



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE HIDALGO**

ESCUELA SUPERIOR DE TIZAYUCA

**“ANÁLISIS DE OFDM DE LA CAPA FÍSICA
802.11 (WI-FI)”**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

PRESENTA
OROZCO ACOSTA ISSAI

**ASESORES: ING. JORGE BAUTISTA LÓPEZ
M. EN C. HERBERT LARA ORDAZ**

TIZAYUCA, HIDALGO OCTUBRE 2009

Índice general

Resumen	7
Abstract	8
Introducción	9
Justificación	11
Objetivos	12
0.1. Objetivos Específicos.	12
Planteamiento del Problema	13
Alcance del Trabajo	14
Estructura de la Tesis	15
1. Visión general de las redes 802.11.	16
1.1. Árbol de la familia de la tecnología IEEE 802.11.	16
1.1.1. Nomenclatura y Diseño de 802.11.	18
1.2. Tipos de redes.	19
1.2.1. Redes independientes.	20
1.2.2. Redes de infraestructura.	20
1.2.3. Área de servicio extendida.	20
1.2.4. Límites de red.	21
1.3. Operaciones de la red 802.11.	22
1.4. Servicio de red.	22
1.4.1. Servicios de estación.	25
1.4.2. Servicios del sistema de distribución.	25
1.4.3. Servicios de confiabilidad y control de accesos.	25
1.4.4. Servicio de administración de espectro.	26
1.5. Movilidad.	26
1.5.1. Diseñar redes para movilidad.	27

2. Visión general de la capa física.	28
2.1. Arquitectura de la capa física.	28
2.2. El enlace de radio.	29
2.3. Licencias y normativa.	29
2.3.1. Asignación de frecuencias y bandas de frecuencia sin licencia.	30
2.3.2. Otras bandas sin licencia.	31
2.4. Espectro disperso.	31
2.4.1. Tipos de espectro disperso.	32
2.5. Propagación de Radiofrecuencia con 802.11.	32
2.5.1. Recepción y rendimiento de la señal.	33
2.5.2. El límite de Shannon.	33
2.5.3. Pérdida de ruta, rango y rendimiento.	35
2.5.4. Interferencia de múltiples trayectorias.	36
2.5.5. Interferencia entre símbolos.	37
2.6. Ingeniería de RF para 802.11.	38
2.6.1. Componentes RF.	38
2.6.2. Antenas.	39
2.6.3. Amplificadores.	40
3. Análisis del Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM).	41
3.1. La capa física de OFDM a 5 GHz.	41
3.1.1. Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal.	42
3.1.2. Generación de las subportadoras.	42
3.1.3. Multiplexado de portadora.	43
3.1.4. Explicación de ortogonalidad.	45
3.1.5. Tiempo de guarda.	46
3.1.6. Extensiones cíclicas (Prefijos cíclicos).	47
3.1.7. Símbolo OFDM.	49
3.1.8. Trama y supertrama OFDM.	50
3.2. Elección de parámetros OFDM para 802.11a.	50
3.2.1. Extensión IEEE 802.11a.	51
3.2.2. Capa Física de Procedimiento de Convergencia (PLCP) de OFDM.	51
3.2.3. Tramas.	53
3.2.4. Preámbulo.	53
3.2.5. Encabezado.	54
3.3. Procedimiento para el cálculo de bits de relleno.	55
3.4. Corrección de error sin retorno con codificación de circunvolución.	56
3.5. Técnica de modulación de subportadora.	58
3.6. Estructura de un canal operativo.	60
3.6.1. Subcapa PMD y canales operativos.	61
3.7. Codificación y modulación.	64

4. Simulación del sistema OFDM.	66
4.1. Desarrollo de la simulación.	66
4.2. Plataforma de simulación en SimuLink.	66
4.3. Descripción del sistema a simular.	67
4.3.1. Alcance y principales parámetros de la simulación.	68
4.4. Explicación de cada una de las partes del diseño OFDM.	68
4.4.1. Transmisor OFDM.	70
4.4.2. Generador de datos binarios.	70
4.5. Modulador.	71
4.5.1. Codificación convolucional.	72
4.5.2. Perforado de datos.	72
4.5.3. Matriz interleaver.	72
4.5.4. Bloque general interleaver.	72
4.5.5. Tipo de modulación.	73
4.6. Entramado OFDM.	73
4.6.1. Símbolos OFDM.	74
4.6.2. Inserción del preámbulo y ecualizador.	74
4.6.3. Inserción de subportadoras piloto.	75
4.7. IFFT y FFT.	76
4.7.1. Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT).	76
4.7.2. Transformada Rápida de Fourier (FFT).	77
4.8. Prefijo cíclico.	77
4.9. Multiplexor.	78
4.10. Canal AWGN.	79
4.11. Receptor OFDM.	79
5. Análisis de resultados.	80
5.1. Análisis de resultados de la simulación.	80
5.2. Simulaciones obtenidas de OFDM.	80
Conclusiones	85
Apéndices	88

Índice de figuras

1.	Capa del modelo OSI.	10
1.1.	Familia IEEE 802 y su relación con el modelo OSI.	16
1.2.	Componentes PHY.	18
1.3.	Componentes de las LAN 802.11.	18
1.4.	BSS Independiente y de Infraestructura.	19
1.5.	Conjunto de servicio extendido.	21
1.6.	Superposición de los BSS en un ESS.	21
1.7.	Transición BSS.	26
1.8.	Transición ESS.	27
2.1.	Arquitectura lógica de la capa física.	28
2.2.	Tasa de señal a ruido y el fondo del ruido.	33
2.3.	Límite de Shannon como función de SNR.	34
2.4.	Rendimiento frente a distancia.	35
2.5.	Combinación de ondas por superposición.	36
2.6.	Múltiples rutas.	37
2.7.	Interferencia entre símbolos.	38
2.8.	Representación de la antena en los diagramas.	39
2.9.	Potencia radiada de antenas omnidireccionales y direccionales.	39
3.1.	Modulador de OFDM.	43
3.2.	FDM tradicional.	44
3.3.	FDM frente a OFDM.	44
3.4.	Ortogonalidad en el dominio de la frecuencia.	45
3.5.	ISI revisado.	46
3.6.	Desplazamiento en tiempo de cada símbolo OFDM.	47
3.7.	Adición del intervalo de guarda.	48
3.8.	Símbolo OFDM.	49
3.9.	Trama y supertrama OFDM.	50
3.10.	Procedimiento de transmisión.	52
3.11.	Formato de trama PLCP de OFDM.	53
3.12.	Preámbulo e inicio de trama.	54
3.13.	Campo señal.	54

3.14. Perforación para incrementar la relación de código.	57
3.15. Modulador.	58
3.16. Constelaciones usadas en 802.11a.	59
3.17. Constelaciones utilizadas por 802.11a.	59
3.18. Estructura de un canal OFDM.	60
3.19. Bandas operativas de U-NII (Baja, Media y Superior).	63
4.1. Diagrama Transmisor - Receptor OFDM.	67
4.2. Esquema simulado OFDM.	69
4.3. Transmisión OFDM.	70
4.4. Generador de datos aleatorios.	70
4.5. Bloque que contempla a la modulación.	71
4.6. Bloque interior de cada modulación.	73
4.7. Preámbulo OFDM.	74
4.8. Inserción piloto en OFDM.	75
4.9. Entramado OFDM.	75
4.10. IFFT en OFDM.	76
4.11. Explicación de la IFFT en OFDM.	77
4.12. FFT en OFDM.	77
4.13. Prefijo cíclico OFDM.	78
4.14. Multiplexor OFDM.	78
4.15. Canal AWGN de OFDM.	79
5.1. Modulación BPSK y QPSK.	81
5.2. Modulación 16-QAM y 64-QAM.	82
5.3. Modulación BPSK Y QPSK.	83
5.4. Modulación 16-QAM y 64-QAM.	83

Índice de cuadros

1.1. Servicio de red	24
3.1. Número de muestras que contiene el intervalo de guarda	49
3.2. Factor de normalización	60
3.3. Canales operativos para 802.11a/j	62
3.4. Niveles de transmisión de potencia en las bandas U-NII	63
3.5. Requerimientos de rendimiento del receptor	64
3.6. Detalles de codificación para velocidades de datos OFDM	65
4.1. Detalles de la codificación OFDM	68
4.2. Parámetros de la codificación OFDM.	68

Resumen.

En este trabajo de tesis se realiza un estudio y análisis de OFDM (Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal) ubicado en la capa física de redes inalámbricas, bajo el protocolo IEEE 802.11.

La especificación IEEE 802.11, es un estándar internacional que define las características de una red de área local inalámbrica (WLAN). Wi-Fi es el nombre de la certificación otorgada por la Wi-Fi Alliance, anteriormente WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), grupo que garantiza la compatibilidad entre dispositivos que utilizan el estándar 802.11 [10].

Las redes inalámbricas nos proporcionan una gran movilidad para trabajar, permitiéndonos abarcar con facilidad ciertos puntos no accesibles para redes cableadas, pero además de todo esto existen algunos inconvenientes que están relacionados con su seguridad durante el intercambio de información.

Con Wi-Fi se pueden crear redes de área local inalámbricas de alta velocidad. En la práctica, Wi-Fi admite ordenadores portátiles, equipos de escritorio, asistentes digitales personales (PDA) o cualquier otro tipo de dispositivo de alta velocidad dentro de un radio que va de los diez a cien metros.

Por ello este trabajo consiste en el estudio del comportamiento de las señales de Wi-Fi (Wireless-Fidelity). Todo este análisis se realiza simulando la modulación con la que trabaja el protocolo IEEE 802.11 en la capa física, específicamente en la parte de OFDM que es la que se encarga de los detalles de la transmisión y recepción de datos permitiendo de esta manera analizar con más detalle este protocolo y obtener un trabajo que permita ver cada una de las partes y características que integran a esta tecnología, así como el comportamiento de la señal, con el único objetivo de obtener los conocimientos básicos ya comprobados y de esta manera comprender el funcionamiento de este tipo de redes basadas en OFDM.

Abstract.

In this work of thesis there is realized a study and analysis of OFDM (Multichanneling for Division of Orthogonal Frequency) located in the physical layer of wireless networks, under the protocol IEEE 802.11.

The specification IEEE 802.11, it is an international standard that defines the characteristics of a network of local wireless area (WLAN). Wi-Fi is the name of the certification granted by the Wi-Fi Alliance, previously WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), group that guarantees the compatibility between devices that use the standard 802.11.[10].

The wireless networks provide a great mobility to us to work, permitting to include with facility certain not accessible points for wired up networks, but besides all that there exist some disadvantages that are related to it safety during the exchange of information.

With Wi-Fi there can be created wireless networks of local area of high speed. In the practice, Wi-Fi admits portable computers, equipments of office, digital personal assistants (PDA) or any other type of device of high speed inside a radius that goes of the ten to hundred meters.

For it this work consists of the study of the behavior of the signs of Wi - Fi (Wireless-Fidelity) All this analysis is realized simulating the modulation with which there is employed the protocol IEEE 802.11 at the physical layer, specifically in OFDM is part that is the one that takes charge of the details of the transmission and receipt of information allowing to analyze hereby with more detail this protocol and to obtain a work that allows to see given one of the parts and characteristics that integrate this technology, this way as the behavior of the sign, with the only aim to obtain the basic already verified knowledge and hereby to understand the functioning of this type of networks based on OFDM.

Introducción.

Las redes inalámbricas han llegado a ser una de las tecnologías predominantes hoy en día, evitando de alguna forma el uso de una numerosa cantidad de cables por cualquier lugar y permitiendo tener una conectividad más libre, mayor movilidad, flexibilidad y velocidad de desarrollo por parte de los usuario a la red, dando como resultado que las redes inalámbricas sobresalgan sobre las redes fijas o con cables.

La tecnología en sistemas de redes inalámbricas más exitosas está basada en el protocolo 802.11 siendo un miembro de la familia IEEE 802, una serie de especificaciones tecnológicas en Red de Área Local (LAN)

IEEE aprobó la norma 802 en 1990 que normalizaba el funcionamiento de las redes de área local y metropolitanas, y de esta manera se definía el estándar necesario para que los productos de los diferentes fabricantes del mercado fueran compatibles entre sí.

Esta primera norma se fue dividiendo sucesivamente en diferentes grupos de trabajo, y en la actualidad se pueden encontrar más de 20, estableciéndose un grupo de trabajo específico para las redes locales inalámbricas creadas con la tecnología Wi-Fi siendo este grupo de trabajo el 802.11 creado en 1999 por la asociación WECA y dentro de este grupo se encuentra la tecnología OFDM que es la de interés.

Las especificaciones IEEE 802 se centran en las dos últimas dos capas inferiores del modelo OSI ya que incorporan tanto componentes físicos como enlace de datos siendo su principal objetivo de este modelo establecer un estándar en las comunicaciones para su compatibilidad global de las redes de las computadoras estableciendo siete niveles o capas como se describe a continuación.



Figura 1: Capa del modelo OSI.

Este trabajo se basa en la investigación detallada del funcionamiento de redes inalámbricas 802.11a, a partir de estudio de su capa física siendo ésta la base principal para el funcionamiento, la cual utiliza una técnica de modulación de OFDM, que alcanza velocidades de hasta 54 Mbps.

Además de la investigación se realiza una Modulación de OFDM, que permitirá ver cada una de las partes que componen a esta tecnología así como sus ventajas y desventajas. Esta simulación se realizó con el apoyo del programa MATLAB el cual permite simular y obtener un mejor resultado para su estudio y comprobación.

Justificación.

Las redes inalámbricas Wi-Fi han tenido un gran avance tecnológico, siendo éstas uno de los principales medios de comunicación, ofreciendo una mayor conectividad, movilidad y flexibilidad; además de evitar el empleo de una gran cantidad de cables dentro de su aplicación.

La conexión a través de Wi-Fi está basada en una tecnología OFDM, conformada por el protocolo 802.11 de la IEEE, ocupando principalmente las dos capas inferiores del modelo OSI; siendo la parte principal del estudio de este trabajo.

Es importante conocer los detalles del funcionamiento del sistema OFDM, debido a que tiene un papel fundamental en las comunicaciones inalámbricas 802.11a, además de que permitirá comprender sus ventajas y desventajas de este sistema.

La simulación del sistema OFDM proporciona un amplio panorama del comportamiento de las señales y muestra sus características integradoras, proporcionando así un conocimiento del trabajo más a detalle sobre esta tecnología.

El desarrollo de la simulación toma un papel importante en este trabajo ya que es una herramienta útil para observar los comportamientos de este sistema de una forma más detallada, proporcionando un mayor análisis de dicha simulación.

Objetivos.

Estudiar las señales con las que trabaja las redes inalámbricas Wi-Fi, analizar su modulación específicamente en la capa 802.11a de OFDM mostrando la señal modulada por medio de un programa de MATLAB.

0.1. Objetivos Específicos.

- Estudiar las funciones y aplicaciones de las redes inalámbricas.
- Analizar del protocolo 802.11 específicamente en la capa física.
- Conocer las modulaciones con las que trabaja el protocolo 802.11.
- Comprender cada una de las partes que integran el proceso de modulación OFDM.
- Obtener la modulación de señales de Wi-Fi a través de la simulación en MATLAB con ayuda de Simulink en base a los estudios ya mencionados.

Planteamiento del Problema.

Las redes locales basadas en Wi-Fi tienen un gran inconveniente en su aplicación, ya que estas señales pueden ser muy fáciles de detectar y al mismo tiempo acceder a ellas y todo esto gracias a la tecnología que ha mejorado día con día, lo cual provoca problemas en el libre de acceso a personas ajenas, permitiendo el uso inadecuado de la información que se encuentra en intercambio.

Por esta razón el motivo principal, es realizar un estudio acerca de las señales Wi-Fi para desarrollar una simulación de su modulación con la que Wi-Fi trabaja, obteniendo como resultado la información necesaria para que en trabajos futuros se logre realizar un inhibidor de dichas señales evitando el robo de información por medio de la delimitación de áreas de trabajo.

De lo anterior se formularon las siguientes preguntas para detectar nuestro problema principal.

¿Qué es WI-Fi?, ¿Qué modulación utiliza las redes Wi-Fi?, ¿A qué frecuencias trabaja el protocolo 802.11?, ¿Cómo realizar la simulación en MATLAB de la modulación de señales de Wi-Fi?.

Alcance del Trabajo.

Este trabajo de tesis estudia la tecnología OFDM (Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal), la cual no es muy reciente, pero que actualmente se le está dando muchas aplicaciones, por lo que surgió la idea de hacer una investigación de las redes inalámbricas.

Por esta razón el alcance del desarrollo de este trabajo comprende un análisis de OFDM, a partir del estudio de las redes 802.11a, haciendo referencia general al tipo del protocolo con el que trabaja así como de su capa física, finalizando esta investigación con el análisis de cada una de las partes que comprenden a OFDM, obteniendo la simulación de la señal con ayuda del programa de SimuLink para el mejor entendimiento de su funcionamiento.

Estructura de la Tesis.

En esta sección se habla de manera general del contenido de cada uno de los capítulos que abarca este trabajo de tesis, con el fin de dar una idea de lo que trata cada capítulo.

El inicio de este trabajo contiene un avance de lo que es la tesis como una introducción, objetivos generales y específicos, planteamiento del problema, justificación entre otras cosas.

En el primer capítulo se habla de una forma global de lo que son las redes 802.11 las cuales son el principio fundamental para el desarrollo de este trabajo, y entre los temas que se encuentran son, los tipos de redes, servicio de las redes, movilidad y entre otros conceptos.

En el segundo capítulo se encuentran algunos temas relacionados con la capa física de las redes 802.11 los cuales hablan sobre la arquitectura de la capa física, la licencia y normas de las bandas de frecuencia, espectro disperso, además abarca los temas de RF para redes 802.11.

En el tercer capítulo se abarcan los temas más enfocados en el desarrollo de este trabajo los cuales son de mayor importancia ya que tratan de la capa física de OFDM donde se comprende cada una de las partes que integran a esta tecnología así como algunas de sus características principales.

En el cuarto capítulo se trata específicamente del desarrollo de la simulación de OFDM que es objetivo de este trabajo por lo cual se explica de manera general cada una de sus partes que lo integran así como su funcionamiento de las mismas, a través de los bloques que comprende esta simulación.

El quinto y último capítulo trata del análisis de resultados que se obtuvieron al final del trabajo además de dar algunas conclusiones obtenidas al término del mismo. Y por último contiene las conclusiones a las que se llegó al término de este trabajo además de un apéndice.

Capítulo 1

Visión general de las redes 802.11.

1.1. Árbol de la familia de la tecnología IEEE 802.11.

802.11 es miembro de la familia IEEE 802, una serie de especificaciones para tecnologías de red de área local (LAN, Local Área Network). La figura 1.1 muestra las relaciones existentes entre los diversos componentes de la familia 802 y su lugar en el modelo OSI.

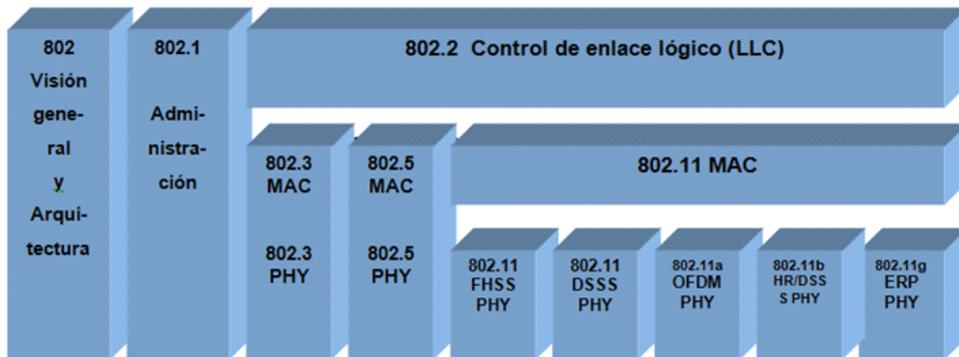


Figura 1.1: Familia IEEE 802 y su relación con el modelo OSI.

Las especificaciones IEEE 802 se centran en las dos capas inferiores del modelo OSI ya que incorporan tanto componentes físicos como enlaces de datos. Todas las redes 802 tienen un componente MAC y un componente físico (PHY) [12].

MAC: Es un conjunto de reglas para determinar como acceder al medio y enviar datos.

PHY: Se encarga de los detalles de la transmisión y recepción de datos.

Las especificaciones individuales en la serie 802 se identifican por un segundo número. Por ejemplo, 802.3 es la especificación para la red de acceso múltiple con detección de portadora y detección de colisión (CSMA/CD, Carrier Sense Multiple Access Network / Collision Detection) que esta relacionada con Ethernet.

Las demás especificaciones describen otras partes de la pila del protocolo como de enlace común, el control de enlace lógico (LLC, Logical Link Control) que puede utilizar cualquier tecnología LAN de capa inferior.

La especificación base de 802.11 incluye MAC 802.11 y dos capas físicas:

Una capa física de espectro disperso por salto de frecuencia (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum) y una capa de enlace de espectro disperso por secuencia directa (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum). Las especificaciones antes mencionadas han añadido capas físicas adicionales como son las siguientes:

- **802.11a:** Esta describe una capa física basada en la multiplexado por división de frecuencia ortogonal (OFDM, Orthogonal Frequency División Multiplexing).

- **802.11b:** Especifica una capa de secuencia directa de alta velocidad (HR/DSSS, High Rate Direct Sequence) siendo la primera PHY del mercado aplicada en masa.

- **802.11g:** Es la capa física más moderna del bloque ofreciendo una velocidad superior a través del uso de OFDM y con compatibilidad con 802.11b, y cuando existe esta compatibilidad de 802.11b y 802.11g en el mismo punto de acceso tiene una desventaja ya que requiere mayor control en protocolo adicional, reduciéndose la velocidad máxima para los usuarios de 802.11g.

802.11 permite el acceso a redes móviles; para conseguir este objetivo, en el MAC se incorporaron diversas opciones adicionales. Como resultado, el MAC puede parecer bastante complejo comparado con otras especificaciones IEEE 802 MAC.

El uso de ondas de radio como capa física requiere también una PHY relativamente compleja. 802.11 divide PHY en dos componentes de medio físico genéricos:

- El procedimiento de convergencia de capa física (PLCP, Physical Layer Convergence Procedure) para asignar las tramas MAC en el medio.

- Un sistema dependiente del medio físico (PMD, Physical Medium Dependent), responsable de transmitir señales de RF a otras estaciones 802.11.

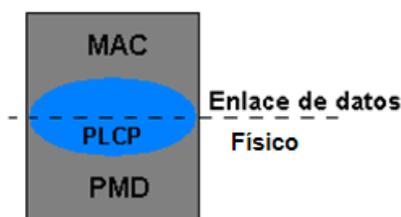


Figura 1.2: Componentes PHY.

El PLCP crea un puente entre el límite de MAC y de las capas físicas, como se muestra en la figura 1.2.

En 802.11, el PLCP añade diversos campos a la trama a medida que se transmite en el aire.

1.1.1. Nomenclatura y Diseño de 802.11.

Las redes 802.11 están compuestas por cuatro componentes físicos importantes que se representan en la siguiente figura.

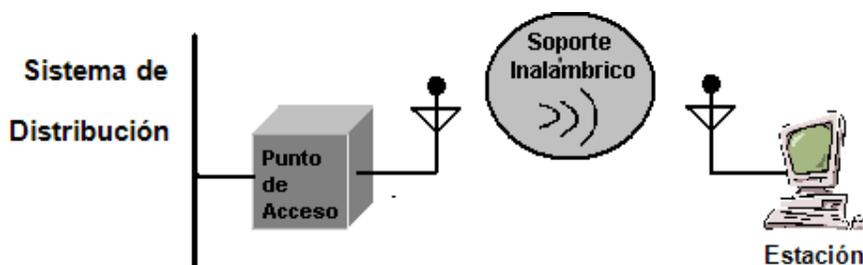


Figura 1.3: Componentes de las LAN 802.11.

■ **Estaciones:** Las redes se crean para transferir datos entre estaciones. Las estaciones son dispositivos informáticos con interfaces de red inalámbricas. Normalmente son equipos manuales o portátiles que funcionan con baterías.

En algunos entornos, el sistema de red inalámbrico se utiliza para no incluir un nuevo cable y los equipos de sobremesa se conectan a través de LAN inalámbrica. En áreas abiertas también se pueden beneficiar de los sistemas de redes inalámbricas, como una planta de fabricación que utilice una LAN inalámbrica para conectar componentes.

802.11 se está convirtiendo rápidamente en un estándar para unir los componentes electrónicos de consumidor.

■ **Puntos de acceso:** Las tramas de una red 802.11 se deben convertir a otro tipo de trama para su entrega al resto de mundo. Los dispositivos denominados puntos de acceso (AP, Access Point) ejecutan la función de puente inalámbrico a cable. (Los puntos de acceso ejecutan otras funciones, pero el servir de puentes es la más importantes de todas). Las funciones del punto de acceso en los productos más modernos del protocolo 802.11 se dividen en los de “poca densidad” y controladores AP.

■ **Medio inalámbrico:** Para mover las tramas de una estación a otra, el estándar utiliza un medio inalámbrico. Se definen diversas capas físicas diferentes; la arquitectura permite el desarrollo de múltiples capas físicas para admitir MAC 802.11. Al principio se estandarizaron dos capas físicas de radio frecuencia (RF, Radio Frequency) y una capa física de infrarrojos, aunque las capas RF son más populares.

■ **Sistema de distribución:** Cuando se conectan diversos puntos de acceso para formar un área de cobertura grande, deben comunicarse entre sí para registrar los movimientos de las estaciones móviles. El sistema de distribución es el componente lógico de 802.11 utilizado para reenviar tramas a su destino. 802.11 no especifica ninguna tecnología particular para el sistema de distribución.

En la mayoría de los productos comerciales, el sistema de distribución, es la red troncal utilizada para la conmutación de tramas entre los puntos de accesos, normalmente se le conoce solo como troncal.

1.2. Tipos de redes.

La base de una red 802.11 es el conjunto de servicio básico (BSS, Basic Service Set) que es simplemente un grupo de estaciones que se comunican entre ellos. Las comunicaciones tienen lugar dentro de un área poco definida denominada área de servicio básico definida por las características de propagación del medio inalámbrico.

Cuando una estación está en el área de servicio básico, puede comunicarse con el resto de miembros del BSS. Los BSS son de dos tipos como se ilustra en la figura 1.4.

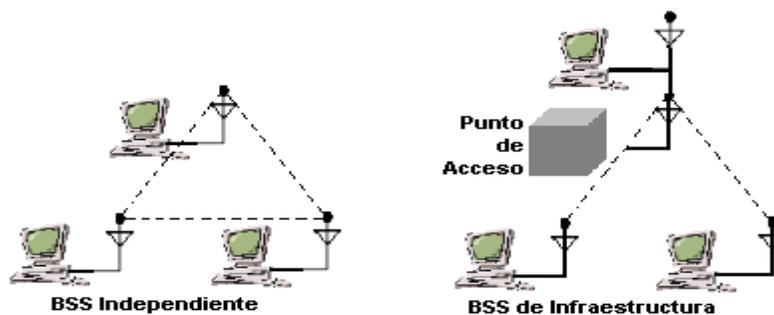


Figura 1.4: BSS Independiente y de Infraestructura.

