haz espacial. A continuación, envía esta información al transmisor que puede optimizar su transmisión de señales y modulación de las características del paso de RF.

Este es un procedimiento complicado, ya que muchos cálculos deben realizarse y las condiciones de RF pueden estar cambiando rápidamente, lo que requiere un ajuste continuo. Dado que 802.11n utiliza OFDM, cada símbolo es modulado en torno a varias portadoras en lugar de una sola, y cada portadora debe medirse para cada par emisión-recepción de antenas para la caracterización completa. Sin embargo, esta técnica es un mecanismo clave para MIMO, y se ha demostrado trabaja bien tanto en pruebas de laboratorio como de campo.

En síntesis, MIMO significa la capacidad de transmitir y recibir simultáneamente sobre múltiples antenas; y nos sirve para transferir múltiples flujos de datos, es decir colocar más bits en el aire en el mismo tiempo y alcanzar velocidades de datos mayores (multiplexado espacial); o puede servir para transmitir y recibir copias del mismo flujo de datos sobre múltiples antenas para incrementar el rango de alcance (diversidad espacial).

A través de la técnica de MIMO se obtiene la capacidad de recibir y/o transmitir flujos de datos simultáneos a través de múltiples antenas. La norma 802.11n define muchas configuraciones de antenas "M x N", ordenadas desde la configuración "1 x 1" a "4 x 4". Esto se refiere al número de antenas transmisoras (M) y antenas receptoras (N). Por ejemplo, un AP con dos antenas transmisoras y tres receptoras es un dispositivo MIMO "2 x 3", como se observa en la figura 14.

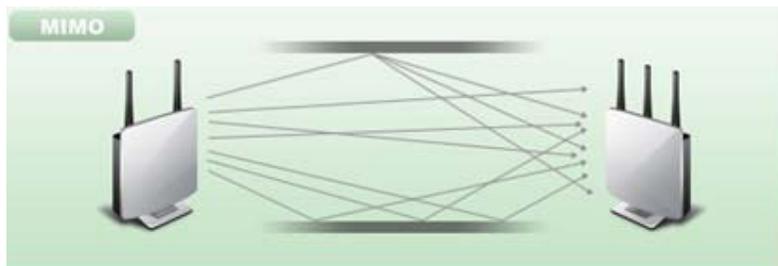


Figura 14: Esquema MIMO 2x3

Por lo tanto podríamos decir que, generalmente, a mayor cantidad de antenas que un dispositivo de norma n utilice simultáneamente, mayor es la velocidad de datos. Sin embargo, el uso de múltiples antenas por sí solas no incrementa la velocidad o el rango, sino hay que considerar como se utilizan de acuerdo a las distintas técnicas introducidas en la norma, como se observa en las siguientes figuras [11]

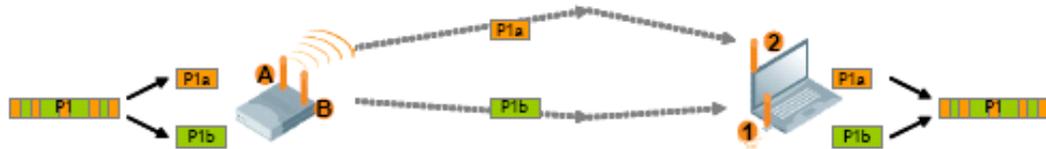


Figura 15: MIMO con Multiplexación de Diversidad espacial: pasos independientes entre pares de antenas permiten transmisión de datos en paralelo.

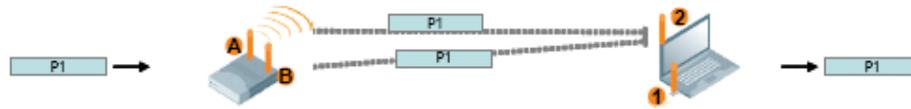


Figura 16: Transmisión Beamforming: el transmisor envía un simple haz de datos, ajustando la señal de cada antena para asegurar las formas de señal óptima para el receptor.

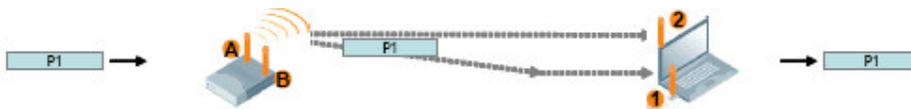


Figura 17: Diversidad espacial en la recepción: una única señal transmitida, el receptor puede usar técnicas de combinación de señales RF de diferentes antenas receptoras para la mejor SNR.

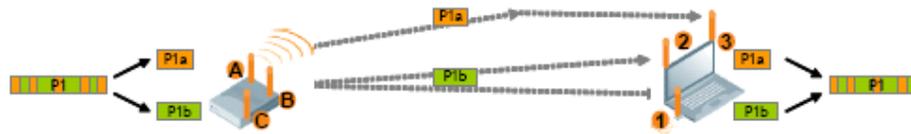


Figura 18: Multiplexación de Diversidad espacial con diversidad de antena: en este ejemplo, el paso entre el par de antenas A-3 tiene diferentes características RF de los otros pares de antenas: ofrece diversidad RF y lleva un solo haz. Los otros pasos entre las antenas B/C a 1/2 no están aislados en RF y no pueden enviar haces independientes; solo utilizan beamforming o diversidad de antenas receptoras. En este caso un sistema de 3x3 sólo permite 2 haces de señales.

2.4.1.2 ESQUEMAS DE CODIFICACIÓN Y MODULACIÓN (MCS):

Los sistemas de radio tienen que adaptarse a las características de señal y de ruido de la ruta RF; para ello cambian la velocidad de modulación. Para una determinada SNR, el sistema cambiará la velocidad de modulación para ofrecer el compromiso óptimo entre velocidad de datos y tasa de errores: en un momento cualquiera, la modulación para obtener una mayor velocidad de datos incrementará la tasa de errores. Se trata de un proceso continuo de toma de decisiones; el transmisor recibe del receptor realimentación acerca de la SNR y ajusta de forma acorde la modulación de transmisión. [11]

La Codificación y Modulación de la señal determinan como los datos se envían al medio. Por ejemplo, Binary Phase Shift Keying (BPSK) fue incluido en el estándar original 802.11, mientras que la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) fue añadido por el 802.11a. Métodos más recientes de modulación y codificación de las

tasas son generalmente más eficientes y brindan mayor velocidad de transmisión de datos, pero los métodos y las tasas existentes todavía se soportan para dar compatibilidad a las versiones anteriores.

Para 802.11n, la velocidad de transmisión real en cada instante es una decisión más compleja que las versiones anteriores. Para ello se utiliza un esquema de modulación por codificación (MCS) para especificarla. MCS incluye variables para el esquema de modulación, el número de flujos de datos enviados al espacio y la velocidad de datos de cada flujo. El número de flujos espaciales depende de la cantidad de antenas implementadas, con un máximo de cuatro. En la transmisión entre nodos, se utiliza un proceso de toma de decisiones sobre la base de la información del receptor sobre el canal para ajustar las condiciones de transmisión y la modulación. Dadas las condiciones, el sistema cambiará el tipo de modulación para ofrecer el mejor compromiso entre velocidad de transmisión de datos y la tasa de error para la carga útil. El MCS es continuamente ajustado cuando las condiciones del canal cambian. En el modo de legado, el sistema de modulación 802.11a / g se utilizará. Sin embargo, el 802.11n proporciona muchas más combinaciones para permitir la transmisión de la utilización de múltiples flujos de datos y codificación. Durante la comunicación, la mejor supervisión, control y vigilancia serán objeto de una negociación sobre la base de las condiciones de canal. [12]

En resumen, el MCS es un valor que determina la modulación, la codificación y el número de canales espaciales, dado por la permutación de los distintos factores involucrados. Por supuesto que identificando los valores de MCS soportados por los dispositivos se puede determinar la velocidad de datos de la capa física real desde un mínimo de 6,5 Mbps a un máximo de 600 Mbps (cuando se logra la conjunción de todas las opciones posibles teóricas de 802.11n). Hay 77 MCS que se especifican en la norma IEEE 802.11n, de los cuales los primeros 16 son obligatorios para los dispositivos access points y solamente los primeros 8 son obligatorios para los clientes. Todos los demás son opcionales.

En las siguientes tablas se muestran los valores de MCS, que dan los parámetros dependientes de la velocidad para cada MCS. [13]

Los parámetros relacionados a cada modo MCS son:

- Modulation: método de modulación empleado
 - BPSK
 - QPSK

- 16-QAM
- 64-QAM
- R: (Rate) velocidad de codificación
- NSS: Número de flujos espaciales
- NSD: Número de Subportadoras de datos
- NSP: Número de Subportadoras piloto
- NBPSC: Número de bits codificados por subportadora por haz espacial
- NCBPS: Número de bits de código por símbolo OFDM (total de todos los haces espaciales)
- NDBPS: Número de bits de datos por símbolo MIMO-OFDM
- NTBPS: Número total de bits codificados por subportadora

Las tablas 4 a 7 muestran los parámetros dependientes de la velocidad para igual modulación MCS en uno, dos, tres y cuatro haces en el funcionamiento de 20 MHz.

| MCS Index | Modulation | R | N _{BPS} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|-----|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | 800ns GI | 400ns GI ¹ |
| 0 | BPSK | 1/2 | 1 | 52 | 4 | 52 | 26 | 6.5 | 7.2 |
| 1 | QPSK | 1/2 | 2 | 52 | 4 | 104 | 52 | 13.0 | 14.4 |
| 2 | QPSK | 3/4 | 2 | 52 | 4 | 104 | 78 | 19.5 | 21.7 |
| 3 | 16-QAM | 1/2 | 4 | 52 | 4 | 208 | 104 | 26.0 | 28.9 |
| 4 | 16-QAM | 3/4 | 4 | 52 | 4 | 208 | 156 | 39.0 | 43.3 |
| 5 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 52 | 4 | 312 | 208 | 52.0 | 57.8 |
| 6 | 64-QAM | 3/4 | 6 | 52 | 4 | 312 | 234 | 58.5 | 65.0 |
| 7 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 52 | 4 | 312 | 260 | 65.0 | 72.2 |

Tabla 4: Parámetros para modo Mandatorio 20 MHz, modos NSS =1 (NES = 1)

| MCS Index | Modulation | R | N _{BPS} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|-----|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | | | | | | | | 800ns GI | 400ns GI |
| 8 | BPSK | 1/2 | 1 | 52 | 4 | 104 | 52 | 13.0 | 14.444 |
| 9 | QPSK | 1/2 | 2 | 52 | 4 | 208 | 104 | 26.0 | 28.889 |
| 10 | QPSK | 3/4 | 2 | 52 | 4 | 208 | 156 | 39.0 | 43.333 |
| 11 | 16-QAM | 1/2 | 4 | 52 | 4 | 416 | 208 | 52.0 | 57.778 |
| 12 | 16-QAM | 3/4 | 4 | 52 | 4 | 416 | 312 | 78.0 | 86.667 |
| 13 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 52 | 4 | 624 | 416 | 104.0 | 115.556 |
| 14 | 64-QAM | 3/4 | 6 | 52 | 4 | 624 | 468 | 117.0 | 130.000 |
| 15 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 52 | 4 | 624 | 520 | 130.0 | 144.444 |

Tabla 5: Parámetros para modo Mandatorio 20 MHz, modos NSS =2 (NES = 1)

RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR 802.11n – ESTRATEGIAS DE MIGRACIÓN

| MCS Index | Modulation | R | N _{BPSK} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 16 | BPSK | ½ | 1 | 52 | 4 | 156 | 78 | 19.5 | 21.7 |
| 17 | QPSK | ½ | 2 | 52 | 4 | 312 | 156 | 39.0 | 43.3 |
| 18 | QPSK | ¾ | 2 | 52 | 4 | 312 | 234 | 58.5 | 65.0 |
| 19 | 16-QAM | ½ | 4 | 52 | 4 | 624 | 312 | 78.0 | 86.7 |
| 20 | 16-QAM | ¾ | 4 | 52 | 4 | 624 | 468 | 117.0 | 130.0 |
| 21 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 52 | 4 | 936 | 624 | 156.0 | 173.3 |
| 22 | 64-QAM | ¾ | 6 | 52 | 4 | 936 | 702 | 175.5 | 195.0 |
| 23 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 52 | 4 | 936 | 780 | 195.0 | 216.7 |

Tabla 6: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos NSS =3 (NES = 2)

| MCS Index | Modulation | R | N _{BPSK} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 24 | BPSK | ½ | 1 | 52 | 4 | 208 | 104 | 26.0 | 28.9 |
| 25 | QPSK | ½ | 2 | 52 | 4 | 416 | 208 | 52.0 | 57.8 |
| 26 | QPSK | ¾ | 2 | 52 | 4 | 416 | 312 | 78.0 | 86.7 |
| 27 | 16-QAM | ½ | 4 | 52 | 4 | 832 | 416 | 104.0 | 115.6 |
| 28 | 16-QAM | ¾ | 4 | 52 | 4 | 832 | 624 | 156.0 | 173.3 |
| 29 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 52 | 4 | 1248 | 832 | 208.0 | 231.1 |
| 30 | 64-QAM | ¾ | 6 | 52 | 4 | 1248 | 936 | 234.0 | 260.0 |
| 31 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 52 | 4 | 1248 | 1040 | 260.0 | 288.9 |

Tabla 7: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos NSS =4 (NES = 2)

Las tablas 8 a 11 muestran los parámetros dependientes de la velocidad para igual modulación MCS en uno, dos, tres y cuatro haces en el funcionamiento de 40 MHz.

| MCS Index | Modulation | R | N _{BPSK} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 0 | BPSK | ½ | 1 | 108 | 6 | 108 | 54 | 13.5 | 15.0 |
| 1 | QPSK | ½ | 2 | 108 | 6 | 216 | 108 | 27.0 | 30.0 |
| 2 | QPSK | ¾ | 2 | 108 | 6 | 216 | 162 | 40.5 | 45.0 |
| 3 | 16-QAM | ½ | 4 | 108 | 6 | 432 | 216 | 54.0 | 60.0 |
| 4 | 16-QAM | ¾ | 4 | 108 | 6 | 432 | 324 | 81.0 | 90.0 |
| 5 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 108 | 6 | 648 | 432 | 108.0 | 120.0 |
| 6 | 64-QAM | ¾ | 6 | 108 | 6 | 648 | 486 | 121.5 | 135.0 |
| 7 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 108 | 6 | 648 | 540 | 135.0 | 150.0 |

Tabla 8: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos NSS =1 (NES = 1)

RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR 802.11n – ESTRATEGIAS DE MIGRACIÓN

| MCS Index | Modulation | R | N _{BPSK} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 8 | BPSK | ½ | 1 | 108 | 6 | 216 | 108 | 27.0 | 30.0 |
| 9 | QPSK | ½ | 2 | 108 | 6 | 432 | 216 | 54.0 | 60.0 |
| 10 | QPSK | ¾ | 2 | 108 | 6 | 432 | 324 | 81.0 | 90.0 |
| 11 | 16-QAM | ½ | 4 | 108 | 6 | 864 | 432 | 108.0 | 120.0 |
| 12 | 16-QAM | ¾ | 4 | 108 | 6 | 864 | 648 | 162.0 | 180.0 |
| 13 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 108 | 6 | 1296 | 864 | 216.0 | 240.0 |
| 14 | 64-QAM | ¾ | 6 | 108 | 6 | 1296 | 972 | 243.0 | 270.0 |
| 15 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 108 | 6 | 1296 | 1080 | 270.0 | 300.0 |

Tabla 9: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos NSS =2 (NES = 1)

| MCS Index | Modulation | R | N _{BPSK} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 16 | BPSK | ½ | 1 | 108 | 6 | 324 | 162 | 40.5 | 45.0 |
| 17 | QPSK | ½ | 2 | 108 | 6 | 648 | 324 | 81.0 | 90.0 |
| 18 | QPSK | ¾ | 2 | 108 | 6 | 648 | 486 | 121.5 | 135.0 |
| 19 | 16-QAM | ½ | 4 | 108 | 6 | 1296 | 648 | 162.0 | 180.0 |
| 20 | 16-QAM | ¾ | 4 | 108 | 6 | 1296 | 972 | 243.0 | 270.0 |
| 21 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 108 | 6 | 1944 | 1296 | 324.0 | 360.0 |
| 22 | 64-QAM | ¾ | 6 | 108 | 6 | 1944 | 1458 | 364.5 | 405.0 |
| 23 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 108 | 6 | 1944 | 1620 | 405.0 | 450.0 |

Tabla 10: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos NSS =3 (NES = 2)

| MCS Index | Modulation | R | N _{BPSK} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 24 | BPSK | ½ | 1 | 108 | 6 | 432 | 216 | 54.0 | 60.0 |
| 25 | QPSK | ½ | 2 | 108 | 6 | 864 | 432 | 108.0 | 120.0 |
| 26 | QPSK | ¾ | 2 | 108 | 6 | 864 | 648 | 162.0 | 180.0 |
| 27 | 16-QAM | ½ | 4 | 108 | 6 | 1728 | 864 | 216.0 | 240.0 |
| 28 | 16-QAM | ¾ | 4 | 108 | 6 | 1728 | 1296 | 324.0 | 360.0 |
| 29 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 108 | 6 | 2592 | 1728 | 432.0 | 480.0 |
| 30 | 64-QAM | ¾ | 6 | 108 | 6 | 2592 | 1944 | 486.0 | 540.0 |
| 31 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 108 | 6 | 2592 | 2160 | 540.0 | 600.0 |

Tabla 11: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos NSS =4 (NES = 2)

Las siguientes tablas muestran los parámetros dependientes de la velocidad para MCSs con modulación distinta para uso con TxBF. Las tablas 12 a 14 son para funcionamiento a 20 MHz. Las tablas 15 a 17 son para funcionamiento a 40 MHz

Los MCS 0 a 15 son mandatorios en 20 MHz con intervalo de guarda de 800 ns. Todos los otros MCSs y modos son opcionales, específicamente incluyendo soporte de Tx y Rx de 400 ns de intervalo de guarda, funcionamiento a 40 MHz, y soporte de MCSs con índices 16 a 76.

| MCS Index | Modulation | | R | N _{TBPS} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|----------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | Stream 1 | Stream 2 | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 33 | 16-QAM | QPSK | 1/2 | 6 | 52 | 4 | 312 | 156 | 39 | 43.3 |
| 34 | 64-QAM | QPSK | 1/2 | 8 | 52 | 4 | 416 | 208 | 52 | 57.8 |
| 35 | 64-QAM | 16-QAM | 1/2 | 10 | 52 | 4 | 520 | 260 | 65 | 72.2 |
| 36 | 16-QAM | QPSK | 3/4 | 6 | 52 | 4 | 312 | 234 | 58.5 | 65.0 |
| 37 | 64-QAM | QPSK | 3/4 | 8 | 52 | 4 | 416 | 312 | 78 | 86.7 |
| 38 | 64-QAM | 16-QAM | 3/4 | 10 | 52 | 4 | 520 | 390 | 97.5 | 108.3 |

