

# Capítulo 3.

## Estándar IEEE 802.11 WiFi

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Como se mencionó previamente, uno de los ejes principales en el desarrollo del presente trabajo es el análisis que se hace de la tecnología WLAN, representada principalmente por la marca WiFi, la cual es dominante en el ámbito comercial y está ampliamente extendida en su uso e implementación en miles de hogares y sitios públicos alrededor del mundo.

En el presente Capítulo se hace una revisión detallada de los aspectos más importantes del estándar IEEE 802.11 y que serán de relevancia para las secciones posteriores. Primeramente se hace un breve recorrido por la historia del desarrollo del estándar; posteriormente se especifica la pila de protocolos a usarse.

Se dedican dos secciones a la descripción de las capas de acceso al medio (MAC) y física (PHY) contenidas en el estándar, incluyendo aspectos relevantes como tipos de modulación, técnicas de acceso al medio, técnicas de codificación.

### 3.2 RESUMEN HISTÓRICO DEL ESTÁNDAR

El grupo de *estándares 802.11*, al que por facilidad se hará referencia en este trabajo como el estándar 802.11 es un miembro a su vez de la familia de estándares del *IEEE 802*, que es una serie de especificaciones para las Redes de *Área Local (LAN)*.

De acuerdo con [5], sus especificaciones se enfocan en las dos capas más bajas del *modelo OSI*, pues incorporan componentes de la capa física y de control de acceso al medio. Dentro de la *capa MAC* están definidas una serie de reglas para determinar la forma en que los dispositivos obtienen acceso al medio y envían datos, pero los detalles de transmisión y recepción corresponden a la *capa física (PHY)*.

El *estándar 802.11* se apoya en la especificación de la capa de acceso al medio común a las tecnologías LAN, es decir, al control de *enlace lógico (LLC)*; incluyendo además la capa MAC y dos capas físicas. La versión original el estándar 802.11 tenía el propósito de proveer tasas de transmisión de 1 a 2 Mbps operando en la banda no licenciada *ISM (Industrial, Scientific and Medical band)* de 2.45 GHz, la cual requería de uso de técnicas de espectro disperso, por lo cual se definieron dos modalidades: salto en frecuencia (*Frequency-Hopping Spread-Spectrum FHSS*) y Esparcimiento en secuencia directa (*Direct-Sequence Spread-Spectrum DSSS*), los cuales resultaban incompatibles [10].

Conforme los usuarios requerían mayores tasas de transmisión, se formaron dos grupos que investigaban diferentes esquemas: DSSS para el 802.11b que proponía 11 Mbps en el canal de 20 MHz y *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* para el 802.11a que especificaba una capa física alterna, brindando tasas de hasta 54 Mbps en la banda de 5 GHz, la cual está menos saturada.

Posteriormente, se han formado otros grupos que realizan correcciones y mejoras al estándar original, la siguiente tabla muestra de forma sintetizada algunas características de dichos estándares los cuales se han denominado usando letras del alfabeto par identificarlos.

Tabla 2. Variantes del IEEE 802.11 [10] pp. 18

Estándar	Alcances [10]	Ancho de banda [Mbps] [12]	Técnica de difusión [12]
<b>802.11</b>	Define estándar para WLAN para capa PHY y MAC	2	FHSS, DSSS, IR
<b>802.11a</b>	Define una capa física de alta velocidad en la banda de 515-5.825 GHz.	6,12,24 opcional 54	OFDM con 24 subportadoras
<b>802.11b</b>	Define una capa física de alta velocidad en la banda de 2.4 GHz.	11	HR/DS, HR/DSSS
<b>802.11e</b>	Mejora del estándar original para implementar QoS (aplica a 802.11a/b/g)		
<b>802.11g</b>	Define una tasa de datos más alta en la capa física de 2.4 GHz.	22-54	ERP
<b>802.11h</b>	Define funciones MAC para permitir a equipos 802.11a cumplir con los requerimientos europeos.	6,12,24 opcional 54	OFDM
<b>802.11i</b>	Mejora de la capa MAC para proveer seguridad en 802.11a/b/g.		

### 3.3 PILA DE PROTOCOLOS

El estándar 802.11 define las dos capas más bajas del modelo de referencia OSI, sin embargo, tiene ciertas diferencias en cuanto a su estructura. De acuerdo con [5], en lo que concierne a la capa física, las funciones descritas en el modelo OSI son muy compatibles con las descritas en el estándar 802.11, sin embargo, la capa de enlace de datos se divide en varias capas para todos los estándares que conforman el grupo del *IEEE 802*.

Para poder implementar sistemas en los que se permitiera la corrección de errores y control de flujo al mismo tiempo, el IEEE definió un protocolo que pueda operar sobre toda la pila de protocolos 802. A dicho protocolo se le dio el nombre de LLC (*Control Lógico*

de Enlace) o IEEE 802.2, el cual constituye la parte superior de la capa de enlace de datos y la subcapa MAC (*Media Access Control*) la parte inferior como se muestra en la Figura 3.1:

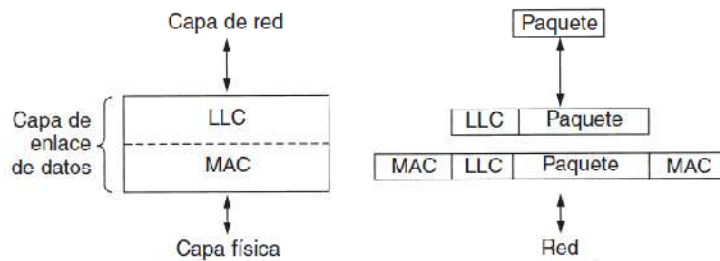


Figura 3.1. Distribución de las subcapas LLC y MAC

A su vez, la capa física se divide en dos subcapas (como se mencionó anteriormente), la *PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)* y *PMD (Physical Medium Dependent)*. Ambas capas y sus funciones se describirán más adelante.

La pila de protocolos completa se ilustra en la Figura 3.2.

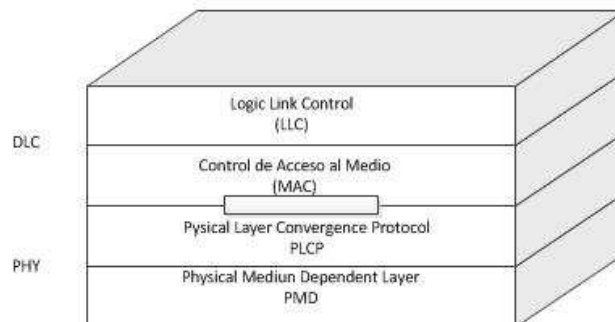


Figura 3.2. Pila de protocolos 802.11

Es necesario establecer una notación específica para entender la relación existente entre ambas subcapas. La carga útil recibida desde capas superiores es encapsulada agregando los encabezados y tráiler en las capas MAC y PHY antes de transmitirse por el canal inalámbrico. Los datos a transmitirse inicialmente reciben el nombre de *Unidades de Datos de Servicio (SDU Service Data Unit)* pues aun no han sido encapsuladas por ningún protocolo.