1.2.1. Redes independientes.

La BSS independiente (IBSS, Independent BSS). Las estaciones en un IBSS se comunican directamente entre sí y, por lo tanto deben encontrarse dentro del alcance directo de la comunicación.

Normalmente, los IBSS se componen de una pequeña cantidad de estaciones configuradas para un propósito específico y durante un breve período de tiempo. Un uso común es crear una red de corta duración para admitir una sola reunión en una sala de conferencias y por lo tanto éstas se conocen como redes provisionales.

1.2.2. Redes de infraestructura.

Las redes de infraestructura se distinguen porque utilizan un punto de acceso. Los puntos de acceso se utilizan para todas las comunicaciones y las redes de infraestructura, incluyendo la comunicación entre nodos móviles en la misma área de servicio. Si una estación móvil en un BSS de infraestructura necesita comunicarse con una segunda estación móvil, la comunicación debe tener dos saltos. Primero, la estación móvil de origen transfiere la trama al punto de acceso, segundo, el punto de acceso transfiere la trama a la estación destino.

Además de que la transmisión de múltiples saltos tiene más capacidad de transmisión, tiene dos ventajas que no tienen ninguna restricción en cuanto a la distancia entre las estaciones móviles siempre y cuando se encuentre al alcance del punto de acceso y la otra ventaja es que pueden ahorrar potencia activando y desactivando el transmisor y receptor por medio del punto de acceso cuando no se ocupe.

1.2.3. Área de servicio extendida.

Los BSS pueden crear cobertura en oficinas pequeñas y en un domicilio particular, pero no pueden proporcionar coberturas de redes para áreas más grandes.

802.11 permite crear redes inalámbricas de tamaño arbitrariamente grande y enlazar los BSS en un conjunto de servicio extendido (EES, Extended Service Set). Un ESS se crea encadenando los BSS entre sí con una red troncal. Todos los puntos de acceso en un ESS tienen el mismo identificador del conjunto de servicio (SSID, Service Set Identifier), que sirve como “nombre” de red para los usuarios.

802.11 no especifica una tecnología troncal determinada; solo requiere que la red troncal proporcione un conjunto de servicios especificado, como se muestra en la figura 1.5 donde ESS es la unión de los cuatro BSS (siempre que todos los puntos de accesos se hayan configurado como parte del mismo ESS).

En una implementación real, es mejor ofrecer una cobertura continua dentro del área servicio extendido, no es necesario que los usuarios se desplacen por el área cubierta por BSS3 cuando se encuentran en camino desde BSS1 hasta BSS2, esto se puede ver en la figura 1.5.

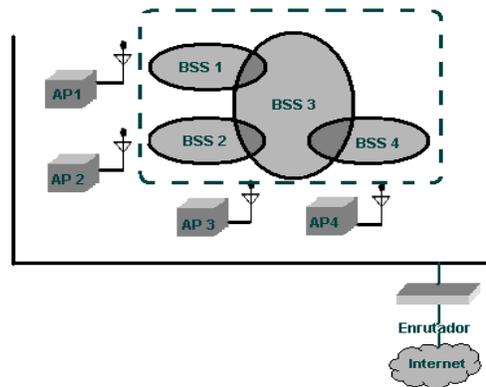


Figura 1.5: Conjunto de servicio extendido.

1.2.4. Límites de red.

Debido a la naturaleza del medio inalámbrico, las redes 802.11 tienen límites poco definidos. Igual que las redes telefónicas móviles, permite que las áreas de servicios básicos se superpongan aumentando la probabilidad de las transiciones con éxito entre áreas de servicio básico y ofrece un nivel más alto de cobertura de la red.

Las áreas de servicio básico que se encuentran en la figura 1.6 se superponen significativamente, lo que significa que una estación que se desplaza desde BSS2 a BSS4 probablemente no perderá cobertura.

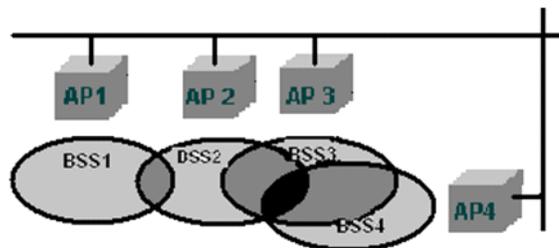


Figura 1.6: Superposición de los BSS en un ESS.

1.3. Operaciones de la red 802.11.

Desde el principio, 802.11 se diseñó para ser solo otra capa de enlace para protocolos de capa superior.

Las estaciones se identifican mediante direcciones IEEE 802 MAC de 48 bits. Conceptualmente, las tramas se entregan basándose en la dirección MAC.

La entrega de tramas no es de confianza, aunque 802.11 incorpora algunos mecanismos de fiabilidad básicos para superar las cualidades inherentemente pobres de los canales de radio que utiliza.

1.4. Servicio de red.

Una forma de definir una tecnología de red es definiendo los servicios que ofrece en cualquier lugar apropiado. 802.11 proporciona nueve servicios, de los cuales tres se utilizan para desplazar datos; y los seis servicios restantes realizan operaciones de administración que permiten a la red registrar los nodos móviles y entregar las tramas en consecuencia. El cuadro 1.1 describe cada uno de los servicios de red que se mencionan a continuación.

■ **Distribución.** Este servicio se emplea en las estaciones móviles en una red de infraestructura cada vez que se envían datos. Una vez aceptada la trama por un punto de acceso, se emplea el servicio de distribución para entregar la trama a su destino. Cualquier comunicación que usa un punto de acceso se desplaza a través del servicio de distribución, incluyendo las comunicaciones entre dos estaciones móviles asociadas con el mismo punto de acceso.

■ **Integración.** La integración es un servicio proporcionado por el sistema de distribución; permite la conexión de un sistema de distribución a una red distinta de IEEE 802.11. La función de integración es entregar las tramas a una LAN fuera de la red inalámbrica.

■ **Asociación.** La entrega de tramas a estaciones móviles es posible gracias al registro de estaciones móviles, o asociación, con los puntos de acceso. El sistema de distribución puede posteriormente utilizar la información del registro para determinar el punto de acceso que debe utilizar para cualquier estación móvil. Las estaciones no asociadas no están en la red de una forma muy parecida a las estaciones con cables Ethernet desconectadas. 802.11 especifica la función que debe ser proporcionada por el sistema de distribución utilizando los datos de asociación pero no dictan ninguna implantación en concreto.

■ **Reasociación:** Cuando una estación móvil se desplaza entre áreas de servicio básicos dentro de una sola área de servicio extendida, tiene que evaluar la fuerza de la señal y, quizá, conmutar el punto de acceso al que está asociada. Las reasociaciones se inician a través de las asociaciones móviles cuando las condiciones de la señal se benefician de una asociación diferente; nunca se inician directamente a través del punto de acceso.

Al finalizar la reasociación el sistema de distribución actualiza sus registros de ubicación para reflejar el alcance de la estación móvil a través de un punto de acceso diferente.

■ **Disociación:** Para terminar una asociación existente, las estaciones pueden utilizar el servicio de disociación. Cuando las estaciones llaman al servicio de disociación, se elimina cualquier dato de movilidad guardado en el sistema de distribución. Una vez finalizada, es como si la estación no estuviese estado nunca unida a la red.

■ **Autenticación:** La seguridad física es un elemento importante de una solución de seguridad de LAN con cables. La autenticación es un requisito previo necesario para la asociación ya que sólo los usuarios autenticados están autorizados a utilizar la red. Antes de la asociación, una estación ejecuta un intercambio de identidad básico con un punto de acceso consistente en su dirección MAC. Este intercambio también se le conoce como autenticación 802.11.

■ **Anulación de la autenticación:** Es una relación autenticada. Como se necesita la autenticación antes de autorizar el uso de la red, un efecto secundario de la anulación de la autenticación es la finalización de cualquier asociación actual. En la red de seguridad se borra la información de claves.

■ **Confidencialidad:** Los controles físicos pueden prevenir un gran número de ataques a la privacidad de los puntos de una LAN con cables. Los atacantes tienen que obtener un acceso físico al medio de la red antes de intentar escuchar ilegalmente el tráfico. Por diseño, el acceso físico a las redes inalámbricas es comparativamente una cuestión de utilizar los métodos de modulación y antena correctos.

En 802.11, el servicio de confiabilidad se denominaba privacidad y la proporcionaba el ahora desacreditado protocolo de privacidad equivalente al cableado (WEP, Wired Equivalent Privacy).

■ **Entrega MSDU:** Las redes no utilizan mucho sin la capacidad de enviar datos al destinatario. Las estaciones proporcionan el servicio de entrega de la unidad de datos del servicio MAC (MSDU, MAC Service Data Unit), responsable de conseguir que los datos lleguen al punto final.

■ **Control de potencia de transmisión (TPC):** TPC es un servicio nuevo definido por 802.11h. El rango es una función de potencia; con una configuración de potencia de alta transmisión siendo más probable que un rango superior de algún cliente interfiera con una red vecina. Al controlar la potencia a un nivel correcto, es menos probable que una estación vecina interfiera.

■ **Selección dinámica de frecuencia (DFS):** Algunos sistemas de radar operan en el rango de 5 GHz. Como resultado, las autoridades normativas dictaminan que las LAN inalámbricas deben detectar los sistemas de radar y moverse a frecuencias que no este aplicando el radar a través de la selección dinámica de frecuencias (DFS, Dynamic Frequency Selection).

Servicio	Tipos de Servicio	Descripción
Distribución	Distribución	Servicio empleado en la entrega de tramas para determinar la dirección de destino de redes de infraestructura.
Integración	Distribución	Entrega de tramas a una LAN IEEE 802 fuera de la red inalámbrica.
Asociación	Distribución	Utilizado para establecer el AP que sirve como pasarela a una estación móvil determinada.
Reasociación	Distribución	Empleado para cambiar el AP que sirve como pasarela a una estación móvil determinada.
Diasociación	Distribución	Elimina la estación inalámbrica de la red.
Autenticación	Estación	Establece identidad de la estación (Dirección MAC) antes de establecer la asociación.
Anulación de la autenticación	Estación	Aplicado para determinar la autenticación y por extensión la asociación.
Confidencialidad	Estación	Proporciona protección frente a escuchas secretas.
Entrega MSDU	Estación	Entrega de datos al destinatario.
Control de potencia de transmisión	Estación/Administración de espectro	Reduce la interferencia minimizando la potencia de transmisión de la estación.
Selección dinámica de frecuencia (DSP)	Estación/Administración de espectro	Evita la interferencia con la operación de radar en la banda de 5 GHz.

Cuadro 1.1: Servicio de red

1.4.1. Servicios de estación.

Los servicios de estación forman parte de cualquier estación conforme a 802.11 y tienen que incorporarse a cualquier producto que demande conformidad con 802.11. Los servicios de estación se proporcionan en estaciones móviles y en la interfaz inalámbrica en los puntos de acceso. La estación proporciona servicios de entrega de tramas para permitir la entrega de mensajes y, para ayudar a la trama, (puede que necesite utilizar los servicios de autenticación para establecer asociaciones). Las estaciones también pueden aprovechar las funciones de confiabilidad para proteger los mensajes a medida que recorran el enlace inalámbrico vulnerable.

1.4.2. Servicios del sistema de distribución.

Estos conectan los puntos de acceso al sistema de distribución. Su función principal es extender los servicios en la red con cables hacia la red inalámbrica; y se realiza proporcionando los servicios de distribución e integración a la parte inalámbrica. En la administración de asociación de estaciones móviles es otra función principal de sistema de distribución. Para mantener los datos asociados y la información de la ubicación de la estación, el sistema de distribución proporciona los servicios de asociación, reasociación y disociación.

1.4.3. Servicios de confiabilidad y control de accesos.

Además del secreto de los datos en tránsito, este servicio proporciona la integridad del contenido de la trama que depende de claves criptográficas, por lo que el servicio de confiabilidad dependen necesariamente de otros servicios para proporcionar autenticación y administración de claves.

- **Autenticación y administración de claves (AKM):** La integridad criptográfica es inútil si no evita que usuarios no autorizados en la red tengan acceso a ella. La autenticación puede realizarse a través de un protocolo externo, como 802.1x o con claves compartidas previamente.

- **Algoritmos criptográficos:** Las tramas pueden protegerse mediante el algoritmo WEP, claves secretas de 40 a 104 bits, y el protocolo temporal de integridad de claves.

- **Autenticidad de origen:** Los protocolos TKIP (Protocolo de Integridad de Llave Temporal) y CCMP(Protocolo de Mensaje con Código de Autenticación) permiten al receptor validar la dirección MAC del remitente para evitar ataques de falsificación.

- **Detección de repetición:** Los protocolos TKIP y CCMP protegen frente ataques de repetición mediante la incorporación de un contador de secuencias que se valida en la recepción.

- **Protocolos de sistemas externos:** El servicio de confiabilidad depende mucho de que se ejecuten protocolos externos. La administración de claves la proporciona 802.1x, que junto con EAP conllevan los datos de autenticación.

1.4.4. Servicio de administración de espectro.

Estos son un subconjunto especial de los servicios de estación. Están diseñados para permitir que la red inalámbrica reaccione ante determinadas condiciones y cambie dinámicamente las configuraciones de radio. Para ayudar a satisfacer los requerimientos normativos, se definieron dos servicios en 802.11h.

El primer servicio, control de potencia de transmisión (TPC, Transmit Power Control) puede ajustar dinámicamente la potencia de transmisión de una estación.

El segundo servicio, la selección dinámica de frecuencia (DFS) se desarrolló principalmente para evitar la interferencia con algunos sistemas de radar de 5 GHz que se utilizan en Europa.

1.5. Movilidad.

La movilidad es la principal motivación para implementar una red 802.11. Transmitir tramas de datos mientras la estación se está moviendo será para las comunicaciones de datos lo que la telefonía móvil para la voz.

802.11 proporciona movilidad entre áreas de servicios básicos en la capa de enlace. En lo que respecta a 802.11 existen tres tipos de transiciones entre los puntos de acceso:

■ **Ninguna transición:** Cuando las estaciones no se mueven del área de servicio de su punto de acceso actual, no se necesita ninguna transición. Esto se produce porque la estación no se está moviendo o se está moviendo dentro del área de servicio básico de su punto de acceso actual.

■ **Transición BSS:** Las estaciones supervisan continuamente la potencia de la señal y la calidad de todos los puntos de acceso determinados de forma administrativa para cubrir un área de servicio extendida. La estación del sistema de distribución no necesita conocer la ubicación de una estación móvil, siempre que se encuentre dentro de la misma área de servicio extendido. La figura 1.7 ilustra una transición ESS.

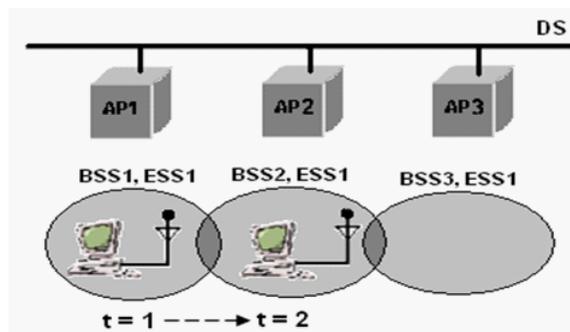


Figura 1.7: Transición BSS.

■ **Transición EES:** Una transición EES se refiere al movimiento desde un ESS a un segundo ESS distinto. 802.11 no admite este tipo de transición excepto para permitir que la estación se asocie con un punto de acceso en un segundo ESS cuando deja el primero, como se ilustra en la figura. 1.8.

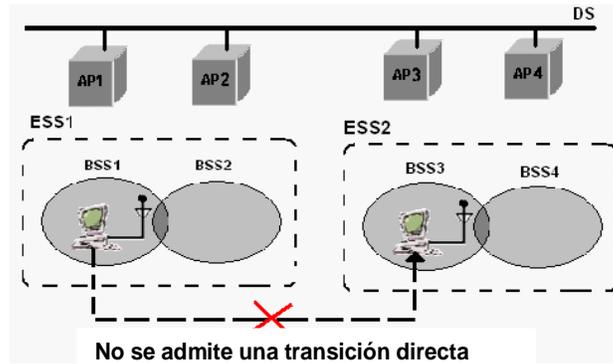


Figura 1.8: Transición ESS.

1.5.1. Diseñar redes para movilidad.

La mayoría de las redes se diseñan para que un grupo de puntos de accesos proporcione accesos a un grupo de recursos. Todos los puntos de acceso bajo el control de la organización del sistema de red asigne a la misma identidad de conjunto de servicio (SSI, Service Set Identity) y los clientes se configuren para utilizar dicho SSI cuando se conectan a la red inalámbrica.

Capítulo 2

Visión general de la capa física.

El protocolo 802.11 en cada una de las capas permite la investigación, experimentación y mejora sobre distintas partes de la pila del protocolo. El segundo componente importante de la arquitectura 802.11 es la capa física, que normalmente se conoce con la abreviatura PHY.

Este capítulo presenta los temas y técnicas comunes que aparecen en la capa física basada en radio y describe los problemas, a continuación se ofrece una explicación más detallada de cada una de las capas físicas estandarizadas para 802.11.

2.1. Arquitectura de la capa física.

La capa física se divide en dos subcapas: La subcapa de procedimiento de convergencia de capa física (PLCP, Physical Layer Convergence Procedure) y la subcapa dependiente del medio físico (PMD, Physical Medium Dependent) [12]. PLCP realiza la unión de las tramas de la MAC y de las transmisiones de radio en el aire y añade su propio encabezado como se muestra a continuación.

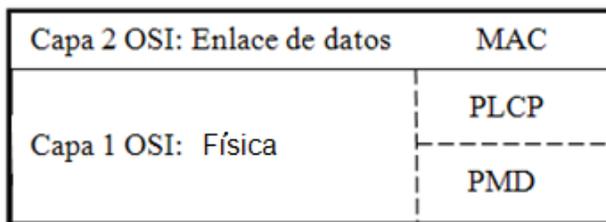


Figura 2.1: Arquitectura lógica de la capa física.

Normalmente, las tramas incluyen un preámbulo para ayudar a sincronizar las transmisiones entrantes. Sin embargo los requerimientos del preámbulo pueden depender del método de modulación por lo que PLCP añade su propio encabezado a cualquier trama transmitida. PMD es la responsable de transmitir cualquier bit que recibe de PLCP en el aire por medio de la antena.

La capa física también incorpora una función de valoración de canal limpio (CCA, Clear Channel Assessment) para indicar a la MAC cuando se detecta una señal.

2.2. El enlace de radio.

En la revisión inicial de 802.11 se estandarizaron tres capas físicas, revisión publicada de 1997:

- Capa física de radio de espectro disperso de salto de frecuencia (FH Frequency Hopping).
- Capa física de radio de espectro disperso de secuencia directa (DS, Direct Sequence).
- Capa física de luz infrarroja (IR, Infrared Light).

Posteriormente, en el año de 1999 se desarrollaron tres capas físicas basadas en la tecnología de radio:

- **802.11a:** Capa física de multiplexado por división de frecuencia ortogonal (OFDM, Orthogonal Frequency División Multiplexig).
- **802.11b:** Capa física de secuencia directa de alto rendimiento (HR-DS o HR-DSSS, High Rate Direct Sequence).
- **802.11g:** Capa física de velocidad extendida (ERT, Extended Rate PHY).
- **El futuro 802.11n:** Coloquialmente se le denomina MIMO PHY o PHY de alto rendimiento.

2.3. Licencias y normativa.

La solución clásica para las comunicaciones de radio es confinar una señal que transporta información a una frecuencia de banda estrecha e introducir tanta potencia como sea posible o se permita legalmente en la señal.

El ruido es la distorsión presente de forma natural en la banda de frecuencia. Transmitir una señal de información frente a un ruido se basa en la fuerza bruta; simplemente se debe asegurar que la potencia de la señal transmitida sea mayor que el ruido.

Con la salida de alta potencia en bandas estrechas, una organización tiene que imponer reglas sobre cómo se utiliza el espectro RF por ejemplo.

- **Estados Unidos:** Comisión Federal de Comunicaciones (FCC).
- **Europa:** Oficina Europea de Radiocomunicaciones (ERO) y el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicación (ETSI).
- **Japón:** Ministerio de Comunicaciones Internas (MIC).
- **Mundial:** Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU).
- **México:** Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL).

Básicamente, una institución tiene que conceder licencias para transmitir a una determinada frecuencia. Las licencias pueden restringir las frecuencias y la potencia de transmisión utilizada así como el área sobre las que se pueden transmitir las señales de radio. La interferencia entre áreas de manera intencionada es equivalente a entrar por la fuerza y ser sujeta a sanciones penales o civiles.

2.3.1. Asignación de frecuencias y bandas de frecuencia sin licencia.

El espectro de radio se asigna en bandas dedicadas a un propósito determinado. Una banda define las frecuencias que pueden utilizar una determinada aplicación. Normalmente incluye bandas de protección, que son partes sin utilizar en la asignación global que evitan que una filtración extraña en una transmisión con licencia afecte a otra banda asignada.

Se han reservado diversas bandas para su uso sin autorización. Por ejemplo los hornos microondas funcionan a 2.45 GHz. Para permitir a los mercados de consumidor desarrollar dispositivos integrados para uso doméstico la FCC ha asignado determinadas bandas de frecuencia para el uso de equipamiento “Industrial, Científico y Médico” mejor conocidas como bandas ISM la cual trabaja a 2.4 GHz y se encuentra disponible para todo el mundo en su uso sin licencia. La banda ISM de 2.4 GHz esta reservada por las reglas ISM.

Para construir, fabricar y diseñar equipamiento 802.11 se requiere una licencia; cada tarjeta 802.11 vendida legalmente en EU dispone de un número de identificación FCC.

Estos son algunos de los nuevos sistemas de comunicación para la banda ISM de 2.4 GHz:

- Las variantes de 802.11 que operan en dicha banda son (la capa de salto de frecuencia, las dos capas de secuencia directa y la capa OFDM).
- Bluetooth, es un protocolo de comunicaciones inalámbricas de rango corto, el cual fue desarrollado por un consorcio industrial dirigido por Ericsson.
- Teléfonos inalámbricos de espectro disperso introducidos por diversos fabricantes de teléfonos móviles.
- X10, es un protocolo empleado en equipamiento de automatización doméstica para la transmisión de video.

No existe ninguna normativa que especifique una codificación o modulación, por lo que no es difícil para los suministradores utilizar el espectro de forma incompatible.

2.3.2. Otras bandas sin licencia.

En el rango de 5 GHz. se encuentra disponible un espectro adicional. Existe un amplio espectro disponible en diversos países del mundo.

- 4.92 - 4.98 GHz. (Japón).
- 5.04 - 5.08 GHz. (Japón).
- 5.15 - 5.25 GHz. (EU, Japón).
- 5.25 - 5.35GHz. (EU).
- 5.47 - 5.725 GHz. (EU, Europa).
- 5.725 - 5.825 GHz. (EU).

Los dispositivos que operan dentro del rango de los 5 GHz, tienen que acatar las limitaciones sobre el ancho del canal y la potencia radiada pero no existe ninguna otra limitación.

2.4. Espectro disperso.

La tecnología de espectro disperso (Spread Spectrum) es la base usada en las bandas ISM. Las comunicaciones de radio tradicionales se centran en llenar tanta señal como sea posible en una banda lo más estrecha posible. El espectro disperso, dispersa la potencia de la señal sobre una amplia variedad de frecuencias. Cuando el receptor ejecuta la operación inversa, la señal esparcida se borra y como señal de banda estrecha es aún más importante, también se borra el ruido, por lo que la señal destaca con claridad.

La aplicación de tecnologías de espectro disperso es un requerimiento para los dispositivos sin licencia, y a veces impuesto por una autoridad legislativa; en otros casos, es la única forma práctica de satisfacer los requerimientos normativos. Por ejemplo, el FCC requiere que los dispositivos en la banda ISM utilicen una transmisión de espectro disperso e impongan rangos aceptables sobre distintos parámetros.

Dispersar la transmisión sobre una banda ancha puede parecer ruidoso para un receptor tradicional de banda estrecha.

Algunos suministradores de dispositivos de espectro disperso afirman que la dispersión añade seguridad porque no se pueden utilizar receptores de banda estrecha para recoger la señal completa. No obstante, se puede utilizar cualquier receptor de espectro disperso estandarizado, por lo que las medidas de seguridad adicional son obligatorias.

Esto no significa que el espectro disperso sea la solución para eliminar todos los problemas de interferencia. Los dispositivos de espectro disperso pueden interferir con otros dispositivos de comunicación y entre sí, y los dispositivos RF de espectro estrecho pueden interferir con los de espectro disperso. A medida que más dispositivos de RF de espectro disperso ocupen el área que cubre la red inalámbrica, el nivel del ruido incrementará, y la velocidad de señal a ruido disminuirá reduciéndose el rango sobre el que se puede realizar una conexión fiable.

Para minimizar la interferencia entre los dispositivos sin licencia, la FCC impone limitaciones en la potencia de las transmisiones de espectro disperso. Los límites legales son 1 volt de potencia de salida del transmisor y 4 volts con un sistema de antena que se tenga una ganancia de 6 dB o 500 mili volts con una antena de ganancia de 1 dB, etc.

Los transmisores y las antenas en las tarjetas de los PC se encuentran dentro de estos límites, pero es posible cubrir grandes áreas utilizando un amplificador externo y una antena de ganancia superior.

2.4.1. Tipos de espectro disperso.

Las capas físicas basadas en radio en 802.11 utilizan tres técnicas diferentes de espectro disperso.

■ **Salto de Frecuencia (FH o FHSS):** Los sistemas de salto de frecuencia saltan de una frecuencia a otra de una forma aleatoria transmitiendo una corta ráfaga a cada subcanal.

■ **Secuencia Directa (DS o DSSS):** Los sistemas de secuencia directa propagan la potencia sobre una banda de frecuencias más ancha utilizando funciones de codificación matemática.

■ **Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM):** Esta técnica divide un canal disponible en diversos subcanales y codifica una parte de la señal por cada subcanal en paralelo. Esta técnica es similar a la técnica de multi-tonos discontinuos (DMT, Multi Tone Discrete) utilizada por algunos módem.

Los sistemas de salto de frecuencia son los más baratos. Es necesario el cronometraje del tiempo preciso para controlar los saltos de frecuencia pero no se requiere un procedimiento de señales sofisticado para extraer el flujo de bits de la señal de radio.

2.5. Propagación de Radiofrecuencia con 802.11.

En las redes fijas, las señales se consignan a las rutas, por lo que los diseñadores de la red no tienen que saber nada sobre la parte física de la propagación de señales eléctricas. En su lugar, existen algunas reglas que se usan para calcular la longitud máxima del cable y, siempre que se asignan dichas reglas, es improbable que surjan problemas. La propagación de RF no es nada sencilla.

2.5.1. Recepción y rendimiento de la señal.

El espacio está lleno de ondas electromagnéticas aleatorias, que se pueden escuchar fácilmente encendiendo un radio en una frecuencia sin utilizar. La comunicación de radio depende de hacer que la señal sea legible sobre el ruido de fondo.

A medida que se degradan las condiciones, la señal se acerca más al fondo del ruido. El rendimiento se determina principalmente por el factor más importante, siendo la tasa de señal relación a ruido (SNR, Signal Noise Ratio). En la figura 2.2 se ilustra la SNR a través de la altura de un pico de la señal sobre el fondo del ruido.