Tabla 12: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos N_{SS} = 2 (N_{ES} = 1)

| MCS Index | Modulation | | | R | N _{TBPS} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|----------|----------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | Stream 1 | Stream 2 | Stream 3 | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 39 | 16-QAM | QPSK | QPSK | 1/2 | 8 | 52 | 4 | 416 | 208 | 52 | 57.8 |
| 40 | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | 1/2 | 10 | 52 | 4 | 520 | 260 | 65 | 72.2 |
| 41 | 64-QAM | QPSK | QPSK | 1/2 | 10 | 52 | 4 | 520 | 260 | 65 | 72.2 |
| 42 | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | 1/2 | 12 | 52 | 4 | 624 | 312 | 78 | 86.7 |
| 43 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 1/2 | 14 | 52 | 4 | 728 | 364 | 91 | 101.1 |
| 44 | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | 1/2 | 14 | 52 | 4 | 728 | 364 | 91 | 101.1 |
| 45 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | 1/2 | 16 | 52 | 4 | 832 | 416 | 104 | 115.6 |
| 46 | 16-QAM | QPSK | QPSK | 3/4 | 8 | 52 | 4 | 416 | 312 | 78 | 86.7 |
| 47 | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | 3/4 | 10 | 52 | 4 | 520 | 390 | 97.5 | 108.3 |
| 48 | 64-QAM | QPSK | QPSK | 3/4 | 10 | 52 | 4 | 520 | 390 | 97.5 | 108.3 |
| 49 | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | 3/4 | 12 | 52 | 4 | 624 | 468 | 117 | 130.0 |
| 50 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 3/4 | 14 | 52 | 4 | 728 | 546 | 136.5 | 151.7 |
| 51 | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | 3/4 | 14 | 52 | 4 | 728 | 546 | 136.5 | 151.7 |
| 52 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | 3/4 | 16 | 52 | 4 | 832 | 624 | 156 | 173.3 |

Tabla 13: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos N_{SS} = 3 (N_{ES} = 2)

RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR 802.11n – ESTRATEGIAS DE MIGRACIÓN

| MCS Index | Modulation | | | | R | NTBPS | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|----------|----------|----------|-----|-------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | Stream 1 | Stream 2 | Stream 3 | Stream 4 | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 53 | 16-QAM | QPSK | QPSK | QPSK | 1/2 | 10 | 52 | 4 | 520 | 260 | 65 | 72.2 |
| 54 | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | QPSK | 1/2 | 12 | 52 | 4 | 624 | 312 | 78 | 86.7 |
| 55 | 16-QAM | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | 1/2 | 14 | 52 | 4 | 728 | 364 | 91 | 101.1 |
| 56 | 64-QAM | QPSK | QPSK | QPSK | 1/2 | 12 | 52 | 4 | 624 | 312 | 78 | 86.7 |
| 57 | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | QPSK | 1/2 | 14 | 52 | 4 | 728 | 364 | 91 | 101.1 |
| 58 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | 1/2 | 16 | 52 | 4 | 832 | 416 | 104 | 115.6 |
| 59 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 1/2 | 18 | 52 | 4 | 936 | 468 | 117 | 130.0 |
| 60 | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | QPSK | 1/2 | 16 | 52 | 4 | 832 | 416 | 104 | 115.6 |
| 61 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | 1/2 | 18 | 52 | 4 | 936 | 468 | 117 | 130.0 |
| 62 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 1/2 | 20 | 52 | 4 | 1040 | 520 | 130 | 144.4 |
| 63 | 64-QAM | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | 1/2 | 20 | 52 | 4 | 1040 | 520 | 130 | 144.4 |
| 64 | 64-QAM | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | 1/2 | 22 | 52 | 4 | 1144 | 572 | 143 | 158.9 |
| 65 | 16-QAM | QPSK | QPSK | QPSK | 3/4 | 10 | 52 | 4 | 520 | 390 | 97.5 | 108.3 |
| 66 | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | QPSK | 3/4 | 12 | 52 | 4 | 624 | 468 | 117 | 130.0 |
| 67 | 16-QAM | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | 3/4 | 14 | 52 | 4 | 728 | 546 | 136.5 | 151.7 |
| 68 | 64-QAM | QPSK | QPSK | QPSK | 3/4 | 12 | 52 | 4 | 624 | 468 | 117 | 130.0 |
| 69 | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | QPSK | 3/4 | 14 | 52 | 4 | 728 | 546 | 136.5 | 151.7 |
| 70 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | 3/4 | 16 | 52 | 4 | 832 | 624 | 156 | 173.3 |
| 71 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 3/4 | 18 | 52 | 4 | 936 | 702 | 175.5 | 195.0 |
| 72 | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | QPSK | 3/4 | 16 | 52 | 4 | 832 | 624 | 156 | 173.3 |
| 73 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | 3/4 | 18 | 52 | 4 | 936 | 702 | 175.5 | 195.0 |
| 74 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 3/4 | 20 | 52 | 4 | 1040 | 780 | 195 | 216.7 |
| 75 | 64-QAM | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | 3/4 | 20 | 52 | 4 | 1040 | 780 | 195 | 216.7 |
| 76 | 64-QAM | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | 3/4 | 22 | 52 | 4 | 1144 | 858 | 214.5 | 238.3 |

Tabla 14: Parámetros para modo Opcional 20 MHz, modos N_{SS} = 4 (N_{ES} = 2)

| MCS Index | Modulation | | R | NTBPS | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|----------|-----|-------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | Stream 1 | Stream 2 | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 33 | 16-QAM | QPSK | 1/2 | 6 | 108 | 6 | 648 | 324 | 81 | 90 |
| 34 | 64-QAM | QPSK | 1/2 | 8 | 108 | 6 | 864 | 432 | 108 | 120 |
| 35 | 64-QAM | 16-QAM | 1/2 | 10 | 108 | 6 | 1080 | 540 | 135 | 150 |
| 36 | 16-QAM | QPSK | 3/4 | 6 | 108 | 6 | 648 | 486 | 121.5 | 135 |
| 37 | 64-QAM | QPSK | 3/4 | 8 | 108 | 6 | 864 | 648 | 162 | 180 |
| 38 | 64-QAM | 16-QAM | 3/4 | 10 | 108 | 6 | 1080 | 810 | 202.5 | 225 |

Tabla 15: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos N_{SS} = 2 (N_{ES} = 1)

RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR 802.11n – ESTRATEGIAS DE MIGRACIÓN

| MCS Index | Modulation | | | R | N _{TBPS} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|----------|----------|---|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | Stream 1 | Stream 2 | Stream 3 | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 39 | 16-QAM | QPSK | QPSK | ½ | 8 | 108 | 6 | 864 | 432 | 108 | 120 |
| 40 | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | ½ | 10 | 108 | 6 | 1080 | 540 | 135 | 150 |
| 41 | 64-QAM | QPSK | QPSK | ½ | 10 | 108 | 6 | 1080 | 540 | 135 | 150 |
| 42 | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | ½ | 12 | 108 | 6 | 1296 | 648 | 162 | 180 |
| 43 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | ½ | 14 | 108 | 6 | 1512 | 756 | 189 | 210 |
| 44 | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | ½ | 14 | 108 | 6 | 1512 | 756 | 189 | 210 |
| 45 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | ½ | 16 | 108 | 6 | 1728 | 864 | 216 | 240 |
| 46 | 16-QAM | QPSK | QPSK | ¾ | 8 | 108 | 6 | 864 | 648 | 162 | 180 |
| 47 | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | ¾ | 10 | 108 | 6 | 1080 | 810 | 202.5 | 225 |
| 48 | 64-QAM | QPSK | QPSK | ¾ | 10 | 108 | 6 | 1080 | 810 | 202.5 | 225 |
| 49 | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | ¾ | 12 | 108 | 6 | 1296 | 972 | 243 | 270 |
| 50 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | ¾ | 14 | 108 | 6 | 1512 | 1134 | 283.5 | 315 |
| 51 | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | ¾ | 14 | 108 | 6 | 1512 | 1134 | 283.5 | 315 |
| 52 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | ¾ | 16 | 108 | 6 | 1728 | 1296 | 324 | 360 |

Tabla 16: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos N_{SS} = 3 (N_{ES} = 2)

| MCS Index | Modulation | | | | R | N _{TBPS} | N _{SD} | N _{SP} | N _{CBPS} | N _{DBPS} | Data rate (Mbps) | |
|-----------|------------|----------|----------|----------|---|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| | Stream 1 | Stream 2 | Stream 3 | Stream 4 | | | | | | | 800 ns GI | 400ns GI |
| 53 | 16-QAM | QPSK | QPSK | QPSK | ½ | 10 | 108 | 6 | 1080 | 540 | 135 | 150 |
| 54 | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | QPSK | ½ | 12 | 108 | 6 | 1296 | 648 | 162 | 180 |
| 55 | 16-QAM | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | ½ | 14 | 108 | 6 | 1512 | 756 | 189 | 210 |
| 56 | 64-QAM | QPSK | QPSK | QPSK | ½ | 12 | 108 | 6 | 1296 | 648 | 162 | 180 |
| 57 | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | QPSK | ½ | 14 | 108 | 6 | 1512 | 756 | 189 | 210 |
| 58 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | ½ | 16 | 108 | 6 | 1728 | 864 | 216 | 240 |
| 59 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 16-QAM | ½ | 18 | 108 | 6 | 1944 | 972 | 243 | 270 |
| 60 | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | QPSK | ½ | 16 | 108 | 6 | 1728 | 864 | 216 | 240 |
| 61 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | ½ | 18 | 108 | 6 | 1944 | 972 | 243 | 270 |
| 62 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | ½ | 20 | 108 | 6 | 2160 | 1080 | 270 | 300 |
| 63 | 64-QAM | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | ½ | 20 | 108 | 6 | 2160 | 1080 | 270 | 300 |
| 64 | 64-QAM | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | ½ | 22 | 108 | 6 | 2376 | 1188 | 297 | 330 |
| 65 | 16-QAM | QPSK | QPSK | QPSK | ¾ | 10 | 108 | 6 | 1080 | 810 | 202.5 | 225 |
| 66 | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | QPSK | ¾ | 12 | 108 | 6 | 1296 | 972 | 243 | 270 |
| 67 | 16-QAM | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | ¾ | 14 | 108 | 6 | 1512 | 1134 | 283.5 | 315 |
| 68 | 64-QAM | QPSK | QPSK | QPSK | ¾ | 12 | 108 | 6 | 1296 | 972 | 243 | 270 |
| 69 | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | QPSK | ¾ | 14 | 108 | 6 | 1512 | 1134 | 283.5 | 315 |
| 70 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | QPSK | ¾ | 16 | 108 | 6 | 1728 | 1296 | 324 | 360 |
| 71 | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | 16-QAM | ¾ | 18 | 108 | 6 | 1944 | 1458 | 364.5 | 405 |
| 72 | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | QPSK | ¾ | 16 | 108 | 6 | 1728 | 1296 | 324 | 360 |
| 73 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | QPSK | ¾ | 18 | 108 | 6 | 1944 | 1458 | 364.5 | 405 |
| 74 | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | 16-QAM | ¾ | 20 | 108 | 6 | 2160 | 1620 | 405 | 450 |
| 75 | 64-QAM | 64-QAM | 64-QAM | QPSK | ¾ | 20 | 108 | 6 | 2160 | 1620 | 405 | 450 |
| 76 | 64-QAM | 64-QAM | 64-QAM | 16-QAM | ¾ | 22 | 108 | 6 | 2376 | 1782 | 445.5 | 495 |

Tabla 17: Parámetros para modo Opcional 40 MHz, modos N_{SS} = 4 (N_{ES} = 2)

2.4.1.3 INTERVALO DE GUARDA (GI – Guard Interval):

Es el periodo de tiempo existente entre símbolos OFDM transmitidos para minimizar los efectos de la interferencia intersímbolos. Este tipo de interferencia es provocada en entornos de multitrayectos, cuando el comienzo de un nuevo símbolo llega al receptor antes que finalice la recepción del símbolo anterior. Estos dos símbolos llegan al receptor por caminos diferentes. El último símbolo no ha sido completamente recibido cuando el nuevo símbolo llega a través de un camino más corto (*Figura 19*).

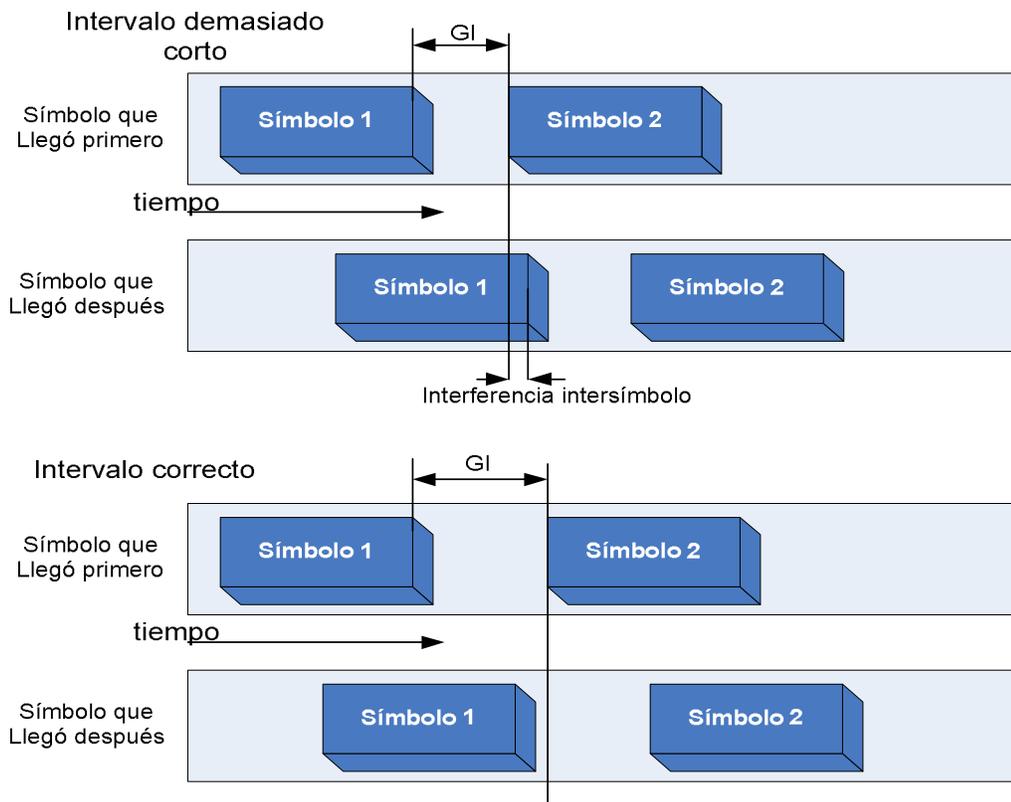


Figura 19: Interferencia multitrayecto

Cuando ocurre esto la interferencia entre ambos reduce la relación señal-ruido (SNR) efectiva del enlace de radio. El intervalo de guarda es un período de tiempo entre símbolos y su longitud es seleccionada dependiendo de la severidad del entorno multitrayecto. Las normas anteriores utilizan 800 nanosegundos como intervalo de guarda permitiendo diferencia de distancias de trayectos de hasta 240 metros

El modo obligatorio para 802.11n es usar 800 ns como intervalo de guarda; pero tiene la opción de usar uno de 400 ns en aquellos entornos donde el efecto de multitrayecto se minimiza.

Al reducir este tiempo se reduce el tiempo de símbolo de 4 a 3,6 microsegundos, y esto tiene un efecto directo en la velocidad. Por ejemplo, con GI de 400 ns y para canales de 20 MHz, puedo obtener velocidades de 72, 144, 216, y 288 Mbps y para canales de 40 MHz velocidades de 150, 300, 450, y 600 Mbps, mientras que para GI de 800 ns y 20 MHz de 64, 130, 195 y 260 Mbps y en 40 MHz de 135, 270, 405 y 540 Mbps. (Figura 20). [14]

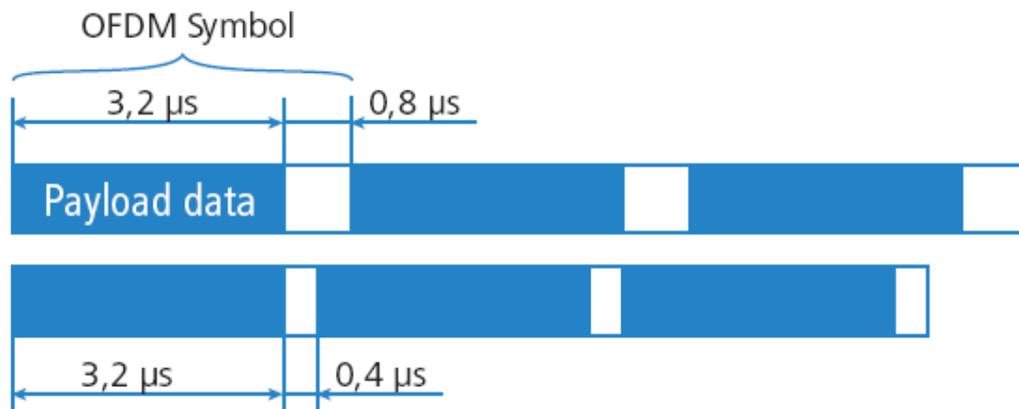


Figura 20: Símbolo OFDM

2.4.1.4 ANCHO DE CANAL:

La norma original 802.11 y su extensión 802.11b usan un ancho de canal de radio de 22 MHz. Las normas 802.11a y 802.11g usan un ancho de canal de 20 MHz. A causa de que 802.11g es una extensión de 802.11b, 802.11g también tiene un ancho de 22 MHz por razones de compatibilidad.

El tamaño del canal de radio, o ancho de banda, es una medida importante de la eficiencia del radio. Esto se llama eficiencia espectral y se mide en bits por hertz. La eficiencia espectral máxima de 802.11b es de un medio de bit por hertz (por ejemplo, 11 Mbps en 22 MHz). 802.11a y 802.11g tienen una eficiencia espectral de máxima de 2,7 bits por hertz a 54 Mbps. [10]

Usando exactamente la misma tecnología que 802.11a y 802.11g, algunos propietarios de sistemas de WLAN proveen hasta 108 Mbps llamado normalmente “turbo mode”. Estos sistemas propietarios usan una simple técnica de duplicar la velocidad de datos modulando dos canales al mismo tiempo. Esto, normalmente, se llama “channel bonding” (union de canales). Con esta técnica, la eficiencia espectral es la misma que para 802.11 a/g, pero el ancho de banda del canal es el doble, y, por lo tanto, se provee el doble de velocidad.

