UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones

MODELO DE CAPA FÍSICA WLAN UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE

Autor: Ing. José Carlos Cruz Sandoval

Tutor: Dr.C Carlos Roche Beltrán

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Maestría en Telemática

Santa Clara

2019

"Año 61 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

MODELO DE CAPA FÍSICA WLAN UTILIZANDO RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Autor: Ing. José Carlos Cruz Sandoval

E-mail: jose.cruz@jovenclub.cu

Tutor: Dr.C Carlos Roche Beltrán

E-mail: croche@uclv.edu.cu

Santa Clara

2019

“Año 61 de la Revolución”

Hago constar que la presente Tesis en Opción al Título Académico de Máster en Telemática fue realizada en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de Maestría en Telemática, autorizando a que la misma sea utilizada por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentada en eventos, ni publicada sin autorización de la Universidad.

_____

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

_____

Firma del Tutor

_____ _____

Firma del Jefe de Departamento

Firma del Responsable de Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

"El conocimiento no es una vasija que se llena, sino un fuego que se enciende"

Plutarco

DEDICATORIA

A mis padres, quienes han sido mis ejemplos a seguir y han dedicado todos sus esfuerzos para permitirme poder realizar todas mis metas

A mis abuelos, quienes siempre me educaron con mucho amor, vivieron orgullosos de mí y hoy estuvieran y están muy feliz por este logro alcanzado.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia, por su apoyo brindado a lo largo de toda la etapa de mi vida estudiantil

A mi tutor Roche, por aceptar ayudarme en el desarrollo de este trabajo y ser un amigo incondicional durante toda mi vida universitaria

A mi novia Sindy y mis suegros, por la acogida y ayuda que me dieron

A todos mis profesores de la maestría, quienes dieron su mejor esfuerzo por inculcarme un amplio caudal de conocimientos

A todos mis compañeros de esta edición de la maestría, por compartir juntos estos años de arduo estudio y sacrificios

A mis compañeros de trabajo, por su apoyo en todo este tiempo

RESUMEN

Las redes WLAN han encontrado una variedad de escenarios de aplicación, tanto en el ámbito residencial como en entornos empresariales. En su implementación, las diferentes técnicas de transmisión de datos en la capa física, constituyen un factor importante, debido a que los mecanismos de codificación que emplean y los métodos para lograr la eficiencia en la transmisión, representan elementos fundamentales en cualquier sistema de transmisión inalámbricos. Por otra parte, la tecnología SDR está evolucionando igualmente los sistemas de comunicaciones inalámbricos. Los algoritmos actuales utilizados en la codificación y la presencia creciente de SDR posibilitan que resulte muy cómodo diseñar un modelo de capa física de una red WLAN, aprovechando las posibilidades de flexibilidad y reconfiguración que brinda la tecnología SDR.

En el presente trabajo se relacionan los principales conceptos, características y aplicaciones más utilizadas de las Redes Inalámbricas, utilizando la SDR. Se realizó un modelo de capa física del protocolo IEEE 802.11, empleando técnicas de transmisión de datos de Espectro Extendido por Secuencia Directa y Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, mediante el software de simulación MATLAB/SIMULINK, utilizando diferentes algoritmos de codificación, para analizar el comportamiento del modelo en los diferentes escenarios, atendiendo al parámetro Razón de Error de Bit. Al final se exponen los resultados a los que se llega, según el parámetro de comparación relacionado.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 10

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE LA SDR Y DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11 14

1.1. Estándar IEEE 802.11 14

1.1.1. Arquitectura del estándar IEEE 802.11 15

1.1.2. Ventajas y desventajas del estándar IEEE 802.11 18

1.2. Caracterización de la Radio Definida por Software 20

1.2.1. Definición para Radio Definida por Software 21

1.2.2. Arquitectura de la Radio Definida por Software 22

1.2.3. Ventajas y desventajas de la Radio Definida por Software 23

1.2.4. Implementación de SDR en plataformas de hardware y software 25

1.3 Investigaciones realizadas sobre WLAN y SDR 27

1.4. Conclusiones parciales 36

CAPÍTULO 2. TRANSMISIÓN DE DATOS EN SDR DE LA CAPA FÍSICA DE IEEE 802.11 37

2.1. Caracterización de la Capa Física de IEEE 802.11 37

2.2. Técnicas de transmisión de datos en la capa física 39

2.2.1 Espectro Extendido de Salto de Frecuencia 40

2.2.2 Espectro Extendido de Secuencia Directa 41

2.2.3 Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales 45

2.3. Codificación en la capa física 50

2.4. Herramienta de simulación MATLAB en el diseño de SDR 52

2.5. Conclusiones parciales 53

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL MODELO DE CAPA FÍSICA WLAN 55