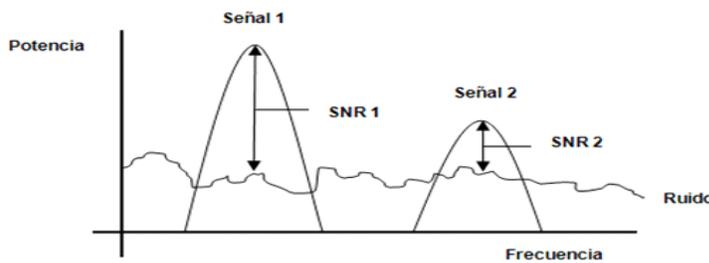


Figura 2.2: Tasa de señal a ruido y el fondo del ruido.

Es importante tener una señal fuerte, pero estas señales pueden ser difíciles de recibirse en entornos ruidosos. En algunas situaciones, puede elevarse la potencia para compensar el fondo del ruido alto. Las redes sin licencia sólo tienen una capacidad limitada para aumentar la potencia debido a las restricciones normativas. Como resultado, se llevan a cabo más esfuerzos para introducir el menor ruido adicional posible antes de intentar decodificar la señal de radio.

2.5.2. El límite de Shannon.

No existe una teoría para calcular exactamente la cantidad de datos que puede transportar un canal de radio. La capacidad del canal de comunicaciones la proporciona el teorema de Shannon-Hartley.

El teorema expresa el límite matemático de la capacidad de un canal de comunicaciones que, normalmente, se denomina límite de Shannon o capacidad de Shannon. El límite de Shannon expresa los bits de capacidad (C) por un segundo como una función del ancho de banda W en Hertz de la tasa absoluta de potencia de la señal al ruido.

Si la ganancia se mide de decibeles, se resuelve simplemente con la primera ecuación que define un decibel para la tasa de potencia en la segunda ecuación.

$$C \leq W \log_2 (1 + S/N) \quad [12] \quad (\text{SNR en decibeles}) \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

$$C \leq W \log_2 (1 + 10^{(.1 * \text{SNR}))}) \quad [12] \quad (\text{S/N en tasa de potencia}) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

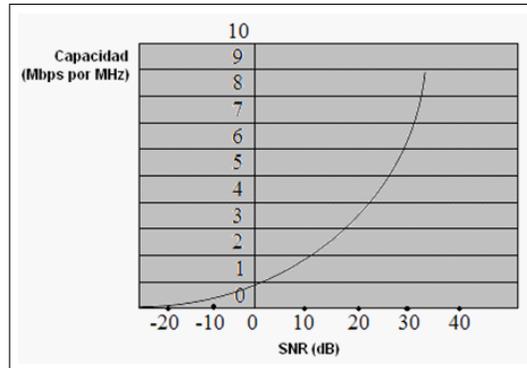


Figura 2.3: Límite de Shannon como función de SNR.

En la figura 2.3 se muestra el límite Shannon como una función de la tasa de señal a ruido. El teorema de Shannon refleja una realidad teórica de una velocidad de bits ilimitada. Para obtener una velocidad de bits ilimitada, el diseñador del código puede requerir un número grande de niveles de señal para distinguir entre los bits. Uno de los objetivos principales de los diseñadores de PHY 802.11 es diseñar velocidades de codificación tan cercanas al límite de Shannon como sea posible.

Alternativamente se puede utilizar el teorema de Shannon para determinar la tasa de señal a ruido teóricamente mínima para conseguir una velocidad de datos determinada. Las siguientes ecuaciones determinan la tasa de señal a ruido.

$$S/N = 2^{(C / W)} - 1 \quad [12] \quad (\text{S/N como porcentaje de potencia}) \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

$$\text{SNR} = 10 * \text{Log}_{10} (2^{(C / W)} - 1) \quad [12] \quad (\text{SNR como dB}) \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Tomando 802.11a como ejemplo. Un sólo canal de 20 MHz puede transportar una señal a una velocidad de datos de hasta 54 Mbps. El resultado de resolver la tasa de señal a ruido requerida es de 7.4 dB, siendo un resultado mucho más bajo que el requerido por la mayoría de los productos del mercado, lo que refleja la necesidad en los productos para trabajar en el mundo real con un rendimiento mucho menor al deseado.

2.5.3. Pérdida de ruta, rango y rendimiento.

En 802.11, la velocidad de red depende del rango. Los diversos estándares 802.11 definen diversos tipos de modulación que varían en velocidad de 1Mbps a 54 Mbps. Los circuitos del receptor tienen que distinguir entre los distintos estados para extraer bits de las ondas de radio. Las modulaciones de velocidad superior empaquetan más bits en un determinado período de tiempo y requieren una señal más clara y por lo tanto una tasa de señal de radio superior para que se pueda decodificar con éxito.

A medida que viajan las señales por el espacio, estas se degradan. En general, el fondo de ruido será relativamente constante sobre el rango limitado de una red 802.11. Con la distancia, la degradación de la señal limitará la tasa de señal a ruido en el receptor.

A medida que la estación se desvíe a un punto de acceso, el nivel de la señal desciende; con un fondo de ruido constante, la señal degradada resultará en una tasa de señal a ruido degradada como se muestra en la figura siguiente.

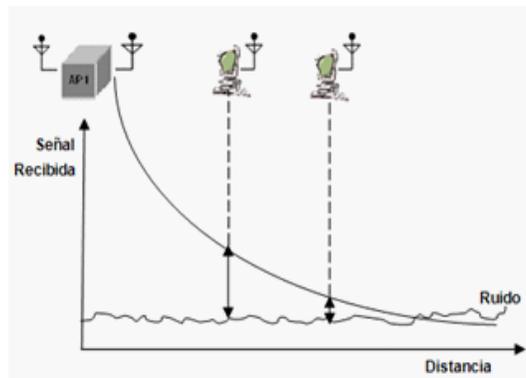


Figura 2.4: Rendimiento frente a distancia.

A medida que aumenta el rango desde el punto de acceso, la señal recibida se acerca más al fondo del ruido. Las estaciones que se encuentran más cerca tienen tasas de señal a ruido superiores. Cuando la tasa de señal a ruido es demasiado pequeña para soportar una velocidad de datos alta, la estación reducirá la velocidad de los datos como requerimientos de tasa de señal a ruido menos exigentes.

Cuando no existen obstáculos, que obstruyan la onda de radio, se puede calcular la degradación de la señal con la ecuación 2.5. El deterioro de espacio libre a veces se denomina pérdida de ruta; siendo la degradación mínima esperada en una dirección, dada una determinada longitud. La pérdida de ruta depende de la distancia y la frecuencia de la onda de radio. Distancias y frecuencias superiores conducen a una degradación del camino superior. Una de las razones por la que 802.11a tiene un rango más corto que 802.11b y 802.11g es que la pérdida de ruta es superior a los 5 GHz utilizados por 802.11a.

La ecuación de la pérdida de ruta de espacio libre es:

$$\text{Pérdida de ruta (dB)} = 32.5 + 20 \text{ Log } F + \text{Log } d \text{ [12]} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Siendo F la frecuencia expresada en GHz. y d la distancia en metros.

Sin embargo, la degradación de ruta no es el único determinante del rango. Los obstáculos como las paredes y ventanas reducirán la señal y se pueden usar antenas y amplificadores para ampliarla, compensando así el deterioro de la transmisión.

Los cálculos de rango normalmente incluyen un factor de fallo denominado margen de enlace para tener en cuenta las pérdidas imprevistas:

$$\text{Pérdida total} = \text{potencia TW} + \text{ganancia de antena Tx} - \text{pérdida de ruta} - \text{pérdida de obstáculo} - \text{margen de enlace} + \text{ganancia de antena Rx} \text{ [12]} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

2.5.4. Interferencia de múltiples trayectorias.

Además de las ausencias de línea de vista, existen otros fenómenos que pueden inhibir la recepción de la señal con 802.11. Unos de los problemas principales que dañan a las redes de radio es el desvanecimiento de múltiples rutas. Las ondas se añaden por superposición. Cuando convergen en un punto múltiples ondas, la onda total es simplemente la suma de las ondas como se muestra en la figura 2.5.

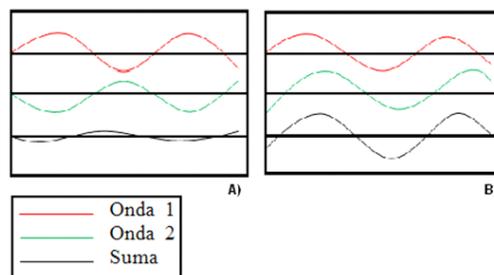


Figura 2.5: Combinación de ondas por superposición.

La mayor parte del equipamiento 802.11 utiliza antenas unidireccionales por lo que la energía RF se irradia en todas direcciones. Las ondas propagadas hacia fuera desde la antena que está transmitiendo en todas las direcciones se reflejan mediante las superficies en el área.

La figura 2.6 muestra un ejemplo muy simple de dos estaciones en un área rectangular sin obstrucciones, mostrando las trayectorias desde el transmisor hasta el receptor.

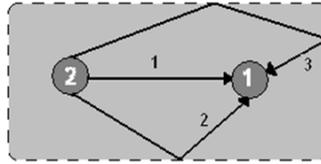


Figura 2.6: Múltiples rutas.

La onda en el receptor es la suma de componentes diferentes. Es posible que las trayectorias de la figura anterior se combinen para proporcionar una onda neta de 0, en cuyo caso el receptor no entenderá la transmisión porque no ha recibido ninguna.

Como la interferencia es una copia retardada de la misma transmisión sobre una trayectoria diferente, el fenómeno se denomina desvanecimiento o interferencia de múltiples trayectorias. Muchas veces, la interferencia de múltiples trayectorias se puede resolver combinando la orientación o posición del receptor.

2.5.5. Interferencia entre símbolos.

El desvanecimiento de múltiples rutas es un caso especial de interferencia intersimbólica (ISI, Inter-Symbol Interference). Las ondas que toman diferentes rutas desde el transmisor hasta el receptor van a viajar a diferentes distancias y se retrasan la una con respecto a la otra, como se ilustra en la figura 2.7.

Una vez más las dos ondas se combinan por superposición, pero el efecto es que se distorsiona la forma de onda. En situaciones del mundo real se pueden añadir frentes de onda de múltiples trayectorias.

El tiempo entre la llegada del primer frente de ondas y el último eco del frente de ondas se le llama dispersión de retardado. Las dispersiones retardadas más largas requieren mecanismos de codificación más complicados. Las redes 802.11b pueden controlar las dispersiones retardadas de hasta 500 ns pero el rendimiento es mucho mejor cuando la dispersión retardada es inferior.

Cuando la dispersión retardada es larga muchas de las tarjetas reducirán la velocidad de transmisión y algunos suministradores afirman que se requiere una dispersión retardada de 65 ns para un rendimiento a plena velocidad de 11 Mbps a una velocidad de error de trama razonable. Se pueden utilizar herramientas de análisis para medir la dispersión retardada.

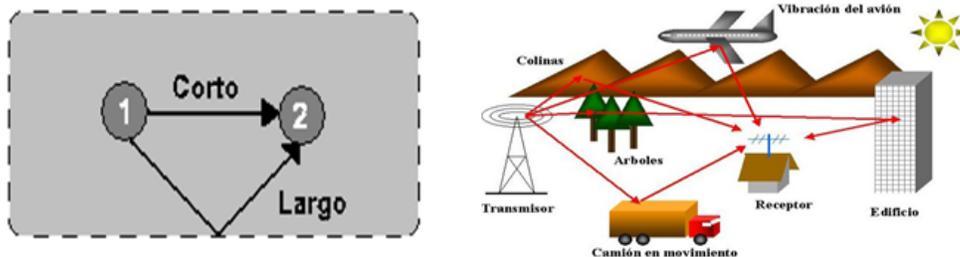


Figura 2.7: Interferencia entre símbolos.

2.6. Ingeniería de RF para 802.11.

802.11 ha llegado a velocidades superiores. Algunos ingenieros de red se han acostumbrado a las señales que fluyen a lo largo de rutas de cable bien definidas y ahora se enfrentan a las LAN que se ejecutan sobre un enlace de radio ruidoso, propenso al error. En los sistemas de red de datos el éxito de 802.11 está vinculado a la ingeniería RF la cual es complicada ya que se divide en dos partes: la primera es cómo crear ondas de radio y la segunda cómo mover las ondas de radio.

2.6.1. Componentes RF.

Los sistemas RF complementan las redes con cable ampliándolas. Se pueden utilizar elementos diferentes dependiendo de la frecuencia y la distancia a la que tienen que llegar las señales pero básicamente todos los sistemas son iguales y están formados por una cantidad relativamente pequeña de distintas piezas.

Los componentes RF como son las antenas y amplificadores tienen un interés particular para los usuarios de 802.11:

- **Las antenas:** son de interés general, siendo la opción más tangible de un sistema RF.
- **Los amplificadores:** son los que complementan a las antenas permitiendo que éstas emitan más potencia algo que puede ser interesante del tipo de red 802.11 que se este creando.

2.6.2. Antenas.

Las antenas son los elementos más importantes de cualquier sistema RF ya que convierten las señales eléctricas en ondas de radio y viceversa.

En los diagramas de bloque, las antenas normalmente se representan con una forma triangular, como se muestra en la figura 2.8.



Figura 2.8: Representación de la antena en los diagramas.

Para que todo funcione, una antena tiene que estar fabricada de material conductor. Las ondas de radio que golpean la antena producen que los electrones fluyan en el conductor creando una corriente. Así mismo, al aplicar corriente a una antena se crea un campo eléctrico alrededor de la misma. A medida que la corriente de la antena cambia, también cambia el campo eléctrico. Un campo eléctrico que cambia produce un campo magnético y la onda se anula.

El tamaño de la antena que se necesite dependerá de la frecuencia: a mayor frecuencia, menor antena. La antena más simple tiene una longitud de media onda, con una interfaz de red 802.11b que opera en la banda de los 2.4 GHz y tiene una longitud de onda de 12.5 cm.

Las antenas también se pueden diseñar con preferencia direccional las cuales reciben una porción más estrecha del campo. Y el otro tipo de antenas son omnidireccionales, lo que significa que puede enviar y recibir señales desde cualquier dirección. La siguiente figura 2.9 se muestra la comparación de estas dos.

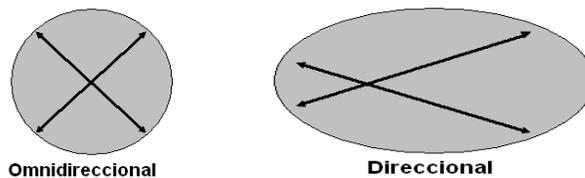


Figura 2.9: Potencia radiada de antenas omnidireccionales y direccionales.

La antena direccional con una determinada cantidad de potencia de entrada puede llegar más lejos y con una señal más clara utilizando enlaces inalámbricos o en telefonía móvil cuando se subdividen en celdas ya que tienen mayor sensibilidad a las señales de radio en dirección dominante. Normalmente las redes 802.11 utilizan antenas omnidireccionales para ambos extremos de la conexión.

Con respecto a las antenas convencionales en los dispositivos 802.11 en la banda de lo 2.4 GHz la típica tarjeta de PC inalámbrica tiene una antena integrada.

2.6.3. Amplificadores.

Los amplificadores amplían las señales. Esta amplificación de la señal o ganancia, se mide en decibeles (dB). Los amplificadores pueden clasificarse en tres categorías: ruido bajo, potencia alta y cualquier otra categoría.

Los amplificadores de ruido bajo (LNA, Low Noise Amplifiers), se conectan a una antena para aumentar la señal recibida a un nivel que sea reconocible por los elementos electrónicos del sistema RF al que se conecta.

Esto también se clasifica por el factor de ruido que es la medida de la cantidad de información extraña que introduce el amplificador permitiendo escuchar las señales más pequeñas y por lo tanto permiten un rango superior.

Los amplificadores de alta potencia (HPA, High Power Amplifier) se utilizan para aumentar una señal a la potencia máxima posible antes de la transmisión.

Capítulo 3

Análisis del Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM).

3.1. La capa física de OFDM a 5 GHz.

Las bandas ISM de 2.4 GHz están abarrotadas y normalmente comprimidas de tráfico que no es de 802.11. En un intento por desarrollar velocidades de datos superiores, el grupo de trabajo 802.11 estandarizó una capa física utilizando un espectro no autorizado alrededor de los 5 GHz. Se encontraban disponibles grandes superficies de espectro para su uso sin autorización y mucho menos ningún dispositivo utilizaba el espectro.

802.11a se estandarizó de 1999 pero los productos tardaron bastante tiempo en introducirse en el mercado. Finalmente, el hardware 802.11a irrumpió en el mercado a finales del 2001. Actualmente, los chips más conocidos de 802.11a son los de Atheros Communications. En su funcionamiento, estos conjuntos se parecen a cualquier otra tarjeta LAN inalámbrica. La mayoría son tarjetas CarBus, aunque ahora se utilizan con más frecuencia algunos factores de forma adicionales. Hay una variedad de velocidades de los datos en 802.11, pero normalmente, 802.11a tiene una velocidad de datos comparable con 802.11b al igual que su distancia.

Al principio 802.11a se diseñó para las bandas de infraestructura de información nacional sin autorización (U-NII, Unlicensed National Information Infrastructure) en los Estados Unidos. Con el éxito de 802.11a en el mercado americano, otros legisladores desarrollaron normas para admitir 802.11a. El grupo de trabajo 802.11 admitió estos esfuerzos a través de 802.11h para Europa y de 802.11j para Japón.

3.1.1. Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal.

802.11a se basa en un sistema de multiplexado por división de frecuencia ortogonal (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing). OFDM no es una nueva técnica; gran parte del trabajo fundamental se llevó a cabo a finales de 1960 y la patente de los EE.UU. número 3.488.445 se emitió en Enero de 1970.

Una tarea recientemente sobre DSL (HDSL, VDSL y ADSL) y de aplicaciones de datos inalámbricos ha iniciado otra vez el interés en OFDM, especialmente ahora que las técnicas de procesamiento de las señales son más prácticas y mejores. Sin embargo, OFDM difiere de las técnicas de codificación emergentes, como el Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, Code Division Multiple Access). En su solución, CDMA utiliza transformaciones matemáticas complejas en una sola portadora; OFDM codifica una sola transmisión en múltiples subportadoras. Las matemáticas subyacentes en la división de código en CDMA son mucho más complicadas que las de OFDM.

Los dispositivos OFDM utilizan un canal de frecuencia ancha dividiéndolo en diversos subcanales. Cada subcanal se utiliza para transmitir datos. Todos los subcanales “lentos” se multiplexan en un canal “rápido” combinado.

3.1.2. Generación de las subportadoras.

La señal OFDM consiste en una serie de símbolos OFDM, resultado de la suma de las subportadoras, las cuales son moduladas utilizando la técnica de modulación PSK (por desplazamiento de fase) ó QAM (modulación de amplitud en cuadratura). Matemáticamente un símbolo OFDM puede ser escrito como sigue.

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(t) &= \mathbf{Re}\left\{\sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+\frac{N_s}{2}} \exp(j2\pi(fc - \frac{i+\frac{5}{2}}{T})(t - ts))\right\}, .ts < t < ts + T \\ \mathbf{s}(t) &= \mathbf{0}, \quad \mathbf{t} < \mathbf{ts} \quad \mathbf{t} > \mathbf{ts} + \mathbf{T} \quad [15] \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde se considera d_i como los símbolos complejos (QAM o PSK), N_s es el número de subportadoras, T como la duración del símbolo, fc la frecuencia de portadora y ts es el tiempo de inicio de un símbolo OFDM.

Comúnmente la notación en banda base compleja equivalente es la transformada inversa de Fourier IFT de los N_s símbolos utilizados, como muestra en la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(t) &= \mathbf{Re}\left\{\sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+\frac{N_s}{2}} \exp(j2\pi\frac{i}{T}(t - ts))\right\}, .ts < t < ts + T \\ \mathbf{s}(t) &= \mathbf{0}, \quad \mathbf{t} < \mathbf{ts} \quad \mathbf{t} > \mathbf{ts} + \mathbf{T} [15] \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Su equivalente en tiempo discreto está dado por la transformada discreta inversa de Fourier IDFT.

$$s(n) = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp(j2\pi \frac{in}{N}). \quad [15] \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde t se reemplaza por n número de muestras. La transformada inversa rápida de Fourier IFFT, (Inverse Fast Fourier Transform) es una técnica para el cálculo eficiente de la transformada discreta inversa de Fourier IDFT. De ahí que la IDFT puede implementarse por medio de la IFFT, reduciendo en gran medida la cantidad de cálculos.

En esta representación, las partes real e imaginaria corresponden a las componentes de fase y cuadratura de la señal OFDM, las cuales tienen que ser multiplicadas por un coseno y seno de la frecuencia portadora deseada para producir la señal OFDM final. En la figura 3.1 se muestra el diagrama a bloques de la operación de un modulador OFDM.

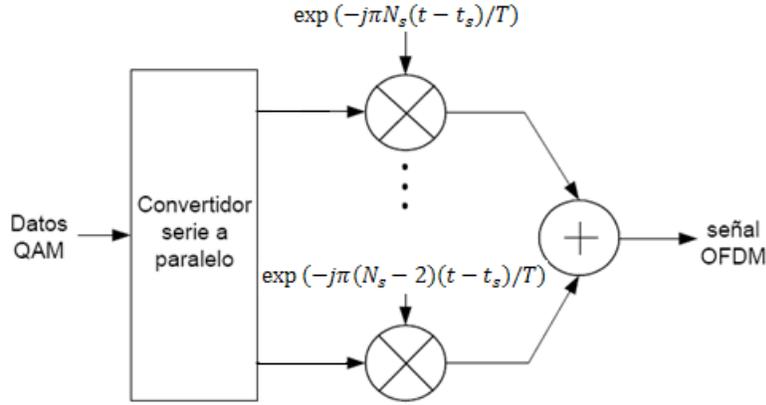


Figura 3.1: Modulador de OFDM.

3.1.3. Multiplexado de portadora.

Cuando los administradores de la red solicitan una entrada de usuario a la red, una de las demandas más comunes es la velocidad de la parte superior. La gran cantidad de transmisiones de datos incrementados han conducido a las tecnologías anfitrionas a aumentar su velocidad. OFDM adopta una solución cualitativamente similar a la de múltiples enlaces, cuando el enlace no es suficiente, se utilizan varios enlaces en paralelo.

OFDM está estrechamente relacionado con el Multiplexado por División de Frecuencia (FDM, Frequency Division Multiplexing). Ambos dividen el ancho de banda disponible en sectores denominados portadoras o subportadoras y hacen que dichas portadoras estén disponibles como canales distintos para la transmisión de datos. OFDM incrementa el rendimiento utilizando diversas subportadoras en paralelo y realizando un multiplexado de datos sobre el conjunto de las subportadoras.

En FDM cada usuario se le proporciona un canal exclusivo y se usan bandas de protección para asegurarse de que la pérdida espectral de un usuario no causará problemas a los usuarios de los canales adyacentes como se muestra a continuación.

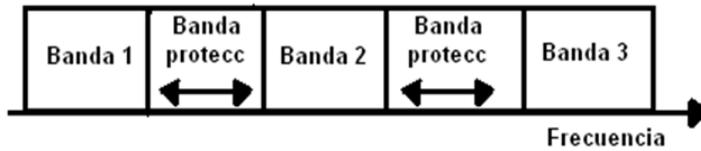


Figura 3.2: FDM tradicional.

El problema de FDM tradicional es que las bandas de protección desperdiciarían ancho de banda y, por lo tanto, reducen la capacidad. Para evitar este desperdicio de capacidad de transmisión, OFDM selecciona canales superpuestos pero que no interfieran entre sí [22]. La figura 3.3 muestra la comparación de FDM con la de OFDM.

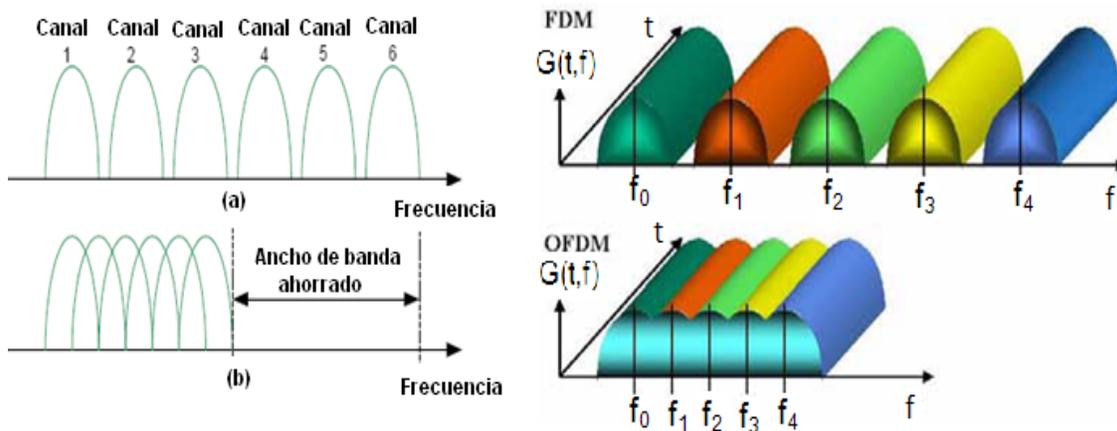


Figura 3.3: FDM frente a OFDM.

En OFDM se permite a las portadoras superpuestas porque las subportadoras se definen de forma que se pueden distinguir fácilmente. La capacidad para separar las subportadoras crea una relación matemática compleja denominada ortogonalidad.

3.1.4. Explicación de ortogonalidad.

El principio de la ortogonalidad define que la separación entre las portadoras sea exactamente igual al recíproco del período del símbolo útil (T_u), es decir, que la separación en frecuencia sea $f_u = 1/T_u$, logrando que las portadoras no se interfieran entre sí como se ilustra en la figura 3.4.

Las portadoras forman lo que los matemáticos llaman un conjunto ortogonal, debido que la portadora k esima (en banda base) puede escribirse como:

$$\Psi_k(t) = e^{jk\omega_n t} \quad [12] \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

$$\omega_n = 2\pi/T_u s \quad [12] \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Con la ortogonalidad se consigue:

- Traslapar varias portadoras en el mismo espacio que ocupan dos portadoras que emplean FDM.
- Se reduce el ancho de banda en comparación con FDM.

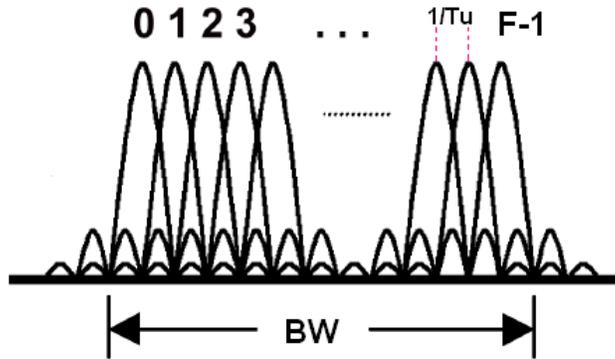


Figura 3.4: Ortogonalidad en el dominio de la frecuencia.