La norma 802.11n utiliza las dos opciones, ancho de canal de 20 MHz como obligatorio, y de 40 MHz como opcional. Como en los productos propietarios, el ancho de canal de 40 MHz en 802.11n son dos canales adyacentes de 20 MHz unidos. Cuando se utiliza un canal de 40 MHz, 802.11n toma una ventaja adicional ya que cada canal de 20 MHz tiene una pequeña cantidad del ancho del canal que se reserva al comienzo y al final para reducir la interferencia entre esos canales adyacentes; y con un canal de 40 MHz, el final del canal inferior y el comienzo del canal superior no se deben reservar. Estas pequeñas partes del canal se pueden usar para transportar información; y, por lo tanto, 802.11n alcanza un poco más del doble de velocidad. (Figura 21).

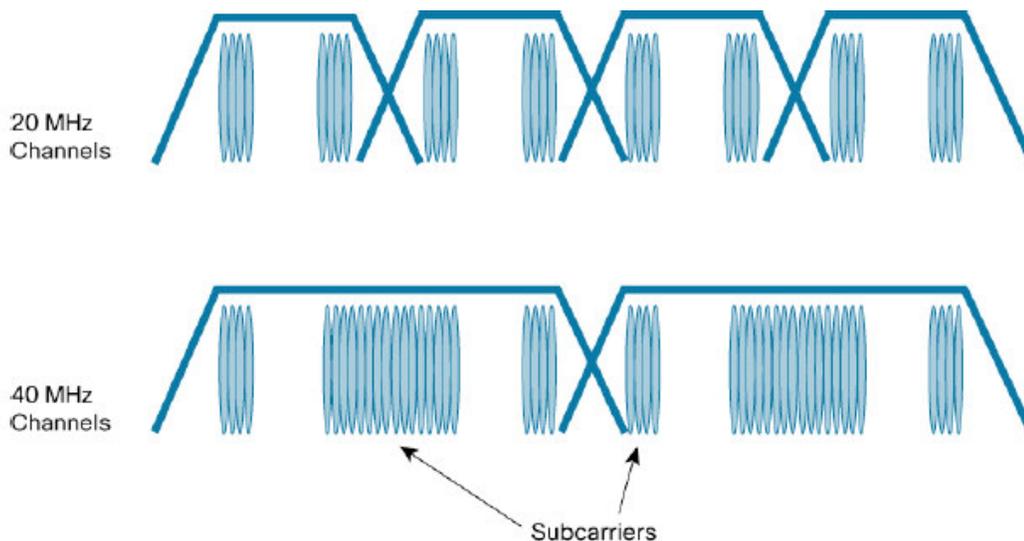


Figura 21: Canales de 20 y 40 MHz

2.4.1.5 FORMATO DE TRAMA HEREDADO Y MIXTO [15]

En los sistemas 802.11n, el PLCP (Protocolo de Convergencia de capa física) puede tener los siguientes formatos: el HT (high throughput) Green Field, el non-HT (Legacy) y el HT-Mixed:

Modo Legado/sin alto rendimiento (Legacy/non-HT): Este modo permite la compatibilidad total con dispositivos heredados de las normas 802.11. Cuando se trabaja en este modo, las tramas son todas en formato heredado. El dispositivo también trabaja en modo SISO (Single-In-Single-Out); y no se puede usar con canales de 40 MHz. (Figura 22).

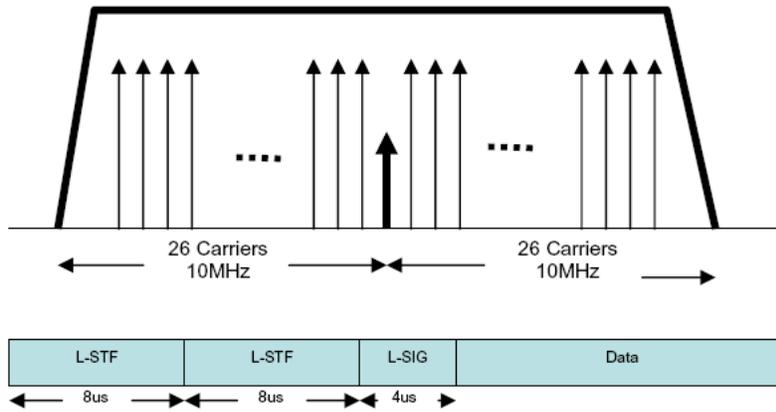


Figura 22: Formato de trama Legado – no HT

Modo Mixto HT: Este modo es para redes con un equipo 802.11n y un entorno mixto de clientes 802.11n y clientes 802.11a/b/g. Hay un preámbulo full compatible con elementos heredados, seguido por la opción de formato HT o legado. El preámbulo permite que clientes heredados detecten la transmisión, adquieran la frecuencia portadora y la sincronización de temporización. El campo de la señal Legacy (L-SIG) les permite estimar la longitud de la transmisión. Para una comunicación con dispositivos heredados, todas las transmisiones se mantienen en el formato de canal de 20 MHz. Para una comunicación en 802.11n para mayor velocidad, se hace en formato de canal de 40 MHz. El canal de 40 MHz se crea usando dos canales adyacentes de 20 MHz juntos. Sin embargo, los broadcasts y otras tramas de control se envían en canales de 20 MHz para permitir a los dispositivos de normas anteriores puedan interoperar entre sí. (Figura 23)

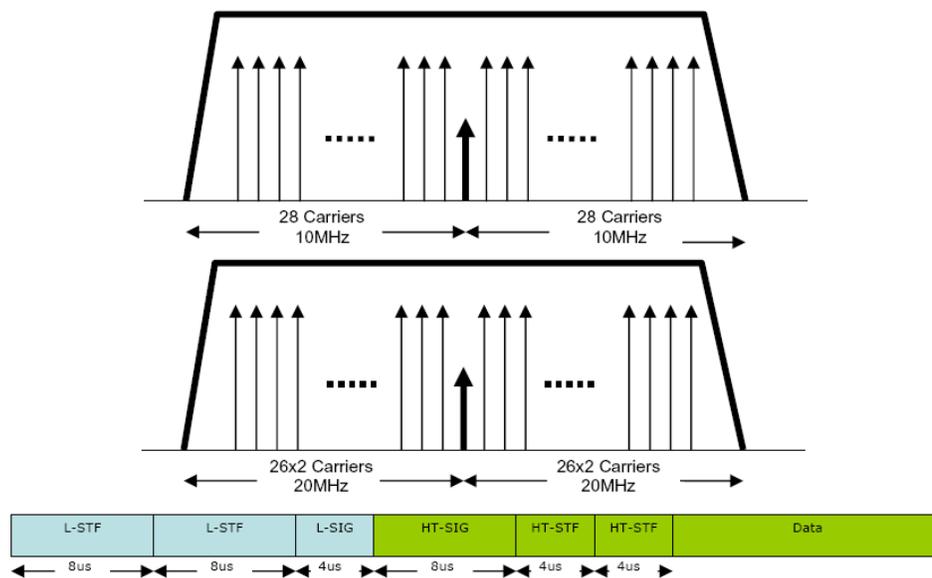


Figura 23: Formato de trama Mixto

Modo Greenfield: Este modo es para una red con clientes 802.11n conectados a un router 802.11n. Acá no hay manera que dispositivos de normas anteriores comprendan el protocolo de transmisión. Sin embargo, la primer parte del preámbulo es una corta secuencia de trama heredada (definida como HT-G-STF en el borrador IEEE 802.11n). De este modo, los dispositivos que incluyen normas anteriores sean capaces de sentir que hay equipos 802.11n en la vecindad. (Figura 24)

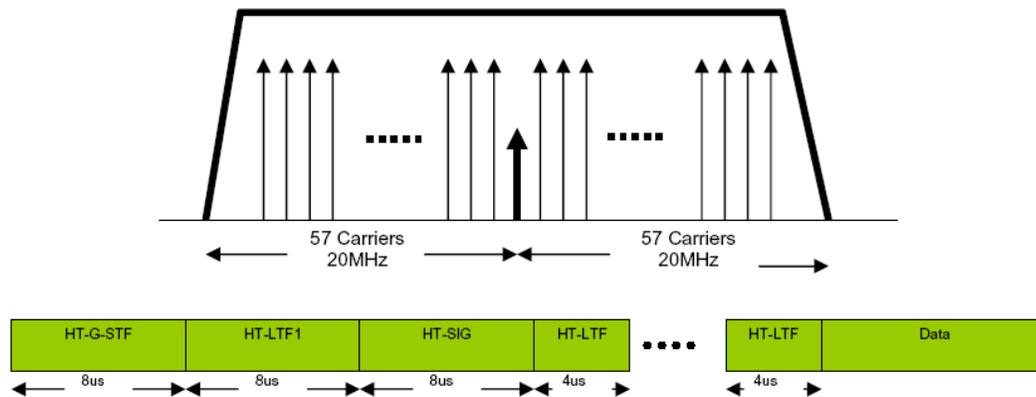


Figura 24: Formato de trama Greenfield

Veamos en detalle cada campo de las tramas anteriores:

Legacy Short Training Field (L-STF)

Es el mismo que el símbolo corto (STS, short training symbol) OFDM de 802.11a. El L-STF es de 6 Mbps usando modulación BPSK. No contiene codificación de canal, y toma 8 μs para completarse. En el modo de transmisión de 20 MHz, este campo usa sub-portadoras: -24, -20, -16, -12, -8, -4, 4, 8, 12, 16, 20, 24 para los símbolos OFDM. En el modo de 40 MHz usa sub-portadoras -58 a -2 y 2 a 58. Los subcanales superiores (sub-portadoras 6-58) están rotadas en fase por +90°. La rotación de 90° ayuda a mantener la equivalencia de 40 MHz comparable al de 20 MHz.

Legacy Long Training Field (L-LTF)

Igual que en 802.11a (LTS, long training symbol). El L-STF es de 6 Mbps usando modulación BPSK. No contiene codificación de canal. El modo de 20 MHz usa sub-portadoras -26 a -1 y 1 a 26. El modo 40 MHz usa sub-portadoras -58 a -2 y 2 a 58. Por la misma razón que STF, los tonos en los subcanales superiores (sub-portadoras 6-58) son rotadas en fase +90°. Las subportadoras a ±32 en 40 MHz, las cuales son subportadoras DC para la transmisión de 20 MHz, son ambas anuladas en L-LTF. Tal

disposición también permite una sincronización apropiada con dispositivos heredados de 20 MHz.

High Throughput Signal Field (H-SIG)

HT-SIG consiste de dos símbolos OFDM. Son intercalados y mapeados. El HT-SIG no está codificado. En el modo de 20 MHz, las subportadoras usan -28 a 1 y 1 a 28, y tienen un piloto insertado en las subportadoras -21, -7, 7 y 21. En el modo de 40 MHz, las subportadoras usadas son -58 a -2 y 2 a 58, y tienen piloto insertado en las subportadoras -53, -25, -11, 11, 25, 53.

2.4.1.6 Codificación convolutiva. [16]

Cuando los datos llegan a la capa física para ser transmitidos, estos se procesan para codificarlos. Este proceso modifica sus características de frecuencia para obtener la mejor relación señal-ruido, y también se incorpora en los datos información de corrección de errores denominada codificación convolutiva. El estándar 802.11n incluye codificación convolutiva de bloque (BCC, block convolutional coding), también incorporada en los anteriores estándares 802.11, pero se agrega una opción de codificación de comprobación de paridad de baja densidad (LDPC, Low density parity check) que puede mejorar la capacidad efectiva en condiciones de RF determinadas.

2.4.2 Mejoras en la Capa MAC

Con el incremento de la velocidad de datos del radio se mejoran algunas características de los estándares anteriores 802.11.

Si además observamos la cantidad fija de bits adicionales a los datos en el protocolo de capa MAC, los espacios libres intertramas y las confirmaciones de cada trama transmitida podemos decir que aún en las velocidades más altas, todo el tiempo de transmisión de las características mencionadas puede ser mayor que el tiempo real utilizada para transmitir los datos. Además las colisiones también reducen el rendimiento efectivo de 802.11.

En 802.11n se introducen cambios en la capa MAC para mejorar estas características como:

2.4.2.1 Agregación de tramas: [10][16]

Un cliente o punto de acceso debe competir (lograr una ‘oportunidad de transmisión’ en el aire) para cada trama que quiera transmitir. Esto tiene como consecuencia contención (competición), colisiones en el medio y retrasos de retroceso que provocan pérdidas de

tiempo, que se podría estar usando para el envío de tráfico. ‘802.11n’ incorpora mecanismos de agrupación de tramas en las estaciones y así reducir el número de eventos de contención. Numerosas pruebas han demostrado la eficacia de este método en estándares 802.11 anteriores. Por ejemplo, en 802.11g, una configuración determinada puede enviar 26 Mbps de datos mediante tramas de 1.500 bytes pero, cuando la longitud de la trama se reduce a 256 Bytes, la capacidad de datos se reduce a 12 Mbps.

Cada trama transmitida por un dispositivo 802.11 tiene una carga adicional de bits para control (overhead) asociada con el preámbulo de radio; y campos de tramas MAC que limitan el rendimiento (throughput) efectivo, aún si la velocidad real de datos fuera infinito (Figura 25).

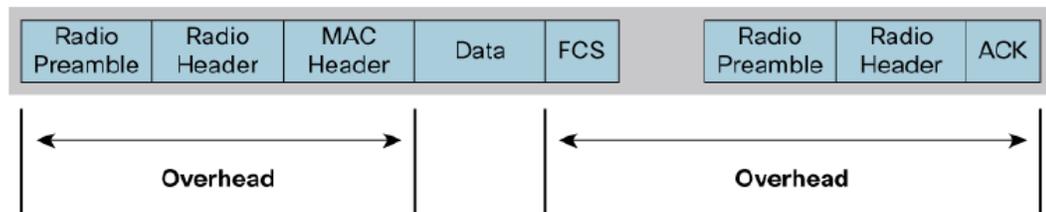


Figura 25: Overhead en las tramas

Para reducir este overhead, 802.11n introduce la agregación de tramas (*frame aggregation*). Esto es esencialmente poner dos o más tramas juntas en una única transmisión.

Con la agrupación de capa MAC, una estación que tenga un cierto número de tramas para enviar puede optar por combinarlas en una trama agregada (MAC MPDU). La trama resultante contiene menos sobrecarga (overhead) de cabecera de la que contendría sin agrupación, y el hecho de enviar menos tramas y de mayor tamaño reduce también el tiempo de competición por el medio inalámbrico.

Debido a que múltiples tramas se envían ahora en una única transmisión, el número de colisiones potenciales y el tiempo perdido por backoff se reducen significativamente. El tamaño de trama máximo se incrementa para poder dar lugar a estas largas tramas. El tamaño de las mismas se incrementa de 4 KB a 64 KB. Una limitación es que todas las tramas que son unidas en una transmisión deben enviarse al mismo destino; esto es, que todas las tramas deben direccionarse al mismo cliente móvil o al mismo access point. Otra limitación es que todas las tramas agregadas deben estar listas para transmitir desde el cliente o access point al mismo tiempo, potencialmente retardando algunas

tramas que esperen por tramas adicionales, para poder intentar enviar una única trama agregada. Una tercer limitación es que el tamaño máximo de trama que puede enviarse satisfactoriamente es afectado por un factor llamado Tiempo de coherencia de canal (*channel coherence time*). Este tiempo depende de que tan rápidamente el transmisor, el receptor y otros ítems en el entorno se muevan.

Hay dos mecanismos de agrupación, MSDU agrupado (A-MSDU, Aggregated MSDU) y MPDU agrupado (A-MPDU, Aggregated-MPDU). Ambos métodos reducen el overhead a un único preámbulo simple de radio para cada trama de transmisión (Figura 26).

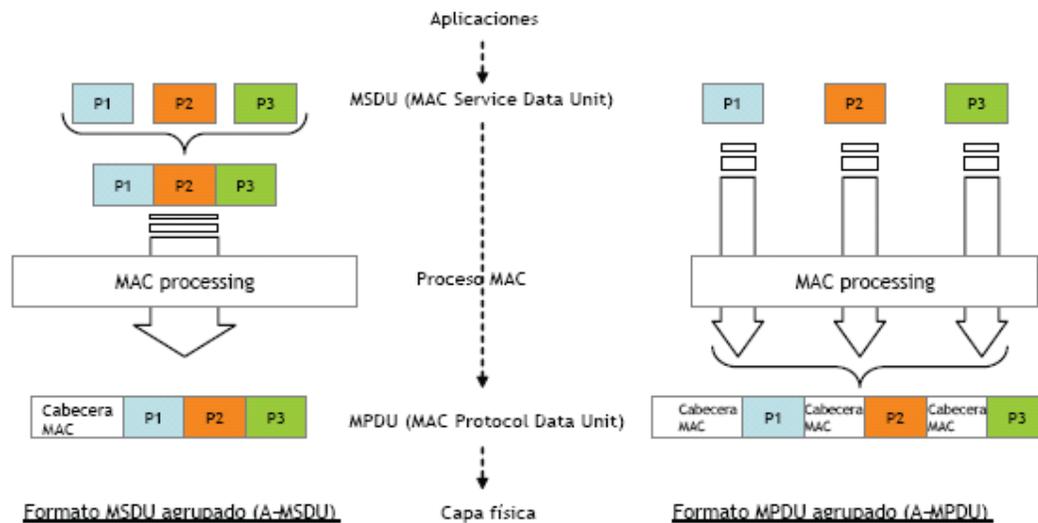


Figura 26: Agregación de tramas

2.4.2.1.1 Formato A-MSDU (MAC Service Data Units Aggregation)

Es el método más eficiente; y se basa en el hecho de que un access point recibe tramas desde su interface Ethernet para ser traducidas a tramas 802.11 y entonces transmitir las a un cliente móvil; y que similarmente, la mayoría de los stacks de protocolo de los cliente móviles crean una trama Ethernet, la cual el driver 802.11 debe traducir a una trama 802.11 antes de su transmisión. En ambos casos, el formato “nativo” de la trama es Ethernet, y luego traducido al formato de 802.11 para su transmisión.

Teóricamente, este método permite que tramas para muchos destinos se junten en una única trama agregada para transmitir. Prácticamente, sin embargo, se juntan tramas Ethernet para un destino común, y coloca esa junta en una única trama 802.11, y luego la transmite (Figura 27). Este método es más eficiente que el de agregación MPDU, debido a que la cabecera Ethernet es mucho más corta que la cabecera 802.11.

MSDU = Ethernet Frame



Figura 27: A-MSDU

Para un dispositivo móvil, la trama agregada se envía al access point, donde las tramas Ethernet constitutivas son enviadas a sus destinos finales. Para un access point, todas las tramas que constituyen una trama agregada deben destinarse a un único cliente móvil, dado que hay un único destino en cada cliente móvil.