Una vez que estas pasan de la capa MAC (llamadas *MSDU*) a la subcapa LLC aumentan en tamaño pues se les agregan 30 bytes de encabezado MAC y 4 bytes de *FCS (Frame Check Sequence)*, los cuales en conjunto forman la Unidad de Datos de Protocolo MAC (MPDU).

A su vez, al ser ésta unidad pasada a capa física, se le conoce como Unidad de Datos de Servicio de Capa Física (*PSDU Physical Service Data Unit*); al pasar la subcapa PLCP la cual agrega preámbulo, encabezado y tráiler se genera la *PPDU (Physical Layer Protocol Data Unit)*. La relación entre ellas se ilustra en la Figura 3.3.

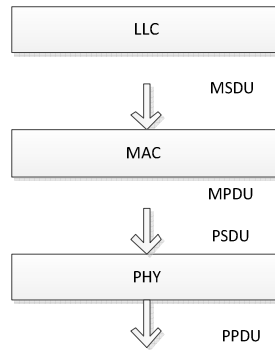


Figura 3.3. Relación entre subcapas

### 3.4 LA CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO 802.11 (MAC)

Constituye la parte más baja de la capa de enlace de datos, y es la clave de las especificaciones hechas para el estándar 802.11 pues trabaja sobre cualquiera de las capas físicas definidas en el 802.11 y proporciona el control de la transmisión de los datos en el aire.

Proporciona también el centro de las operaciones para las tramas a transmitirse y les permite interactuar con la red dorsal (*Backbone*) de redes cableadas. Además de proveer un mecanismo para asignar el medio físico a las diversas estaciones en la red. Las colisiones son muy frecuentes, es por ello que reducen de forma significativa las tasas de trasmisión si no se tiene un adecuado control de ellas.

Al igual que en Ethernet se usa el protocolo CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) que consiste en detectar el canal, cuando esta inactivo comienza a transmitir emitiendo su trama completa y sin escuchar el canal en el proceso por lo cual podría ser destruida debido a la interferencia.

Para evitar dichas colisiones y corrupción de datos el 802.11 usa un sistema de prevención de colisiones ***Collision Avoidance (CA)***, en unión con CSMA, el cual consiste en censar el canal repetidas veces para detectar cuando esté libre de otras transmisiones.

Físicamente se usa el CCA (*Clear Channel Assessment*), que es un mensaje que indica dicho estado y el método de censado virtual del canal. Una vez que se encuentre libre se envían mensajes de aviso a través del con el fin de evitar las colisiones, pues estas redes

son *Half-Duplex*. En caso de colisiones hay tiempos de espera aleatorios que aumentan de acuerdo con el algoritmo *Exponential Backoff*.

Ejemplo [5]: cuatro estaciones (A-D) se encuentran en una misma área. Las estaciones B y C están en el rango de detección de A, lo mismo que lo son B y C para la estación D. A desea transmitir a B así que envía un mensaje *RTS (Request to Send)* a B; como el canal esta libre B manda una confirmación usando *CTS (Clear to Send)*. La estación A envía los datos y B prepara el *ACK* para confirmar la recepción.

La estación C puede procesar mensajes *RTS*, sin embargo al detectar la actividad de A y B no puede transmitir para evitar las colisiones, así que hace un cálculo para estimar el tiempo que tardarán A y B para terminar el envío y mandar el *ACK*. El resultado se coloca en forma de un *NAV (Network Allocation Vector)*, que es un temporizador interno que permite saber cuanto duran los periodos de silencio. La estación D efectúa el mismo procedimiento pues puede escuchar el mensaje *CTS* de B.

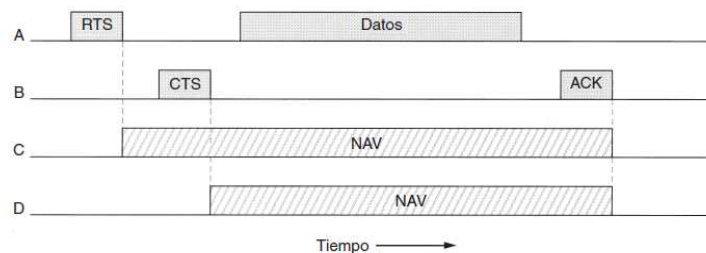


Figura 3.4. Ejemplo de detección virtual el canal para 802.11

### 3.4.1 Tipos de mensajes

Se definen tres tipos de mensajes [12]:

- **Datos:** se encargan del transporte de lo datos de forma adecuada provenientes de capas superiores.
- **Control:** se utilizan para controlar la comunicación que se establece entre las estaciones, es decir, se encarga de que estas intercambien mensajes adecuadamente. Algunas de ellas son las tramas CTS, RTS y ACK
- **Administración (management):** permiten soportar los servicios que define la subcapa MAC, los cuales son: distribución, integración, asociación, re-asociación, des-asociación, autenticación, privacidad y entrega MSDU. Seis de ellos son usados para soportar la entrega de paquetes entre las estaciones (STA's). Tres de ellos se enfocan a la seguridad y confidencialidad.

Para el presente estudio sólo se tomaran en cuenta los mensajes de datos, pues son los que llevan la carga útil producida por el usuario en capas superiores y mediante los cuales se podrá determinar de forma más precisa la eficiencia volumétrica.

### 3.4.2 Formato general de la trama

El formato genérico para la trama MAC está compuesto de un grupo de campos en un orden fijo, de acuerdo al tipo de trama el formato puede variar haciendo desaparecer algunos campos, sin embargo, con el objeto de tener un estudio de la eficiencia volumétrica más preciso se tomara en cuenta éste formato genérico.

Se puede dividir en dos subgrupos:

- **Encabezado:** contiene cuatro campos: control de trama (*frame control*), duración (*duration*), direcciones (*address1-address4*) y control de secuencia (*Sequence Control*).
- **Cuerpo de la trama:** está constituido por los datos útiles, en ese caso la MSDU proveniente de la subcapa LLC.
- **FCS (*Frame Check Sequence*):** se agrega a la trama para añadir robustez, es decir, para que se pueda verificar que no esté corrupta la información que se recibe al llegar al destino.