3.1. Diseño en MATLAB/SIMULINK de la capa física WLAN 55

3.1.1. Modelo de capa física de IEEE 802.11 empleando DSSS 56

3.1.2. Modelo de capa física de IEEE 802.11 empleando OFDM 59

3.2. Evaluación de desempeño de capa física WLAN 60

3.2.1. Desempeño del modelo de capa física con DSSS 61

3.2.2. Desempeño del modelo de capa física con OFDM 63

3.3. Conclusiones parciales 65

CONCLUSIONES 66

RECOMENDACIONES 67

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 68

INTRODUCCIÓN

Los avances en las tecnologías inalámbricas han modificado los hábitos de comunicación de los consumidores. Las tecnologías inalámbricas son una parte esencial de la vida cotidiana de los usuarios, y su efecto se hace cada vez mayor. Cuando estos enormes números de dispositivos están conectados a Internet para formar una red IoT (Internet de las Cosas, por sus siglas en inglés), el primer desafío es ajustar la conectividad básica y capas de red para manejar la gran cantidad de puntos finales. Hay un número creciente de protocolos inalámbricos que tienen desarrollado, como ZigBee, BLE, LTE y WiFi nuevo protocolos para fines de comunicación loT y máquina a máquina (M2M) debido a diferentes requisitos exigentes[1]**.**

Las redes WLAN (*Wireless Local Area Network*) son una de las más populares y utilizadas en la actualidad. Basadas en el estándar IEEE 802.11, WLAN han sufrido un crecimiento importante a lo largo de los años y se han convertido en el método preferido por los usuarios para acceder a Internet. Las redes WLAN han encontrado una variedad de escenarios de aplicación, tanto en el ámbito residencial como en entornos empresariales, por las ventajas que poseen en cuanto a la movilidad, facilidad de instalación y flexibilidad ya que permiten llegar a zonas donde no es posible el cableado o este resulta más costoso. Sin embargo, en su implementación, la seguridad es un aspecto importante ya que a diferencia de las redes cableadas no es necesaria una conexión física. En una red WLAN el medio de transmisión es el aire y los datos son transmitidos mediante ondas de radio que se propagan entre clientes inalámbricos y puntos de acceso (*Access Point*). Las ondas de radio atraviesan objetos como techos, pisos y paredes, y los datos transmitidos pueden llegar a destinatarios no deseados. De esta manera, terceros tienen la posibilidad de acceder a dicha información[2]. La naturaleza de las comunicaciones inalámbricas hace que sea difícil de proteger las señales transmitidas, de destinatarios no deseados. Como consecuencia, los usuarios adversarios son comúnmente modelados como un receptor no autorizado que intenta extraer información de una transmisión en curso[3].

Los algoritmos actuales y métodos de cifrado que se utilizan para la tecnología inalámbrica tienen vulnerabilidades que lo convierten en un terreno fértil para los hackers e intrusos para actividades ilegales como espionaje, destruir datos, obtener controles de acceso no autorizados y cambiar la integridad de los datos. Los problemas de seguridad inalámbrica han ido aumentando con el creciente número de usuarios[4]. Por tanto, desarrollar mecanismos robustos y eficientes que protejan la

información que se transmite es de vital importancia, para tal efecto se debe tener en consideración dos características principales. La primera de ellas es la fiabilidad del sistema. La segunda es el secreto del mensaje[5].

Debido al rápido crecimiento y proliferación de dispositivos inalámbricos que facilitan las actividades del ser humano orientadas a la transmisión de datos, se ha propulsado el uso dentro del espectro RF, de la banda Industrial, Científica y Médica (ISM) que alberga muchas de las tecnologías utilizadas para la conexión de estos dispositivos como: WiFi, Bluetooth, LoRa, SigFox, Zigbee (IEEE 802.15.4). Todas estas tecnologías listadas anteriormente, pueden ser analizadas mediante una placa SDR (*Software Defined Radio*) que cubra la banda ISM[6].