Con agregación MSDU, la trama entera agregada es encriptada una vez usando la asociación de seguridad del marco exterior del destino. Una restricción de la agregación MSDU es que todas las tramas que la constituyen deben tener el mismo nivel de Calidad de Servicio (QoS). Por ejemplo, no se permite mezclar tramas de voz con tramas enviadas por el concepto de “mejor esfuerzo”.

2.4.2.1.2 Formato A-MPDU (Mac Protocol Data Units Aggregation)

Este método es levemente diferente de MSDU. En lugar de juntar tramas Ethernet, la agregación MPDU traduce cada trama Ethernet a formato 802.11 y luego junta las tramas 802.11 dirigidas a un destino común. Esta colección de tramas no requiere un encapsulado aparte ya que ya son tramas 802.11 (*Figura 28*).

RP = Radio Preamble
 RH = Rapid Header
 MH = Mac Header
 MSDU = Ethernet Frame

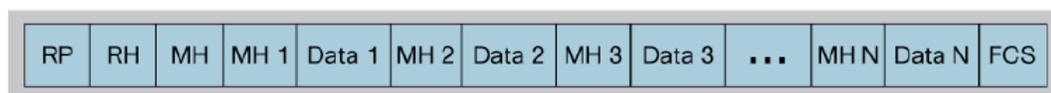


Figura 28: A-MPDU

Esto requiere que todas las tramas 802.11 que constituyen la trama agregada tengan la misma dirección destino. Sin embargo, esto resulta en la misma característica que MSDU, dado que el destino de todas las tramas enviadas por un cliente móvil es ese access point del cliente, donde las tramas 802.11 son traducidas a Ethernet y enviadas a su último destino. Similarmente, el destino de cualquier trama enviada por el access point es un único cliente móvil.

Con la agregación MPDU, es posible encriptar cada trama constituyente independientemente, usando la asociación de seguridad para cada dirección destino individual 802.11. Esto no tiene ninguna diferencia efectiva de la encriptación realizada

en la agregación MSDU. Como en MSDU, MPDU requiere que todas las tramas constitutivas tengan el mismo nivel de QoS.

La eficiencia del método MPDU es menor que el de MSDU, a causa del overhead extra de las cabeceras de las tramas individuales 802.11 por cada trama constitutiva. La eficiencia es, además, reducida cuando se usa encriptación.

2.4.2.2 Confirmación de bloque

Para que el protocolo MAC 802.11 funcione confiablemente, cada una de las tramas transmitidas a una dirección individual (esto es, no tramas multicast ni broadcast) es inmediatamente confirmada por el receptor. La agregación MSDU no permite cambios a este funcionamiento. La trama agregada es confirmada, igual que cualquier trama 802.11. En forma diferente, para la agregación MPDU, cada una de las tramas 802.11 individuales constituyentes debe confirmarse. El mecanismo para lograr este requerimiento que introduce 802.11n se llama Confirmación de bloque (*block acknowledgement*).

Este método compila todas las confirmaciones de las tramas individuales constituyentes producidas por la agregación MPDU en una única trama retornada por el receptor al emisor. Así permite un mecanismo rápido y compacto para implementar una retransmisión selectiva de solamente aquellas tramas constituyentes que no fueron confirmadas. En entornos con alta tasa de error, este mecanismo de retransmisión selectivo puede proveer alguna mejora en el rendimiento efectivo de una WLAN que usa MPDU sobre aquellas que usan MSDU, debido a que se retransmite mucho menos cuando un error afecta a alguna de las tramas constituyentes de una trama MPDU agregada cuando se compara con una trama MSDU agregada.

Se definen cuatro tipos de acuse de recibo, de los cuales se mantienen dos de 802.11e (ACK retrasado y ACK inmediato), mientras que se crearon otros 2 para alto rendimiento (HT- ACK retrasado y HT-ACK inmediato). Por lo tanto, las estaciones de alto rendimiento (HT) pueden soportar los cuatro mecanismos, teniendo que el mecanismo original (ack inmediato y ack retrasado) sea utilizado para mantener compatibilidad con dispositivos anteriores (legados), mientras que las otras técnicas sean utilizadas para mantener sesiones entre dispositivos 802.11n, siendo obligatorio el mecanismo HT- ACK inmediato.

2.4.2.2.1 ACK inmediato y ACK retrasado

Como se puede ver en la figura 29 la sesión entre dos estaciones para un tráfico particular (TID, Traffic Identifier) empieza con el intercambio de tramas ADDBA (Add Block Acknowledgement), cada una confirmada con un acuse de recibo (ACK). Seguido de este se tiene la transferencia de datos, para que se transmita una petición de acuse de recibo (BAR, Block Acknowledgement Request), a la que el destino contesta con un acuse de recibo BA. El BA reconoce las tramas recibidas correctamente dentro del bloque y de existir algún error, este pide retransmisión selectiva.

La estación fuente o destino puede terminar con la sesión por medio de una trama de eliminación de bloques de acuse de recibo (DELBA, Delete Block Acknowledgement) la cual debe ser confirmada con un ACK.

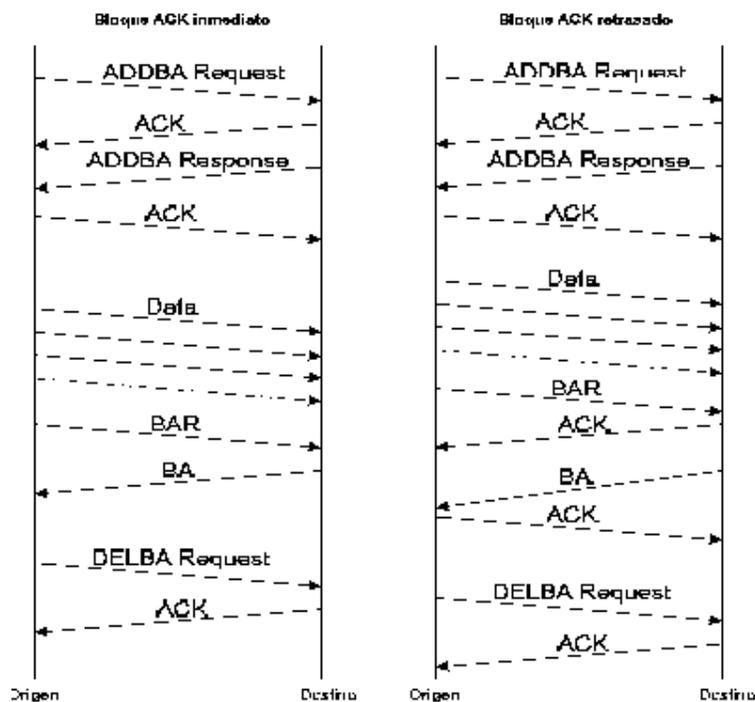


Figura 29: ACK inmediato y retrasado

La diferencia entre un ACK inmediato y un ACK retrasado, radica en la manipulación de BAR, teniendo de esta manera que en un ACK inmediato el BAR solicita la respuesta inmediata BA. Mientras que con un ACK retrasado, el BAR es confirmado con un ACK y el BA es enviado al origen y confirmado con otro ACK.

2.4.2.2.2 ACK inmediato de alto rendimiento

Esta técnica de acuse de recibo es utilizada para dispositivos de alto rendimiento, y se basa en la confirmación de un bloque de tramas; como se vio anteriormente, el BAR es

utilizado para pedir un BA, pero además es utilizado para desbloquear el buffer de orden en el receptor.

Como se puede ver en la Figura 30, la MSDU 3 no llega satisfactoriamente al receptor luego de algunos intentos. Lo que hace que las MSDU que se envían a continuación de ésta, se bloqueen en el receptor y no puedan ser enviadas a capas superiores. Luego que el tiempo de vida expira el origen descarta el MSDU 3.

Para eliminar el bloqueo en el receptor se envía un BAR que contiene el número de la siguiente MSDU a ser transmitida, y para este ejemplo tenemos el 8 debido a que los MSDU con bajo número de secuencia ya fueron confirmados o descartados por la fuente.

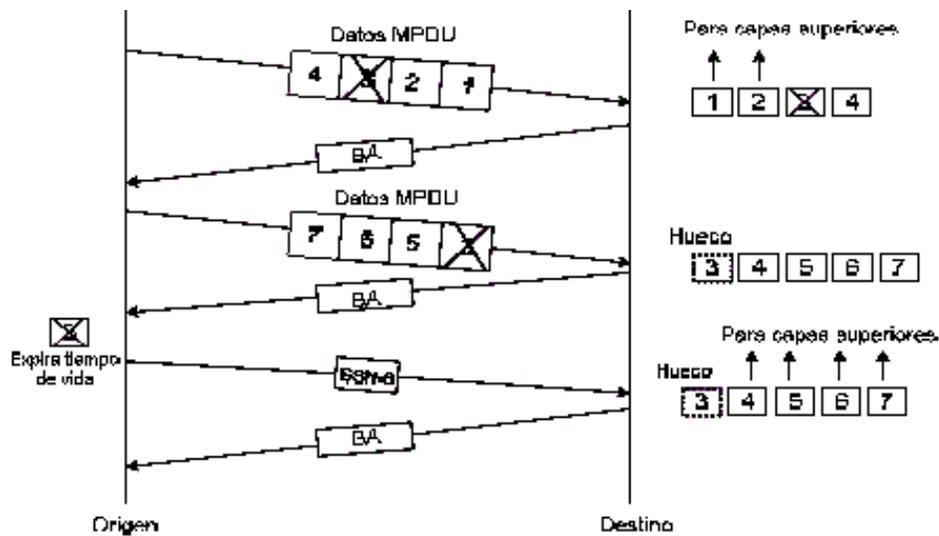


Figura 30: ACK inmediato de alto rendimiento

Como se puede ver en el ejemplo, el estándar 802.11n utiliza retransmisión selectiva de los MSDU que conforman la trama agregada.

Por otro lado, se tiene la técnica ACK retrasado para alto rendimiento, la cual es opcional en el estándar 802.11n y para ser utilizada debe ser establecida en las dos estaciones.

2.4.2.3 Espacio Intertrama Reducido

Cuando la agregación de tramas no es posible, 802.11n provee un mecanismo que reduce el overhead involucrado con la transmisión de un conjunto de tramas a diferentes destinos. Este mecanismo reduce el espacio intertrama entre la recepción de una trama, (típicamente una trama de confirmación), y la transmisión de la trama siguiente. La

extensión 802.11e para calidad de servicio adiciona la capacidad para un único transmisor de enviar una ráfaga de tramas durante un tiempo único, llamado *oportunidad de transmisión (transmit opportunity)*. Durante este tiempo, el emisor no necesita realizar ningún random backoff entre transmisiones, separando sus tramas por el más pequeño espacio intertrama permitido, es decir, el SIFS (*short interframe space*). 802.11n implementa este mecanismo, reduciendo el overhead entre tramas, especificando un espacio intertrama aún más pequeño, llamado el *reduced interframe space* (RIFS). RIFS reduce más el tiempo muerto entre tramas, incrementando la cantidad de tiempo en la *oportunidad de transmisión* que está ocupado enviando tramas. La desventaja de usar RIFS es que su uso está restringido solamente al modo *Greenfield*; es decir, solamente a implementaciones 802.11n y que no se encuentran dispositivos de las tecnologías anteriores 802.11a, b, o g en el área.

2.4.2.4 Ahorro de energía [16]

2.4.2.4.1 Ahorro de energía por multiplexado espacial (SM power save, Spatial multiplexing power save)

El modo de ahorro de energía básico de 802.11n se basa en la función de ahorro de energía de versiones anteriores de 802.11. En este modo, el cliente notifica al punto de acceso su estado de ahorro de energía (entrada en modo de suspensión) y luego se suspende; solo se despierta con una multidifusión de DTIM (Delivery Traffic Indication Maps, Mapas de indicación de entrega de tráfico) por parte del punto de acceso, mientras que este acumula el tráfico recibido para las estaciones en suspensión entre DTIM.

El ahorro de energía en 802.11n se ha mejorado para MIMO con el modo SM power save. MIMO exige el mantenimiento de varias cadenas de recepción en marcha, de modo que el consumo en espera de los dispositivos MIMO puede ser sensiblemente superior al de equipos de versiones anteriores de 802.11.

Para mitigar este fenómeno, una nueva cláusula permite que un cliente MIMO desactive todas las cadenas RF salvo una cuando entra en modo de ahorro de energía. Cuando un cliente está en el estado SM power-save dinámico, el punto de acceso envía una trama de reactivación –que suele ser un intercambio RTS/CTS- para darle tiempo para activar las otras antenas y cadenas RF. En modo estático, el cliente decide cuándo debe activar todas las cadenas RF independientemente del estado del tráfico.

2.4.2.4.2 Ahorro de energía multiconsulta (PSMP, Power Save Multi-poll)

PSMP se puede considerar una ampliación de APSD de 802.11e: tiene las mismas extensiones PSMP programado y no programado (que tienen su equivalente en S-APSD y U-APSD).

PSMP no programado (U-PSMP) es el modo más simple: es muy similar a U-APSD, y admite opciones habilitadas por activador y habilitadas por recepción. Cada intervalo de suspensión se considera y señala de forma independiente, y el cliente es quien determina cuándo se reactiva para recibir o transmitir datos. En el diagrama superior, la trama de ‘suspensión’ informa al punto de acceso de que el cliente dejará de recibir tramas hasta nuevo aviso. Cuando el cliente desea comunicarse envía una trama normal o de activación al punto de acceso y entonces ambos interlocutores transmiten los datos en cola. A final de este intercambio, el cliente puede indicar su regreso al modo de suspensión. (Figura 31)

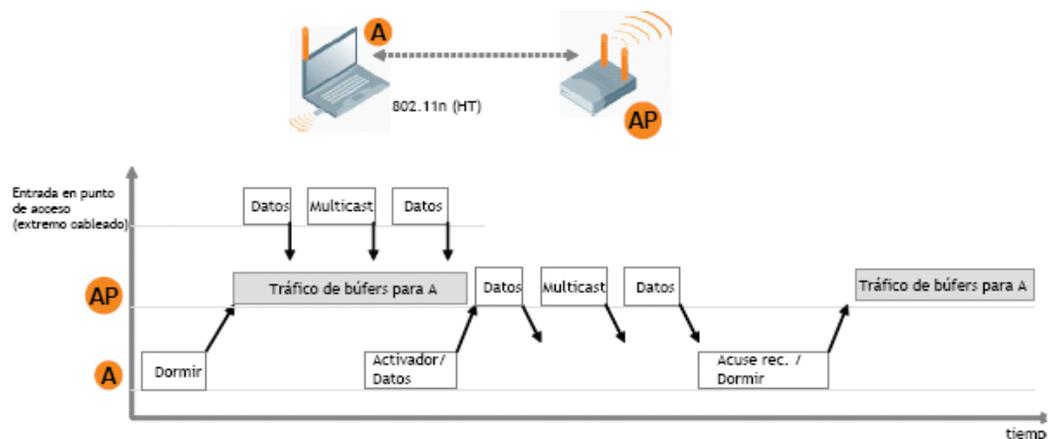


Figura 31: PSMP no programado

PSMP programado (S-PSMP) es muy similar a la función S-APSD incorporada en 802.11e. El cliente solicita al punto de acceso una reserva para una T-Spec (especificación de tráfico), indicando detalles de velocidad de datos, tamaño de trama, intervalo de trama y clase de acceso (prioridad QoS) de los flujos de tráfico que desea enviar y recibir. El punto de acceso, una vez admitida esta T-Spec, define una planificación de consultas para el cliente. Puede haber varios cliente que utilicen S-PSMP, de modo que el punto de acceso define el PSMP SP (service period, periodo de servicio) global para el tráfico S-PSMP e informa a las otras estaciones de que no pueden transmitir durante estos intervalos. Una vez declarado un PSMP SP, el punto de acceso transmite en primer lugar datos en la dirección de ‘bajada’ (punto de acceso a

cliente) a todos los clientes S-PSMP pertinentes durante el tiempo de transmisión de bajada (DTT, downlink transmission time), y a continuación acepta tráfico de los clientes durante el tiempo de transmisión de subida (UTT, uplink transmission time) (del cliente al punto de acceso)(figura 32)

S-PSMP es una forma muy eficaz de transmitir tráfico streaming o periódico a través de 802.11n: no hay competencia por el medio, ya que todo depende de una planificación pública.

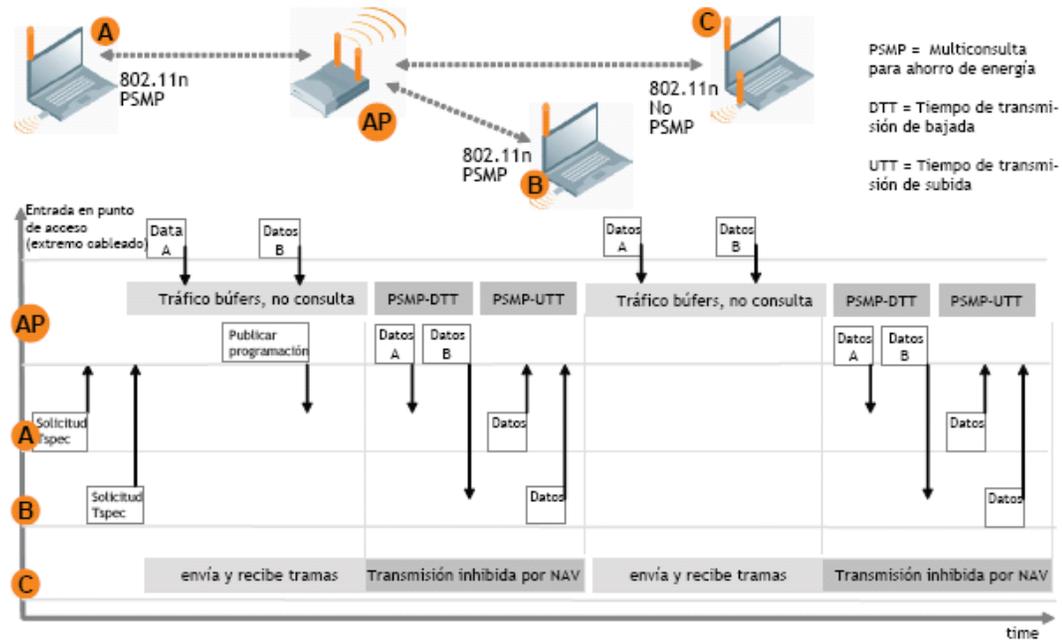


Figura 32: PSMP programado

2.4.2.5 Operación de coexistencia en fases (PCO, Phased Coexistence Operation) [16]

La Operación de coexistencia en fases (PCO, Phased Coexistence Operation) está pensada para que un punto de acceso 802.11n admita tanto clientes 802.11n como 802.11a/g y sea un buen vecino para otros puntos de acceso 802.11 del área.