Su formato se muestra a continuación:

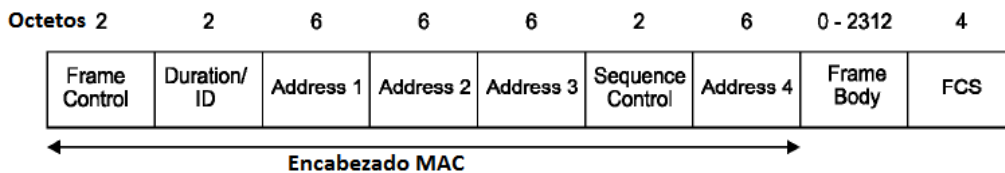


Figura 3.5. Formato de trama MAC

- **Frame control ( 2 bytes = 16 bits):** los subcampos que contiene son:

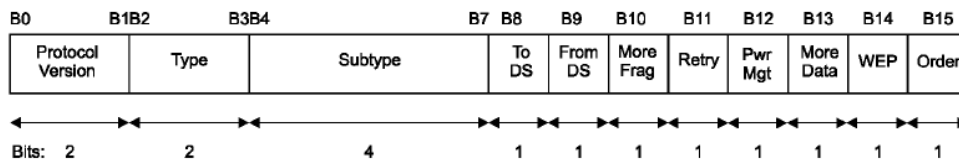


Figura 3.6. Campo de Control de trama (*Frame Format Field*)

**Protocol version:** indica la versión del 802.11 MAC que contiene el resto de la trama. Únicamente se ha desarrollado una versión identificada con 0.

**Type/Subtype:** identifican el tipo de trama, es decir, la clase de trama de la que se trate. Debido al uso de CTS y RTS se han creado diversos tipos de tramas de control. Los identificadores son: 00 *Management frames*, 01: *control frames*, 10: *data frames*, 11: reservado. Los subtipos son 16 (4 bits) y pueden ser consultados en [1] sección 7.1.3.1.

**To DS y from DS:** indica si la trama va hacia o viene del sistema de distribución entre celdas.

**MF (More Fragments):** indica si el paquete proviene de capas superiores ha sido fragmentado poniéndose con valor 1. En la práctica, la mayoría de los paquetes se transmiten usando la MTU Ethernet, por lo que no es muy frecuente usarlo.

**Retransmitir (Retry):** para evitar las tramas que se han retransmitido estén duplicadas, se coloca en 1 este bit.

**Manejo de energía (Power Management):** activa el modo de ahorro de energía cuando se usan dispositivos portátiles, es decir, indica que pueden ser apagadas partes de la interfaz de red cuando se hayan transmitido los paquetes. Los AP nunca activan esta modalidad.

**Más datos (More data):** indica si una estación tiene tramas almacenadas en el buffer para un destino específico.

**WEP:** indica si la trama se ha codificado usando el algoritmo WEP (*Wireless Equivalent Privacy*).

**Orden (Order):** se coloca en 1 cuando el envío ordenado de paquetes sea crucial.

- **Duration (2 bytes = 16 bits):** indica cuánto tiempo ocuparán en el canal la trama y su confirmación de recepción.
- **Address 1-4 (6 bytes cada una):** pueden contener hasta cuatro direcciones, las cuales están numeradas de acuerdo con el propósito que tenga la trama o su tipo. La regla es que Address 1 es usada para el receptor Address 2 para el transmisor, Address 3 para filtrado del receptor, Address 4 sirve para identificar a qué parte de la red está asociado el receptor.
- **Sequence (2 bytes = 16 bits):** se usa para desfragmentar y evitar tramas repetidas. Se compone de dos campos: 4 bits para el campo de número de fragmento y 12 para número de secuencia. Todas las tramas que provienen de capas superiores tienen un número de secuencia, dependiendo de la estación que la haya transmitido, antes de

pasar a MAC. Va de 0 a 4096 incrementándose en 1 por cada paquete maneje MAC. Si hubo fragmentación, los fragmentos de un mismo paquete tiene el mismo número de secuencia y lo que los diferencia es el número de fragmento, que de igual manera comienza en 0 e incrementa en 1 por cada fragmento.

- **Cuerpo del mensaje Payload (0-2312 bytes):** es la carga de datos útiles encapsulado desde capas superiores como se establece en el estándar original, la máxima cantidad de datos que se pueden transmitir es de 2304 bytes de datos de capas superiores; en la implementación se pueden soportar mayor número de datos, para acomodar encabezados adicionales de seguridad y QoS.
- **Secuencia de verificación de errores FCS (4 bytes = 32 bits):** es una verificación de la integridad de la trama que se lleva a cabo mediante *un código de redundancia cíclica (CRC)*. La verificación se realiza operando matemáticamente la trama con un polinomio en este caso un polinomio de grado 32.

El polinomio es:

$$x^{32} + x^{30} + x^{29} + x^{28} + x^{26} + x^{20} + x^{19} + x^{17} + x^{16} + x^{15} + x^{11} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$$

Las MSDU que llegan de la subcapa de control de enlace lógico se encapsulan en el formato de trama mencionado anteriormente y se convierten en una MPDU (MAC Protocol Data Unit). A cada MSDU se le agregan en total 30 bytes de encabezados y 4 bytes como FCS, por lo tanto, la infamación que agrega la subcapa MAC a la información útil es:

$$Encabezado_{MAC} = 30 \text{ [bytes]}$$

$$Tail_{MAC} = 4 \text{ [bytes]}$$

$$adicional_{MAC_{WiFi}} = 34 \text{ [bytes]} \quad (3)$$

### 3.5 LA CAPA FÍSICA 802.11 (PHY)

El estándar 802.11 publicado en 2007 especifica además tres técnicas de transmisión permitidas para la capa física, dos de ellas basadas en la banda de frecuencias ISM 2.4 GHz y técnicas de espectro disperso<sup>11</sup>, y la tercera basada en radiación infrarroja difusa [5].

Las tres proveen un ancho de banda de hasta 2 Mbps. Se conocen como:

<sup>11</sup> Se puede encontrar una descripción más amplia de las técnicas Spread Spectrum (SS) en el apéndice A.



**Frequency-hopping spread-spectrum (FHSS):** utiliza 79 canales, cada uno con un ancho de banda de 1 MHz, con el extremo más bajo en la banda de 2.4 GHz. Para generar la secuencia aleatoria de frecuencias se usa un generador de números pseudoaleatorios. Siempre que el transmisor y receptor utilicen la misma “semilla” para generar dicha secuencia y permanezcan sincronizados, saltaran de forma simultánea a la misma frecuencia. El tiempo invertido en cada frecuencia (permanencia) es un parámetro ajustable., lo que proporciona seguridad, robustez al ruido y eficiente uso del espectro.

La Figura 3.7 ilustra gráficamente el proceso de generación de la señal y una imagen de la misma vista en el analizador de espectros.