OFDM recoge la señal codificada para cada subcanal y utiliza la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) para crear una forma de onda compuesta a partir de cada subcanal. Los receptores de OFDM pueden aplicar entonces FFT a una forma de onda recibida para extraer la amplitud de cada subportadora.

3.1.5. Tiempo de guarda.

El tiempo de protección en la capa física para los receptores es la interferencia entre símbolos (ISI, Inter-Symbol Interference), como se ilustra en la figura 3.5. El ISI se produce cuando el retardo de propagación entre distintas trayectorias es larga y produce una copia retardada de bits transmitidos a un desfase en una copia entregada previamente. Con OFDM, la interferencia entre símbolos no supone el mismo tipo de onda recibida en las subportadoras, por lo que los desfases de tiempo no producen problemas serios.

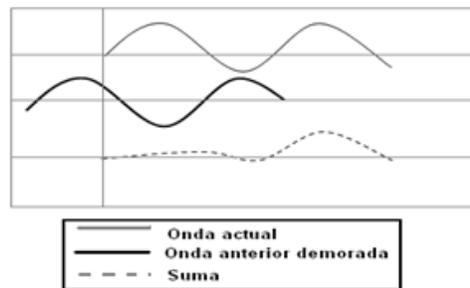


Figura 3.5: ISI revisado.

Los sistemas OFDM ocupan múltiples subportadoras de distintas frecuencias. Las subportadoras se empaquetan cuidadosamente en un canal operativo y los pequeños desfases en las frecuencias de las subportadoras pueden producir interferencias entre portadoras, fenómeno denominado Interferencia entre portadoras (ICI, Inter-Carrier Interference). Se pueden producir desfases de frecuencia debido a que existe una ligera diferencia entre las frecuencias del reloj del transmisor y receptor.

Para evitar tanto a ISI como ICI, los receptores OFDM reservan la parte inicial del tiempo del símbolo como tiempo de protección y ejecutan la transformada de Fourier sólo en la parte del tiempo de protección del tiempo del símbolo. La parte del tiempo sin protección del símbolo normalmente se denomina tiempo de integración FFT ya que la transformada de Fourier se ejecuta solo esa parte del símbolo.

Los retardos menores que el tiempo de protección no producen ICI ya que no permiten a los componentes de la frecuencia filtrarse en sucesivos tiempos de símbolo. Seleccionar el tiempo de protección es una de las tareas principales para los diseñadores de OFDM.

Evidentemente, el tiempo de protección reduce el rendimiento general del sistema ya que reduce el tiempo durante el cual se permite la transmisión de datos.

Un tiempo de protección que sea demasiado corto puede que no evite las interferencias pero reduce el rendimiento y un tiempo de protección demasiado largo reduce el rendimiento innecesariamente como se observa en la figura 3.6.

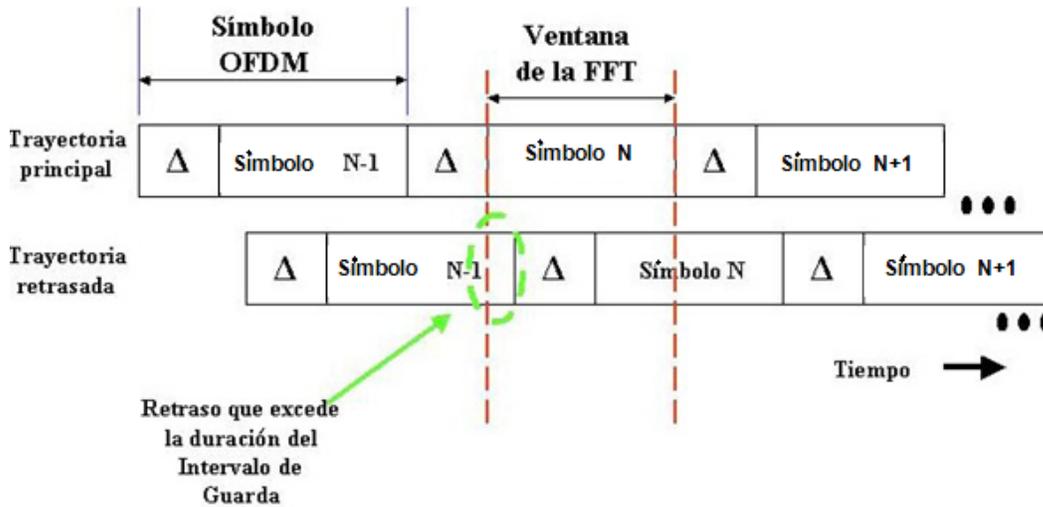


Figura 3.6: Desplazamiento en tiempo de cada símbolo OFDM.

3.1.6. Extensiones cíclicas (Prefijos cíclicos).

El intervalo de guarda " Δ " es una banda temporal añadida al símbolo útil de OFDM que es una extensión cíclica de la IFFT en el Transmisor, es decir, es la copia de las últimas muestras de salida de la IFFT y colocadas al principio [12].

La figura 3.7 muestra la adición de un intervalo de guarda. El período del símbolo OFDM está extendido para que exceda el período de integración de la FFT del receptor. Puesto que todas las portadoras son cíclicas dentro de T_u , así también es el conjunto de la señal modulada. De esta manera el segmento agregado al principio del símbolo OFDM para formar el intervalo de guarda es idéntico al segmento de la misma longitud al final del símbolo OFDM.

Con tal de que el retraso de cualquiera trayectoria con respecto a la trayectoria principal sea menor al intervalo de guarda, todas las componentes dentro del período de integración de la FFT vienen desde el mismo símbolo OFDM y el criterio de ortogonalidad esta satisfecho.

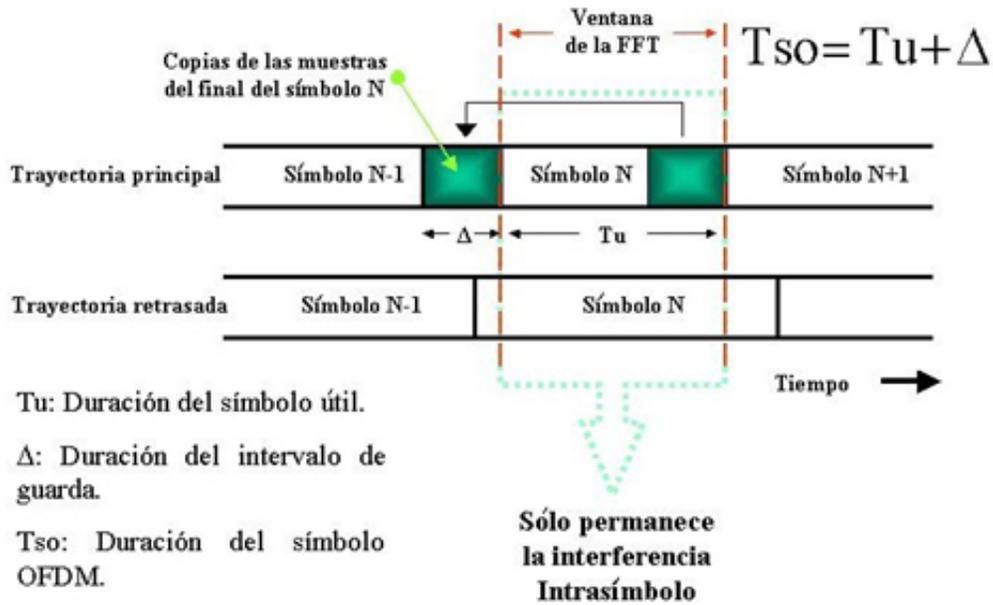


Figura 3.7: Adición del intervalo de guarda.

El propósito del intervalo de guarda es evitar la interferencia entre símbolos (ISI) y la interferencia entre portadoras (ICI) que trae como consecuencia la pérdida de la ortogonalidad, que es provocada por el efecto multitrayectoria, lográndose así mejorar la sincronización en el receptor. Pero todavía queda la interferencia entre símbolo que es eliminada totalmente o parcialmente por el receptor usando ecualización del canal o por modulación diferencial. La ICI y ISI solo ocurrirá cuando el retraso relativo exceda el intervalo de guarda.

El intervalo de guarda trae como consecuencia la pérdida de la eficiencia espectral y un mayor requerimiento de potencia en el transmisor. La pérdida de eficiencia espectral es causada al transmitir muestras duplicadas que no aportan nueva información. El número de muestras que contiene el Intervalo de Guarda para algunos casos están en la tabla 3.1, donde el ancho del Intervalo de Guarda esta expresado por esta ecuación.

$$(\Delta) = A \times T_u. \text{ y } A = \frac{1}{2^n} \text{ para } n = 2, 3, 4, 5 \text{ y } 6 \text{ [12]} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Un intervalo de guarda nulo, es decir, sin muestras del símbolo no proporciona protección contra la ICI pero si proporciona protección contra la ISI.

Número de puntos de la FFT	Ancho del intervalo de guarda				
	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64
64	16	8	4	2	1
128	32	16	8	4	2
256	64	32	16	8	4
512	128	64	32	16	8
1024	256	128	64	32	16
2048	512	256	128	64	32
4096	1024	512	256	128	64
8192	2048	1024	512	256 </tr	

Cuadro 3.1: Número de muestras que contiene el intervalo de guarda

3.1.7. Símbolo OFDM.

Es generado por la IFFT al transformar N símbolos en el dominio de la Frecuencia al dominio del Tiempo más una extensión cíclica, dentro de un intervalo de tiempo $T_u + \Delta$, donde Δ es la extensión cíclica, obteniéndose N portadoras. Además es el elemento básico donde se distribuye la información codificada y entrelazada como se muestra en la figura 3.8. El patrón de distribución de las portadoras dentro de un símbolo OFDM por lo general va cambiando de símbolo a símbolo OFDM.

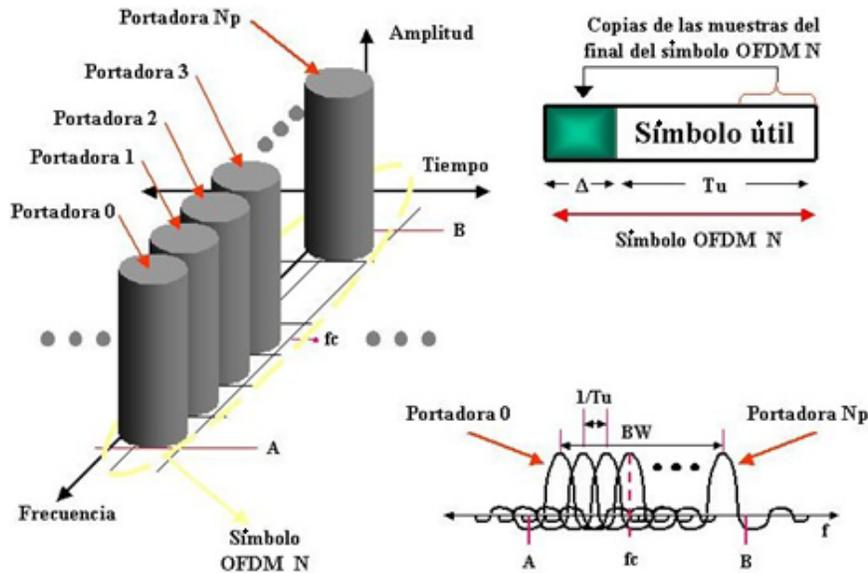


Figura 3.8: Símbolo OFDM.

3.1.8. Trama y supertrama OFDM.

Una trama OFDM está formada N símbolos OFDM como se muestra en la figura 3.9, y es utilizada para distribuir la información codificada y entrelazada del modulador debido a que el formato de la información de entrada al modulador son tramas de una cantidad determinada de Bytes que son constantes ya que no se puede distribuir en un sólo símbolo OFDM.

La cantidad de símbolos OFDM que contiene una trama OFDM esta en directa relación con un número entero de tramas que están a la entrada del modulador y además de los bits agregados por la redundancia de la codificación. El primer símbolo OFDM que contiene una trama OFDM tiene una distribución de portadoras especial para efecto de sincronización.

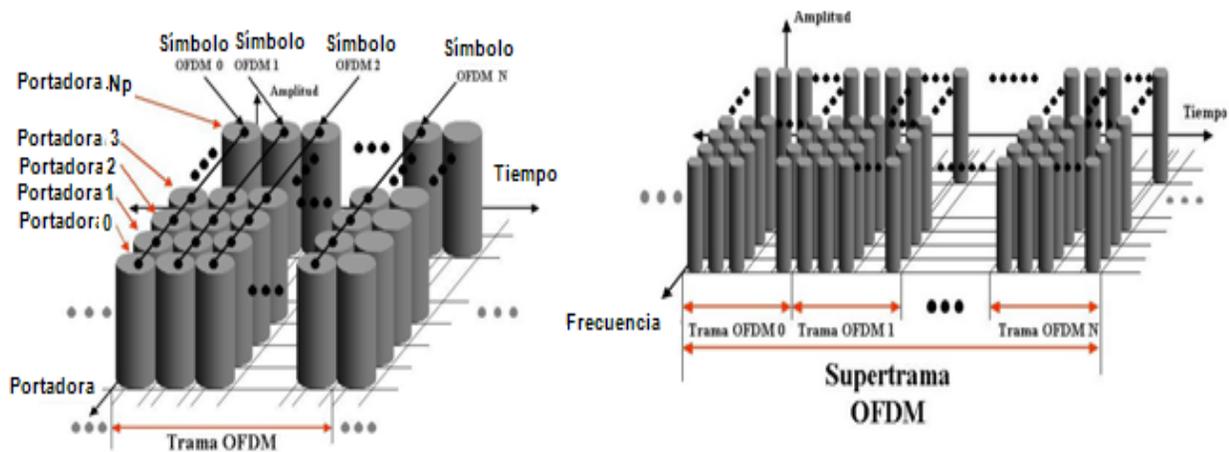


Figura 3.9: Trama y supertrama OFDM.

3.2. Elección de parámetros OFDM para 802.11a.

Cuando se eligen los parámetros OFDM, normalmente se proporcionan tres elementos determinados de información. El ancho de banda es fijo, normalmente regulado por las autoridades legislativas. El retardo se determina a través del entorno en que va a funcionar el sistema; generalmente se muestra una propagación retardada de entre 40 y 70 ns, aunque en algunos casos puede alcanzar los 200 ns. Por último, la velocidad de bits normalmente es un objetivo de diseño [12].

Una directriz común es que el tiempo de protección debe ser dos o cuatro veces más que la propagación retardada, como resultado los diseñadores eligieron un tiempo de protección de 800 ns [12].

La duración del símbolo debe ser mucho mayor que la duración del intervalo de guarda, pero dentro de lo razonable, de tal forma que no haya una carga excesiva por el número de subportadoras, que implique incremento en costo y complejidad de los dispositivos. Una opción práctica es seleccionar el tiempo de símbolo al menos cinco veces el intervalo de guarda.

De acuerdo a esto, en el estándar IEEE 802.11a se define $4 \mu s$ como tiempo de símbolo, dentro de los cuales se incluye $800 ns$ de intervalo de guarda. En el estándar IEEE 802.11a se tiene un tiempo de integración de $3.2 \mu s$ para la FFT, y un espaciamiento entre subportadoras de $0.3125 MHz$ ($1/3.2 \mu s$).

3.2.1. Extensión IEEE 802.11a.

El estándar 802.11a incluye especificaciones de capa física PHY OFDM para la banda de 5 GHz. Esta banda se refiere a las bandas U-NII. El sistema OFDM proporciona capacidades de transmisión de 6, 9, 12, 18, 24, 36 y 54 Mbps.

El sistema utiliza 52 subportadoras que son moduladas utilizando BPSK (modulación por desplazamiento de fase binaria), QPSK (modulación por desplazamiento de fase cuaternaria), 16-QAM (modulación de amplitud en cuadratura de 16 niveles) o 64 QAM (modulación de amplitud en cuadratura de 64 niveles).

Adicionalmente el estándar IEEE 802.11a define el uso de codificación convolucional FEC (FEC, Forward Error Correction), para el control de los errores con tasas de codificación de: $1/2$, $2/3$ o $3/4$. Con la finalidad de incluir suficiente información redundante en cada trama de datos transmitida para que el receptor pueda decidir lo que se ha transmitido.

En el estándar IEEE 802.11a se divide la capa física en dos subcapas: en la capa física de procedimiento de convergencia (PLCP, Physical Layer Convergence Procedure) y la capa dependiente del medio (PMD, Physical Medium Dependent).

3.2.2. Capa Física de Procedimiento de Convergencia (PLCP) de OFDM.

La capa PLCP permite operar a la MAC con un mínimo de dependencia de la PMD (dependiente del medio físico), siendo el componente inferior de la PHY y responsable de transmitir señales de RF a otras estaciones 802.11.

En la PLCP se lleva a cabo el proceso de transformación de las tramas o unidades de datos que provienen de la MAC (en la transmisión) o del medio Inalámbrico (en la recepción) a formatos más adecuados.

En la figura 3.10 se muestra la conversión de la unidad de datos PSDU (PLCP, Service Data Unit) a la trama PPDU (PLCP Protocol Data Unit), como parte del proceso de transmisión.

- **PSDU:** (Unidad de datos de servicio PLCP). Los datos de la PLCP es el responsable de entregar, por ejemplo, una trama MAC con encabezados.

- **PPDU:** (Unidad de datos del protocolo PLCP). La trama PLCP completa, incluyendo los encabezados PLCP, los encabezados MAC, el campo de datos MAC y las colas MAC y PLCP.

Al recibirse la unidad de datos PSDU, la subcapa PLCP le agrega un preámbulo y un encabezado para crear la trama PPDU. En el proceso de recepción, el receptor procesa el preámbulo y encabezado para ayudar en la entrega del PSDU a la capa MAC. A continuación se muestra en la figura 3.10 el procedimiento de transmisión.

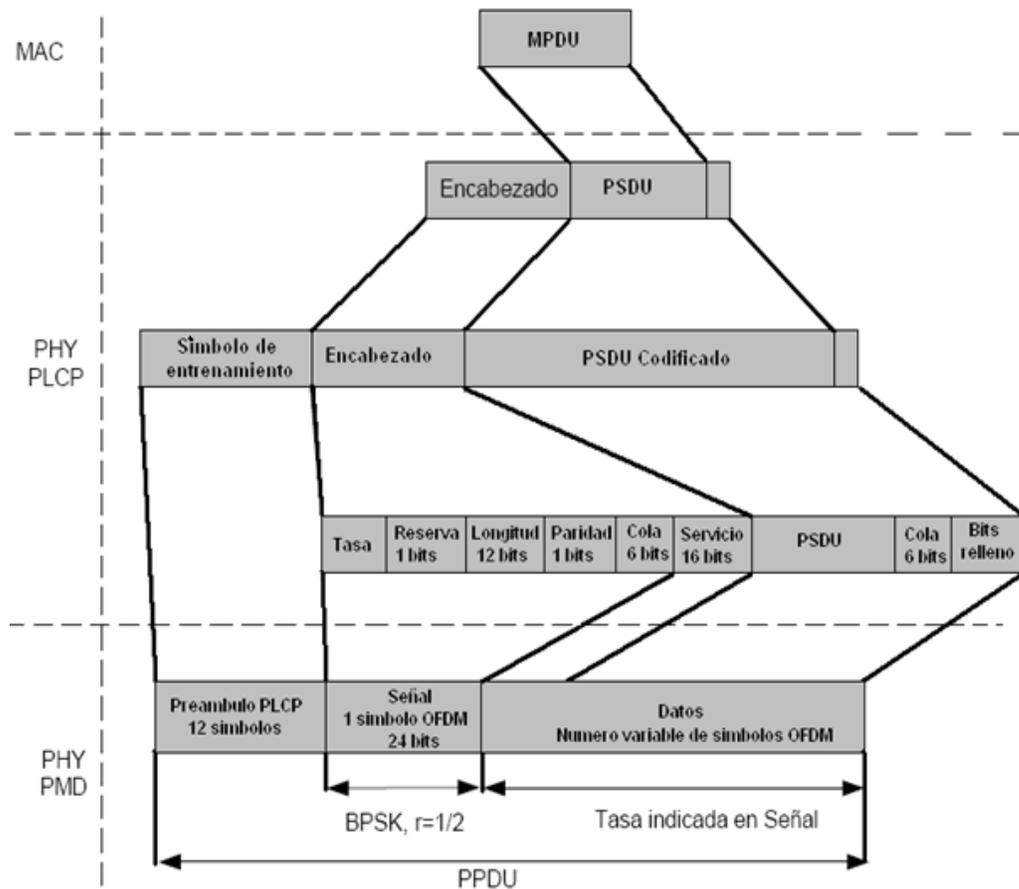


Figura 3.10: Procedimiento de transmisión.

3.2.3. Tramas.

La PHY de OFDM añade un preámbulo y un encabezado PLCP, también añade bits al final para ayudar a los esquemas de codificación utilizados. El PLCP se divide en forma analógica, aunque algunos componentes ocupan campos diferentes en la unidad de protocolo. La figura 3.11 muestra el punto de inicio para el análisis de una trama OFDM.

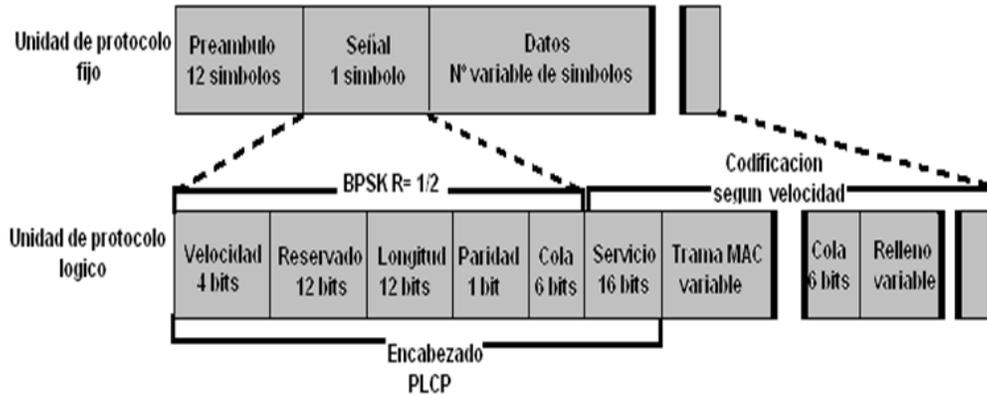


Figura 3.11: Formato de trama PLCP de OFDM.

3.2.4. Preámbulo.

La figura 3.12 muestra el preámbulo y el inicio de la trama, pero no incluye los intervalos de protección ni las ventanas utilizadas en el transmisor. El campo del preámbulo PLCP es utilizado para la sincronización. Consiste en diez símbolos OFDM cortos y dos símbolos OFDM largos, en donde de $t1$ a $t10$ se tienen los símbolos cortos que los utiliza el receptor para bloquear la señal, seleccionar una antena apropiada o si se están utilizando múltiples antenas sincronizadas para iniciar la decodificación de los símbolos.

La secuencia de formación corta transmite sin periodo de protección mientras que $T1$ y $T2$ representan los símbolos largos que ajustan a la adquisición del cronometraje y están protegidas por un intervalo de protección. Dos secuencias de formación largas siguen a las secuencias de formación cortas.

El preámbulo PLCP es seguido por los campos Señal y Datos. Los símbolos son precedidos por un intervalo de guarda (IG). La longitud total de entrenamiento, en el preámbulo PLCP, es de $16\mu s$.

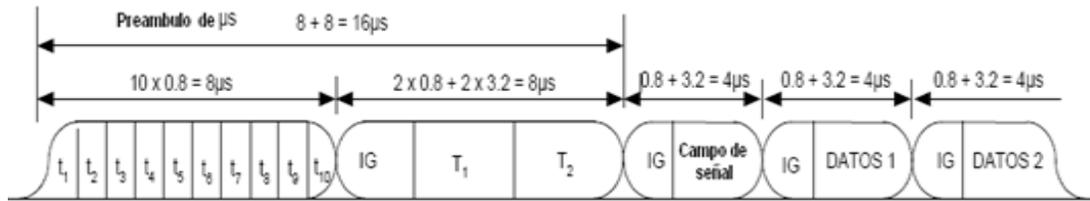


Figura 3.12: Preámbulo e inicio de trama.

3.2.5. Encabezado.

El encabezado PLCP se compone de los campos Señal de la unidad del protocolo físico y campo de Servicio de la unidad del protocolo físico. A su vez el campo Señal está formado por los campos Velocidad, Longitud, Cola y Bits de paridad que se desglosan a continuación:

- **Campo señal:** Constituye a un símbolo OFDM, el cual se transmite usando la combinación BPSK y una tasa de codificación convolucional $R = \frac{1}{2}$ como se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.13: Campo señal.

- **Velocidad (4 bits):** Cuatro bits codifican la velocidad de los datos.
- **Longitud (12 bits):** 12 bits codifican el número de bytes en la trama MAC incrustada. Igual que la mayoría de los campos, se transmite desde el bit menos significativo al más significativo. La longitud se procesa mediante un código de circunvolución para proteger frente a errores de bits.
- **Paridad (1 bit) y reservado (1 bit):** El bit 4 se reserva para uso futuro y se tiene que establecer en 0. El bit 17 es un bit de paridad par para los primeros 16 bits de señal para proteger frente a los daños de los datos.
- **Cola:** El campo señal finaliza con seis 0 utilizados para deshacer el código de circunvolución y debe procesarse a través de este.

■ **Servicio (16 bits):** El campo final del encabezado PLCP es este campo. Al contrario que otros componentes del encabezado PLCP, se transmite en el campo de datos de la unidad del protocolo físico a la velocidad de datos de trama MAC incrustada. Los primeros 8 bits se establecen en 0. Igual que las otras capas física, se cifran las tramas MAC antes de la transmisión. Los 9 bits resultantes se reservan y tienen que establecerse en 0 hasta que se adopten para su uso futuro.

Datos.

El esquema de codificación empleado para los datos depende de la velocidad de los mismos. Antes de la transmisión, los datos se cifran, igual que sucede en las otras capas físicas. El campo servicio del encabezado se incluye en el campo datos de la unidad del protocolo físico porque inicializa la cifra.

Cola.

El campo datos de la unidad del protocolo físico finaliza con una cola, y está compuesto por dos campos.

■ **Cola (6 bits):** Igual que los datos en el encabezado PLCP, los bits de cola anexados al final de la trama MAC hacen que finalice uniformemente el código de circunvolución. Se requiere 6 bits ya que el código de circunvolución tiene una longitud limitada de siete.

■ **Bits de relleno (variable):** OFDM requiere la transmisión de bloques de bits de datos de tamaño fijo. El campo datos se rellena para que su longitud sea un entero múltiplo del tamaño del bloque. El tamaño del bloque depende de la modulación y codificación utilizada por la velocidad de datos.

3.3. Procedimiento para el cálculo de bits de relleno.

El estándar indica que el número de bits en el campo datos deberá ser múltiplo del número de bits codificados en un símbolo OFDM, N_{CBPS} (48, 96, 192 o 288). Para lograrlo, la longitud del mensaje se extiende de tal forma que se convierta en múltiplo del número de bits de datos por símbolo OFDM, N_{DBPS} . El número de símbolos OFDM N_{SYM} , el número de bits en el campo de datos N_{DATA} y el número de bits de relleno N_{PAD} , son calculados con la siguiente ecuación a partir de la longitud del PSDU, que se define en el campo Longitud.