Como se muestra en la figura 33, el punto de acceso crea segmentos temporales en su célula entre el funcionamiento a 20 MHz compatible con 802.11 a/b/g en cada uno de los canales de 20 MHz y funcionamiento completo a 40 MHz para los clientes 802.11n.

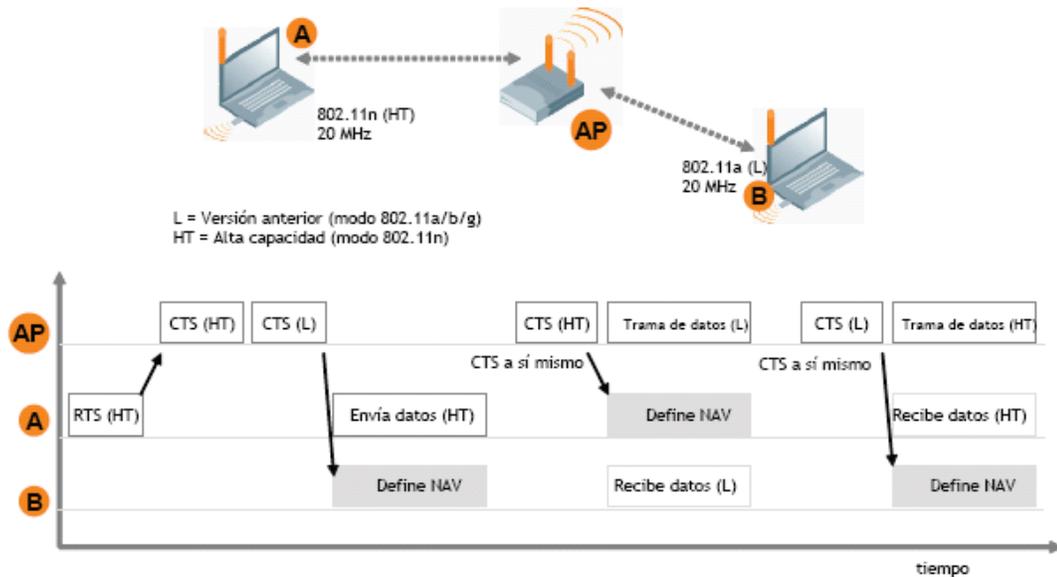


Figura 33: Coexistencia en fase

Para mantener el orden y ofrecer la máxima capacidad se emplean dos mecanismos

En primer lugar, para los clientes 802.11n, el punto de acceso anuncia un próximo cambio de modo de operación, lo que permite a estos clientes seguir comunicándose en todos los segmentos temporales, ya sean de 20 MHz o de 40 MHz. Es obvio que la capacidad es inferior durante los segmentos de 20 MHz, pero en todo caso la transmisión entre el cliente y el punto de acceso puede proseguir sin interrupciones. Mientras el diagrama muestra todos los segmentos temporales con la misma longitud por simplicidad, el punto de acceso puede elegir entre un número de intervalos de tiempo definidos para cada segmento de tiempo.

Para los clientes 802.11 de versiones anteriores, solo uno de los tres modos de operación (canal de 40 MHz, 20 MHz superior o 20 MHz inferior) será posible en cualquier momento: estos clientes solo podrán operar en uno de los canales de 20 MHz. Durante los segmentos de tiempo en los que el punto de acceso esté en uno de los otros dos modos, se debe informar a estos clientes de que no pueden transmitir, ya que el punto de acceso no podrá recibir sus tramas. Para ello, el punto de acceso transmite una trama CTS (clear to send, ver más adelante) dirigida a sí mismo con un valor de 'duración' igual a la duración del siguiente segmento temporal. Cuando los clientes reciben esta trama, asignan este valor a su NAV (network allocation vector, vector de asignación de red): según las normas de todos los estándares 802.11, no tienen permiso para intentar transmitir hasta que se agote este temporizador.

La Operación de coexistencia en fases es también una estrategia de buena vecindad, ya que los puntos de acceso y clientes dentro del alcance del punto de acceso podrán recibir los mensajes de CTS dirigidos a sí mismo y asignar sus temporizadores NAV de la forma apropiada, evitando así una de las formas de interferencia entre canales. Sin embargo, las células 802.11a/b/g que operen dentro del alcance de una célula PCO experimentarán una reducción de capacidad, ya que los puntos de acceso y los clientes tendrán inhibida la función de transmisión durante un porcentaje significativo del tiempo que antes tenían disponible.

2.4.2.6 Mecanismos de Protección

En esta parte se va a revisar ciertos mecanismos para la protección de las transmisiones de alto rendimiento de estaciones que no pueden reconocer estos formatos y por lo tanto no puedan aplazar sus transmisiones. Estos mecanismos incrementan el overhead de una trama, razón por la cual deben ser utilizados cuando sean necesarios.

Estos mecanismos son utilizados debido a que se tienen redes heterogéneas, por una parte se está trabajando con estándares anteriores, en su gran mayoría con 802.11g y por otro lado la no existencia de dispositivos homogéneos de alto rendimiento (802.11n) en el cual algunos de los casos no incluyen ciertas características opcionales.

Se posee un mecanismo que consiste en el intercambio de las tramas RTS/CTS, el cual es transmitido en formato de tramas PPDU compatibles con estaciones legadas (802.11a/b/g) para de esta manera establecer el NAV de las estaciones vecinas y proteger las secuencias transmitidas.

Si existe al menos una estación IEEE 802.11b asociada a un BSS, el punto de acceso se encarga de establecer un bit en el beacon para indicar a las demás estaciones de esto. De tal manera, que una estación que recibe este beacon, ya sabe que debe transmitir su RTS/CTS en DSSS/CCK.

Para proteger una transmisión de alto rendimiento de estaciones 802.11a/g se utiliza el formato mixto de alto rendimiento. Este formato incluye el preámbulo legado el cual permite diferir la transmisión de las estaciones de rendimiento no alto para que no interfieran con la transmisión de alto rendimiento.

También se tiene un mecanismo denominado CTS-to-self, el cual fue introducido en 802.11g para tener protección con dispositivos 802.11b. La secuencia empieza cuando la estación origen envía una trama CTS pero con el campo de dirección destino

establecido a su propia dirección MAC y el campo duración indicando lo que va a durar la trama. (Figura 34)

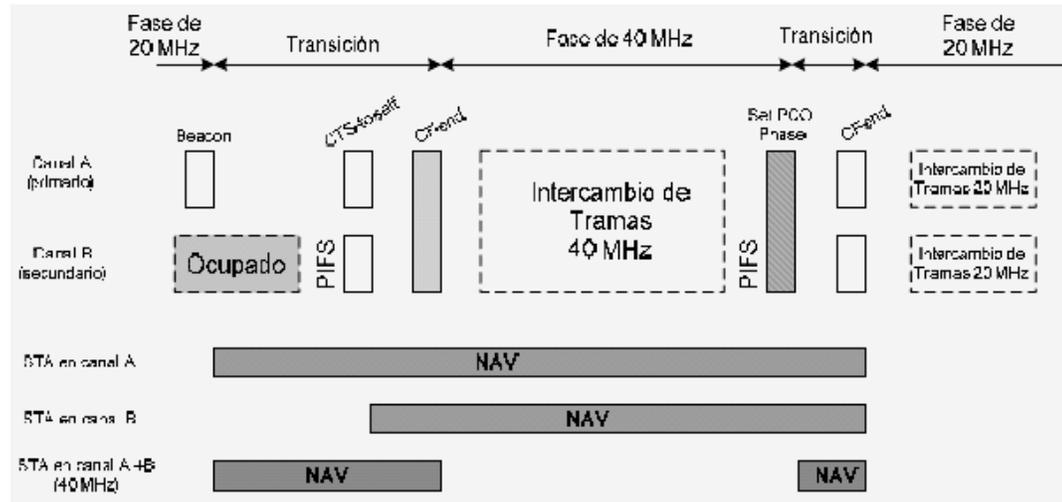


Figura 34: Mecanismos de Protección

2.4.2.7 Arquitectura de servicios de datos MAC

A diferencia de la norma 802.11 – 2007, esta arquitectura sufre modificaciones, como se muestra en la figura 35. Durante la transmisión, una MSDU pasa por algunos (o todos) de los siguientes procesos: *agregación A-MSDU*, envío de tramas diferidas durante el modo de ahorro de energía, asignación de número de secuencia, fragmentación, encriptación, protección de integridad, formateo de trama, y *agregación A-MPDU*. De acuerdo al estándar IEEE 802.1X-2004 se puede bloquear la MSDU en el puerto Controlado (Controlled Port). En este punto, las tramas de datos que contienen todo o parte de la MSDU se encolan por acceso de streams de categoría/tráfico (AC/TS).

Durante la recepción, una trama de datos recibida pasa a través de los procesos de *posible desagregación A-MPDU*, cabecera MPDU y validación del código de redundancia cíclica (CRC), remoción de duplicados, posible reordenamiento si el mecanismo de de confirmación de bloque se usa, descryptación, defragmentación, chequeo de integridad, y detección de reenvío. Después de la detección de reenvío (o defragmentación si se usa seguridad) y *posible desagregación A-MSDU*, una ó más MSDUs se envían a MAC_SAP o al DS. La IEEE 802.1X Controlled/Uncontrolled Ports descartan *cualquier MSDU recibida*, si el Puerto controlado no está habilitado y si la MSDU no representa una trama IEEE 802.1X. [18]

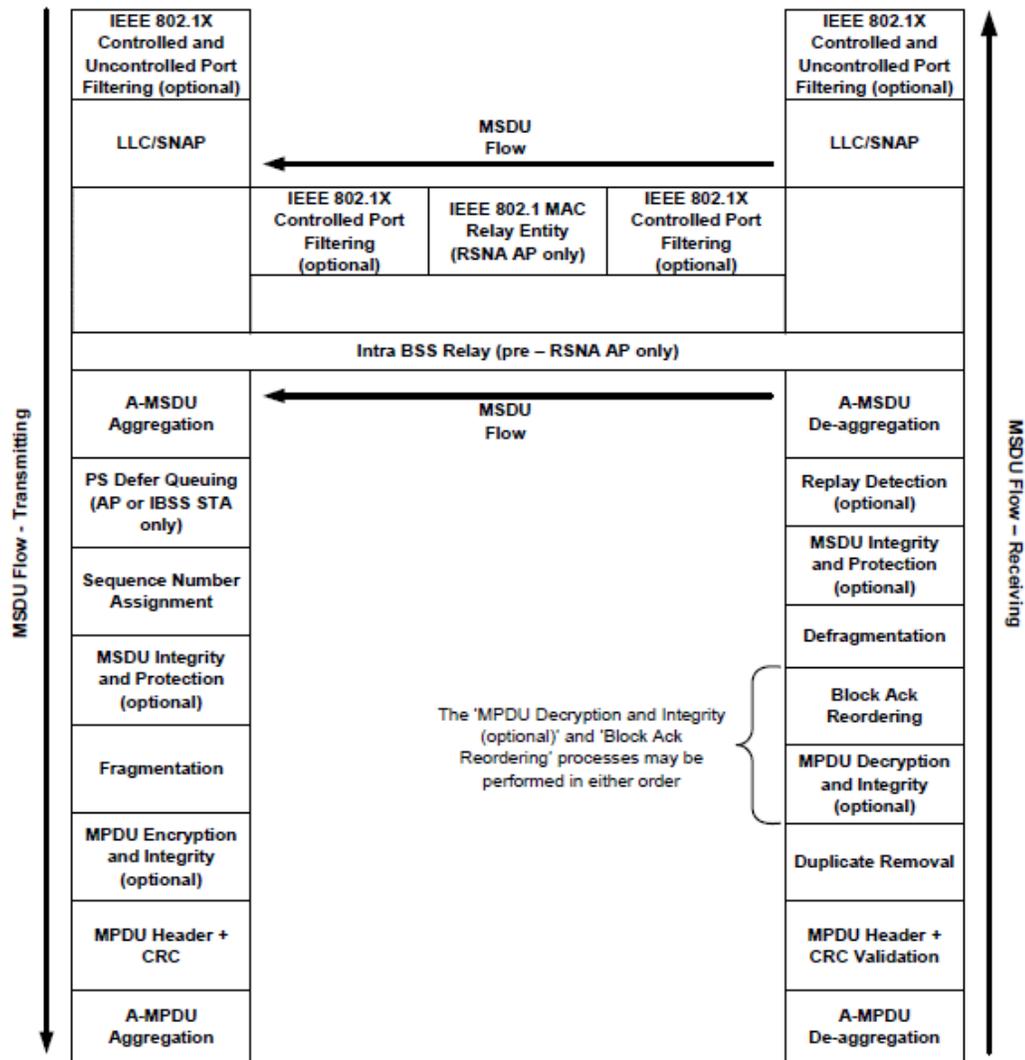


Figura 35: Arquitectura de servicios de datos MAC

2.4.3 Uso de 802.11n en la banda de 2,4 GHz [16]

La banda de 2,4 GHz presenta problemas específicos para 802.11n. Mientras que, en la banda de 5 GHz, las entidades de regulación han establecido que los canales utilizables estén separados 20 MHz, el espaciado en 2,4 GHz es de 5 MHz. Este hecho, combinado con la limitación de espectro disponible en esta banda, ha hecho que de forma habitual se utilicen los canales 1, 6 y 11 es una planificación de 3 canales (en EE.UU, otros reguladores permiten el uso del canal 13). Esto presenta dos dificultades al definir un canal de 40 MHz en 2,4 GHz. En primer lugar, la limitación de espectro disponible solo permitiría dos canales en la banda, uno a 40 MHz y el otro a 20 MHz. En segundo lugar, no sería posible construir el canal de 40 MHz sobre dos canales de 20 MHz adyacentes. Esta superposición de canales se muestra en la figura 36.

En la práctica, esto se traduce en que es poco probable que se vayan a utilizar canales de 40 MHz en la banda de 2,4 GHz. Pero eso no quiere decir que no se deba utilizar 802.11n: las mejoras de rendimiento existirán incluso con el uso de un canal de 20 MHz, aunque la presencia de clientes de versiones anteriores reducirá los beneficios reales obtenidos. También sirve para ilustrar uno de los motivos para el uso de 802.11n en clientes portátiles como teléfonos móviles con Wi-Fi, e incluso en tarjetas NIC para PC en donde el espacio es limitado y los fabricantes se ven tentados a recurrir al uso de componentes 802.11g por razones de consumo, tamaño y coste.

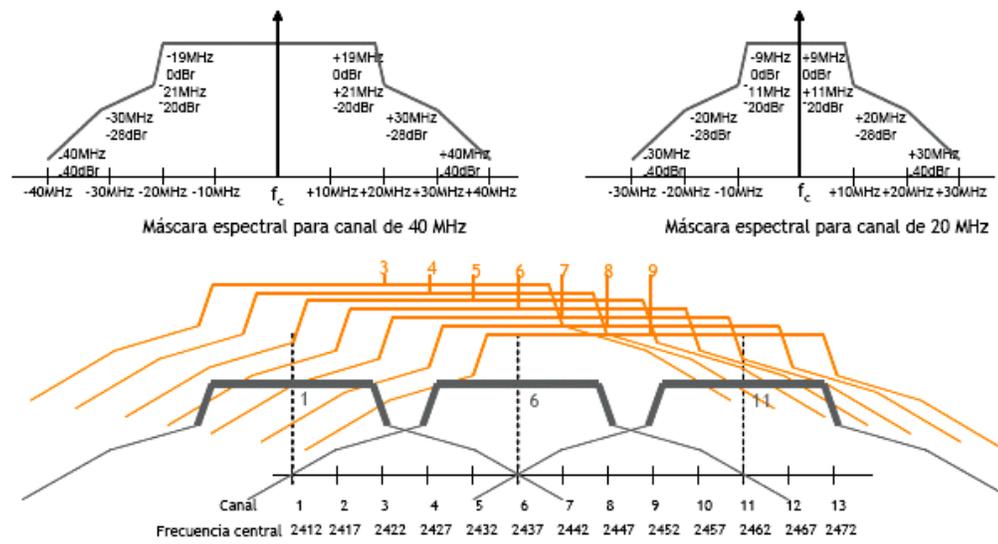


Figura 36: Canales definidos para la banda de 2,4 GHz, con las opciones comunes de plan de canales de 20 MHz y canal de 40 MHz

Si estos dispositivos pueden funcionar en modo 'n', la célula no tendrá necesidad de utilizar PCO ni otro modo de coexistencia, incrementando así en gran medida el rendimiento de la célula, incluso usando una única antena con una sola cada de transmisión/recepción. Los diseñadores de dispositivos cliente de tamaño reducido como teléfonos móviles ya están enfrentándose a estos desafíos con técnicas como diversidad de polarización y posición, pero lo más probable es que pase algún tiempo antes de que un pequeño dispositivo de mano 802.11n logre obtener el mismo rendimiento que un PC con las antenas incorporadas.

2.4.4 Uso de 802.11n en la banda de 5 GHz [16]

Se cree que las redes empresariales ‘n’ utilizarán de forma exhaustiva la banda de 5 GHz.

En la figura 37 se muestran los canales de 40 MHz disponibles en las diversas bandas de 5 GHz. Observe que la Selección de frecuencia dinámica (DFS, Dynamic Frequency Selection), una técnica de 802.11h, es necesaria para la operación en algunas de estas bandas.

Los chips de silicio ‘Draft-n’ suelen ser compatibles con este requisito de DFS. La amplia disponibilidad de canales permitirá una implementación masiva con canales de 40 GHz, así como opciones de implementación con células 802.11a y ‘n’ paralelas a 5 GHz; las células ‘n’ podrán efectuar repartición de carga y dirigir los clientes de versiones anteriores a las células 802.11a.