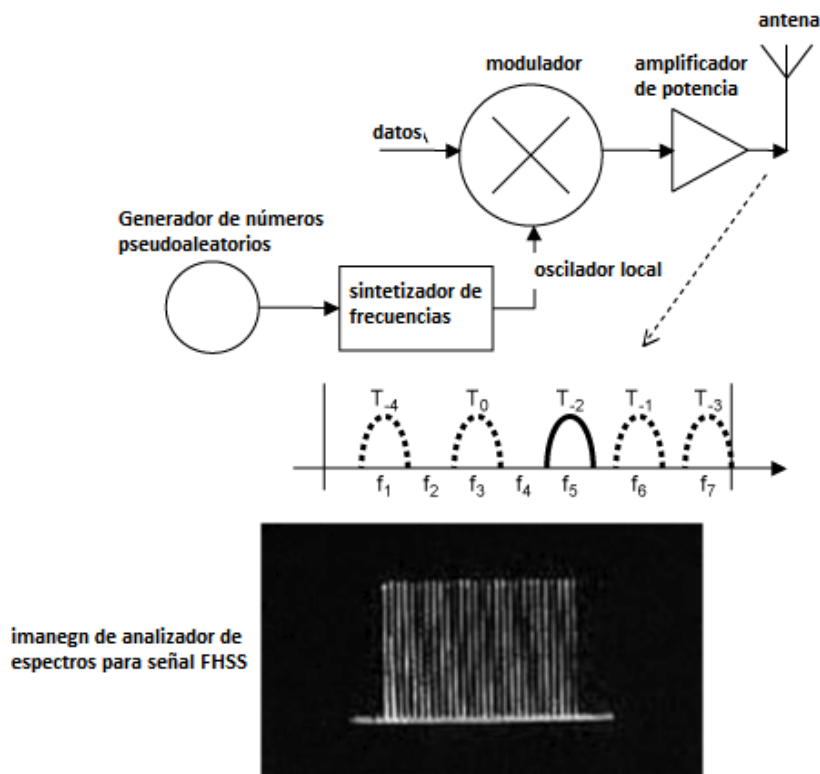


Figura 3.7. Señal FSSS

**Direct-sequence spread-spectrum (DSSS)** [13]: también restringido a 1-2 Mbps. Se encarga de ensanchar la potencia de la señal en una banda de frecuencias ancha multiplicando una portadora de RF y un secuencia pseudoaleatoria similar al ruido PN (cuyos símbolos se denominan Chips y son de menor duración que el bit de información y se generan a partir de la secuencia de *Barker*).

En primer lugar el código PN (*Pseudo Noise*) se modula en la señal de información a través de una de varias técnicas de modulación digital (por ejemplo, BPSK, QPSK<sup>12</sup>). Entonces, un mezclador doblemente balanceado se utiliza para multiplicar la portadora de RF y la señal PN información. Este proceso hace que la señal de RF para ser sustituida por una señal de gran ancho de banda espectral con el equivalente de una señal de ruido.

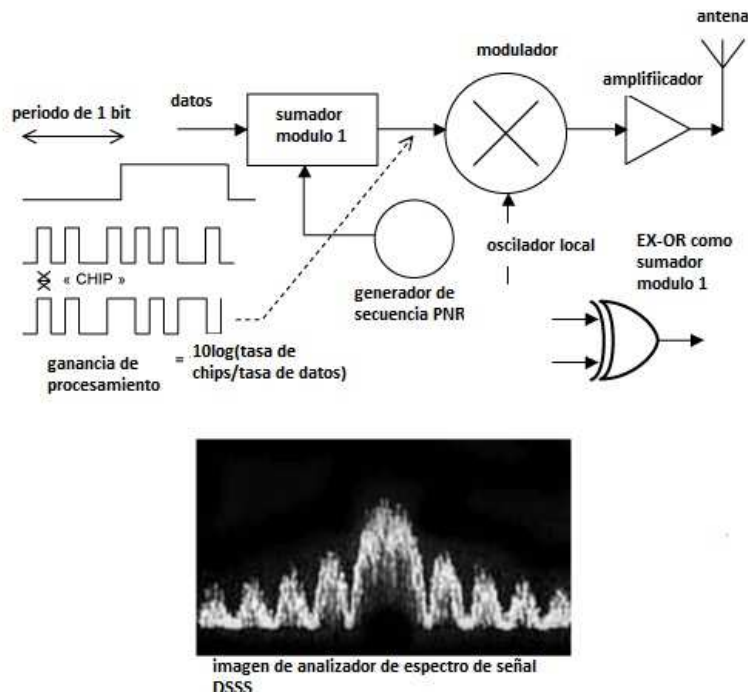


Figura 3.8. Señal DSSS

**Infrared light (IR):** utiliza transmisión difusa (*no LOS*) a 0.85 o 0.95  $\mu\text{m}$ . Se utiliza esquema de codificación en el que grupos de 4 bit se codifican con una palabra codificada de 16 bits que contiene 15 ceros y un 1 usando *código Gray*, con lo que un error a la entrada produce sólo un error a la salida. Los infrarrojos no penetran paredes, por lo que las habitaciones son como celdas independientes celdas. No es popular debido al bajo ancho de banda y a que es afectado por fenómenos físicos como la luz solar.

El uso de equipo en las bandas ISM generalmente no requiere licencia pues son bandas de uso libre. Sin embargo, el problema de interferencia crece debido a la gran cantidad de dispositivos operando en dicha banda; es por ello que la potencia de transmisión debe ser limitada, es decir, la radiación emitida debe ser baja para evitar que dos sistemas en la misma banda se enmascaren.

<sup>12</sup> Se podrá encontrar más información acerca de modulaciones digitales en el Apéndice B.

Como se mencionó anteriormente, la necesidad de contar con anchos de banda mayores y reducir la interferencia, se definieron posteriormente ciertas variantes del estándar que operan en diferentes frecuencias y variedad de anchos de banda. Estas especificaciones se realizaron basándose en tecnologías de microondas y con técnicas de *Spread Spectrum*.

Se denominan de acuerdo con la variante del estándar bajo el cual se definió:

- 802.11a: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (**OFDM**) **PHY** (hasta 54 Mbps).
- 802.11b: High-Rate Direct Sequence (**HR/DS or HR/DSSS**) **PHY** (11 Mbps).
- 802.11g: Extended Rate **PHY (ERP)**.
- Para la variante futura 802.11n, se le denomina coloquialmente **MIMO PHY**.