La función ceiling es una función que regresa el valor entero más cercano mayor o igual a su valor argumento.

$$N_{SYM} = \text{Ceiling}\left(\frac{(16+8 \times \text{longitud}+6)}{N_{DBPS}}\right) \quad [13] \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

$$N_{DATA} = N_{SYM} \times N_{DBPS} \quad [13] \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

$$N_{PAD} = N_{DATA} - (16 + (8 \times \text{longitud}) + 6) \quad [13] \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

3.4. Corrección de error sin retorno con codificación de circunvolución.

La corrección de error sin retorno, estrictamente hablando, no forma parte de OFDM. Sin embargo, en OFDM se usa en aplicaciones en las que la señal esta sujeta a interferencias o desvanecimientos de banda estrecha específicos de la frecuencia. Cuando se produce un desvanecimiento, la capacidad de un canal para transportar datos puede llegar a cero ya que la amplitud recibida es demasiado pequeña.

Para evitar algunos canales desvanecidos se incrementa el porcentaje de error de bits, normalmente OFDM aplica un código de corrección de errores para todos los subcanales. Las implementaciones que emplean un código de corrección de errores junto con OFDM a veces se denomina OFDM codificados (COFDM, Coded OFDM).

OFDM usa un código de corrección de error sin retorno (FEC, Forward Error Correction) en cada canal. Este es un sistema que permite a un receptor detectar los bits dañados y reparar la transmisión, siempre que la fracción de bits perdida o dañada sea lo bastante pequeña.

Para proporcionar una capacidad de corrección de errores, se añaden bits redundantes al flujo de datos. Al quitar el ruido a través de diversos símbolos transmitidos, se puede reducir el ruido transitorio hasta que los errores resultantes no afecten a la capacidad del receptor de reconstruir el flujo de bits. Se pueden utilizar dos clases de datos de corrección de error sin retorno.

- Los códigos de bloque, funcionan corrigiendo bloques de entradas de un tamaño fijo usados para aplicaciones en la que los datos se guardan naturalmente, se transmiten o procesan en fragmentos (DVD, CD, etc.).

- Los códigos de circunvolución, funcionan sobre flujos de cualquier longitud siendo la elección para las LAN inalámbricas ya que las tramas que se están transmitiendo pueden tener una variedad de tamaños.

Los códigos de circunvolución tienen dos parámetros principales. La longitud de la restricción determina cuanto tiempo como promedio, puede estar en transmisiones sucesivas cada bit de datos. 802.11a aplica una longitud de restricción de 7, el límite donde se puede usar de forma practica un decodificador de Viterbi (a mayor longitud mayor la complejidad de Viterbi).

El segundo parámetro, la relación de codificación (R) determina cuantos bits redundantes se añaden. Se expresa como la cantidad de datos de bits trasmitidos como una porción de la cantidad total de bits codificados.

Un código de circunvolución con un $R=1/2$, transmite un bit de datos para cada dos bits de código o con un $R=3/4$, donde solo el 25 por ciento de los bits son redundantes. 802.11a especifica tres tasas de código que varían de $1/2$ hasta $3/4$ el más robusto.

Es posible obtener mayores tasas de transmisión de datos, a partir del mismo código mediante el uso de códigos perforados. El perforado de códigos es una técnica muy útil para generar tasas de código adicionales a partir de un codificador convolucional. La idea básica es no transmitir algunos de los bits de salida del codificador, incrementándose la tasa de código. El receptor inserta bits de relleno para reemplazar a los bits perforados. Los bits no transmitidos se definen como patrón de perforado, siendo simplemente un conjunto de bits que no son transmitidos cada cierto período de bits.

En la figura 3.14 se muestra el proceso para una perforación de un código de relación $1/2$ a un código de relación $3/4$.

Una de las ventajas de usar este código es que se puede implementar como codificador de circunvolución único en el control de software.

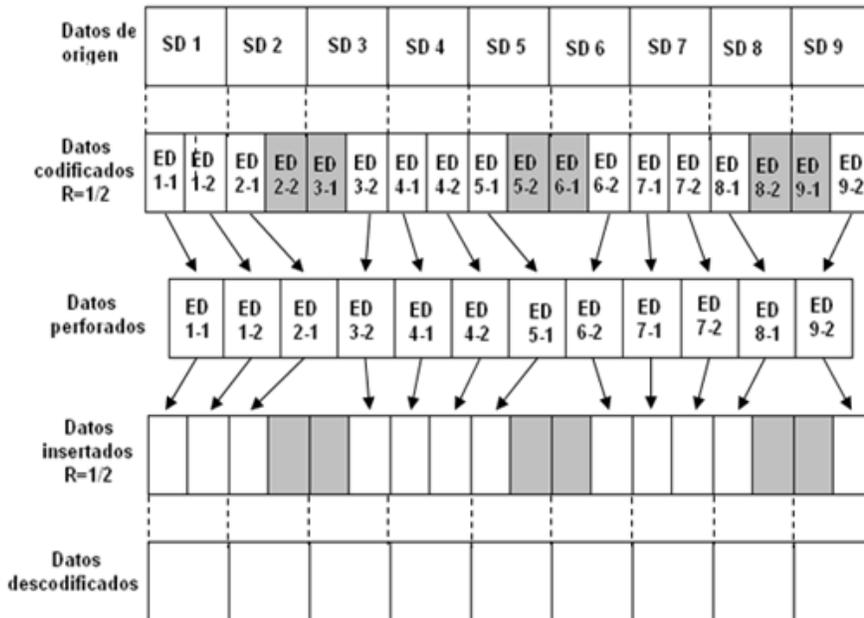


Figura 3.14: Perforación para incrementar la relación de código.

3.5. Técnica de modulación de subportadora.

En la etapa de modulación de subportadora o mapeo, las subportadoras se modulan empleando una modulación (BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM) dependiendo de la tasa de datos. La serie de datos, ya codificados y entrelazados, se dividen en grupos de N_{CBPS} (1, 2, 4 ó 6) bits y se convierten a números complejos ($a+jb$) que representa puntos en las constelaciones (BPSK, QPSK, 16-QAM ó 64-QAM.) debido que la IFFT trabaja con muestras de número complejo a su entrada, como se muestra a continuación.



Figura 3.15: Modulador.

La modulación de amplitud de cuadratura (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) codifica datos en una sola onda de portadora, pero dicha onda de portadora está compuesta por dos elementos, denominados componente de fase y cuadratura. QAM ejecuta la modulación de amplitud en ambos componentes; es decir, varía el tamaño de la onda de portadora basándose en la entrada.

La onda de la portadora principal se denomina componente de fase y se abrevia como I.

El retraso de un cuarto de ciclo con respecto a la fase es el componente de cuadratura, que se abrevia como Q. Básicamente, la amplitud de una señal compuesta y de los desfases que contiene codifican la información (la modulación de desfase aplicada por PHY de secuencia directa es un caso especial de QAM donde la amplitud no cambia pero si lo hace la fase).

A cada punto de constelación se le asigna un símbolo y a cada símbolo se le asigna un valor de bit específico. 802.11a también emplea constelaciones cuadradas, lo que significa que en ambas direcciones deben ser potencia de dos par y el número es también un cuadrado perfecto (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM).

Todas las constelaciones aplicadas en OFDM tienen en común que la asignación binaria de los puntos de la constelación corresponde a un código Gray como se muestra en las figura 3.16 y 3.17.

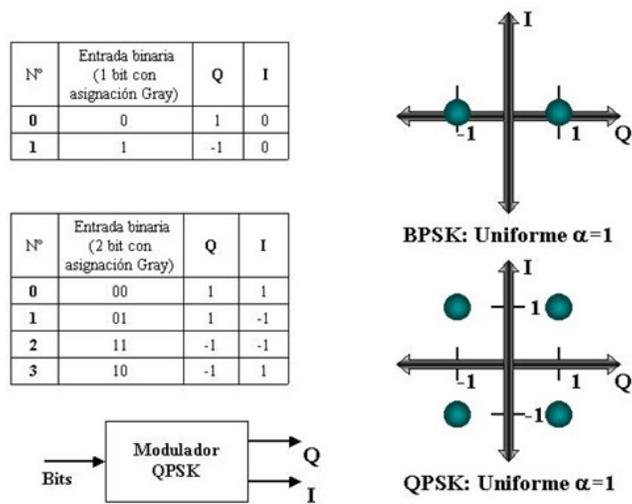


Figura 3.16: Constelaciones usadas en 802.11a.

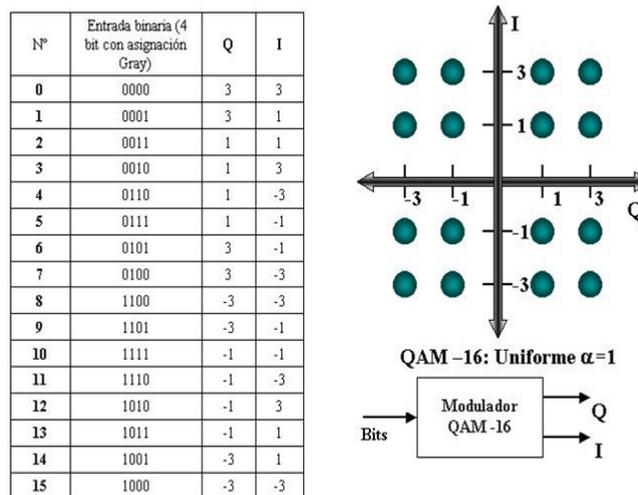


Figura 3.17: Constelaciones utilizadas por 802.11a.

Modulación	K_{MOD}
BPSK	1
QPSK	$1/\sqrt{2}$
16-QAM	$1/\sqrt{10}$
64-QAM	$1/\sqrt{42}$

Cuadro 3.2: Factor de normalización

El bit b0 en la figura 3.17 representa el bit menos significativo de la trama. Estos números complejos ($I + jQ$) que representan los puntos en las constelaciones, son multiplicados por un factor de normalización K_{MOD} , para obtener los valores resultantes d , como se muestra en la siguiente fórmula:

$$d = (I + jQ) \times K_{MOD}, [12] \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Este factor de normalización K_{MOD} de la tabla 3.2 depende del tipo de modulación, y el propósito del mismo es lograr la misma potencia promedio para todos los mapeos de acuerdo a la tabla ya mencionada.

3.6. Estructura de un canal operativo.

Los canales en el estándar IEEE 802.11a se especifican con un ancho de banda de 20 MHz. Esto permite velocidades hasta de 54 Mbps y un número de canales razonables. Cada canal se compone de 52 subportadoras, cuatro de las cuales se usan como portadoras piloto para supervisar los desfases de rutas e ICI, y las otras 48 subportadoras se usan para la transmisión de datos.

Las subportadoras se numeran del -26 al 26. La subportadora 0 no se maneja por motivo de procesamiento de la señal, como se muestra en la figura 3.18.

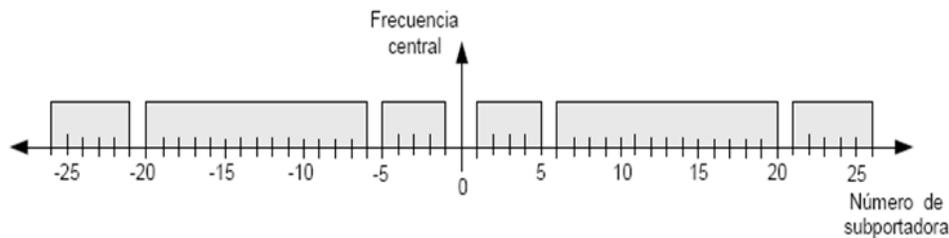


Figura 3.18: Estructura de un canal OFDM.

3.6.1. Subcapa PMD y canales operativos.

La subcapa PMD, cuya función define las características y el método para el envío y recepción de datos a través del medio inalámbrico entre dos o más estaciones, concierne a la banda de 5 GHz aplicada en OFDM.

La PHY de OFDM usa diferentes técnicas de modulación para lograr tasas de datos de 6 a 54 Mbps. En todos los casos, la capa física utiliza una tasa de símbolo de 250,000 símbolos/segundo a través de 48 subcanales. El número de bits de datos por símbolo varía. Los canales de la banda de los 5 GHz se numeran al inicio de cada 5 MHz según las siguientes fórmulas:

$$\text{Frec. central (MHz)} = 5000 + (5 \times n) \quad n = 0,1,2,\dots,199 \quad [12] \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

$$\text{Frec. central (MHz)} = 5000 - 5 \times (256 - n), n = 240, 241, 255 \quad [12] \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

Cada canal de 20 MHz OFDM, ocupa cuatro canales dentro de las bandas UNII. En la tabla 3.3 se muestra el esquema de canalización para el estándar IEEE 802.11a.

Frecuencia GHz	Permitido en:	Potencia permitida	N° del canal	Frecuencia central en Hz
4.920 - 4.980	Japón	250 mW EIRP y < 1W ó 10 nW EIRP	240	4920
			244	4940
			248	4960
5.040 - 5.080	Japón	250 mW EIRP y < 1W ó 10 nW EIRP	8	5040
			12	5060
			16	5080
5.15 - 5.25	Japón	200 mW (<10mW/MHz)	34	4170
			38	4190
			42	5210
			46	5230
Banda U-NII Inferior (5.15 - 5.25)	E.U.A.	40 mW (2.5 mW/MHz)	36	5180
			40	5200
			44	5220
			48	5240
Banda U-NII Media (5.25 - 5.35)	E.U.A.	200 mW (12.5 mW/MHz)	52	5260
			56	5280
			60	5300
			64	5320
5.470 - 5.725	Europa (CEPT)	1W EIRP	100	5500
			104	5520
			108	5540
			132	5660
			136	5680
			140	5700
Banda U-NII Superior (5.725 - 5.825)		800 mW (50mW/MHz)	149	5745
			153	5765
			157	5785
			161	5805

Cuadro 3.3: Canales operativos para 802.11a/j

Banda de frecuencia (GHz)	Potencia máxima de salida	
	mW	dBm
5.15 - 5.25	40	16
5.25 - 5.35	200	23
5.725 - 5.825	800	29

Cuadro 3.4: Niveles de transmisión de potencia en las bandas U-NII

La figura 3.19 muestra una visión general de los canales 802.11a disponibles en los Estados Unidos. En cada una de las bandas U-NII de E.U.A. se encuentran disponibles cuatro canales. En las dos bandas U-NII inferiores, se encuentra presente tanto el extremo inferior de la banda U-NII como el extremo superior de la banda U-NII intermedia.

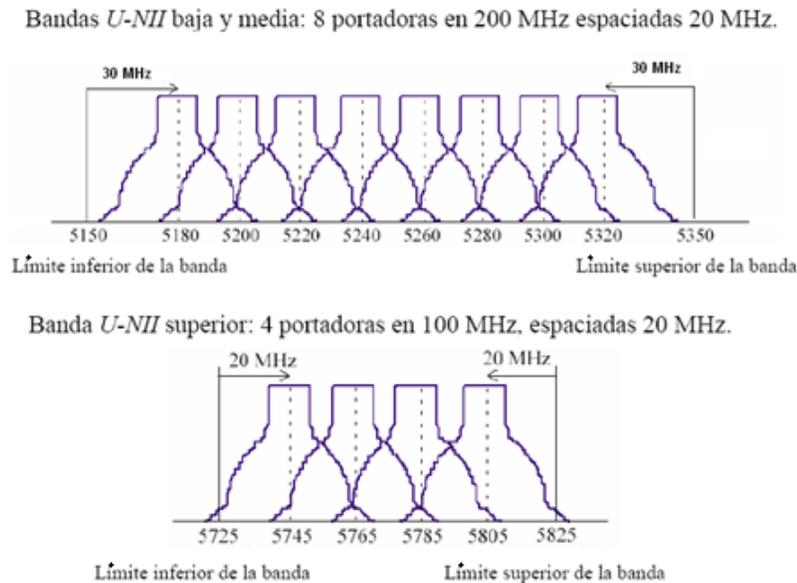


Figura 3.19: Bandas operativas de U-NII (Baja, Media y Superior).

El estándar IEEE 802.11a, cuenta con especificaciones para la potencia máxima de transmisión. Los tres niveles de potencia de transmisión que son considerados se observan en la tabla. 3.4.

Velocidad de datos (Mbps)	Sensibilidad mínima (dB)	Rechazo de el canal adyacente (dB)	Rechazo de canal no adyacente (dB)
5	-82	16	32
9	-81	15	31
12	-79	13	29
18	-77	11	27
24	-74	8	24
36	-70	4	20
48	-66	0	16
54	-65	-1	13

Cuadro 3.5: Requerimientos de rendimiento del receptor

También existen diferentes niveles de sensibilidad de potencia mínima en el receptor que pueden determinar la tasa de transmisión de datos, a la cual es posible operar las estaciones, estos niveles se muestran en la tabla 3.5.

A medida que aumenta la velocidad de los datos, es difícil que se interrumpa una señal en el receptor.

3.7. Codificación y modulación.

Hay cuatro niveles de tasas de datos en Mbps para OFDM dependiendo del tipo de modulación: 6 y 9 (BPSK), 12 y 18 (QPSK), 24 y 36 (16-QAM), 48 y 54 Mbps (64-QAM). Las tasas menores en cada uno de los niveles (6, 12 y 24 Mbps) son las más robustas en presencia de interferencia, siendo consideradas obligatorias en el estándar IEEE 802.11a.

El nivel más bajo utiliza BPSK para codificar 1 bit por subcanal o 48 bits por símbolo. Las tasas de transmisión de datos de 6 Mbps se logra aplicando la codificación convolucional de 1/2, la de 9 Mbps se obtiene con una tasa de código de 3/4. La codificación convolucional significa que ya sea la mitad o 1/4 de los bits, serán bits de redundancia usados para la corrección de errores, así que solamente se tendrán 24 o 36 bits de datos por símbolo. El siguiente nivel emplea QPSK para codificar 2 bits por subcanal para un total de 96 bits por símbolo. Después de restar los bits introducidos por el codificador convolucional, el receptor queda con 48 o 72 bits de datos.

El tercero y cuarto nivel maneja una QAM. Con 16-QAM se codifican 4 bits por subcanal empleando 16 símbolos y tasas de codificación de $R=1/2$ y $R=3/4$. Con 64-QAM se codifica 6 bits por subcanal utilizando 64 símbolos y tasas de codificación de $R=2/3$ y $R=3/4$. La tabla 3.6 muestra un resumen de los métodos de codificación usados por cada velocidad de los datos en la PHY de OFDM.

Velocidad (Mbps)	Modulación	Tasa de código. (R)	Bits codificados por portadora. (N_{BPSC})	Bits codificados por símbolo. (N_{CBPS})	Bits de datos por símbolo. (N_{DBPS})
6	BPSK	R=1/2	1	48	24
9	BPSK	R=3/4	1	48	36
12	QPSK	R=1/2	2	96	48
18	QPSK	R=3/4	2	96	72
24	16-QAM	R=1/2	4	192	96
36	16-QAM	R=3/4	4	192	144
48	64-QAM	R=2/3	6	288	192
54	64-QAM	R=3/4	6	288	216
72	64-QAM		6	288	288

Cuadro 3.6: Detalles de codificación para velocidades de datos OFDM

Nota:

- Los bits por canal se codifican en función de la modulación (BPSK, QPSK, 16-QAM, ò 64-QAM).
- Los bits de datos por símbolo son una función de la relación del código de circunvolución.
- Aunque no se ha estandarizado una velocidad sin un código de circunvolución, muchos productos ofrecen un modo donde se elimina para obtener un rendimiento adicional.

Capítulo 4

Simulación del sistema OFDM.

4.1. Desarrollo de la simulación.

La simulación es la etapa necesaria que se tiene que realizar para comprobar el funcionamiento de un sistema previo a su implementación real como es en este caso, siendo la tarea principal de este proyecto, basado en las señales de OFDM, perteneciente a la tecnología Wi-Fi.

En este caso la simulación se desarrollo con el uso del simulador de SimuLink, que trabaja integrado con MatLab.

4.2. Plataforma de simulación en SimuLink.

Este software ofrece una plataforma basada en el uso de bloques, cuyo funcionamiento es a través de objetos independientes, sumado a la gran variedad existente de elementos que integran en librerías que vienen por defecto, otorgando de esta manera una incomparable versatilidad para diversas aplicaciones en múltiples áreas de ingeniería y de ciencias tales como control automático, hidráulica, mecánica, comunicaciones, radiofrecuencia, electricidad, aeronáutica, finanzas, termodinámica, entre otros siendo diversas las simulaciones que se pueden desarrollar con este programa.

SimuLink soporta la realización de sistemas que funcionen usando una tasa de datos fija durante un largo tiempo de simulación a través de todo el modelo, o bien puede ser de una tasa de datos múltiple o incluso variable. La configuración del método adecuado a cada simulación se hace seleccionando las opciones correspondientes a cada bloque de SimuLink.

4.3. Descripción del sistema a simular.

Como en cualquier sistema de comunicaciones se requiere de un transmisor y receptor para la comunicación, por ello se presenta un diagrama a bloques de manera general de los puntos principales que permitan el desarrollo de esta simulación. En este apartado se realizó la siguiente estructura del transmisor y receptor OFDM, y que posteriormente va a ser simulado como se muestra en la figura 4.1:

- Fuente o generador de datos.
- Modulador OFDM.
- IFFT.
- Inserción del tiempo de guarda.
- Canal.
- Supresión del intervalo de guarda.
- FFT.
- Demodulador OFDM.
- Salida de datos.

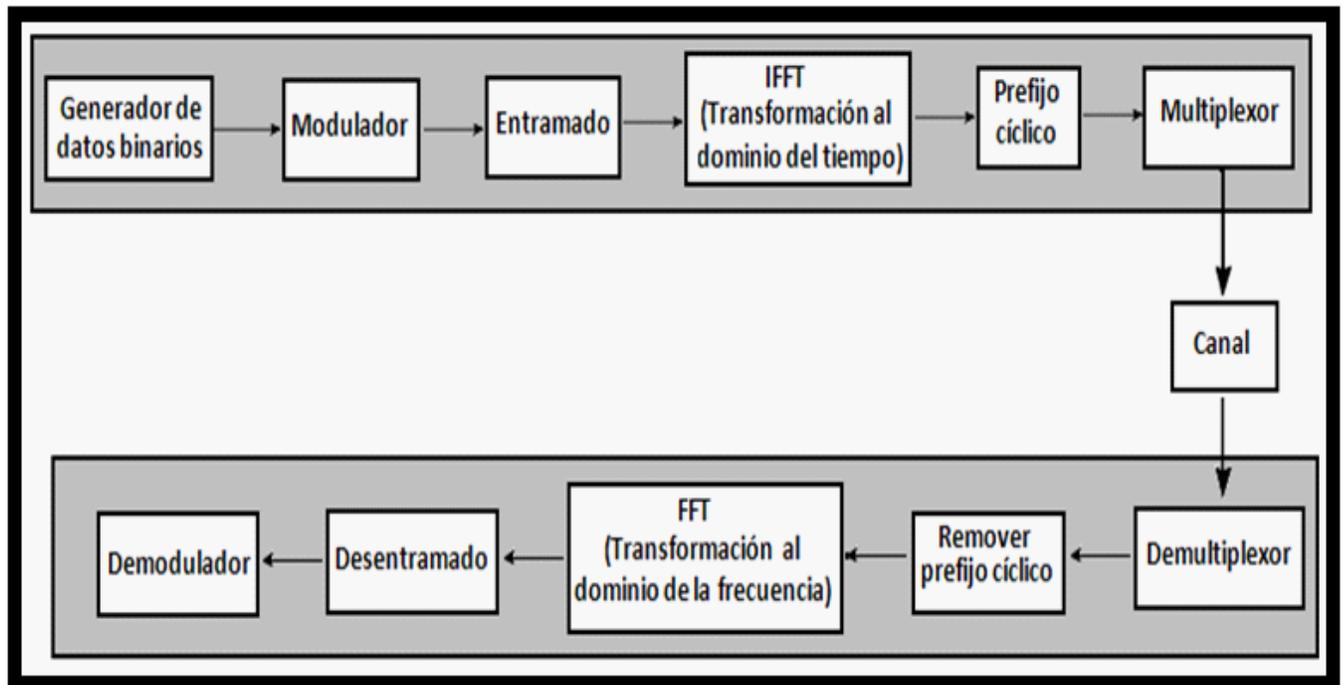


Figura 4.1: Diagrama Transmisor - Receptor OFDM.

Velocidad (Mbps)	Modulación	Tasa de código (R)	Bits codificados por portadora. (N_{BPSC})	Bits codificados por símbolo. (N_{CBPS})	Bits de datos por símbolo. (N_{DBPS})
9	BPSK	R=3/4	1	48	36
18	QPSK	R=3/4	2	96	72
36	16-QAM	R=3/4	4	192	144
54	64-QAM	R=3/4	6	288	216

Cuadro 4.1: Detalles de la codificación OFDM

Parametros	Datos
N_{sd} :Número de subportadoras de datos.	48
N_{sp} :Número de subportadoras piloto	4
N_{fft} :Número de puntos de la FFT	64
N_{cyclic} :Muestras del prefijo ciclico	16

Cuadro 4.2: Parámetros de la codificación OFDM.

4.3.1. Alcance y principales parámetros de la simulación.

El sistema a simular, tiene como principal finalidad demostrar el funcionamiento de un Transmisor – Receptor OFDM, así como comprender cada una de sus partes más importantes que lo conforman, así como su funcionamiento.

Para el desarrollo de la simulación de OFDM se tienen que determinar algunas características siendo estas fundamentales para el desarrollo de la transmisión, ya que de ello depende el proceso y fidelidad de la señal. En las tablas 4.1 y 4.2 se mencionan dichas características.

4.4. Explicación de cada una de las partes del diseño OFDM.

El sistema a simular, descrito anteriormente en el capítulo tercero, se explica ahora con más detalle, describiendo cada una de las partes que conforman al sistema OFDM como se muestra a continuación en la figura 4.2, siendo este el diseño propuesto en este trabajo permitiendo de esta manera el desarrollo de la simulación, observando así cada una de sus diferentes etapas que lo componen.