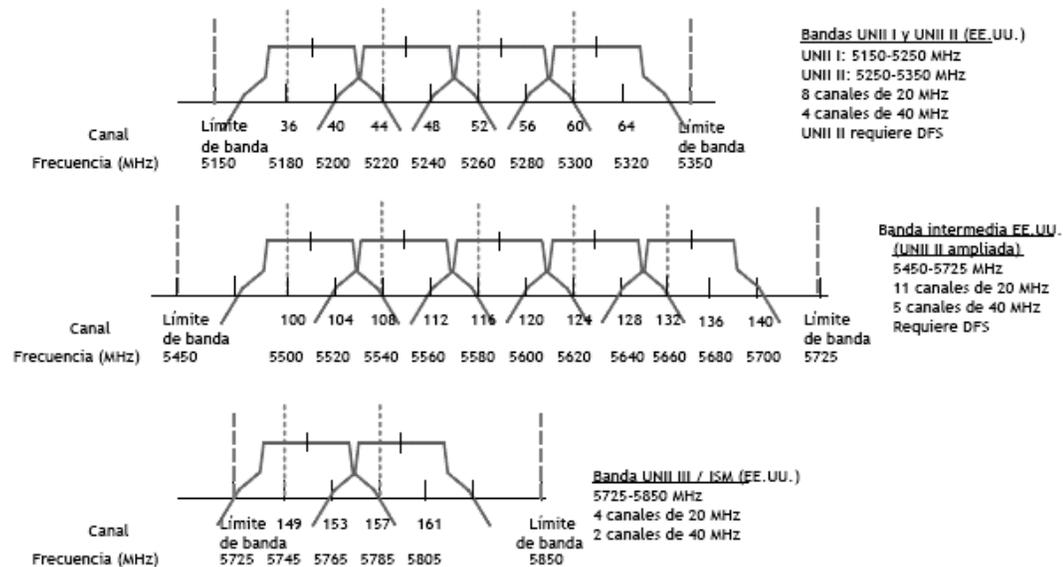


Figura 37: Canales definidos para la banda de 5 GHz (regulaciones EE.UU.), con las opciones comunes de plan de canales de 20 MHz y canal de 40 MHz

2.5 Capacidad Real de las Celdas 802.11n [16]

Mientras que un punto de acceso 802.11a/g admite una velocidad de datos máxima de 54 Mbps, 802.11n puede llegar hasta los 600 Mbps (con configuraciones 4x4 completas, que aún no están disponibles). Se trata de un dato importante, ya que una célula Wi-Fi (el área cubierta por un único punto de acceso) comparte todo el ancho de banda: el comportamiento es muy similar al de la Ethernet cableada original, en la que todas las estaciones compartían un único segmento de cable y debían coordinar las transmisiones para evitar colisiones. Tres son los efectos que limitan la capacidad efectiva de una célula 802.11 (los ejemplos son de 802.11g, pero son equivalentes en 802.11n):

- *Velocidades de datos reales.* Aunque en las especificaciones se indican velocidades de datos máximas, estas solo se alcanzan en condiciones de radio óptimas. La distancia del punto de acceso al cliente, los obstáculos a las transmisiones RF como muebles o personas y las interferencias de otras transmisiones limitan la velocidad alcanzable. Así, es posible que un cliente situado a 20 metros del punto de acceso en un entorno de oficina alcance solo una velocidad de datos de 12 Mbps en lugar de la velocidad pico de 54 Mbps. Si todos los clientes se conectan a esta velocidad, la capacidad bruta de la célula pasa a ser de 12 Mbps.

- *Pérdidas por contención.* El medio inalámbrico es un medio compartido, de forma que las estaciones que quieran enviar datos deberán competir por el control temporal de este. Esta contención o competición ocupa un tiempo que deja de estar disponible para el tráfico de datos, reduciendo así la capacidad de la célula. La contención depende del número de clientes y de la longitud de las tramas enviadas: a más clientes y tramas más cortas, menor capacidad efectiva de la célula. Por ejemplo, mientras que una célula 802.11g puede alcanzar una velocidad de transferencia de 26 Mbps con tramas de 1500 bytes, la capacidad baja hasta unos 12 Mbps con tramas de 256 bytes. La función de agrupación MAC de 802.11n reducirá las pérdidas por contención, pero no funcionará con todos los tipos de tráfico.

- *Compatibilidad con versiones anteriores.* Todos los sistemas 802.11 están diseñados para ser compatibles con los clientes 802.11 de versiones anteriores. Así, un punto de acceso 802.11g admite clientes 802.11b. Sin embargo, esta característica tiene un precio: cuando un cliente de versiones anteriores se conecta a una célula, el resto de clientes y el punto de acceso deben indicar la presencia de tráfico con velocidades de datos que sean comprensibles para el cliente más antiguo. Para la compatibilidad 802.11g/b, esto se traduce en el uso de RTS/CTS a velocidades inferiores, lo que incrementa de forma considerable la sobrecarga y reduce la capacidad de la célula. Y, claro está, la estación de versión anterior transmite o recibe a velocidades de datos inferiores, disminuyendo la capacidad efectiva de la célula.

- El intervalo de guarda de 400 ns no es en general una opción realista para una red de empresa, en la que se producen numerosas reflexiones multirruta, algunas de ellas con dispersiones de retraso prolongado.

El diseño de clientes para 802.11n representa un desafío, ya que es difícil hallar espacio en ciertos dispositivos para montar antenas y cadenas RF adicionales, y el proceso puede exigir más espacio en placa y mayor consumo; y, claro está, el precio del silicio

802.11n será durante unos años superior al del 802.11a/g. Además, el diseño de tarjetas NIC y clientes como teléfonos Wi-Fi es complejo: hasta hace poco tiempo, los teléfonos Wi-Fi estaban limitados a 802.11b.

Todo esto contribuye a reducir la capacidad efectiva de una célula. Así, aunque se anuncian para 802.11n velocidades de transferencia de hasta 600 Mbps, la capacidad que se espera de una célula 802.11n es de entre 100 y 200 Mbps, y seguramente podría ser menos en caso de clientes que se conectan desde largas distancias, transmiten tramas cortas o parten de las tecnologías anteriores 802.11a/b/g. Sin embargo, esto aún representa un factor cinco de mejora frente a la tecnología 802.11a/g.

La tabla 18 muestra previsiones de expectativas ‘razonables’ para velocidades de datos en una implementación 802.11n empresarial (suponiendo una implementación pura sin clientes ni puntos de acceso 802.11a/b/g). Esta tabla se puede interpretar como una comparativa de las velocidades de datos alcanzables en 802.11n frente a las de 802.11a u 802.11g a la misma distancia del punto de acceso. También se puede leer como la capacidad de una célula (solo con clientes 802.11n) comparada con una célula del mismo radio.

| Secuencias espaciales | Ancho de banda del canal (MHz) | Intervalo de guarda (ns) | Intervalo de velocidades de capa física (MHz) | Rendimiento relativo a 802.11a/g |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|---|----------------------------------|
| 1 (2x1, 3x1) | 20 | 800 | 7.2-72.2 | 1x - 1.5x |
| 1 (2x1, 3x1) | 40 | 800 | 13.5 - 135 | 1.5x - 2x |
| 2 (2x2) | 40 | 800 | 27 - 270 | 2x - 4x |
| 3 (3x3) | 40 | 800 | 40.5 - 405 | 4x - 6x |

Tabla 18: Rendimiento relativo 802.11n frente a anteriores

De acuerdo a la teoría del estándar, y los valores máximos de velocidad posibles a alcanzar, se muestran en la tabla 19, las velocidades de datos teóricas posibles de acuerdo al ancho de canal, cantidad de haces de señal en el espacio y tipo de intervalo de Guarda. Estos valores son calculados por la Wi-Fi Alliance y mostrados en sus página WEB, considerando las distintas opciones y configuraciones que pueden utilizar los equipos.

| | 20 MHz Channel | | | | 40 MHz Channel | | | |
|---|--|--|---|--|---|--|---|---|
| | 1 stream | 2 streams | 3 streams | 4 streams | 1 stream | 2 streams | 3 streams | 4 streams |
| | Data Rate, in Mbps | | | | | | | |
| 802.11b 2.4 GHz | 1, 2, 5.5, 11 | | | | | | | |
| 802.11a 5 GHz | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 | | | | | | | |
| 802.11g 2.4 GHz | 1, 2, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 | | | | | | | |
| 802.11n 2.4 and 5 GHz | 6.5, 13, 19.5, 26, 39, 52, 58.5, 65 | 13, 26, 39, 52, 78, 104, 117, 130 | 19.5, 39, 58.5, 78, 117, 156, 175.5, 195 | 26, 52, 78, 104, 156, 208, 234, 260 | 13.5, 27, 40.5, 54, 81, 108, 121.5, 135 | 27, 54, 81, 108, 162, 216, 243, 270 | 40.5, 81, 121.5, 162, 243, 324, 364.5, 405 | 54, 108, 162, 216, 324, 432, 486, 540 |
| 802.11n, SGI enabled 2.4 and 5 GHz | 7.2, 14.4, 21.7, 28.9, 43.3, 57.8, 65, 72.2 | 14.4, 28.9, 43.3, 57.8, 86.7, 115.6, 130, 144.4 | 21.7, 43.3, 65, 86.7, 130, 173.3, 195, 216.7 | 28.9, 57.8, 86.7, 115.6, 173.3, 231.1, 260, 288.9 | 15, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150 | 30, 60, 90, 120, 180, 240, 270, 300 | 45, 90, 135, 180, 270, 360, 405, 450 | 60, 120, 180, 240, 360, 480, 540, 600 |

Tabla 19: Velocidades de datos en Mbps para 802.11 a/b/g/n

Aparte de los efectos en la capa física indicados, las numerosas mejoras en la capa MAC de 802.11n supondrán un incremento de la velocidad de transmisión y, por tanto, de la capacidad de una célula. El análisis de estos efectos supone un desafío, ya que dependen en muy gran medida de los patrones de datos. Algunas de las mejoras están especialmente pensadas para contenidos de streaming como vídeo, pero se especula que pueden reducir la velocidad de otros tipos de tráfico como voz o archivos.

Muchos números de performance en la industria citados para cálculos de throughput, mediciones y comparaciones están basados, típicamente, en la transmisión de la suite de protocolos TCP/IP. La figura 38 muestra cómo algunas características opcionales contribuyen a mejorar el “throughput” de dispositivos Wi-Fi CERTIFIED como “n”:

Las velocidades de datos esperados reales de acuerdo a algunos tests se grafican en la figura 38:



Figura 38: Rendimiento esperado en 802.11n respecto a normas anteriores

En la figura 39 se muestran los resultados de los modelos de propagación en espacio libre y en edificios. La línea de ‘espacio libre’ supone un comportamiento con línea de visión sin obstáculos, y se trata obviamente del límite superior de lo que se puede esperar en la práctica: en redes reales no será posible mejorar estas cifras. La línea correspondiente a la propagación en edificios muestra, como era de esperar, un descenso mucho más pronunciado de la velocidad de datos con la distancia: en general se asume ausencia de línea de visión y numerosas reflexiones multirruta. La forma general de esta curva está bastante aceptada: la pendiente varía en función del tipo de entorno.

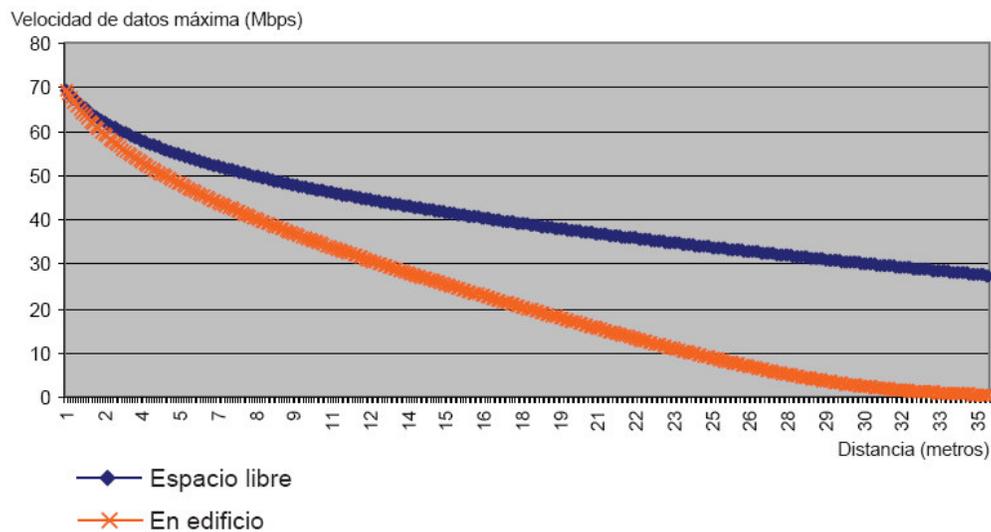


Figura 39: velocidad de datos en 802.11n

La hipótesis en esta gráfica es un factor de propagación γ de 2,7 (las estimaciones varían entre 2,0 para espacio libre y 3,5 en entornos extremadamente complejos), y creemos que es un valor razonable para edificios con pocas paredes internas ‘gruesas’, pero con escritorios, divisiones de cubículos, tabiques separadores delgados y puertas. Este modelo puede corresponder a un edificio de oficinas moderno; mientras que los edificios con paredes internas de ladrillo u hormigón o que contengan objetos metálicos de gran tamaño justificarían el uso de un factor γ mayor.

Ahora se ajusta a las velocidades de datos reales de 802.11, en función de las distintas combinaciones de codificación, y con un factor para simular el ruido aleatorio en el entorno. Se trata de una simplificación grosera de un entorno típico de empresa, en el que habrá fuentes de ruido no aleatorio y también otros dispositivos Wi-Fi que de hecho interferirán con el canal considerado, pero sirve para obtener una aproximación del rendimiento esperado. En la figura 40 se muestra esto para 802.11a, que se puede utilizar como referencia para comparar con los resultados de 802.11n.

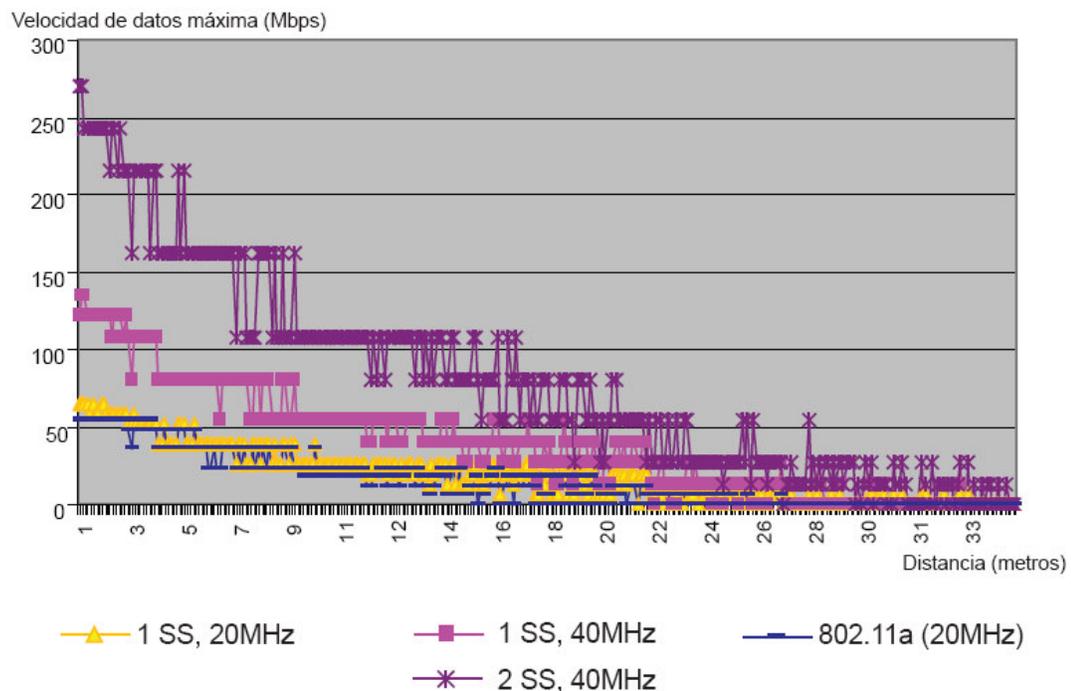


Figura 40: velocidad de datos reales en 802.11n

Los resultados muestran que, incluso con una única secuencia espacial, 802.11n supera el alcance de 802.11a/g. Este efecto puede deberse a STBC, MRC y una serie de mejoras menores en la capa física (el modelo no incluye la formación de haces). La cuantía de la mejora del alcance de 802.11n sobre 802.11a es de aproximadamente 5%

para una sola antena, y aumenta hasta el 50% en el caso de antenas adicionales disponibles.

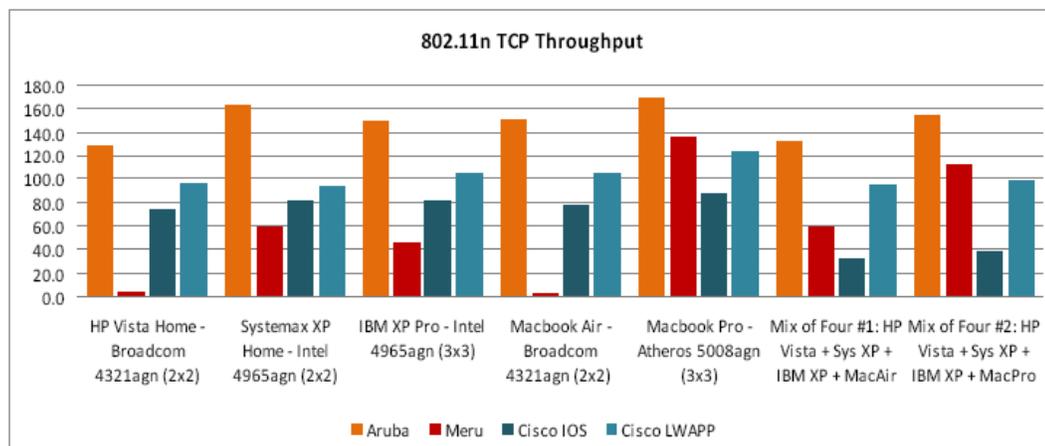
Asimismo, el alcance efectivo de 802.11n (la distancia a la que la velocidad de datos más baja deja de ser fiable) aumenta ligeramente con el número de secuencias espaciales: alrededor del 20% con la segunda secuencia. Aunque puede parecer un incremento escaso, permite aumentar el espaciado de los puntos de acceso y una reducción en su número del 30-50%.

En pruebas de Laboratorio de ARUBA se determinaron la performance de diferentes tipos de clientes como así también el impacto de usar múltiples clientes en una infraestructura 802.11n. [17]

Se testearon 4 equipos AP en la capacidad de transferencia TCP: Aruba's 802.11n AP, Cisco's autonomous AP (IOS), Cisco's lightweight AP (LWAPP), y Meru's thin AP. Además cinco clientes laptop usando chipsets representativos 802.11n de Atheros, Broadcom, y Intel que se testearon individualmente y en grupos. Todos los equipos utilizados fueron certificados por Wi-Fi Alliance® Draft-802.11n v2.0 certified.

Se usaron la misma topología de red, entorno de RF, y conectividad Gigabit Ethernet para todas las pruebas con un script de throughput TCP que genera tráfico desde la red cableada a los clientes inalámbricos que corren una aplicación IxChariot Performance Endpoint.