La Figura 3.4 muestra de forma gráfica la información anterior:

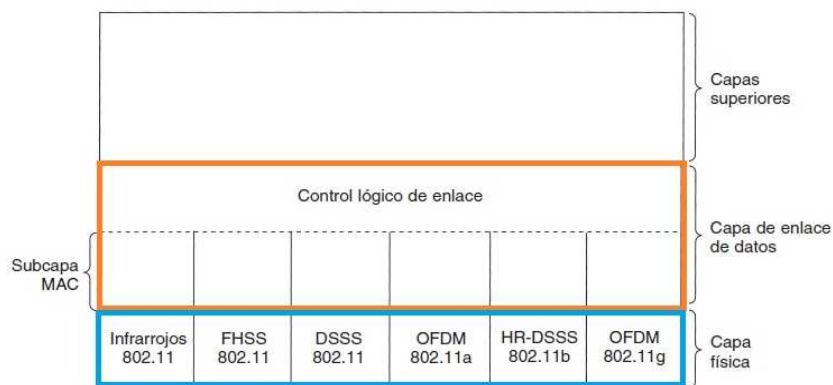


Figura 3.8. Técnicas de transmisión en capa PHY

### 3.5.1 Capa física para el IEEE 802.11g

Ésta variación del estándar surgió como una mejor para las versiones ya existentes, pues incrementa la tasa de transmisión respecto del estándar 802.11b; dado que éste último no era compatible con la versión 802.11a, surge la variante 802.11g la cual ofrece una tasa de transmisión comparable con la versión 802.11a al mismo tiempo que permite la operación en la banda de 2.4 GHz.

Esta especificación no presenta cambios significativos respecto de las anteriores, y su principal característica es proveer compatibilidad con los sistemas previos. Se establecieron varias especificaciones para esta versión, se incorpora una cláusula para Extended Rate PHY (ERP), con lo cual surgen diversas variedades de ERP [12]:

- **ERP-DSSS and ERP-CCK:** compatibles con las especificaciones originales de DSSS, y con las mejoras de 802.11b (5.5 Mbps and 11 Mbps).
- **ERP-OFDM:** es el más extendido, esencialmente es la versión 802.11a operando en la banda 2.4 GHz con cambios menores para proveer compatibilidad. Velocidades de 6, 12, and 24 Mbps son requeridas.
- **ERP-PBCC:** extensión del estándar 802.11b, es opcional. De uso muy reducido.
- **DSSS-OFDM:** sistema híbrido que codifica paquetes usando DSSS para los encabezados y OFDM para los datos. Se publicó para permitir compatibilidad, sin embargo, no es muy usado.

Las estaciones 802.11g deben ser capaces de procesar la información proveniente de los estándares previos, 802.11 soporta el preámbulo corto, lo que ayuda a mantener el throughput en un nivel aceptable. Los dispositivos 802.11 también implementan ERP-OFDM basado en gran parte en el 802.11a; en realidad es casi idéntico en su formato excepto por pequeños cambios que permiten el incremento de la tasa de transmisión.

Sus principales parámetros son:

Tabla 3. Parámetros del 802.11g [1] pp.72

Información de tasa de datos	6,12,18,24,36,48 y 54 Mbps (6,12 y 24 Mbps obligatorios)
Modulación	BPSK OFDM QPSK OFDM 16-QAM OFDM 64-QAM OFDM
Código de corrección de errores	Código convolucional K=7 (64 estados)
Tasa de codificación	1/2, 2/3, 3/4
Número de subportadoras totales	64
Número de portadoras no nulas	52
Número de subportadoras de datos	48
Número de portadoras piloto	4
Duración de símbolo OFDM	4 $\mu$ s
Espacio entre portadoras	312.5 kHz
Ancho de banda de la señal	16.6 MHz
Ancho de banda del canal	20 MHz

El presente trabajo se enfocará en analizar los formatos de las tramas para la modalidad ERP-OFDM, pues es el que mejor compatibilidad muestra con el estándar WiMAX fijo, y que se tratará en el desarrollo posterior.

Como se manifiesta en la tabla 3, entre portadoras existe un espacio de 312.5 KHz, lo cuál se obtiene de la siguiente forma:

$$\Delta f = \frac{20 \text{ MHz}}{64 \text{ portadoras}} = 312.5 \text{ [KHz]} \quad (4)$$

Por lo que el tiempo de un símbolo es:

$$T_s = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{312.5 \text{ KHz}} \approx 3.2 \mu\text{s} \quad (5)$$

Y agregando 0.8  $\mu\text{s}$  de tiempo de guarda, el tiempo de un símbolo es:

$$T_s = 4[\mu\text{s}] \quad (6)$$

Por tanto la señal OFDM contando las portadoras de datos (48) y las cinco portadoras nulas (piloto más DC), dan un ancho de banda de:

$$BW_{señal} = (48 + 5) \cdot 312.5[\text{KHz}] = 16.6 \text{ [MHz]} \quad (7)$$

### 3.5.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

La *multiplexión por división de frecuencias ortogonales* conocida como OFDM es una técnica de comunicaciones que divide un canal de comunicación en un número de bandas de frecuencia igualmente espaciadas.

Una subportadora (también conocida como tono) lleva una porción de los datos de usuario y es transmitida en cada una de dichas bandas; dichas bandas resultan ser ortogonales entre si, es decir, independiente de las otras cuyo espaciado proporciona ortogonalidad, de tal forma que el espectro puede ser usado en su totalidad pues las portadoras no se interfieren entre si y no es necesario el uso de bandas de guarda entre ellas como lo hace *FDM*.

La Figura 3.9 muestra el espectro *OFDM*, señal es una subportadora con una cierta frecuencia. Nótese que las frecuencias son ortogonales pues para cada máximo de las señales, las demás valen cero, con lo cual se evita la interferencia entre ellas.

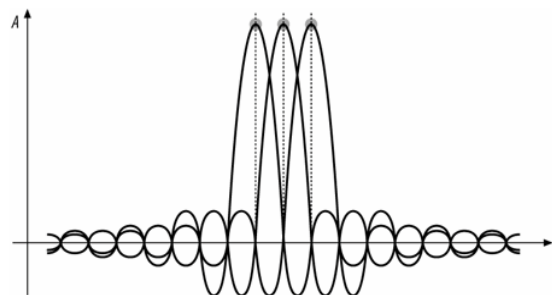


Figura 3.9. Espectro OFDM

Por tanto, algunos de los beneficios de OFDM son:

- Alta eficiencia espectral
- Resistencia a la interferencia de otras señales de RF.
- Baja distorsión por multitrayectoria.

Es por estas razones que es una técnica muy usada en comunicaciones inalámbricas, pues proporciona mayor robustez al sistema en contra del ruido y la degradación de la señal por multitrayectoria.

Puede ser vista como una combinación entre *modulación*<sup>13</sup> y *técnica de acceso al medio*, pues segmenta el espectro de tal forma que múltiples usuarios tengan acceso a él.

Dicha técnica permite que la información contendía en cada tono sea modulada usando modulación en fase, amplitud o ambas; por lo que *PSK (Phase Shift Keying)* o *QAM (Quadrature Amplitud Modulation)* son usadas frecuentemente.