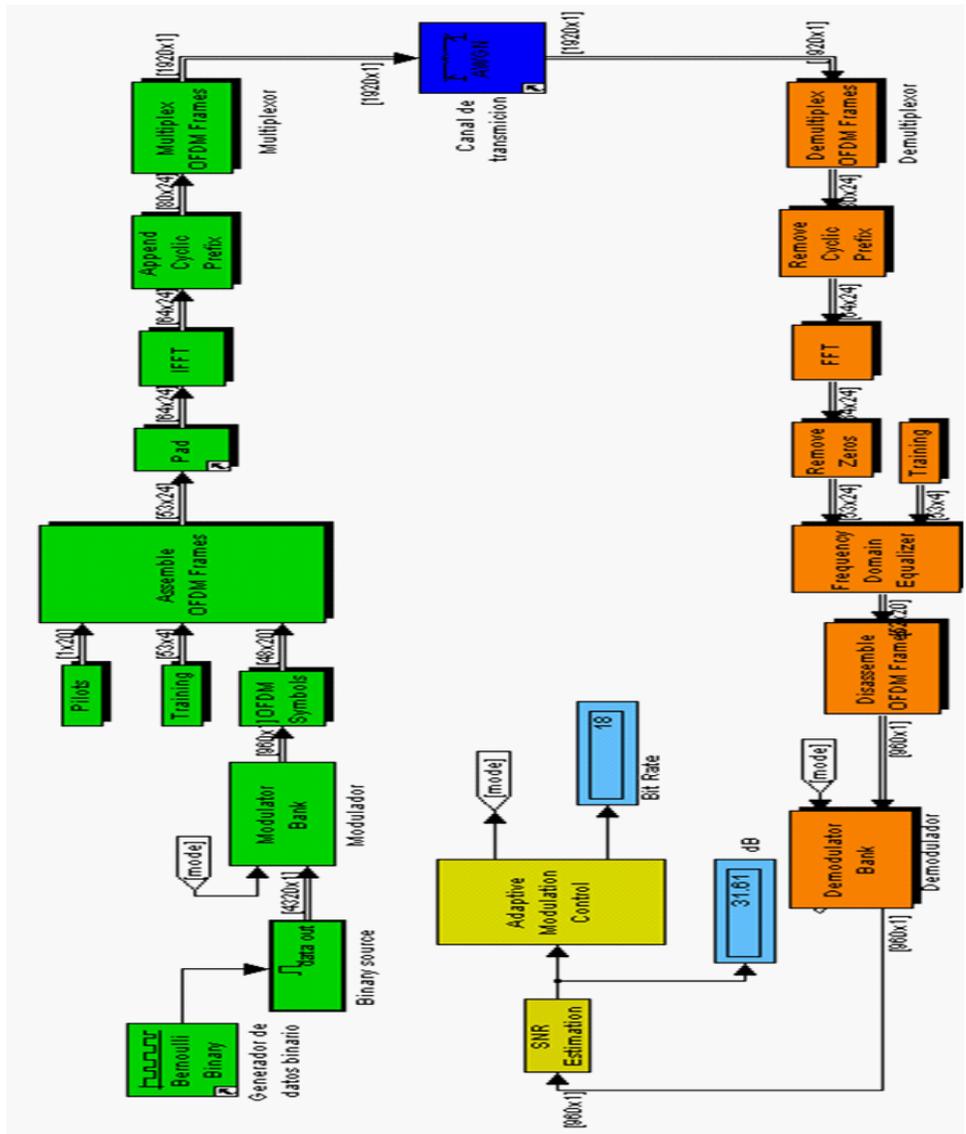


Figura 4.2: Esquema simulado OFDM.

4.4.1. Transmisor OFDM.

En OFDM la transmisión y recepción simulada emplea 52 subportadoras, 4 pilotos, 64 puntos FFT, y un prefijo cíclico de 16 muestras. Estos parámetros son parte esencial para el envío de datos, ya que en ellos se transporta la información, formando así a cada una de las portadoras y en conjunto estas forman a las tramas. La figura 4.3 ilustra la transmisión de subportadoras OFDM.

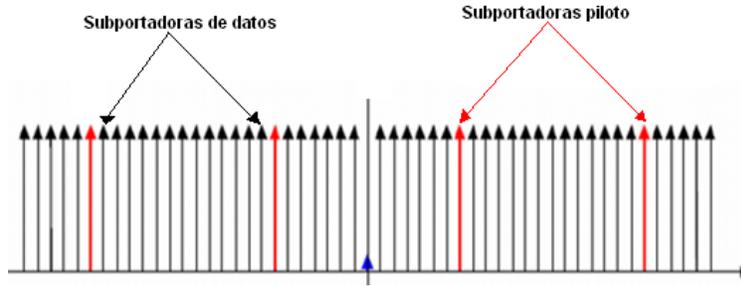


Figura 4.3: Transmisión OFDM.

4.4.2. Generador de datos binarios.

Para comenzar a realizar esta simulación es necesario generar datos arbitrariamente, por ello se eligió al bloque Generador de Bernoulli ya que permite realizar esta tarea de manera eficiente a través de la manipulación de sus parámetros, eligiendo así una probabilidad entre uno y cero de .5 obteniendo la serie de bits requerida para la representación de los datos. Dado que éste bloque, es la fuente de información para todo el sistema.

Esta tasa no es la misma a la que los datos pasan por el canal, y por tanto a la que se reciben en la etapa de recepción, ya que la modulación implica otras tareas adicionales como colocar los datos en tramas, inserción de subportadoras pilotos, generación de preámbulos, ocasionando un aumento en la tasa de datos para las simulaciones propuestas. En la figura 4.4 se ve la representación de este bloque que funciona principalmente como el generador de datos aleatorios.

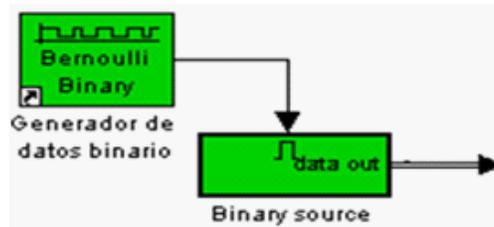


Figura 4.4: Generador de datos aleatorios.

4.5. Modulador.

El modulador y demodulador constituyen el primer y último proceso, respectivamente dentro del sistema transmisor y receptor OFDM. Las modulaciones que se realizaron en éste trabajo son la BPSK, QPSK, 16-QAM, y 64-QAM como se muestra en la figura 4.5. El subsistema del modulador es el responsable de realizar otras tareas aparte de la modulación, obteniendo de esta manera una mejor transmisión de información, permitiendo que esta sea más confiable como ya se explico anteriormente. Para llevar acabo cada una de estas funciones se utilizaron distintos bloques como lo son el de codificación convolucional y perforado de datos, estos bloques se eligieron porque que ya vienen integrados en SimuLink además de que facilitan el desarrollo de este trabajo, siendo estos utilizados en cada una de las distintas modulaciones. Estos bloques se explican a detalle a continuación.

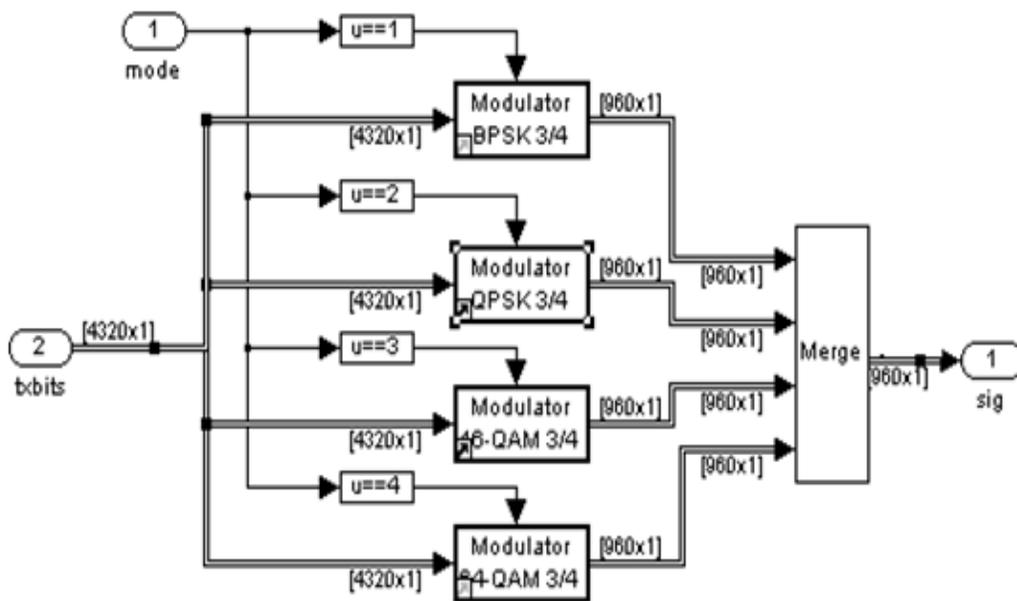


Figura 4.5: Bloque que contempla a la modulación.

- Codificación convolucional.
- Perforado de datos.
- Matriz interleaver.
- Bloque general interleaver.
- Modulación (BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM).

4.5.1. Codificación convolucional.

La codificación de control de error, es un método para añadir la redundancia a la información enviada de modo que pueda ser transmitida sobre un canal ruidoso, y posteriormente ser comprobado y corregido en los errores que ocurrieron durante la transmisión, codificando una secuencia de vectores a la entrada binaria para producir una secuencia de vectores binarios en la salida. En el código convolucional comúnmente son especificados por tres parámetros como son la n , k y m , donde la n es el número de datos de la salida, la k es el número de datos en entrada y m es el número de registros de memoria. Todo este proceso se repite para cada una de las modulaciones correspondientes.

4.5.2. Perforado de datos.

Es posible obtener mayores tasas de transmisión de datos, a partir del mismo código convolucional mediante el uso de códigos perforados. El perforado de códigos es una técnica muy útil para generar tasas de código adicionales a partir de un codificador convolucional. La idea básica es no transmitir algunos de los bits de salida del codificador, incrementándose así la tasa de código. El receptor inserta bits de relleno para reemplazar a los bits perforados. Los bits no transmitidos se definen como patrón de perforado, siendo simplemente un conjunto de bits que no son transmitidos cada cierto período de bits.

4.5.3. Matriz interleaver.

La principal función de la matriz interleaver es realizar el llenado de matrices con los símbolos de entrada de acuerdo a la modulación ya que lo hace a partir del bit menos significativo al bit más significativo de las constelaciones correspondientes.

4.5.4. Bloque general interleaver.

Este bloque organiza los elementos de su vector de entrada sin repetir ni omitir ninguno de sus elementos obteniendo los datos reorganizados que están conforme a los bits codificados por símbolo empezando por el menos significativo al más significativo según la constelación correspondiente.

4.5.5. Tipo de modulación.

La modulación digital es el proceso por el cual la información digital es transformada en formas de onda digitales. En cada símbolo OFDM, cada portadora es modulada (multiplicada) por un número complejo tomado desde una constelación fija que es un símbolo. Entre más estados hay en la constelación, más bits pueden ser transmitidos por cada portadora durante un símbolo OFDM, pero más cerca llegan a estar los puntos de la constelación.

Todas las constelaciones utilizadas en este trabajo son (BPSK, QPSK, 16-AQM, y 64-QAM) tienen en común la asignación binaria de los puntos de la constelación corresponde al código Gray.

En general el modulador utiliza como referencia una constelación asignada, tomando N bits a su entrada y los transforma en un número complejo ($a+jb$) a su salida representando a un símbolo, debido que la IFFT trabaja con muestras de número complejo a su entrada. En la figura 4.6 se muestran cada uno de los bloques ya mencionados anteriormente.

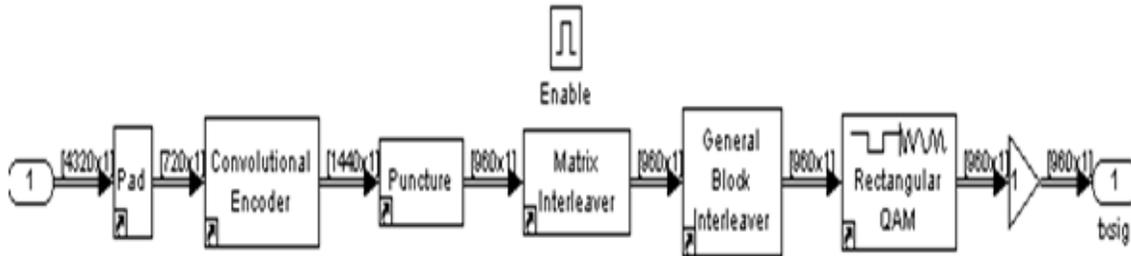


Figura 4.6: Bloque interior de cada modulación.

4.6. Entramado OFDM.

La etapa de entramado se encarga básicamente de preparar los datos codificados de acuerdo a modulación especificada (I/Q) previo a su paso por la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT), y luego adicionar el prefijo cíclico. Para realizar el entramado de los diferentes datos se utilizó en esta simulación el bloque selector multipuertos cuya función es la de seleccionar determinados parámetros siendo en este caso los que contienen a las subportadoras de datos. También se utilizaron dos bloques que concatenan a cada una de las salidas del selector multipuertos además de insertar un preámbulo y las portadoras piloto para obtener así un solo canal de comunicación.

En este proceso se llevan a cabo tres tareas importantes las cuales ya se mencionaron pero ahora se describen de forma detallada.

- Símbolos OFDM.
- Inserción del preámbulo.
- Inserción de subportadoras piloto.

4.6.1. Símbolos OFDM.

Los datos obtenidos a través del modulador OFDM, son pasados de forma paralela al bloque que realiza el entramado, reorganizando los datos según la modulación determinada. Esta función se lleva a cabo con el bloque *Rashape* ya que permite el cambio de dimensiones de un vector a matriz o viceversa siendo esta la razón principal por la que se eligió este bloque en dicha simulación.

4.6.2. Inserción del preámbulo y ecualizador.

El preámbulo lo constituyen datos ya conocidos usados para determinar el principio del paquete y también para sincronizar al transmisor con el receptor, un preámbulo es añadido al principio de cada trama. Para llevar a cabo este proceso se utilizó un bloque constante porque permite ingresar los datos ya establecidos, además de que facilita el trabajo ya que solo se tiene que ingresar los datos requeridos por el preámbulo.

El proceso de ecualización se realiza con el bloque de tramas de datos que precede ésta serie. La ecualización consiste en tomar las tramas repetidas en el tiempo, promediar sus valores y de ésta manera obtener los coeficientes tales que, multiplicados por los valores recibidos darán los valores esperados, estos mismos coeficientes se usan para normalizar todo el bloque de datos que le precede.

El estándar OFDM en el que se basó esta simulación ya tiene su esquema de sincronización con sus respectivos preámbulos ya diseñados y características especiales que facilitan la operación para la cual están destinados, como se muestra en la figura.4.7.

$$L_{[-26,26]} = \{1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 0, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1\}$$

Figura 4.7: Preámbulo OFDM.

4.6.3. Inserción de subportadoras piloto.

En cada símbolo OFDM, cuatro de las subportadoras son dedicadas para pilotar señales que hacen la detección coherente y robusta contra compensaciones de frecuencia y dividir en fases el ruido. Estas señales piloto serán puestas en las subportadoras -21,-7, 7 y 21, como se ilustra a en la figura 4.8.

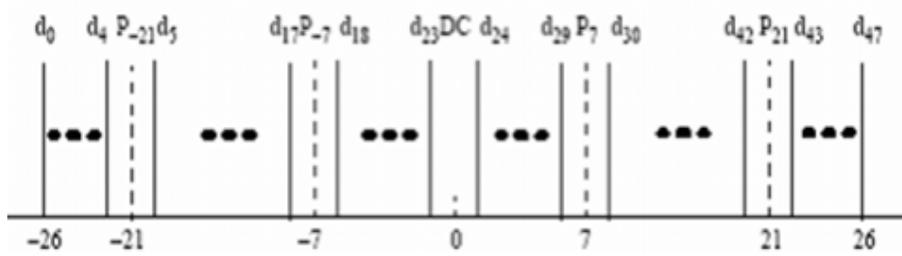


Figura 4.8: Inserción piloto en OFDM.

Las cuatro subportadoras pilotos son insertadas en cada símbolo OFDM. Los pilotos son generados por un polinomio generador: $x^7 + x^3 + 1$, estos datos se generaron a partir del bloque llamado Generador de Secuencia PN, el cual se ocupo porque con el era posible generar este polinomio siendo esta parte de gran importancia para dicha simulación. La inserción es lograda con un bloque de encadenamiento de la matriz, así los pilotos son insertados en el lugar apropiado en cada símbolo. La figura 4.9 muestra la simulación de la parte del entramado OFDM.

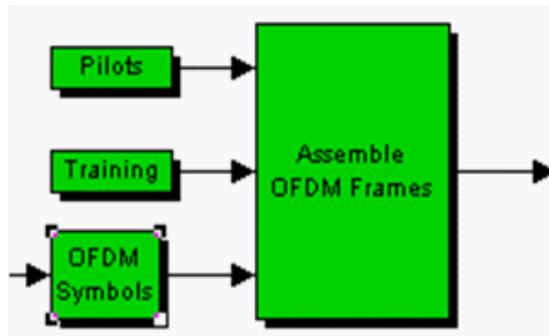


Figura 4.9: Entramado OFDM.

4.7. IFFT y FFT.

Este apartado comprende el uso de la IFFT y la FFT, que son parte importante para el desarrollo de este trabajo, siendo su principal tarea el pasar los datos que están en función de la frecuencia a función del tiempo y viceversa. Estas dos partes esenciales se hicieron a través del uso de los bloques que brinda SimuLink facilitando así este trabajo, además de que realiza las tareas específicas que se necesitan en el diseño de este esquema.

Estas dos funciones tienen una amplia variedad de aplicaciones, como lo es el tratamiento digital y filtrado digital de señales entre otras.

4.7.1. Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT).

Su principal función de la IFFT es pasar la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. La IFFT es útil en OFDM porque genera muestras en una forma de una onda compuesta a partir de cada subcanal con componentes de frecuencia que satisfacen condiciones de ortogonalidad permitiendo que las señales se superpongan pero no se interfieran entre sí. En la figura 4.10 se observa la aplicación de la IFFT de esta simulación.

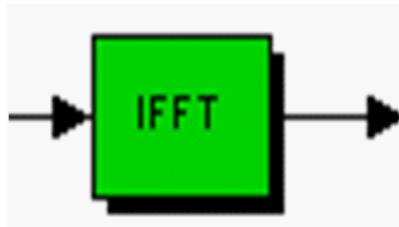


Figura 4.10: IFFT en OFDM.

A continuación se explica detalladamente el proceso de la IFFT. La IFFT obtiene los 64 puntos los cuales van del 1 al 26 y del 38 al 63 que son los de datos, mientras que el resto de las entradas que van del 27 al 37 y 0 en la entrada, son puestas a cero. Después de la realización de un IFFT, la salida cíclicamente es ampliada a la longitud deseada. En la figura 4.11 muestra lo anterior.

En la figura 4.13 se muestra el prefijo cíclico de la simulación y de acuerdo a los 64 puntos ya establecidos anteriormente y teniendo un intervalo del ancho de banda de $\frac{1}{4}$, le corresponde al sistema copiar las 16 últimas muestras, obteniendo así la inserción del prefijo cíclico. Todo este proceso se lleva a cabo por medio de la utilización de un bloque selector, el cual fue utilizado porque permite seleccionar determinados parámetros a su entrada y de esta manera elegir el tamaño de las muestras que serían copiadas al final de la siguiente trama para el desempeño de esta simulación.

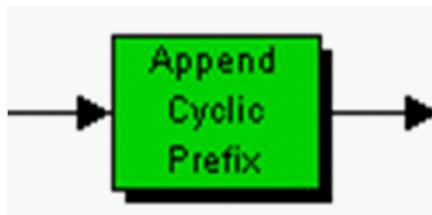


Figura 4.13: Prefijo cíclico OFDM.

4.9. Multiplexor.

El bloque multiplexor es usado para convertir la señal de entrada paralela a una señal de salida serie y así poder transmitir las muestras de dominio de tiempo de un símbolo. Esta tarea se realiza con ayuda de un bloque Reshape, ya que permite cambiar las dimensiones de la entrada de un vector a matriz o en su caso matriz a vector cumpliendo de esta forma con las características necesarias para enviar la señal.

La figura 4.14 muestra la utilización del multiplexor en la realización de esta simulación



Figura 4.14: Multiplexor OFDM.

4.10. Canal AWGN.

La función principal del bloque del canal AWGN es solamente añadir ruido blanco gaussiano a la señal de entrada, en este caso la que viene del multiplexor y de esta forma ver como se comporta la señal de datos conforme a la variación de diferentes parámetros de ruido blanco gaussiano.

Para poder representar al medio por el cual se va a enviar la información se eligió este bloque ya que permite representar la señal que recibe pero en múltiples trayectorias como lo sería en un caso real, por esta razón se aplicó este bloque. En la figura 4.15 se observa la aplicación del bloque AWGN para la simulación de OFDM.

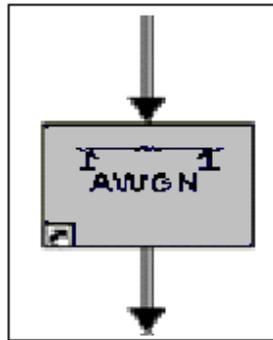


Figura 4.15: Canal AWGN de OFDM.

4.11. Receptor OFDM.

En la sección que corresponde al receptor, se realiza la parte opuesta de cada uno de los bloques ya explicados anteriormente en el apartado del transmisor OFDM, y de esta manera obtener la señal de multiplexado por división de frecuencia ortogonal requerida para su estudio.

Dentro de las tareas realizadas que se encuentran en el receptor son las enlistadas a continuación:

- Demultiplexado de la señal.
- Quita el prefijo Cíclico.
- Aplica la Transformada Inversa de Fourier (IFFT).
- Realiza el desentramado (quita preámbulo, ceros de IFFT, y subportadoras pilotos).
- Demodular la señal (Decodificador de Viterbi, insertar los ceros, matriz deinterleaver, bloque general deinterleaver y demodulación).

Capítulo 5

Análisis de resultados.

5.1. Análisis de resultados de la simulación.

En este último apartado se presentan las simulaciones obtenidas una vez terminada la simulación de OFDM descrita anteriormente, y de esta forma concluir con el proyecto de tesis que se planteo al inicio de éste trabajo. Además se analizan los diferentes resultados que se obtienen al variar los parámetros del canal con relación al (SNR). Por último se establece una conclusión de este trabajo de tesis, como también se mencionan algunas de las características más relevantes de OFDM (Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal).

5.2. Simulaciones obtenidas de OFDM.

En este apartado se presentan los resultados de cada una de las simulaciones que se obtuvieron de acuerdo al tipo de modulación realizada como BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM comprobando cada uno de sus resultado de acuerdo a la variación que se dio del SNR primeramente de 40 dB y posteriormente con un SNR de 20 dB.

La primera modulación que se muestra en la figura 5.1 corresponde a la BPSK, apreciándose su representación por medio de dos puntos ya que esta se basa en la transmisión por desplazamiento en fase, donde la señal de entrada se representa por un 1 y un 0 lo que significa que se tienen dos fases a la salida en una sola frecuencia portadora, estando desfasadas 180° , por ello existen sólo dos puntos uno en 180° y el otro en 0° .

QPSK es una modulación que se realiza a través de una transmisión por desplazamiento de fase en cuadratura, siendo este muy parecido al caso anterior sólo que esta vez se tienen cuatro fases de salida representadas cada una por dos bits de entrada (00, 01, 10, 11) estando en una sola frecuencia de portadora, obteniendo de esta forma un desfase de -135° , -45° , $+135^\circ$ y $+45^\circ$ correspondientes a cada uno de los puntos representados en la figura 5.1 permitiendo alcanzar de esta manera mayor transición de información.

La modulación 16-QAM se basa en la transmisión de amplitud por cuadratura, donde la información se modula tanto en amplitud como en fase de la portadora transmitida, enviando dos mensajes independientes por un sólo camino a través de la modulación de la portadora desfasada 90° entre los dos mensajes.

Esta modulación utiliza para su representación 16 símbolos, agrupando los datos en la entrada en conjuntos de cuatro bits, dividiéndose a su vez en dibits, donde el primer dibit especifica la posición del símbolo en el cuadrante, y el segundo dibit proporciona la posición del símbolo en el cuadrante, por esta razón se observa 16 puntos en la modulación 16-QAM como se observa en la figura 5.2.

La cuarta y último modulación corresponde a la modulación 64-QAM siendo ésta la más robusta en comparación de las anteriores, permitiendo enviar más bits de información, alcanzando mayores velocidades las cuales llegan a los 54 Mbps.

Este tipo de modulación funciona de la misma manera que 16-QAM ya que corresponde al grupo de M-QAM, modificando la información modulada tanto en amplitud como en fase pero con la ventaja de transmitir 64 símbolos como se ve en la figura 5.2, por tal motivo alcanza tasas mayores en la transmisión.

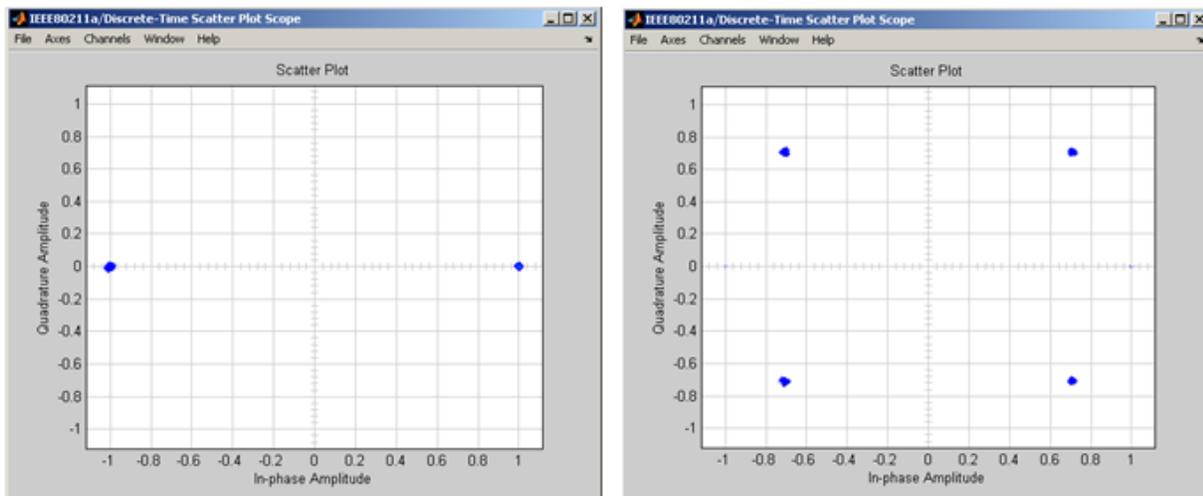


Figura 5.1: Modulación BPSK y QPSK.

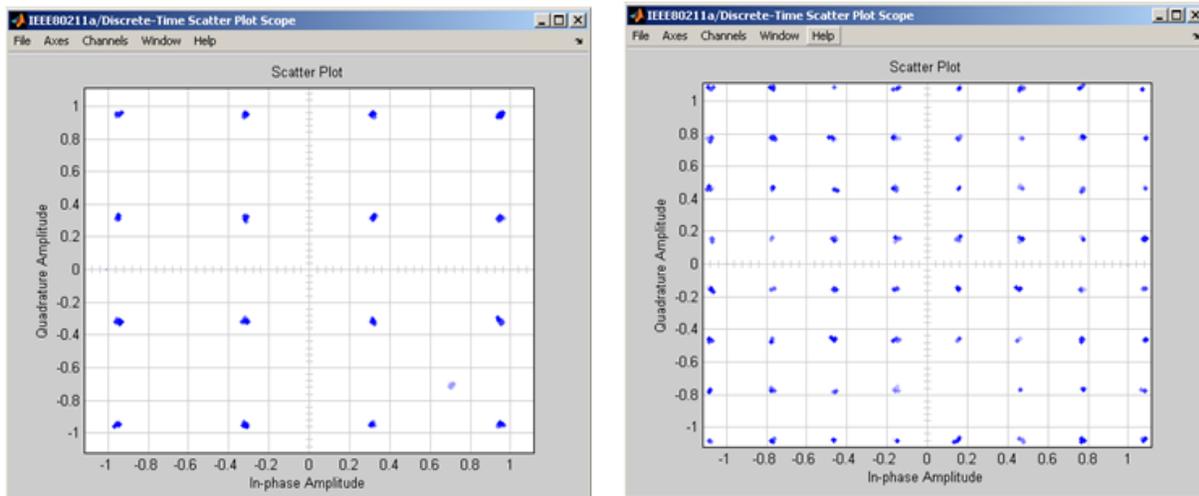


Figura 5.2: Modulación 16-QAM y 64-QAM.