Todos los APs fueron dual-band 2.4/5 GHz pero se utilizó el modo 5 GHz, y en una configuración de antena 3x3 MIMO. (Figura 41)



| 802.11n TCP Throughput | Aruba | Meru | Cisco IOS | Cisco LWAPP |
|---|-------|-------|-----------|-------------|
| HP Vista Home - Broadcom 4321agn (2x2) | 128.0 | 3.1 | 74.2 | 96.2 |
| Systemax XP Home - Intel 4965agn (2x2) | 163.3 | 58.2 | 80.8 | 92.5 |
| IBM XP Pro - Intel 4965agn (3x3) | 149.2 | 44.8 | 81.7 | 105.7 |
| Macbook Air - Broadcom 4321agn (2x2) | 151.0 | 2.0 | 78.9 | 105.4 |
| Macbook Pro - Atheros 5008agn (3x3) | 169.2 | 135.8 | 87.9 | 124.3 |
| Mix of Four #1: HP Vista + Sys XP + IBM XP + MacAir | 131.9 | 58.7 | 31.7 | 96.0 |
| Mix of Four #2: HP Vista + Sys XP + IBM XP + MacPro | 154.0 | 113.2 | 38.2 | 99.3 |

Figura 41: comparación de velocidad en equipos reales en 802.11n

2.6 Estrategias de Migración [16]

En esencia, hay tres estrategias para transformar una WLAN de empresa en ‘n’: pura, superpuesta e intercalada. El diseñador de red debe dar respuesta a cuatro cuestiones: dónde situar los nuevos puntos de acceso 802.11n, qué canales utilizar, posibilidad de eliminar algunos de los puntos de acceso 802.11a/b/g más antiguos y el modo de gestionar la población de clientes.

Como ya se ha mencionado, una red 802.11n uniforme permitirá obtener un alcance mayor y por tanto un mayor espaciado de los puntos de acceso que en una red 802.11a/b/g. Los ingenieros de RF destacan que cada instalación tiene sus propias condiciones y, en general, evitan ofrecer datos numéricos para implementaciones típicas pero, por lo general, en edificios de empresa con cobertura total inalámbrica, para velocidades mínimas de 9-12 Mbps, un 150% de superposición de células y una distribución de oficina y población de usuarios ‘típicas’, los puntos de acceso 802.11a/g pueden espaciarse unos 15 a 21 metros. Con puntos de acceso ‘n’ y clientes 802.11a/b/g, lo normal es pensar que se mantendrán estos parámetros: los clientes de versiones anteriores no se conectan a mayores distancias ni con velocidades más altas.

Sin embargo, con puntos de acceso y clientes ‘n’, las estimaciones son que el espaciado de puntos de acceso puede aumentar quizá hasta 20-25 metros. En una instalación pura nueva, esta característica puede ofrecer un ahorro considerable en hardware, cableado e instalación de puntos de acceso, e incluso en puertos de conmutadores LAN de acceso, espacio en armarios de conexión, consumo y refrigeración.

802.11n ofrece una oportunidad para aumentar el uso de la banda de 5 GHz, en la que abundan los canales, las interferencias son raras y se puede emplear el canal de 40 GHz. Sin embargo, aunque ya hay disponibles clientes PC ‘n’ de 5 GHz, los clientes especializados como teléfonos Wi-Fi, etiquetas de localización o lectores de código de barras portátiles quedarán confinados a los 2,4 GHz y 802.11b/g durante al menos 12 a

24 meses, con escasas excepciones. Por este motivo y por la cantidad considerable de clientes 802.11b/g instalados, sugerimos que cualquier red de empresa ofrezca cobertura para la banda de 2,4 GHz. Los fabricantes de material de WLAN comercializarán puntos de acceso compatibles con doble radio, ambas con capacidades ‘n’ o bien una ‘n’ y la otra 802.11a/b/g.

Red pura (Greenfield)

Esta estrategia no es en realidad una migración: se trata de construir una red nueva con puntos de acceso y clientes nuevos en un lugar en donde no había WLAN. El usuario tiene la oportunidad de empezar con una cobertura totalmente ‘n’, y garantizar que todos los clientes tengan capacidades ‘n’ o desecharlos con rapidez para sustituirlos por otros más capaces. El principal desafío que plantea esta estrategia es que todos los clientes deben tener capacidades ‘n’; en caso contrario, los clientes de versiones anteriores tendrán un alcance más limitado, similar a las distancias de 802.11a/g, y experimentarán velocidades de conexión bajas y pérdidas de cobertura; también reducirán el rendimiento esperado de los clientes 802.11n en las células a las que se conecten

Recomendaciones Generales para una migración de redes 802.11 anteriores a “n”:

- Confirme que dispone de clientes compatibles con 802.11n para todas las necesidades de actuales y futuras previsibles de la empresa.
- La planificación de RF puede llevarse a cabo teniendo en cuenta el alcance previsto de 802.11n, lo que permite reducir el número de puntos de acceso. Utilice un mayor espaciado de puntos de acceso únicamente si todos los clientes tienen capacidad para, al menos, 2 secuencias espaciales. Limite los puntos de acceso de los que ya dispone a un subconjunto de los canales de 5 GHz disponibles y utilice los demás para 802.11n.
- Tenga en cuenta la alimentación de puntos de acceso, puertos de conmutador de acceso, etc.
- Sitúe los puntos de acceso evitando líneas de visión despejadas para mejorar el rendimiento MIMO.
- Desactive los mecanismos de coexistencia como PCO que admiten funcionamiento en modo mixto.
- Active los mecanismos de buen vecino como doble CTS si hay otros puntos de acceso 802.11a en el mismo edificio y canal.

- No haga caso de las solicitudes de ‘intolerancia a 40 MHz’ o rechace esos clientes.
- Utilice puntos de acceso de doble radio en los que la radio principal será 802.11n a 5 GHz y la secundaria (que puede ser 802.11a/b/g) utilice la banda de 2,4 GHz.
- Tenga en cuenta que, en una red pura con poca carga, el uso de puntos de acceso ‘n’ con espaciado 802.11a y la activación de PCO para una base de clientes mixta representa una solución aceptable: al principio, la capacidad será baja, quizá incluso más que en una red 802.11a, hasta que el número de clientes de versiones anteriores se reduzca, pero la red puede instalarse una vez y crecer con la base de clientes sin necesidad de reconfigurarla.
- Los puntos de acceso ‘n’ requerirán conexiones Gigabit Ethernet para que el enlace troncal no se convierta en un cuello de botella. A su vez, esto puede exigir la actualización a cables de Categoría 5e o Categoría 6 (los cables de Categoría 5 no están aprobados para Gigabit Ethernet). Sin embargo, el rendimiento se incrementará de forma significativa incluso sin la actualización a GE.
- Asimismo, los conmutadores de acceso LAN de los armarios de conexión deben tener puertos GE disponibles.
- El estándar de alimentación 802.3af Power-over-Ethernet no basta para muchos de los nuevos puntos de acceso ‘n’ (suponiendo al menos dos antenas y cadenas RF a 5 GHz, un punto de acceso consumirá como mínimo 15 W), de modo que es necesario que los conmutadores de acceso o equipos intermedios PoE sean compatibles con 802.3at, o será necesario utilizar transformadores locales.
- Las directrices de montaje y ubicación de puntos de acceso pueden ser distintas. Con los primeros puntos de acceso 802.11, lo importante era proporcionar una línea de visión lo más despejada posible entre el punto de acceso y el cliente, de manera que se recomendaba no ocultar los puntos de acceso tras tuberías metálicas o conducciones de aire acondicionado. Con la adopción de MIMO, estas prácticas pueden ser precisamente las más adecuadas para ‘n’.
- 802.11n ofrece más oportunidades para montar puntos de acceso en el espacio de trabajo (paredes, divisiones, muebles, pero no en el falso techo), ya que la ausencia de línea de visión despejada es, de hecho, una característica favorable. Esto puede reducir el efecto de algunos de los problemas de instalación mencionados: en las oficinas en las que haya vacíos de cobertura de GE, los puntos de acceso ‘n’ se pueden ubicar de forma

que saquen provecho de ellos, y una opción razonable es proporcionar alimentación localmente a través de un transformador mural.

2.6.1 Consideraciones de diseño de 802.11n

A pesar de todas estas opciones de migración, el diseño de una red 802.11n es mucho más difícil, más aún cuando no se conocen todas sus características. Las condiciones de diseño para caso pueden ser: [4]

- Efecto Multipaso: tradicionalmente presenta el problema de que señales que toman distintos caminos pueden interferir entre sí. MIMO cambia esta dificultad e una ventaja usando múltiples caminos para transportar diferentes haces de datos. Sin embargo, puede seguir provocando problemas, ya que los distintos caminos dependen de los obstáculos entre el transmisor, y por lo tanto son difíciles de predecir y fluctúan de un momento a otro si las personas u objetos se mueven.
- Cobertura de Access Point puede ser impredecible: en redes 802.11a/b/g, los mapas muestran un radio relativamente simple, ya que es sólo un área contigua, con señales más fuertes más cerca del AP. La cobertura se puede representar como una serie de círculos concéntricos que emanan de cada AP, con círculos de mayor tasa de datos más cerca del AP. No es una representación totalmente segura, pero lo suficiente para propósitos de planeamiento. Principalmente se considera la distancia, y los obstáculos sólo reducen el área de cobertura. En 802.11n, la cobertura es menos predecible. Depende del modo en que las ondas de radio se reflejan, se refractan o difractan alrededor de obstáculos tales como paredes, paneles divisores y, aún, personas. La figura muestra la cobertura real de un AP 802.11n en una oficina, donde las mayores velocidades se indican por sombras más oscuras. Algunas áreas de mayor performance están lejos del AP y no contiguas a las más cercanas.

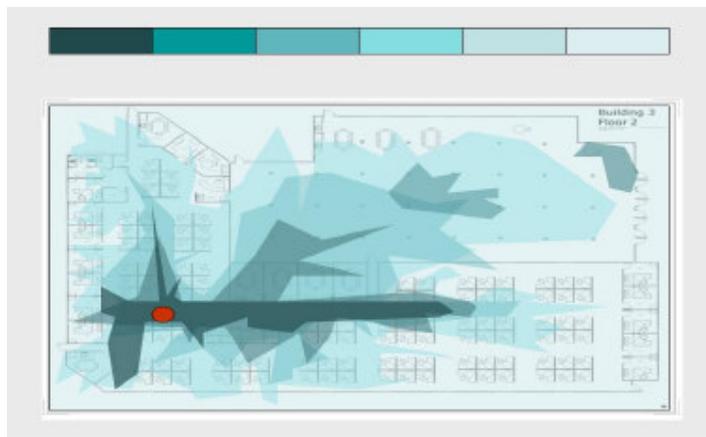


Figura 42: Área de cobertura de un AP 802.11n

- El planeamiento de la cobertura es complicado: para asegurar que una red inalámbrica esté disponible en una amplia zona, los radios de cobertura de los APa necesitan solaparse de modo que los clientes se puedan mover sin interrupción. Sin embargo, este solapamiento puede provocar interferencias, dependiendo de qué versión de red 802.11 se utilice. Hay dos modos de resolver esto:
 - **Microceldas:** las redes 802.11a/b/g usan una arquitectura de microceldas (igual que los celulares). Cada AP se sintoniza en un canal diferente de sus vecinos para evitar interferencia. La ventaja es que no se necesita coordinación entre los APs, fundamentalmente cuando los dispositivos se administran en forma independiente. La desventaja es que se requiere el uso de mucho espectro de radio (al menos 3 canales en 2,4GHz), y fuerza a los clientes retomar un nuevo canal cuando se mueven entre celdas, como se en la figura. Si ahora se coloca un AP con red 802.11n, no puede funcionar con toda su potencia, debido a que el rango extendido resulta en un incremento de interferencia.

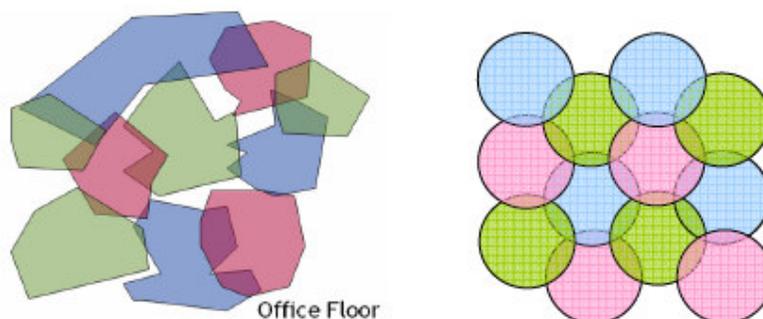


Figura 43: plan de canales de 20MHz en 2,4GHz en 802.11n (izquierda) vs 802.11b/g (derecha)

El hecho de disminuir la potencia introduce zonas muertas (áreas in señal) debido a que las puntas de las áreas son difíciles de cubrir. Si cubro esta deficiencia con más APs, se provoca más interferencia. Se puede agregar más canales, pero no siempre es útil, según se ve en la figura 44



Figura 44: cobertura 802.11n usando microceldas de 5GHz

- **Celdas Virtuales:** estas coordinan las transmisiones de APs adyacentes de modo que puedan usar el mismo canal (o los mismos canales, como la mayoría de los APs modernos que tienen más de un radio). Las ventajas de esto es que se necesita menos espectro de radio para cada zona de cobertura, y que los dispositivos clientes no son responsables de tomar decisiones de conectividad. Igual que con redes 3G y CMA, esta arquitectura permite que múltiples canales usen el mismo espacio físico de modo que múltiples celdas virtuales puedan coexistir. La diferencia es que 3G y CDMA usan múltiples canales para soportar múltiples operadores que compiten, las celdas virtuales lo usan para agregar capacidad y redundancia a la red para incrementar la performance y confiabilidad. La desventaja es que requiere procesamiento e inteligencia dentro de la red.
- **Redes de modo mixto:** Recordar que 802.11n debe ser totalmente compatible con estándares previos, es decir, que clientes de normas anteriores se puedan conectar a una red 802.11n. Sin embargo, este soporte tiene sus desventajas. La diversidad de dispositivos inalámbricos y sus drivers ya causan problemas con redes existentes 802.11g compatibles con clientes 802.11b. Si la red no está bien diseñada, un único cliente legado puede ralentizar la red completa para todos los usuarios. Esto es peor para 802.11n. El estándar ofrece muchas opciones y, por lo tanto, la diferencia entre el cliente más rápido y el más lento es mucho más dramática. Las velocidades de datos pueden variar de 300Mbps hasta 1Mbps. Debido a que los clientes más lentos demoran más en enviar la misma cantidad de datos que los clientes más rápidos, aquellos tienden a dominar el tráfico de las redes con accesos aleatorios. Si todos los clientes tienden la misma probabilidad de enviar un paquete, las redes 802.11n podrían estar casi todo el tiempo escuchando transmisiones lentas de 802.11b. Hay dos métodos efectivos para evitar esto: Reparto de tiempo de aire (Airtime Fairness) y Apilamiento de canal (Channel Stacking).
 - **Reparto de tiempo de aire:** está basado en la equidad de bits, un concepto originalmente aplicado a las redes cableadas. Actualmente en una amplia red de Ethernet conmutada, esta característica asegura que todas las estaciones conectadas a una red reciben una parte igual de la capacidad de la red. En las redes inalámbricas es mucho más compleja debido a la diferencia de velocidades y tasa de retransmisiones. Esto es real aún en redes de un único modo: un cliente 802.11n conectado a una red podría no sufrir pérdidas de paquetes y experimentar una velocidad constante de 200 Mbps, mientras que otro podría estar en una zona más

ruidosa y sufrir mucha pérdida de paquetes. La capa MAC unicast retransmite automáticamente los paquetes perdidos de modo que las aplicaciones no lo notan, pero esas retransmisiones toman tiempo, disminuyendo la velocidad de datos. Por ejemplo, si la mitad de los paquetes se pierden, la velocidad podría caer a un tercio.

Por esto es mejor medir a los clientes por tiempo que por cantidad de datos. Es decir, en vez de dejar que un cliente transmita una determinada cantidad de datos, se le deja acceso por una determinada cantidad de tiempo. Así, un cliente 802.11n puede transmitir alrededor de 10 veces más datos que un cliente 802.11g.

- Channel Layering (o Channel Stacking): En las redes inalámbricas donde hay varias celdas virtuales que comparten el mismo espacio físico pero no tienen solapamiento de canales, se multiplica la capacidad disponible. Esta capacidad adicional se puede usar para redundancia, para soportar mayores velocidades de datos o mayor densidad de usuarios y para soportar clientes de diferentes estándares. Esta característica se puede implementar con múltiples radios en un solo AP o usando múltiples APs juntos cubriendo la misma área, de modo que la capacidad total está limitada sólo por el número de canales sin solapamiento disponibles.
- **POWER OVER ETHERNET:** La mayoría de los APs 802.11n incorporan múltiples radios, cada uno de los cuales puede transmitir más de una haz espacial. Debido a esto se requiere más energía de alimentación. Tradicionalmente, los APs se alimentan a través de Power Over Ethernet (PoE) para evitar un cable más de energía. El estándar para PoE es IEEE 802.3af, donde la corriente continua de inyecta por un switch, o un dispositivo independientemente, y transportado sobre el cable de par trenzado. El límite nominal de potencia es de 12.95W, demasiado bajo para algunos APs 802.11n. Como solución se puede colocar una fuente local de corriente, o utilizar el nuevo estándar 802.3at para PoE, que puede dar una potencia de hasta 30W, pero se deben cambiar los equipos inyectoros.
- **Características de diseño para equipos clientes:** El peor problema para los clientes 802.11n es la necesidad de múltiples antenas. Esto no solo incrementa el costo sino también el tamaño físico, ya que las antenas usadas para soportar MIMO deben estar separadas al menos por media longitud de onda (3 a 6 cm. en las frecuencias usadas en 802.11); lo que es mucho espacio para algunos dispositivos móviles como teléfonos celulares, etc. Como resultado de esto, la Wi-Fi Alliance está certificando dispositivos que soporten 802.11n incluyendo una sola antena. Esto no obtiene los beneficios de MIMO pero soportan otras características tales como unión de canales e

intervalos de guardia cortos, y brindan velocidades de hasta 150Mbps en vez de los 300Mbps que dice la norma.