Un sistema OFDM toma una cadena de datos (*stream*) y la divide en un número N de *streams* paralelos, los cuales son mapeados en tonos, cada uno con una frecuencia distinta y después son combinados mediante *la transformada inversa de Fourier (IFFT)* convirtiéndolos en una única forma de onda en el dominio el tiempo lista para enviarse a través del canal inalámbrico [14].

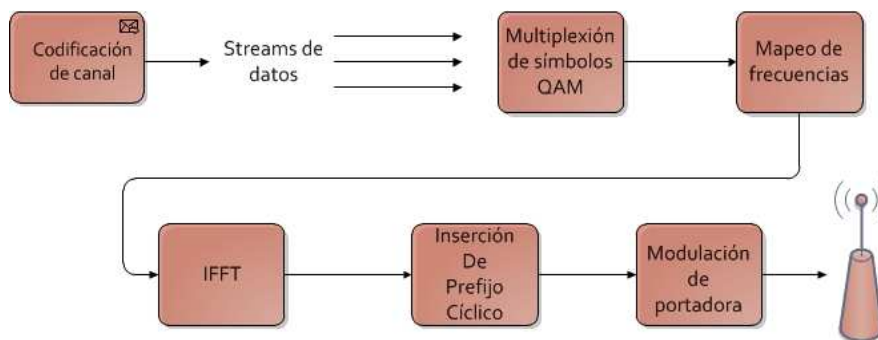


Figura 3.10. Cadena de transmisión de OFDM

OFDM puede ser considerado también como una *técnica múltiple de acceso al medio*, porque un tono o varios de ellos pueden ser asignados a diferentes usuarios, por lo tanto un grupo de ellos **comparten el mismo ancho de banda**, con lo cual se conoce a la

<sup>13</sup> Para mayor referencia acerca de modulaciones refiérase al Apéndice B.

técnica como OFDMA (*Orthogonal Frequency Multiple Access*), dicho número puede ser fijo o variable dependiendo de la cantidad de información que el usuario transmita.

En presencia de multitrayectorias, es necesario introducir un **prefijo cíclico** en la señal OFDM para asegurar que las frecuencias sigan siendo ortogonales y que no haya interferencia; además de seguir admitiendo múltiples usuarios. El prefijo es una copia de la última porción de un símbolo de datos agregado al inicio del símbolo como un tiempo de guarda. Dado que el efecto multitrayectoria y las interferencias ocasionan que la señal llegue retrasada al receptor, este tiempo de guarda permite que los tonos puedan realinearse conservando ortogonalidad, su duración depende de los efectos producidos por el canal.

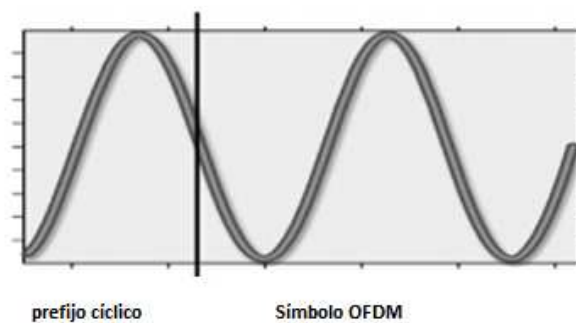


Figura 3.11. Señal OFDM con prefijo cíclico

### 3.5.3 Componentes de la capa física 802.11g (PHY)

La capa física del estándar 802.11 se describe como la combinación de dos subcapas, cuyas funciones se describen en dos protocolos [1]:

1. La capa física de función de convergencia **PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*)**, la cual adapta las funciones del sistema PMD a los servicios de la capa física.
2. El sistema **PMD (*Physical Medium Dependent*)** cuyas funciones definen las características, métodos de transmisión y recepción de los datos a través del medio inalámbrico entre dos o más estaciones (*STA's*). Cada PMD pudiese requerir la definición de una única PLCP.

#### 3.5.3.1 Subcapa OFDM PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*)

En esta sección se presenta el procedimiento por el cual una PSDU se convierte en una PPDU o viceversa. Durante la transmisión, la PSDU debe adicionar a su estructura un preámbulo y un encabezado; y de forma inversa, en el receptor deberán ser retirados para obtener de nuevo la PSDU.

El formato del frame ERP-OFDM es en su estructura muy similar al que presenta la versión 802.11a [12], pues usa un protocolo de unidades de datos lógicas idéntico. La única diferencia consiste en un intervalo de guarda de 6  $\mu\text{s}$  (en donde se detecta el canal libre) al final de la trama en los que se efectúan operaciones de compatibilidad y para terminar de decodificar los datos recibidos.

**3.5.3.2 Formato de la trama PLCP**

La Figura 3.12 [1] muestra el formato de la trama PLCP incluyendo el preámbulo, encabezado y la PSDU y los bits de cola (*tail*) así como los bits de *padding* (*relleno*). Por comodidad no se traducirán los nombres de los campos.

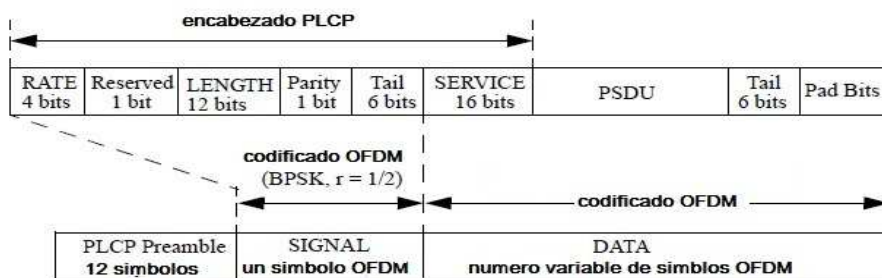


Figura 3.12. Formato de trama PPDU

- **PLCP preamble (12 símbolos OFDM):** Su principal función es la sincronización de diferentes temporizadores entre el transmisor y receptor. Se compone de 10 repeticiones de secuencia corta de entrenamiento. Es usado para proporcionar AGC, selección diversa, adquisición de tiempo y de frecuencia, para seleccionar la antena adecuada. Contiene también dos repeticiones largas. Tiene una duración de 16  $\mu\text{s}$ . Una secuencia corta consta de 12 subportadoras y una secuencia larga consta de 53 subportadoras incluyendo la de DC (nula).