Las figuras 5.3 y 5.4 representan los diagramas de constelación de los distintos tipos de modulación OFDM que fueron explicados brevemente, pero en esta ocasión con un SNR de 20 dB obteniendo como resultado una gran variación ya que se observa una severa degradación entre los distintos puntos de constelación provocando que cada uno de los puntos se encuentren más disperso a causa del ruido ocasionado por la disminución del SNR.

La conclusión a la que se llega es que con un SNR de 30 dB se obtiene una buena transmisión de bits ya que este es el parámetro ideal y con un canal de transmisión de SNR de 30 dB hacia abajo se obtendrá un deterioro mucho mayor porque al tener un SNR menor, la potencia de la señal se acercara más al ruido provocando la distorsión en la señal, en cambio y si el SNR es mayor a este parámetro, la potencia de la señal será mayor con referencia a la señal del ruido ocasionando problemas en la recepción como se observa a continuación en los diagramas de constelación.

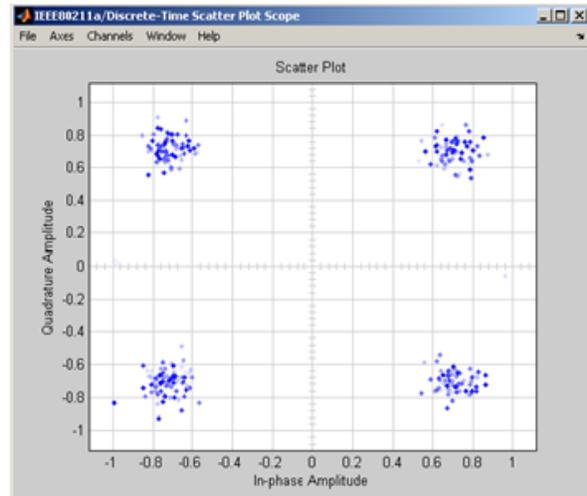
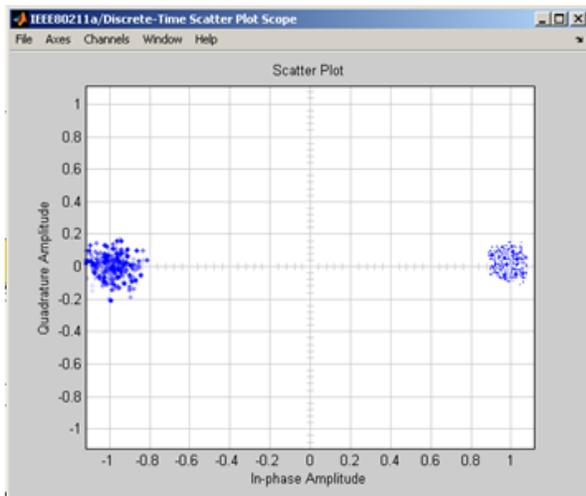


Figura 5.3: Modulación BPSK Y QPSK.

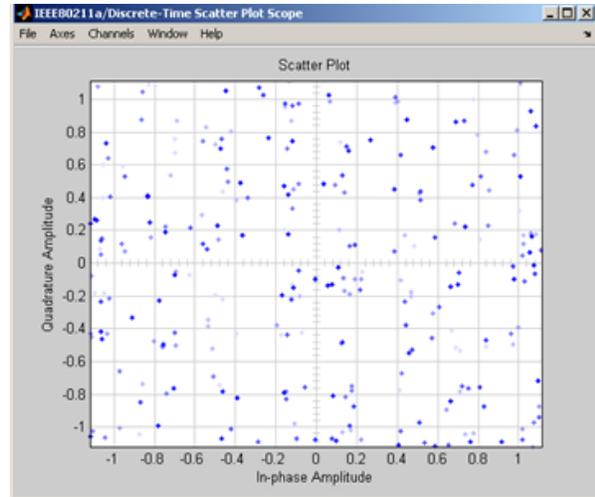
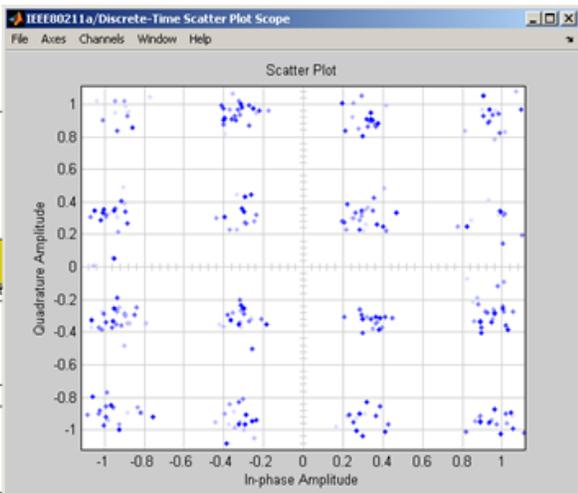


Figura 5.4: Modulación 16-QAM y 64-QAM.

A partir del desarrollo de este proyecto se encontraron algunas ventajas y desventajas de la modulación OFDM siendo estas las más importantes:

Ventajas de OFDM:

- Alta eficiencia espectral.
- Resistencia a desvanecimientos por multitrayectos.
- Elimina la ISI y ICI a través del uso de prefijo cíclico.
- Resistencia a la dispersión de la señal.
- Alta inmunidad a ráfagas de ruido.

Desventajas de OFDM:

- Las variaciones en frecuencia de las subportadoras degradan de manera considerable la calidad del enlace, perdiendo la ortogonalidad.
- Se requieren altas capacidades de procesamiento de señales debido a la complejidad de la técnica.
- Requerimiento de circuitos altamente lineales.

Otra de las observaciones más importantes fue que la modulación OFDM es una excelente tecnología porque puede ser aplicable en distintas áreas de trabajo gracias a todas las herramientas que presenta y entre las principales aplicaciones se enlistan las siguientes:

- La televisión digital terrestre DVB-T, también conocida como TDT.
- La radio digital DAB.
- La radio digital de baja frecuencia DRM.
- El protocolo de enlace ADSL.
- El protocolo de red de área local IEEE 802.11a/g, conocido como Wireless LAN.
- El sistema de transmisión inalámbrica de datos WiMAX.

La modulación OFDM es una tecnología que día con día se está aplicando cada vez más, a pesar que es una tecnología no muy reciente.

Por lo tanto al utilizar OFDM se aprovecha de esta forma cada una de las características que brinda (como ya se menciono anteriormente), logrando llegar a ser una de las tecnologías más aplicables en el futuro.

CONCLUSIONES.

El desarrollo de este trabajo permitió comprender la forma de cómo se realiza una comunicación inalámbrica, así como el entendimiento de cada una de las partes que la conforman, siendo esta parte importante para la comunicación en la vida actual.

El protocolo IEEE 802.11 está regido por diferentes normas, estas se dividen de acuerdo a sus características como por ejemplo el tipo de modulación.

El protocolo 802.11b utiliza para su transmisión señales de código complementario y el protocolo 802.11n ofrece una comunicación Mi-Mo (Múltiples Entradas – Múltiples Salidas). En este caso se realizó la investigación sobre la norma 802.11a que define el funcionamiento de las redes inalámbricas Wi-Fi; aplicando un sistema OFDM con distintas modulaciones, M-PSK y M-QAM.

El sistema OFDM tiene la ventaja de realizar la división de frecuencia ortogonal comparada con el sistema FDM. El sistema OFDM aprovecha un mayor ancho de banda por medio de la división de canales los cuales a su vez son traslapados, además de que cada canal de información se subdivide en subportadoras para poder enviar los datos.

Otra de las características es que aplica un intervalo de guarda y un prefijo cíclico donde cierto porcentaje de la transmisión es copiado al mensaje posterior para evitar la interferencia entre símbolos y la interferencia entre portadoras haciendo más eficiente la transmisión.

El sistema OFDM emplea diferentes tipos de modulación lo que permite alcanzar velocidades de 54 Mbps lo que se traduce en una mayor cantidad de información transmitida.

En la simulación de multiplexado por división de frecuencia ortogonal, se observa que al realizar un cambio del SNR en el canal de transmisión, este afectara a los puntos de constelación, ocasionando que exista un mayor o menor ruido provocando la dispersión de cada uno estos puntos y como consecuencia se vera afectada la transmisión de información.

Como conclusión final, el Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal, es una técnica muy eficiente ya que puede implementarse para el envío de distintos tipos de información, y con ello mejorar el desarrollo y eficiencia de cada una de las áreas en la que esta se aplique, logrando así que OFDM sea una de las mejores tecnologías usadas para la comunicación inalámbrica como es el caso de Wi-Fi.

BIBLIOGRAFÍA.

LIBROS

- [1]Ashok Ambardar “Procesamiento de Señales Analógicas y Digitales” Thompson.
- [2]Bert Gyselinck “Wireless OFDM Systems How to make them work” IMEC.
- [3]Edward W. Kamin, Bonnie S. Heck “Fundamentos de Señales y Sistemas usando Web y Matlab” Pearson Hall.
- [4]Ferrel C. “Sistemas de Comunicación” Alfa omega.
- [5]Frenzel, Luis E. “Sistemas Eléctricos de Comunicación” Alfa omega.
- [6]Gary S. Rogers, John Eduard’s “An Introduction to wireless Technology”.
- [7]H. Labiod, H. Afifi C. de Santis “Wi-Fi Bluetooth, Zigbee and Wimax” Springer, 2007.
- [8]Hui Liu Guoqing Li “OFDM-Based Broadband Wireless Networks Design and Optimization” Wiley-Interscience.
- [9]Juha Jeiskala, John Terry, Ph.D. ”OFDM wireless LAN’s A theoretical and practical guide”.
- [10]Julio Gómez López “Guía de campo Wi-Fi” Alfa omega Ra-Ma.
- [11]John G. Preakis, Dimistri G. Manolakis “Tratamiento Digital de Señales” Pearson Prentice Hall
- [12]Matthew S. Gast, “Redes Wireless 802.11”. Anaya Multimedia.
- [13]R. Prasad, “OFDM for Wireless Communications of System” Ramjec Prasad, 2004.
- [14]Simon and Schuster International Group “Software de simulación de Sistemas Dinámicos” Prentice Hall.
- [15]Steven t. Karris “Signal and System with MatLab and SimuLink” Orchard publications.
- [16]Steven t. Karris “Signal Introduction to SimuLink with Engineering Applications” Orchard publications.
- [17]Simón Haykin “Sistemas de Comunicaciones” Limusa Wiley.
- [18]Leon W. Couch ”Sistema de Comunicaciones Digitales y Analógicos” Pearson Prentice Hall.

[19]PDF "Design and Implementation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Signaling ”.

SITIOS.WEB

[20]<http://www.adslfaqs.com.ar/category/wifi>.

[21]<http://www.depi.itchihuahua.edu.mx/electro/archivo/electro2001/mem2001/articulos/kom3.pdf>

[22]<http://www.complextoreal.com/chapters/ofdm2.pdf>.

[23]<http://www.ocw.universia.net/es/tags/1316/ofdm>.

[24]http://www.vocal.com/redirect/802_11a.html.

[25]<http://www.Wi-Fi.org>.

Apéndice.

GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS:

ADSL: Línea de Subscriptor Digital Asimétrico Acceso a Internet, con aplicaciones en vídeo, LAN, multimedia interactivo.

AP: Punto de acceso (Access Point). Dispositivo parecido a un puente que une estaciones 802.11 inalámbricas a una red de estructura principal con cables.

BER: Tasa de error de bits. Número de bits recibidos en error.

BPSK: Cifrado de desfase binario. Un método de modulación que codifica los bits como desfases.

BSS: Conjunto de servicios básicos. Es la base de las redes 802.11. Un BSS es un conjunto de estaciones que están asociadas lógicamente entre sí.

CDMA: Acceso Múltiple por División de Código, es una técnica de codificación para señales digitales.

CRC: Comprobación de redundancia cíclica. Una suma de comprobación matemática que se puede utilizar para detectar los daños en los datos de las tramas transmitidas.

DSSS: Espectro disperso de secuencia directa (Direct-Sequence Spread Spectrum). Una técnica de transmisión que propaga una señal sobre una banda de frecuencia ancha para la transmisión.

DSL: Línea de Subscriptor Digital (Digital Subscriber Line) es una tecnología de módem de banda ancha para el acceso de los datos sobre las líneas telefónicas de cobre ordinario de casas o negocios.

ESS: Conjunto de servicio extendido. Colección lógica de puntos de acceso unidos.

ETSI: Instituto de Estándares en Telecomunicaciones Europeo Es un órgano de estandarización Europeo.

FCC: Comisión Federal de Comunicaciones. Agencia legislativa de los Estados Unidos.

FEC: Es una codificación para la corrección de errores, usada por el estándar IEEE 802.11a con tasas de codificación de 1/2, 2/3 o 3/4.

FFT: Transformada Rápida de Fourier empleada para el tratamiento digital de señales.

FH: Salto de frecuencia (Frequency Hopping).

FHSS: Espectro disperso de salto de frecuencia (Frequency Hopping Spread Spectrum). Una técnica que utiliza una señal de banda estrecha variable para propagar energía RF sobre una banda ancha.

HDSL: Alta Velocidad de Transmisión de Datos de Línea de Subscriptor Digital con aplicaciones en WAN, LAN y acceso al servidor.

HR/DSSS: Espectro disperso de secuencia directa de alta velocidad (High Rate Direct-Sequence Spread Spectrum). Abreviatura para las señales transmitidas por equipamiento 802.11b aunque similar a las primeras transmisiones de dos Mbps en muchos aspectos la codificación avanzada permite una velocidad de datos superior.

ICI: Interferencia Entre Portadoras, esta interferencia es provocada por los pequeños desfases de las frecuencias de las subportadoras.

IDFT: Transformada Discreta Inversa de Fourier, usada para el tratamiento digital de señales, siendo más complicada que la IFFT.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers. Organización profesional que ha estandarizado las redes IEEE 802 ubicuas.

IFFT: Transformada Inversa Rápida de Fourier es una técnica para el cálculo eficiente de la Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT).

ISM: Industrial Científico y Médico. La banda sin licencia ISM opera a 2.4 GHz operando muchos dispositivos entre ellos las LAN inalámbricas 80.211.

ISI: Interferencia entre símbolos. Debido a los retrasos entre múltiples rutas, los símbolos transmitidos pueden interferir entre sí y causar daño.

ITU: Unión Internacional de Telecomunicaciones.

LLC: Control de enlace lógico. Una especificación IEEE que permite más multiplexado sobre Ethernet.

MAC: Control de acceso al medio (Medium Access Control). Función en las redes IEEE que arbitran el uso de la capacidad de red y determinar las estaciones a las que se les permite utilizar el medio para la transmisión.

MIMO: Múltiples Entrada/Múltiples Salidas.

MPDU: Unidad de datos de protocolo.

OFDM: Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Una técnica que divide una banda de frecuencia ancha con una serie de bandas de frecuencia estrecha e invierte los datos multiplexados a través de los subcanales. 802.11a y 802.11g se basan OFDM.

OSI: Interconexión de sistemas abiertos (Open System Interconnection). Un compendio barroco de estándares de red que nunca se ha implantado porque ya existían las redes IP.

PHY: Abreviatura común de IEEE para la capa física.

PLCP: Procedimiento de convergencia de la capa física. El componente superior de la PHY de redes 802.11.

PMD: Dependiente del medio físico. El componente inferior de la PHY, responsable de transmitir señales de RF a otras estaciones 802.11.

PPDU: Unidad de datos de protocolo PLCP. La trama PLCP completa, incluyendo los encabezados PLCP, los encabezados MAC y las colas MAC y PLCP.

PSDU: Unidad de Datos del Servicio PLCP. Los datos del que PLCP es el responsable de entregar, por ejemplo, una trama Mac con encabezados.

PSK: Cifrado de desfase. Un método de transmisión de datos basados en desfases de la onda de la onda transmitida.

QAM: La modulación de amplitud en cuadratura (QAM), es una forma de modulación digital en donde la información digital está contenida, tanto en la amplitud como en la fase de la portadora transmitida.

QPSK: cifrado de desfase de cuadratura. Método de modulación que codifica bits como desfases.

RF: Radio Frecuencia (Radio Frequency). Utilizado como objetivo para señalar que algo pertenece a la interfaz de radio (“modulador RF”, ”energía RF”, etc.).

SYNC: Abreviatura de sincronización. Los bits transmitidos por el PLCP permiten a los remitentes y a los receptores sincronizar los cronómetros de los bits.

U-NII: Se refiere a la banda de canales operativos para 802.11a/j.

VDSL: Muy Alta Velocidad de Datos de Línea de Subscriptor Digital con aplicaciones en televisión de alta definición.

WEP (Protocolo de equivalencia con red cableada): WEP cifra los datos en su red de forma que sólo el destinatario deseado pueda acceder a ellos. Los cifrados de 64 y 128 bits son dos niveles de seguridad. WEP codifica los datos mediante una “clave” de cifrado antes de enviarlo al aire.

Wi-Fi: La Wi-Fi Alliance inicio en el programa de certificación Wi-Fi (“fidelidad inalámbrica”) para aprobar la interoperabilidad de la implantación 802.11. Originalmente el término se aplicaba a dispositivos que cumplieran con 802.11b (11Mbps HR/DSSS). Ahora incluye la interoperabilidad 802.11g y 802.11a así como la seguridad WPA.

WPA (Wi-Fi Protected Access): Emplea el cifrado de clave dinámico, lo que significa que la clave está cambiando constantemente y hacen que las incursiones en la red inalámbrica sean más difíciles que con WEP. WPA está considerado como uno de los más altos niveles de seguridad inalámbrica.

PASOS PARA EJECUTAR LA SIMULACIÓN.

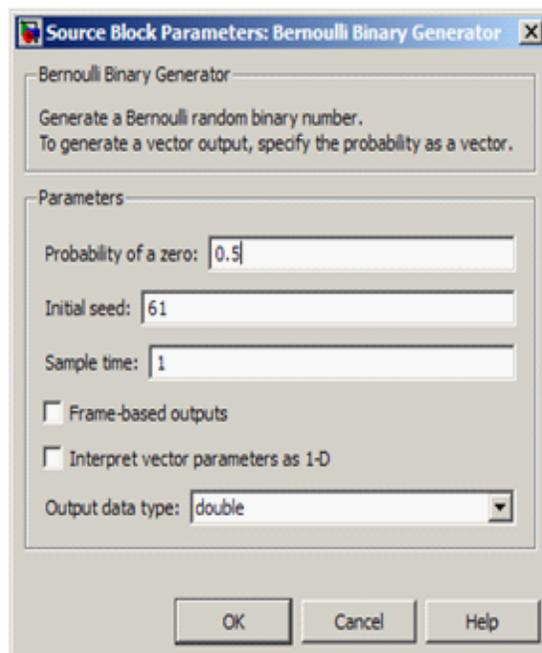
En este apartado se explica de manera breve como abrir la simulación de Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) echa en este trabajo, como también poder ejecutarla para poder apreciar cada uno de sus tipos de modulación que la comprende. Como punto importante se debe tener el programa de MatLab 7.4 instalado en la PC.

- Como primer paso se va a inicio y se da un clic en Mi PC.
- Una vez abierta Mi PC se da doble clic a la unidad o carpeta donde se encuentra el archivo de la simulación que se requiera abrir, en este caso la de OFDM.
- Ya localizado el archivo se da doble clic para abrir la simulación y automáticamente también se cargara el programa de MatLab 7.4.
- Por ultimo, ya abierta la simulación se da un clic en el botón de iniciar simulación (Start simulation), localizado en la parte superior de la pantalla.
- Al iniciarse la simulación se apreciara cada una de las distintas simulaciones, y para detener la simulación se da un clic en el botón de paro (Stop simulation), finalizando así la simulación.

INFORMACIÓN DE SIMULINK.

Generador de Bernoulli Binario:

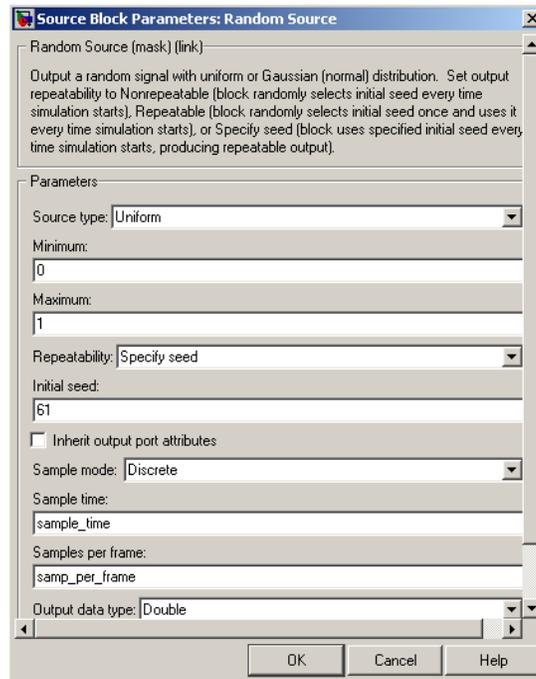
El bloque generador de Bernoulli Binario genera números al azar usando un binario de distribución de Bernoulli. La distribución de Bernoulli con parámetro p produce cero con probabilidad p , y con una probabilidad de $1-p$. La distribución de Bernoulli tiene valor $1-p$ y la varianza $p(1-p)$. La probabilidad de que un parámetro específico cero p , y puede ser cualquier número real entre cero y uno. Además, la forma de fila o columna de la semilla inicial y la probabilidad de los parámetros de un cero se convierten en la forma de una muestra basada en dos dimensiones señal de salida.



Fuente azar:

Genera valores distribuidos al azar de un marco de M valores procedentes de una distribución pseudoaleatoria de, donde se especifica M muestras por marco parámetro.

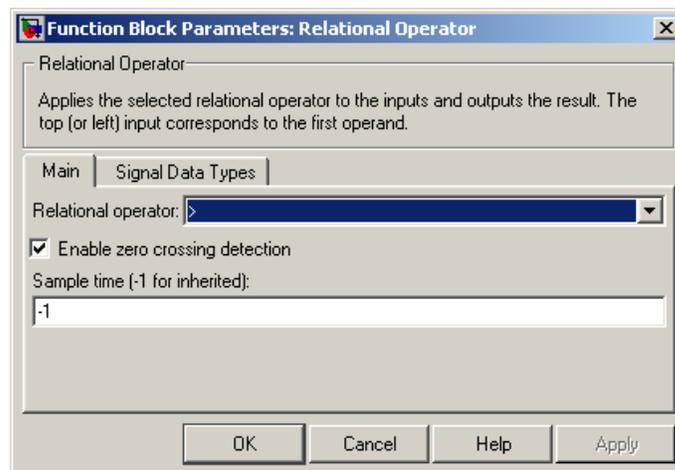
Tipo de distribución ocurre cuando el tipo de fuente del parámetro es uniforme, y la salida de las muestras se toman de una distribución uniforme cuyos valores mínimo y máximo tienen la misma probabilidad de ser seleccionados.



Operador Relacional:

El operador relacional realiza la comparación de sus dos entradas especificadas.

El operador relacional que conecta las dos entradas es seleccionado con el parámetro del operador relacional.

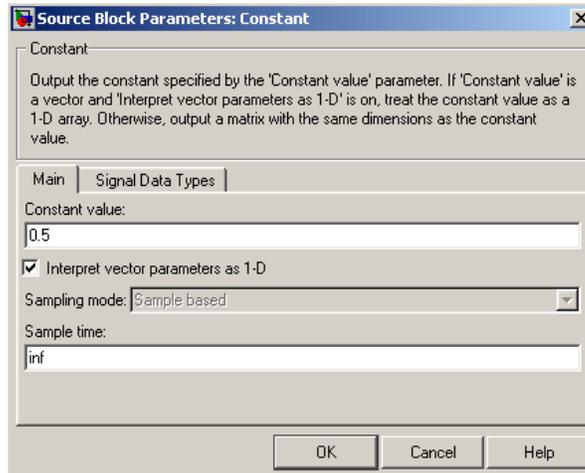


Operación	Descripción
== == ==	TRUE si la primera entrada es igual a la segunda entrada
~= ~= ~=	TRUE si la primera entrada no es igual a la segunda entrada
<<<	TRUE si la primera entrada es inferior a la segunda entrada
<= <= <=	TRUE si la primera entrada sea inferior o igual a la segunda entrada
>= >= >=	TRUE si la primera entrada es mayor o igual a la segunda entrada
>>>	TRUE si la primera entrada es mayor que la segunda entrada

Constante:

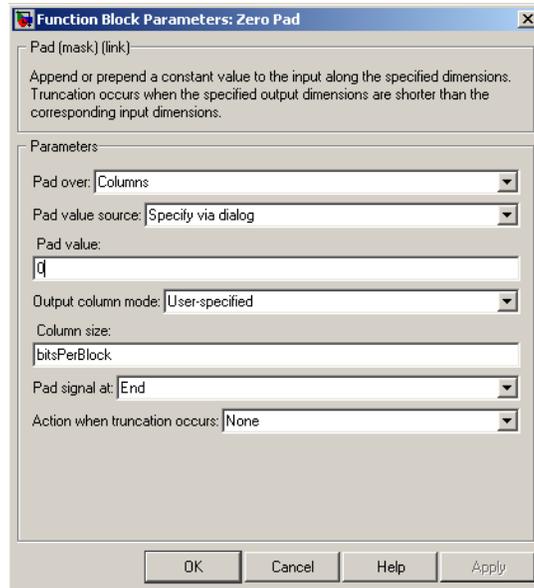
El bloque genera una constante real o complejo de valor constante.

El bloque genera un escalar, vector o matriz de salida, la salida del bloque tiene las mismas dimensiones.



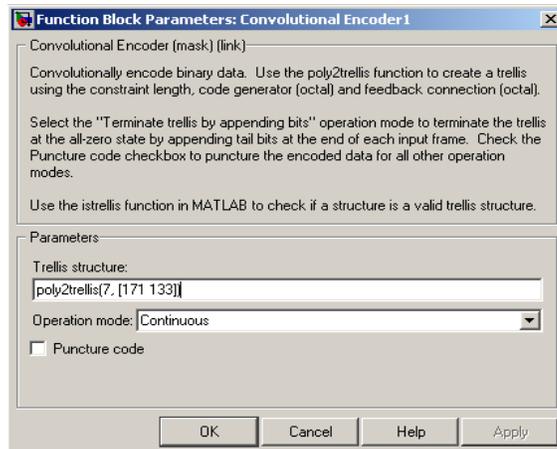
Zero Pad:

El bloque se extiende a las dimensiones de la entrada de relleno o truncan a lo largo de sus columnas, filas, o de cualquier dimensión (s) que se especifique. Truncamiento ocurre cuando se especifica que son las dimensiones de salida más corta que las dimensiones de entrada correspondiente. Si la entrada y salida de las longitudes son los mismos, el bloque es un paso a través.