- Selección de banda de frecuencias y de canal: en 802.11n se puede trabajar tanto en 2,4GHz como en 5GHz, lo que da mayor soporte a distintos clientes:
 - **2,4GHz:** Disponibilidad de canal limitado: esta banda es la más utilizada, con los beneficios tradicionales de costos de radio más bajos y mayor alcance. La diferencia de costos actualmente es pequeña, pero el alcance siempre será mayor que en los 5GHz por una cuestión de las leyes físicas. La gran desventaja de esta banda es que es angosta y muy poblada. Con la unión de canales de 802.11n, la cantidad de canales sin solapamiento se reduce a uno, un grave problema para microceldas. Por eso se recomienda el uso de la banda de 5GHz. Para celdas virtuales se adapta mejor, ya que se usan dos canales para soportar el canal de 40MHz y el canal restante para uso de redes 802.11b/g.
 - **5 GHz: Selección de Frecuencias dinámicas:** Cuando se definieron los estándares 802.11, se restringieron a unos pocos canales en 2,4GHz y 5GHz. Más tarde, la FCC y otros entes reguladores de frecuencias permitieron más canales en la banda de 5 GHz, expandiendo así el espectro disponible para las redes 802.11. Sin embargo, muchos de estos canales son compartidos con otros usuarios, como los sistemas de radar. Como el radar tiene prioridad, las LANs inalámbricas necesitan cambiar de canal cuando detectan un sistema de radar, en un proceso que se llama Selección Dinámica de frecuencias (Dynamic Frequency Selection o DFS). Aunque la FCC solo requiere esta característica en ciertos canales, algunos fabricantes lo aplicaron a sus APs, aún en la banda de 2,4GHz. Debido a que DFS puede degradar la performance, se debe controlar de deshabilitarlo cuando no es necesario.
- **Efecto Ripple:** en redes basadas en la arquitectura de microceldas, resintonizar un AP puede provocar que todos sus vecinos deban resintonizarse también, debido a que APs adyacentes deben usar frecuencias no solapadas. Esto provoca una “cascada” de cambios a través de la red, ya que el sistema de administración de la red puede intentar calcular un nuevo plan de canales en tiempo real, lo que puede resultar en zonas sin cobertura e incremento de la interferencia. Estos problemas se suscitan más fácilmente en 802.11n que en redes anteriores a causa de lo impredecible de la cobertura por efectos de los multipasos. Otro problema potencial con los nuevos canales disponibles en 5GHz es que no todos los equipos lo soportan.

En 2.4 GHz, la arquitectura de celdas virtuales evita la mayoría de los problemas con DFS, ya que solo requiere un solo canal por cada capa de cobertura. Se pueden usar múltiples canales para proveer múltiples capas, en toda la red o sólo en las áreas donde se necesita mayor cobertura, como se muestra en la siguiente figura.

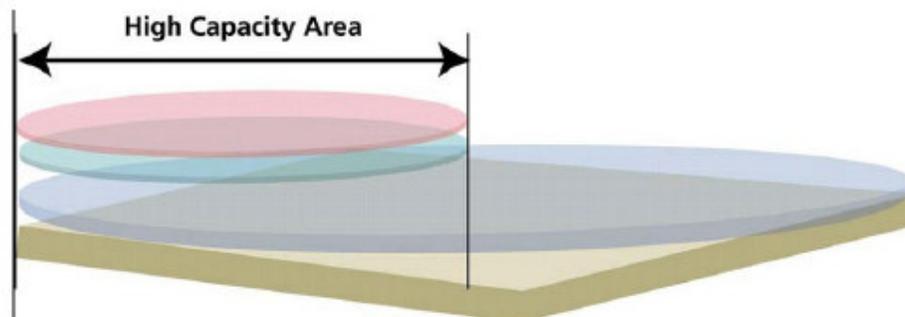


Figura 45: El uso de dos canales en un área congestionada, y un tercer canal en toda la zona.

- SEGURIDAD:** La especificación 802.11n no define, en sí misma, ninguna tecnología de seguridad nueva. Sin embargo, toma las características avanzadas de seguridad de 802.11i como obligatorias, y todos los productos “n” deben soportar WPA2 y el conjunto de tests que cubre 802.11i. Por supuesto, esto puede causar problemas con equipos de otras normas que lo soporten. Todos los equipos que quieran certificar 802.11n deben soportar WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2) y 802.11i, con encriptación AES obligatoria para todos los enlaces seguros, y para los equipos tipo empresariales (no personales) deben soportar autenticación e intercambio de llaves vía 802.1x. La versión empresarial es más segura que la versión personal (o “home”) por dos razones: autenticación fuerte por usuario y nuevas llaves generadas en forma dinámica.

3. CONCLUSIONES:

El objetivo de este documento es explicar la tecnología y las características del estándar 802.11n.

Es evidente que 802.11n representa un avance significativo en la tecnología y el rendimiento de las redes inalámbricas de empresa y/o hogareñas. Las redes 802.11n uniformes ofrecerán una capacidad y un alcance mucho mayores que las WLAN actuales, y permitirán ahorrar costos porque serán necesarios menos puntos de acceso para cubrir un área determinada.

No obstante, en este documento se han identificado también algunos problemas que demorarán la adición de 802.11n en las redes de empresa. Entre ellos se encuentran el recién aprobado estándar, los requisitos de infraestructura como los puertos de conmutadores de acceso LAN, cableado y alimentación, y el número de clientes y WLAN 802.11a/b/g ya instalados y que deben tenerse en cuenta en cualquier estrategia de migración. En conjunto, es probable que estas dificultades ralenticen la adopción de 802.11n; pasarán algunos años antes de que se pongan de manifiesto todos sus beneficios.

En las páginas anteriores se han comentado los hechos conocidos acerca de 802.11n y nuestras previsiones más aproximadas sobre la actividad futura. Las redes de empresa tienen una buena oportunidad para adaptar y extender sus actuales redes 802.11a/g a corto plazo, al tiempo que ensayan y ejecutan pruebas piloto con productos ‘n’ y, eventualmente, con productos compatibles con 802.11n.

802.11n ofrece ventajas obvias y apasionantes, y acabará por cambiar la forma de construir y manejar las LAN inalámbricas.

Como repaso, y recordatorio principal, resumimos las características críticas del estándar, y sus especificaciones claves. Estas características son las fundamentales que Wi-Fi Alliance prueba en sus laboratorios, para que un producto comercial sea, efectivamente, certificado como 802.11n: [19]

Las características obligatorias son:

| Característica | Descripción | Requisitos |
|--|---|---|
| Haces espaciales (Spatial Streams) | Sistemas que transmiten y reciben dos haces espaciales pueden duplicar la velocidad de datos en comparación con el funcionamiento tradicional de un solo haz | Se requiere que los Access Points transmitan y reciban por lo menos dos haces espaciales. Los dispositivos clientes deben recibir y transmitir por lo menos un haz espacial |
| Protocolos de Agregación en modo recepción A-MPDU y A-MSDU | Los protocolos de agregación de tramas mejoran el throughput incrementando el tamaño de trama y reduciendo el “overhead” asociado con las cabeceras y espacios intertramas. | Los Access Points y los clientes deben poder recibir tramas agregadas. |
| Protocolo Block ACK | Enviar una única trama de confirmación de bloque para confirmar varias tramas recibidas. 802.11n ha reducido el tamaño del Block ACK de 128 bytes a 8 bytes. | Los Access Points y los clientes deben soportar la confirmación de bloques |

Tabla 20: Características OBLIGATORIAS para ser Wi-Fi Certified 802.11n

Las características optativas son:

RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR 802.11n – ESTRATEGIAS DE MIGRACIÓN

| Característica | Descripción |
|--|---|
| Tres haces espaciales | La transmisión de tres haces espaciales simultáneos proveen una velocidad de datos tres veces mayor que con un único haz, cuando tanto el Access Point como el cliente lo soporta. Alternativamente, distribuir un stream de datos sobre tres transmisores mejora la tasa de error. |
| Funcionamiento en frecuencia | Dispositivos pueden soportar 2,4GHz, 5GHz, ó ambas frecuencias (dual-band). |
| Canales de 40MHz en la banda de 5 GHz | Es la unión de 2 canales adyacentes de 20MHz para formar uno solo de 40MHz. Un canal de 40MHz provee el doble de velocidad que uno de 20 MHz. |
| Mecanismos de coexistencia de 20/40MHz en la banda de 2,4GHz | Permite que los Access Points sensen redes Wi-Fi cercanas de normas anteriores, y coordinen el funcionamiento de la red a 20 MHz. Estos mecanismos son necesarios si un Access Point soporta canales de 40MHz en la banda de 2,4 GHz. |
| Preámbulo Greenfield | Una técnica que habilita a una red 802.11n usar un preámbulo más corto para mejorar la eficiencia y el consumo de energía. Dispositivos anteriores no pueden detectarlos y, por lo tanto, no se recomienda en redes mixtas. |
| Intervalo de Guarda corto (SGI) | El intervalo de Guarda es de 400ns en lugar de 800ns. Esto reduce el tiempo de símbolo de 4 μ s a 3,6 μ s y mejora la velocidad en un 10%. |
| Space Time Block Coding (STBC) | Mejora la recepción codificando el stream de datos en bloques que son distribuidos por el transmisor a través de múltiples antenas transmisoras a través del tiempo. En la antena receptora, los datos se recombinan de un modo óptimo usando la codificación. STBC requiere múltiples antenas transmisoras y le brinda beneficios a los dispositivos que pueden recibir uno ó más stream de datos. |
| Modo HT Duplicate (MCS 32) | Permite que un Access Point envíe el mismo paquete simultáneamente en cada canal de 20MHz en modo de 40MHz, dando lugar a una transmisión más robusta. Esta característica puede ser particularmente beneficiosa en los extremos de cobertura de una red 802.11n |
| A-MPDU (modo transmisor) | MPDUs agregadas incluyen más información en cada intercambio, y reduce la cabecera y espacios intertramas en la capa MAC. Incrementa el throughput y reduce el consumo de energía. |

Tabla 21: Características OPCIONALES para ser Wi-Fi Certified 802.11n

Los dispositivos pueden incluir, también, otras características opcionales para las cuales la Wi-Fi Alliance no tiene tests definidos. Se conocen como *optional untested*.

Finalmente, concluyo en que con esta tecnología, los miles de consumidores de redes inalámbricas, la pueden utilizar en sus aplicaciones críticas, ya sea, para transportar datos, voz y/o video simultáneamente sobre redes que tengan muchos APs y muchos clientes. Se puede usar en ambientes de interior como de exterior, dando soporte y servicios a laptops, netbooks, teléfonos y, en general a cualquier dispositivo cliente que tenga una placa inalámbrica.

Si tenemos en cuenta las consideraciones de diseño y la correcta elección de las arquitecturas de la red, 802.11n brinda la velocidad, seguridad y escalabilidad de una red cableada (como Ethernet), con dos ventajas adicionales: el ahorro de costo (es más económica su implementación que una red cableada) y la movilidad de los clientes finales (característica muy importante en algunos entornos).

Estadísticamente su uso va creciendo exponencialmente, tanto del lado de la infraestructura como del cliente; aunque no todavía como única tecnología sino como complementaria a las redes tradicionales.

Indudablemente, si queremos maximizar los beneficios de 802.11n, es recomendable y necesario diseñar la red desde un principio para norma “n”. Esto significa tener en cuenta los efectos de multipasos, unión de canales, y demás características para lograr las velocidades ofrecidas. Finalmente brindar los servicios necesarios para que aquellos clientes de normas anteriores puedan seguir conectados.

Todo esto significa que, si usamos una arquitectura construida para 802.11n, podemos asegurar que los usuarios y las aplicaciones reciben la misma performance y confiabilidad que las esperadas para una red cableada Ethernet.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] 802.11n: Next-Generation Wireless LAN Technology – White Paper Broadcom (http://www.broadcom.com/collateral/wp/802_11n-WP100-R.pdf)
- [2] IEEE Ratifies 802.11n, Wireless LAN Specification to Provide Significantly Improved Data Throughput and Range (Amendment to Successful IEEE 802.11 Standard Enables More Scalable WLANs That Co-exist with Legacy Deployments) - Karen McCabe, IEEE-SA Marketing Director (http://standards.ieee.org/announcements/ieee802.11n_2009amendment_ratified.html)
- [3] 802.11n – A long time coming (short chronicle of the 802.11n ratification history) by jepstein on September 15, 2009 (<http://s2n.merunetworks.com/2009/09/802-11n-a-long-time-coming-short-chronicle-of-the-802-11n-ratification-history/>)
- [4] The State of 802.11n – MERU Networks (http://www.merunetworks.com/pdf/whitepapers/WP_state_of_11n_0510_v2.pdf)
- [5] Status of Project IEEE 802.11n – Reporte de la IEEE – (http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgn_update.htm)
- [6] Wi-Fi CERTIFIED™ for 802.11n draft 2.0 (<http://www.wi-fi.org/80211n-draft2.php>)
- [7] A Technical Tutorial on the IEEE 802.11 Protocol – Pablo Brenner (Director de Ingeniería de BreezeCom) - <http://www.dis.org/wl/pdf/tutorial.pdf>
- [8] IEEE 802.11–2007 – <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>
- [9] Wireless Communications & Networks – 2º edición – William Stallings
- [10] 802.11n: The Next Generation of Wireless Performance – White Paper Cisco http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6973/ps8382/prod_white_paper0900aecd806b8ce7.pdf
- [11] 802.11n Theory and Practice – Aruba Networks - http://www.konvergenzforum.de/white_paper/aruba_white_paper_on_802.11n.pdf
- [12] Modulation coding schemes for control frame transmission under 802.11n - Solomon Trainin - <http://www.faqs.org/patents/app/20080316981>
- [13] EWC HT PHY Specification – http://hydrus.et.put.poznan.pl/~rkotrys/802_11/EWC_PHY_spec_V127.pdf
http://hydrus.et.put.poznan.pl/~rkotrys/802_11/EWC_MAC_spec_V124.pdf
- [14] LANCOM™ Techpaper 802.11n in overview –

http://www.lancom.eu/fileadmin/produkte/feature/techpaper/TP-80211n_overview-EN.pdf

[15] Introduction to 802.11n Modulation Standard - Frank Goh - Verigy Singapore
http://www1.verigy.com/cntrprod/groups/public/documents/file/rf_lecture_series_80211n_final.pdf

[16] Concebida para la velocidad: Infraestructura de red para un mundo 802.11n - Peter Thornycroft - Aruba Networks - Octubre de 2007 -

http://www.arubanetworks.com/pdf/technology/whitepapers/wp_80211n_sp.pdf

[17] 802.11n Client Throughput Performance - Gokul Rajagopalan | Technical Marketing – Aruba Networks –

http://www.arubanetworks.com/pdf/technology/TB_11NPERF.pdf

[18] IEEE 802.11n-2009 – <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>

[19] Wi-Fi CERTIFIED™ n: Longer-Range, Faster-Throughput, Multimedia-Grade Wi-Fi® Networks – 2009 – Wi-Fi Alliance –

http://www.wi-fi.org/knowledge_center_overview.php?docid=4590

5. GLOSARIO

802.11a/b/g: especificaciones de la IEEE para redes inalámbricas que funcionan a 2.4 GHz (b, g) o 5 GHz (a) con velocidades hasta 11Mbps (b) o 54 Mbps (a, g).

802.11n: especificaciones de la IEEE para el nuevo estándar 802.11 que define funcionamiento MIMO en la capa física e incorpora mejoras en la capa MAC.

802.11 legacy: La versión original del estándar IEEE 802.11 publicada en 1997

Access Point (AP): un dispositivo que conecta dispositivos inalámbricos a una red

ACK frame: trama breve de confirmación que envía el receptor al transmisor confirmado la recepción correcta de una trama.

Agregación de tramas: un protocolo para combinar varias tramas en una única trama, eliminando así tiempos intertramas y mejorar la eficiencia en el aire.

Basic Service Set (BSS): una red que consiste en un AP y sus clientes asociados

Beacon: tramas emitidas por el AP para identificación y sincronización con las estaciones.

Beamforming: Una técnica de usar varias antenas para formar espacialmente la onda electromagnética emitida y enfocar la energía en el receptor ajustando la magnitud y fase de cada antena transmisora

Block acknowledgement (Block ACK): el método de enviar una única confirmación para confirmar la recepción de múltiples tramas

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización de tecnologías.

Intervalo de Guarda (Guard Interval-(GI): Un período de tiempo al final de cada símbolo OFDM para permitir la disipación de la señal antes del próximo símbolo.

High Throughput (HT): se refiere a las características propias de 802.11n a diferencia de las normas anteriores

Logical Link Control (LLC): capa de protocolo entre la capa MAC y la capa 3 del modelo OSI

Network Allocation Vector (NAV): Un indicador, mantenido por cada estación, de periodos de tiempo cuando la transmisión sobre el medio inalámbrico sea iniciado por la estación. NAV es el mecanismo principal del protocolo CSMA/CA

Space Time Block Coding (STBC): una técnica de diversidad del transmisor de difundir la señal a transmitir sobre múltiples antenas para mejorar la recepción.

Tramas jumbo: tramas de Ethernet mayores de 1518 bytes

Wi-Fi: Un término desarrollado por la Wi-Fi Alliance para describir los productos WLAN que están basados en las normas del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) 802.11 a, b, g, n

Wi-Fi Alliance: organización internacional sin fines de lucro que promueve, investiga y certifica sobre los equipos y tecnologías de WLAN

Wi-Fi CERTIFIED: marca usada por productos que pasan la certificación de los tests desarrollados y administrados por la Wi-Fi Alliance

Wireless Local Area Network (WLAN): una red de área local inalámbrica

6. ABREVIATURAS

A-MPDU: Aggregation multiple PDU
A-MSDU: Aggregation Multiple
ACK: acknowledgement
AP: Access Point
BPSK: Binary Phase Shift Keying
BSS: Basic Service Set
CRC: Cyclic Redundancy Checksum
CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoid
CSMA/CD: Carrier Sense Multiple Access / Collision Detect
DCF: Distributed Coordination Function
DCP: Point Coordination Function
DIFS: Distributed Inter Frame Space
DS: Distribution System
DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum
ESS: Extended Service Set
FHSS: Frecuency Hoping Spread Spectrun
HT: High Throughput
HTSG High Throughput Study Group
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
GI: Guard Interval
LLC: Logical Link Control
MAC: Medium Access Control
MCS = Modulation and Coding Schemes
MIMO: Multiple Input Multiple Output
MITMOT: **Mac** and **mImo** **T**echnologies for **M**ore **T**hroughput
MPDU: MAC Protocol Data Unit
MSDU: MAC Service Data Unit
NAV: Network Allocation Vector
OFDM: Orthogonal Frecuency Division Multiplexing
PCF: Point Coordination Function
PCO: Phased Coexistence Operation
PIFS: Point Inter Frame Space
PLCP: Physical Layer Convergence Procedure

PMD: Physical Medium Dependent

PSMP: Power Save Multi-poll.

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

SIFS: Short Inter Frame Space

SNR: Signal Noise Relation

STBC: Space Time Block Coding

TGnSync: Task Group n Synchronization

Wi-Fi: Wireless Fidelity

WLAN: Wireless Local Area Network

WNG SC: Wireless Next Generation Standing Committee

WWiSE: World Wide Spectrum Efficiency