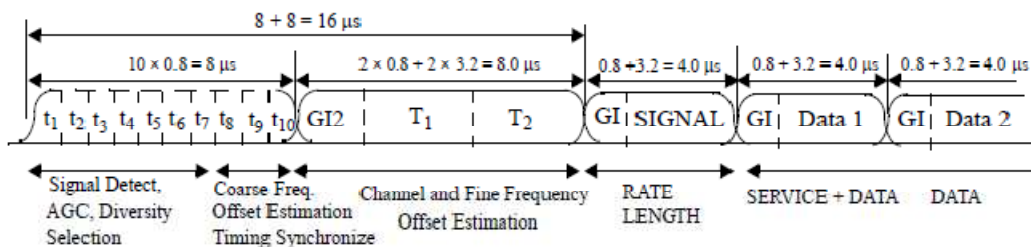
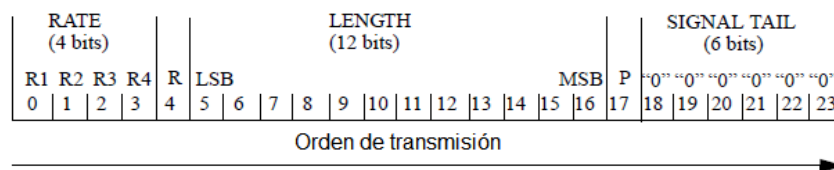


Figura 3.13. Preámbulo PLCP



- **Header (encabezado):** es transmitido a través del campo *Signal*, incorpora el campo *Servicie* del campo de datos de la trama PLCP

**Signal (24 bits):** compuesta por los subcampos *Rate*, *Reserved*, *Lenght*, *Parity* y *Tail*. Está codificada usando el esquema más sencillo de modulación BPSK y un código convolucional de 1/2, los cuales están mapeados dentro de un símbolo OFDM. Para facilitar la detección de los campos *Rate* y *Lenght* 6 bits de relleno (*Tail*) son insertados en el encabezado PLCP. La Figura 3.15 muestra los campos y sus bits numerados:



LSB: bit menos significativo  
 MSB: bit más significativo

3.15 Campo *Signal*

**Rate (4 bits):** esta codificada la tasa de datos en cuatro bits de acuerdo con los valores de la Tabla 3. Los detalles de la codificación y modulación usada en cada una de ellas se describirá en *OFDM PMD*.

Tabla 4 Valores de campo Rate [1]

Rate [Mbps]	R1 a R4
6	1101
9	1111
12	0101
18	0111
24	1001
36	1011
48	0001
54	0011

**Lenght (12 bits):** codifica la cantidad de bytes que contiene la trama MAC (PSDU). Transmite del bit menos significativo al más significativo. Se procesa mediante un código convolucional para protegerlo de errores.

**Parity (1 bit) y Reserved(1 bit):** el bit 4 está reservado para uso futuro y se pone en cero. El bit de paridad es un bit par de paridad para los primeros 6 bits y evitar la corrupción en los datos.

**Tail (6 bits):** son seis bits en cero que terminan el código convolucional, por tanto, deben ser procesados por dicho código.

- **Data:** contiene el campo Service (16 bits), la PSDU, la cola o Tail. Y los padding bits (relleno). Todos se codifican de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 4.

**Service (16 bits):** se denotan del 0-15; los bits 0-6 se transmiten primero y se usan para sincronizar la decodificación en el receptor. Los bits 7-15 son reservados para uso futuro.

**Tail (6 bits):** todos son cero y se usan para regresar el código convolucional al estado cero, lo cual mejora la probabilidad de error del FEC.

**Pad bits (variable):** dado que el número de bits en el campo DATA debe ser un múltiplo de  $N_{CBPS}$ , la información sin codificar debe ser extendida hasta lograr ser un múltiplo de  $N_{DBPS}$ , dicho procedimiento se lleva a cabo con estos bits de relleno.

### 3.5.3.3 Subcapa OFDM PMD (Physical Medium Dependent)

La capa física usa una gran variedad de modulaciones que le permiten un rango de anchos de banda que va de los 6 Mbps a los 54 Mbps. En todos los casos, la capa física usa una tasa de símbolos de 250 000 símbolos/s en 48 subcanales, donde el número de bits de datos por símbolo varía [12].

Un símbolo OFDM ocupa las 48 portadoras. Tal como se apreció en la Tabla 4, las diversas combinaciones existentes de tasa de codificación convolucional y modulaciones permiten alcanzar ciertos anchos de banda.

#### Transmisión y recepción

El diagrama de bloques que describe el transmisor y receptor OFDM se ilustra a continuación [12], algunos de sus elementos se han mencionado en secciones anteriores y otros de ellos no resultan relevantes para el presente trabajo:

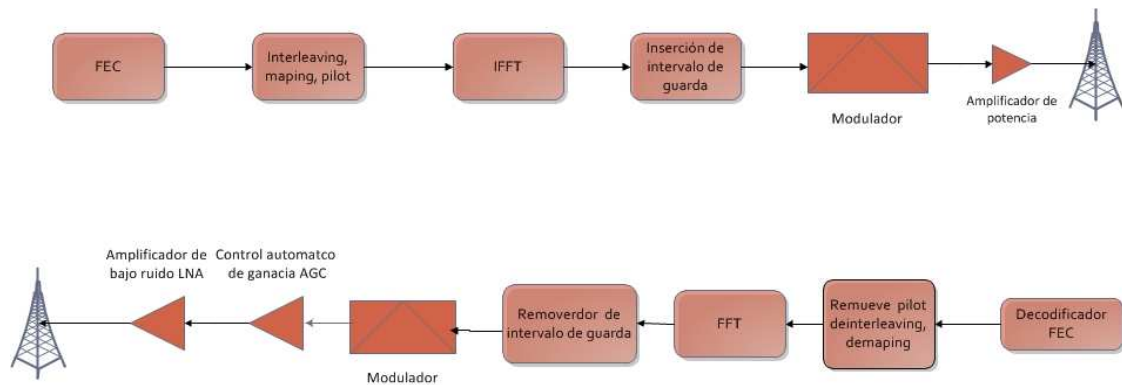


Figura 3.14. Transceptor 802.11a

**FEC (Forward Error Correction):** se usa un codificador convolucional en cada canal, con tasa de codificación  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$ , dependiendo de la tasa de datos que se desee. Dichos códigos permiten detectar en el receptor bits corruptos y reparar la transmisión siempre que la proporción de datos perdidos sea una fracción pequeña. Para llevar a cabo esta función, se agregan a la cadena de datos bits de redundancia. Para ello utiliza una máquina de estados que depende la información que va recibiendo, la cual va codificando usando cierto número de símbolos.

Se pueden usar dos clases de FEC: los códigos de bloque que trabajan tomando bloques de entrada de tamaño fijo y códigos convolucionales, para aplicaciones donde la información se almacena, procesa o transmite en trozos los cuales son ideales para las redes inalámbricas. Se usan los polinomios generadores estandarizados  $g_0=1338$  y  $g_1=1778$ .

En los códigos convolucionales, la tasa de codificación ( $R$ ) determina la cantidad de bits redundantes que se agregaron a la información. Se expresa como la relación entre el número de bits de datos transmitidos y el número total de bits codificados a la salida del codificador.