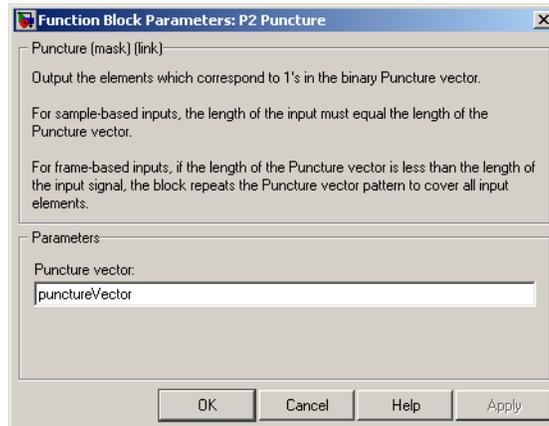
Codificador Convolutional:

Codifica una secuencia de vectores de entrada binaria para producir una secuencia de vectores binarios de salida. Este bloque es capaz de procesar varios símbolos a la vez.



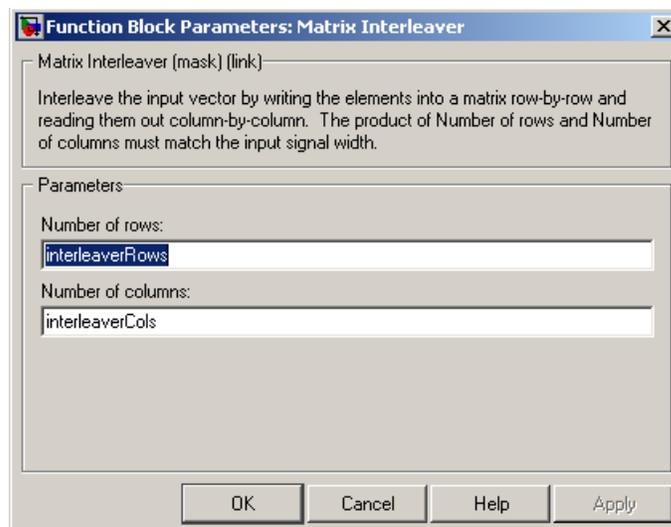
Punción:

El bloque crea una salida de un vector mediante la eliminación de elementos seleccionados de la entrada de vectores y la preservación de los demás.



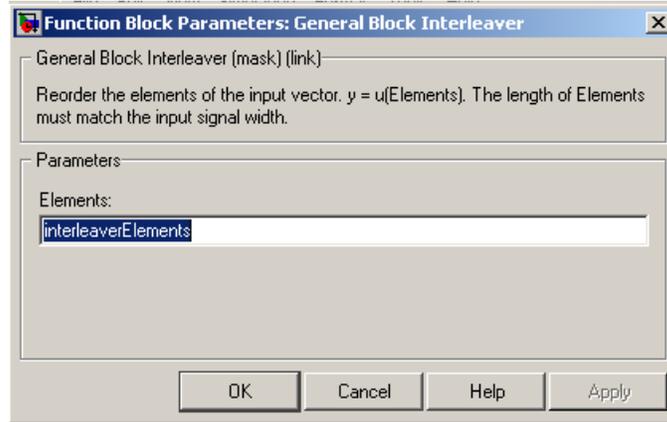
Matriz Interleaver:

Realiza el llenado de una matriz con los símbolos de entrada de fila a fila para, enviar el contenido a la matriz de puerto de salida columna por columna.



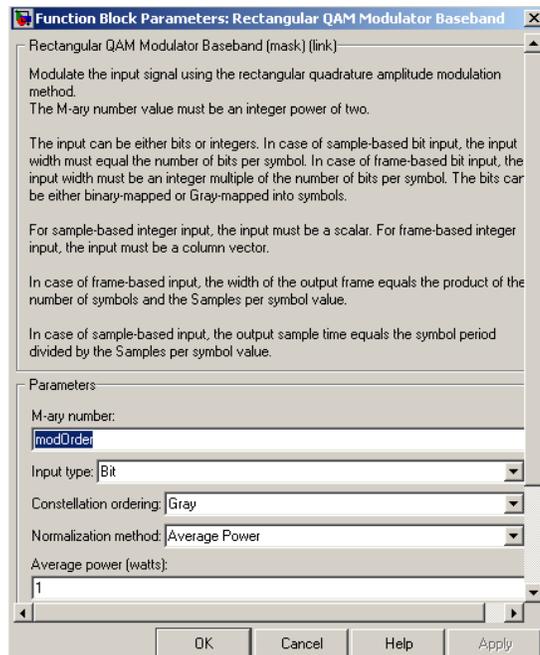
Bloque General Interleaver:

El bloque reorganiza los elementos de su vector de entrada sin repetir ni omitir ningún elemento. La entrada puede ser real o compleja.



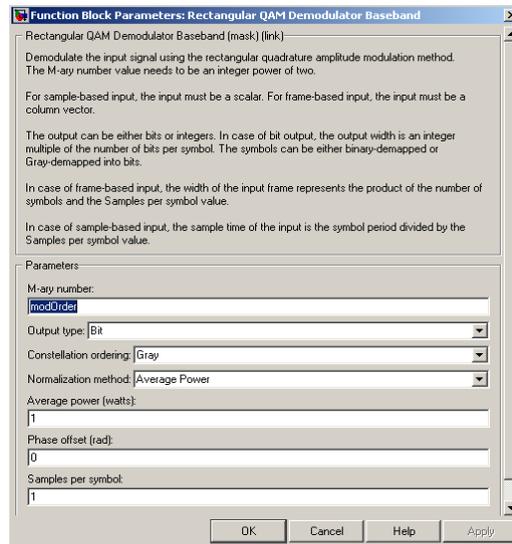
Modulador QAM:

Modula la señal de entrada donde realiza la modulación de amplitud en cuadratura. la entrada puede ser un escalar o un marco basado en un vector de la columna y debe ser de tipos de datos simples o dobles.



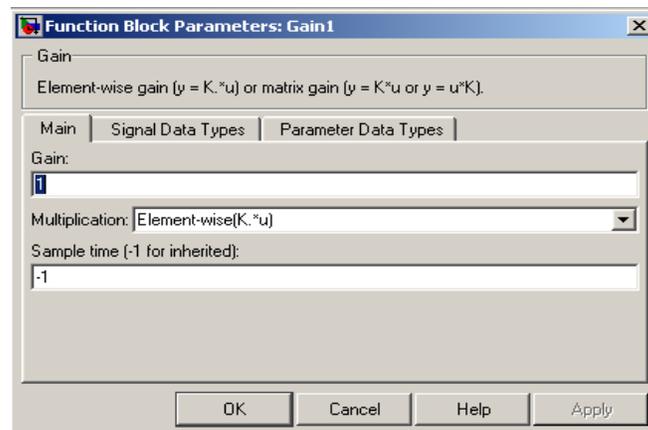
General Demodulador QAM:

Demodula una señal modulada donde se utiliza la modulación de amplitud en cuadratura. La entrada puede ser un escalar o un marco basado en vector de la columna y debe ser de tipos de datos simples o dobles.



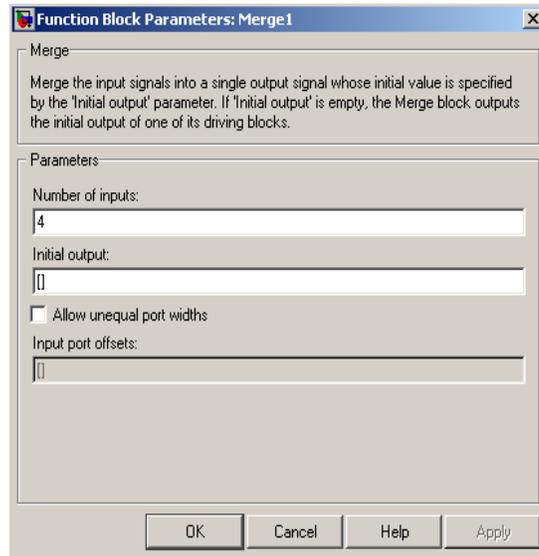
Ganancia:

Multiplica la entrada por una constante. El bloque de ganancia de entrada se multiplica por un valor constante (ganancia). La entrada y la ganancia de cada uno puede ser un escalar, vector o matriz.



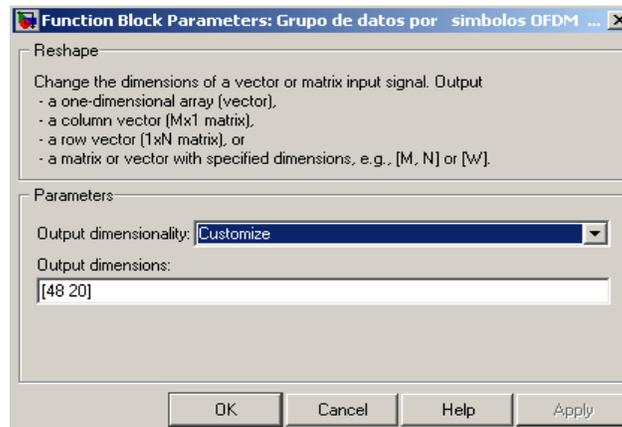
Combinar:

El bloque de combinación combina sus aportes en una sola línea de salida cuyo valor en cualquier momento es igual a la más reciente de la producción calculada de sus bloques de conducción.



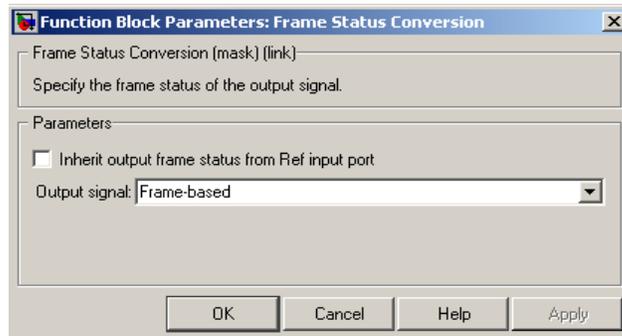
Remodelar:

El bloque remodela los cambios de la dimensionalidad de la señal de entrada a una dimensión que se especifique. Por ejemplo, puede utilizar el bloque de cambiar una N-elemento de un vector 1-por-N-o N-1 por la señal matriz, y viceversa.



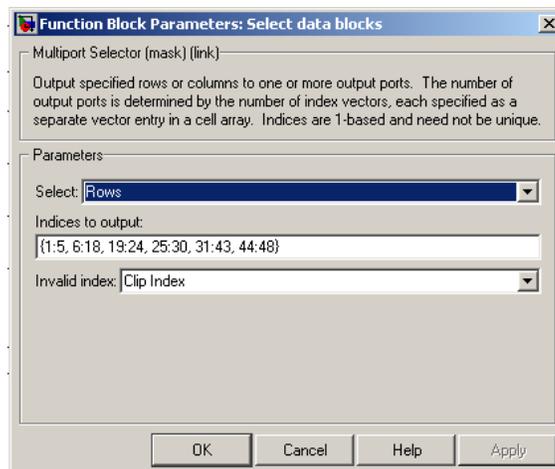
Marco de conversión:

Especifica el modo de muestreo de la señal de salida.



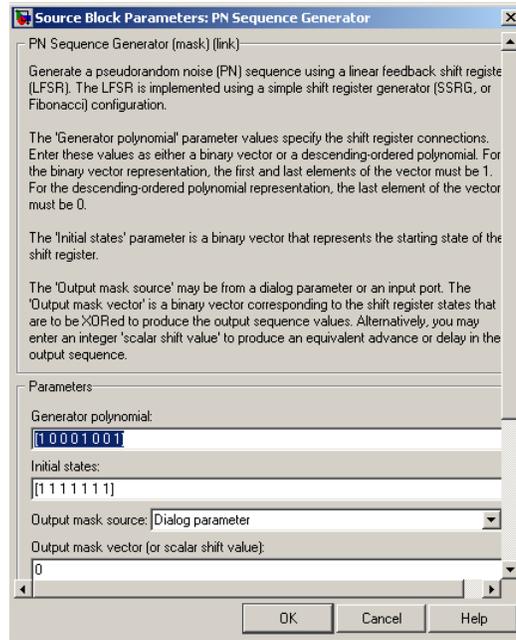
Selector multipuerto:

Distribuye arbitrariamente subconjuntos de filas o columnas de entrada a varios puertos de salida. Una longitud M-1-D de vectores de entrada la trata como una M-1-por la matriz.



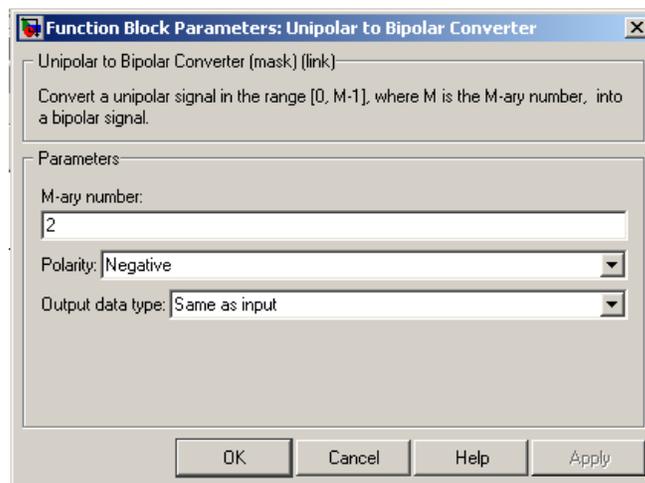
Secuencia PN Generador:

El bloque generador de secuencia PN genera una secuencia de números binarios pseudoaleatorios lineal, mediante un cambio de registro de la retroalimentación. El bloque generador de secuencia PN utiliza un cambio de registro para generar las secuencias.



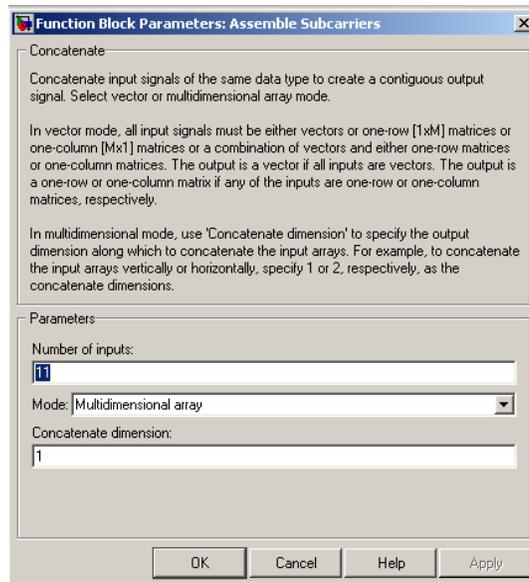
Convertor de Bipolar a Unipolar:

Convierte bloques de la señal de entrada unipolar a una señal de salida bipolar.



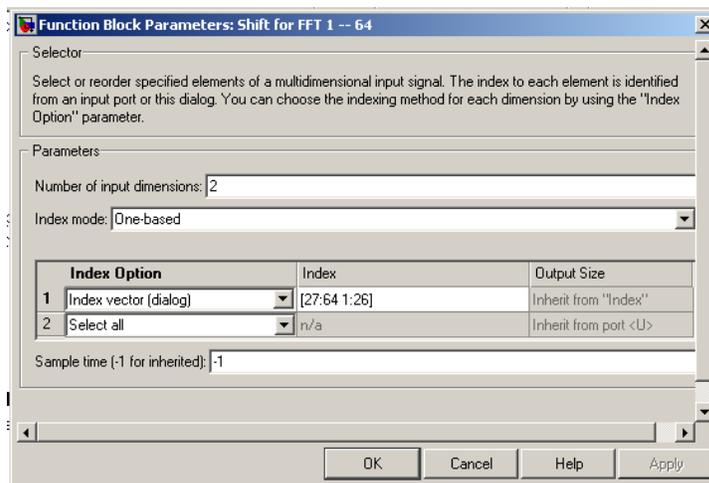
Concatenar Matriz:

El bloque concatena las señales en sus entradas para crear una señal de salida continua cuyos elementos residen en lugares contiguos en la memoria, en cualquier caso, las entradas son a partir de la concatenación de arriba a abajo, o de izquierda a derecha, de los puertos de entrada.



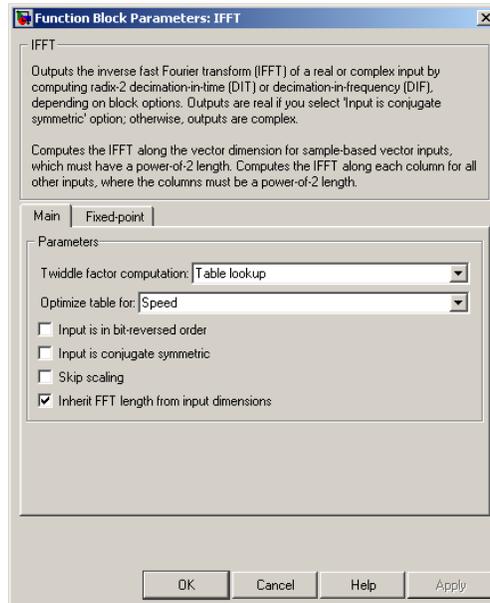
Selector:

El bloque selector genera como salida, la selección de los elementos de un vector o matriz de entrada.



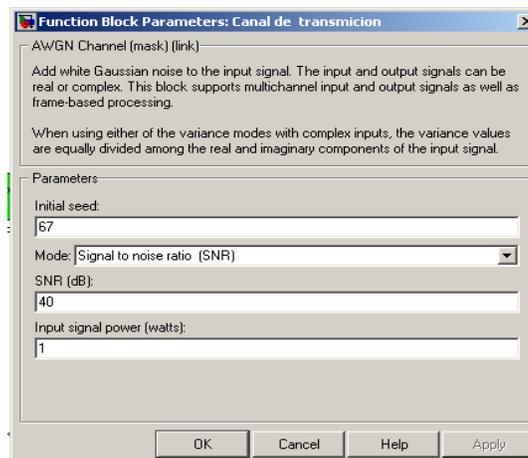
IFFT:

Calcula la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) de cada fila de una muestra basada en 1-por-P vector de entrada, u, o en la primera dimensión (P) de una entrada ND de la matriz, u.



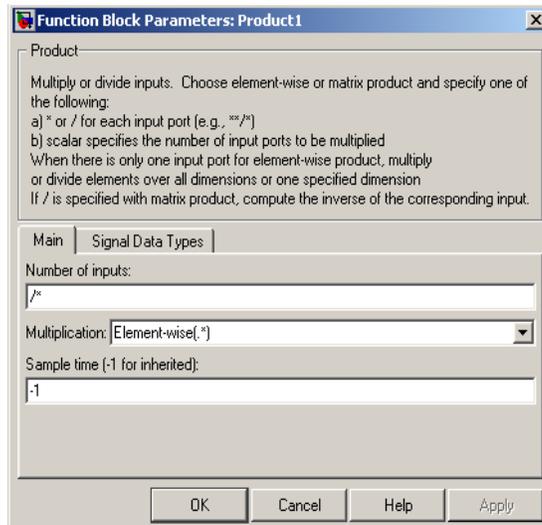
Multipath Rayleigh Fading Channel:

El bloque implementa un canal base, de simulación de un desvanecimiento de Rayleigh con propagación multitrayecto.



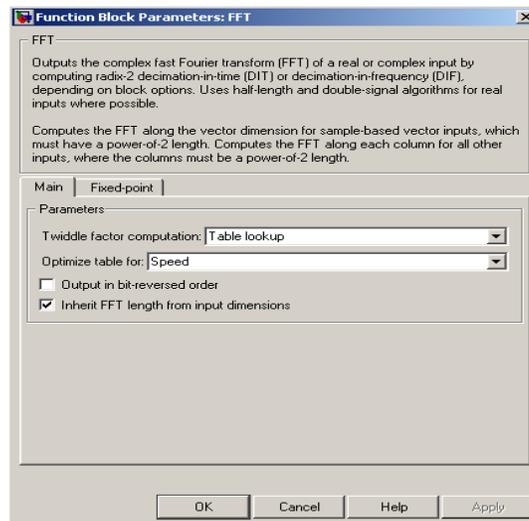
Producto:

El bloque realiza la multiplicación o división de sus entradas.



FFT:

Bloque de la FFT calcula la transformada rápida de Fourier (FFT) de cada fila de una muestra basada en 1-por-P vector de entrada, u, o en la primera dimensión (P) de una entrada ND matriz, u.



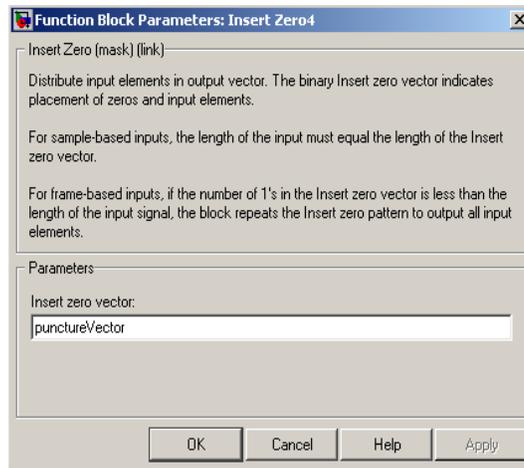
Terminador:

Este bloque puede ser utilizado como tapa de salida de un bloques cuyos puertos no están conectados a otros bloques. El uso de este bloque evita los mensajes de advertencia.



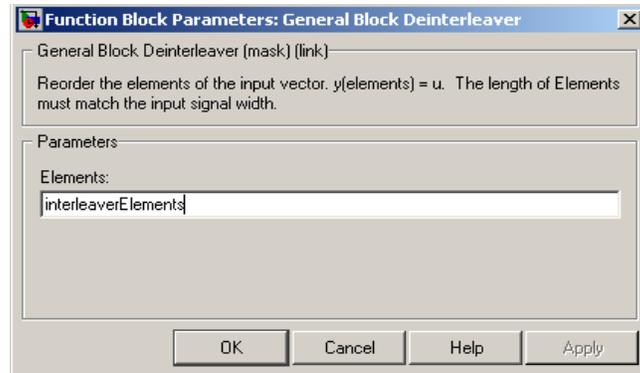
Insertar Cero:

Construye un bloque de vectores mediante la inserción de ceros entre los elementos del vector de entrada. La entrada puede ser real o complejo.



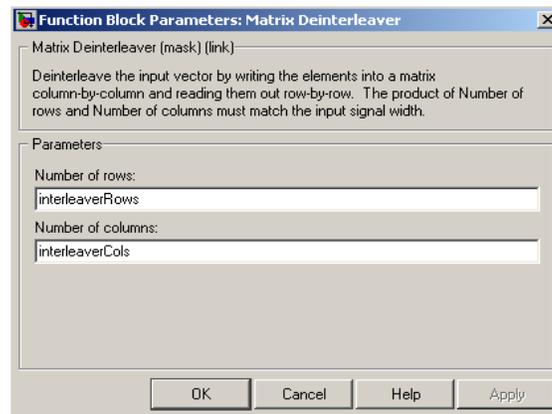
General bloque deinterleaver:

El bloque organiza los elementos de su vector de entrada sin repetir ni omitir ningún elemento. La entrada puede ser real o compleja.



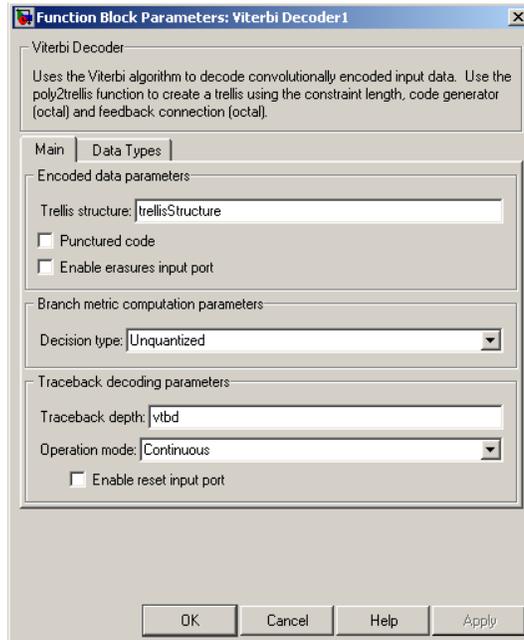
Matriz Deinterleaver:

El bloque deinterleaver realiza llenando una matriz con los símbolos de entrada columna por columna y, enviar el contenido a la matriz de puerto de salida fila por fila.



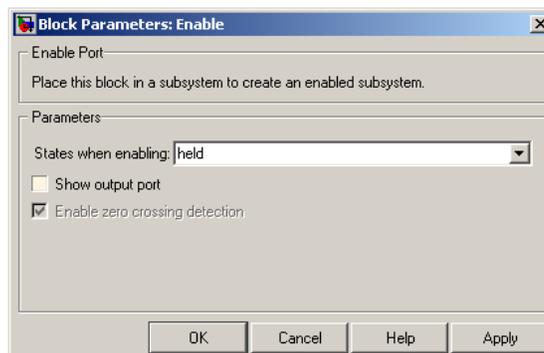
Decodificador de Vitervi:

Descifra los símbolos de entrada para producir símbolos binarios de salida utilizando algoritmo de Viterbi, Este bloque es capaz de procesar varios símbolos a la vez para un rendimiento más rápido.



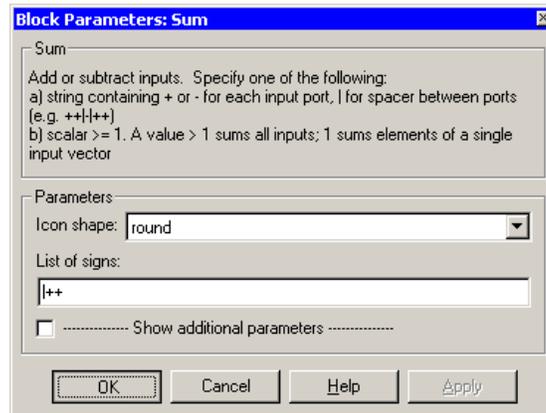
Enable:

Crea o permite la entrada de un sistema a un subsistema de un bloque.



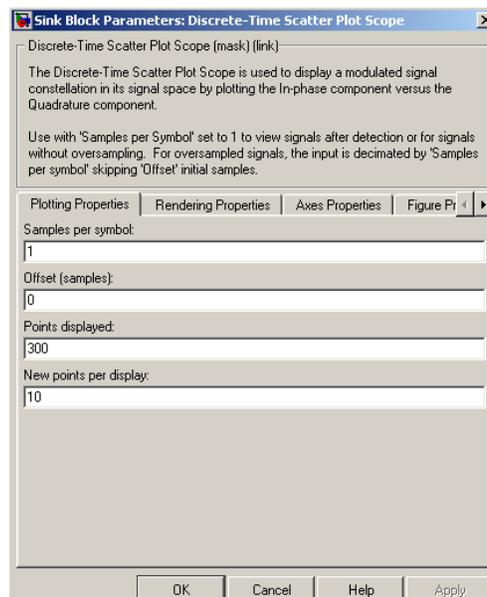
Suma:

Este bloque realiza la suma de sus posibles entradas y puede ser un vector, matriz o escalar. Su salida será de las mismas dimensiones.



Scope:

Este bloque es usado para mostrar la señal modulada en un diagrama de constelación, donde la señal es representada tanto en espacio como en cuadratura.



Display:

Este bloque muestra la salida, la cual debe de ser un valor numérico y estos pueden ser representados de forma long, short, decimal, binario etc.