Un código convolucional con  $R=1/2$  puede transmitir un bit de datos por cada dos bits de código (es decir, se duplica la información a la salida del codificador). Otros códigos pueden tener menos información redundante, por ejemplo  $R=3/4$ , donde sólo el 25% de los bits son redundantes (3 bits de datos, 4 bits totales).

El diagrama de bloques para el codificador convolucional con  $R=1/2$  se muestra en la Figura 3.13, donde los bloques  $T_b$  representan retardos de un bit de ciclo de reloj, además de los sumadores modulo 2.

Las salidas A y A son intercaladas por lo que la salida es {A1B1A2B2...}.

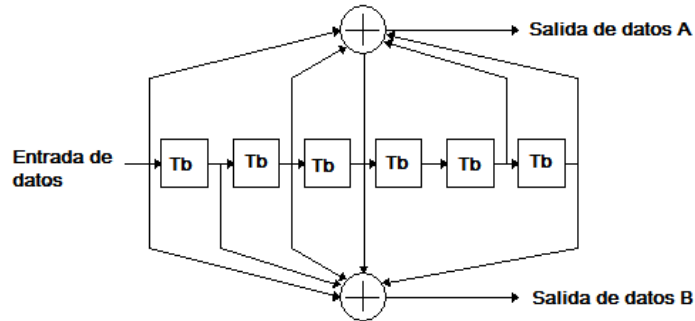


Figura 3.15 Diagrama de bloques para FEC

La selección de un tipo de codificación es una cuestión de ingeniería pues a medida que disminuye la tasa de código, más bits de código están disponibles para corregir los errores, y el código se vuelve más robusto; sin embargo, el precio de la robustez disminuye el rendimiento al tener que procesar mayor cantidad de datos.

**Inteleaving y mapping:** consiste en asignar la cadena de bits codificados a una subportadora que llevará dicha información al canal aéreo. En vez de usar técnicas comunes en las que se asigna la información en el orden que llega a las subportadoras sucesivas, se asigna la información usando reglas de interpolación (*mapping*) que asegura que información consecutiva se asigna a subportadoras lejanas entre si, y que los bits de la secuencia correspondan a diferentes puntos de la constelación (*interleaving*).

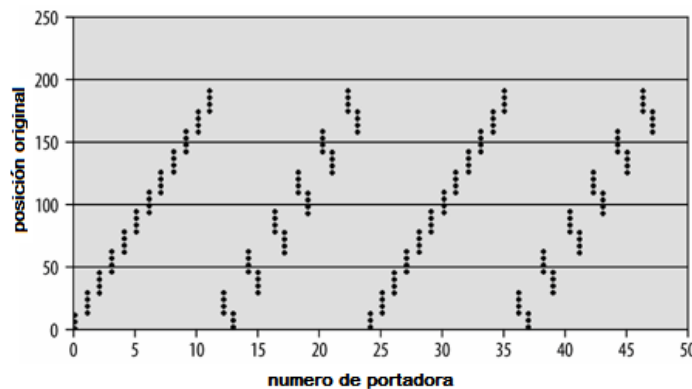


Figura 3.16. *Interleaving* (intercalamiento) con 16-QAM

**Codificación y modulación**

Así mismo, los parámetros de modulación están relacionados con dicha tasa de transmisión de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 4. Parámetros dependientes del campo Rate (tasa de datos) [1]

Tasa de datos [Mbps]	Modulación	Tasa de codificación (R)	Bits codificados por subportadora ( $N_{BPSK}$ )	Bits codificados por símbolo OFDM ( $N_{CBPS}$ )	Bits de datos por símbolo OFDM ( $N_{DBPS}$ )
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Los valores se obtienen de la siguiente forma.

Ejemplo:

Para la tasa de datos 18 Mbps:

Utiliza modulación **QPSK = 4-PSK**, por tanto  $4=2^2$  entonces, por cada símbolo codificado habrá 2 bits, es decir, dos bits por subportadora.

Cada símbolo OFDM tiene  $N_{DBPS} = 72 \text{ bits}$ , aplicándoles una tasa de codificación  $R=3/4$ :

$$N_{CBPS} = N_{DBPS} \left[ \frac{1}{R} \right] = 72 \text{ bits} \left[ \frac{4}{3} \right] = 96 \text{ bits}$$

De esta forma es posible observar que a distintas tasa de codificación corresponden diferente número de bits a la salida del sistema, las tasas de codificación bajas como 1/2 son menos eficientes pues los datos útiles ocupan menor cantidad de recursos de la red.

**3.6 CONCLUSIONES**

Este capítulo permitió conocer más a fondo la tecnología WiFi, la cual se ha convertido en un éxito comercial para redes de área local WLAN. Su bajo costo y el hecho de operar en bandas no licenciadas son los aspectos que le ha permitido tener una gran popularidad en el mercado. Adicionalmente presentan topologías sencillas y más fáciles de operar que otras tecnologías inalámbricas, lo cual la hace una tecnología muy atractiva.

En cuanto a la estructura de la tramas presentes tanto en capa física como en capa MAC, es posible ver que la los bytes que se adicionan a la carga útil en la capa MAC son 34, así mismo, es posible ver que este estándar permite a fragmentación de tramas cuando estas sean más grandes que la correspondiente MTU. Este número podría parecer grande pero en su mayoría esta ocupado por los campos de direcciones que son identificadores MAC de 48 bits.

En cuanto a la capa física, la codificación juega un papel muy importante pues dependiendo de la tasa de codificación convolucional usada, serán la cantidad de bits de redundancia que se agreguen a la información. De acuerdo con los campos de la capa PHY, la subcapa PLCP agrega cierta cantidad de información a la PSDU para convertirla en una PPDU, y dependiendo de la tasa de datos que utilice (Tabla 4):

Los datos en el preámbulo no se codifican, pues son datos bien conocidos:

$$preámbuloPHY = 12 \text{ simbolos}(N_{DBPS}) [bits] \quad (8)$$

Los bits aportados por el campo *Signal* que no están codificados:

$$signalPHY = 24[bits] \quad (9)$$

Los bits del campo *Service* y *Tail*, así como *padding*:

$$N_{symbNC} = ceiling \left[ dataPHY = \frac{16 \text{ bits} + 6 \text{ bits} + \text{tamañoPSDU}}{N_{DBPS}} \right] \quad (10)$$

La función *ceiling* representa una función matemática que redondea el resultado de la división al entero inmediato superior, lo cual permitiría hacer un cómputo de los símbolos no codificados ya contando bits de *padding*.

Y para obtener los bits totales en el campo de datos (Data) ya codificados:

$$N_{dataC\_WiFi} = N_{symNC} * N_{CBPS} \quad (11)$$