La evolución constante de la tecnología, ha hecho posible llevar a la práctica algunos de los conceptos que se han ido gestando y madurando en los últimos años en el SDR, término acuñado por Joe Mitola en 1991, y que consiste en un dispositivo radio en el cual algunas de sus funciones de nivel físico (o todas) pueden modificarse a través del software, lo que proporciona mayor flexibilidad frente al hardware tradicional, permitiendo por ejemplo que se puedan añadir nuevas capacidades al hardware (o modificar las existentes), sin la necesidad de reemplazarlo constantemente para su actualización, reduciendo de esta forma los costes que ello implica[7]. Sin embargo, a pesar que, de forma teórica e investigativa, algunos autores han planteado en sus investigaciones el hecho de poder simular e implementar usando SDR, estándares inalámbricos como IEEE 802.11, este último no ha sido objeto de investigación profunda, de forma que no se ha planteado en ningún artículo, la realización del diseño y simulación de su capa física, ni la evaluación de desempeño del diseño atendiendo a los parámetros más empleados en comunicaciones. De igual forma no ha sido abordado su implementación en ninguna plataforma de hardware.

Lo anterior motiva la siguiente investigación y se enuncia el **problema científico** siguiente: ¿Cómo diseñar y evaluar el comportamiento de la capa física de WLAN utilizando la tecnología de Radio Definida por Software?

Esta investigación tiene como **objeto de estudio** la capa física de WLAN y el **campo de acción** lo constituye la tecnología de Radio Definida por Software. Por tanto, se propone como **objetivo general** desarrollar un modelo de capa física que garantice el desempeño adecuado de WLAN utilizando la tecnología de Radio Definida por Software.

A partir del objetivo general, se derivan como **objetivos específicos** los siguientes:

- Caracterizar la Radio Definida por Software y el estándar IEEE 802.11.
- Identificar tendencias actuales vinculadas a la aplicación de WLAN en SDR.
- Describir las técnicas de transmisión que se implementan en la capa física WLAN.
- Diseñar un modelo de capa física de WLAN mediante la herramienta de simulación MATLAB/SIMULINK.
- Evaluar el desempeño del modelo

De los objetivos específicos propuestos, surgen las siguientes **interrogantes científicas**:

- ¿Qué características presentan los protocolos existentes de redes inalámbricas?
- ¿Qué características presenta la tecnología Radio Definida por Software?
- ¿Cómo describir los diferentes algoritmos de seguridad existentes para las redes inalámbricas?
- ¿Qué hacer para desarrollar, utilizando la herramienta de simulación MATLAB/SIMULINK, un modelo de seguridad en redes inalámbricas utilizando SDR?

Los resultados de esta investigación estarán enmarcados en potenciar el trabajo con la Radio Definida por Software, mediante el desarrollo de sistemas de telecomunicaciones muy utilizados, intencionando más su aplicabilidad a escenarios reales, dada su flexibilidad a las variaciones en cuanto a tecnologías, así como constituirá material de valor teórico complementario para el estudio de los sistemas de comunicaciones inalámbricos, así como para los investigadores de la temática.

Los aportes de este trabajo son:

- Utilidad metodológica: Material para el aprendizaje en el conocimiento de la tecnología SDR e incentivo en el uso de la herramienta de simulación MATLAB/SIMULINK.
- Conveniencia: Modelo diseñado en una tecnología flexible.
- Implicaciones prácticas: Modelo para SDR que constituye una forma de implementar la capa física WLAN.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma: Resumen, Introducción, Tres capítulos, Conclusiones, Recomendaciones y Referencias Bibliográficas.

En el primer capítulo se abordan los principales elementos teóricos concernientes a los protocolos de redes inalámbricas, sus características, alcance y aplicaciones, así como de la tecnología Radio Definida por Software, su estructura e implementación en plataformas de hardware. Igualmente se abordan las investigaciones realizadas acerca de la implementación de redes WLAN en Radio Definida por Software.

En el segundo capítulo se describen las principales características de la capa física del protocolo de comunicaciones inalámbrico IEEE 802.11 y de las distintas técnicas de transmisión de datos y acceso al medio. De igual manera se abordan las ventajas del software de simulación MATLAB/SIMULINK como una de las herramientas más utilizadas para la simulación de sistemas inalámbricos que emplean Radio Definida por Software.

En el tercer capítulo se desarrolla, mediante la herramienta de simulación MATLAB/SIMULINK, el modelo de capa física del protocolo IEEE 802.11 utilizando Radio Definida por Software, se exponen los resultados de la simulación y se realizan análisis comparativos en cuanto a los modelos diseñados, evaluando su desempeño teniendo en cuenta la Razón de Error de Bit de los sistemas.

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE LA SDR Y DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11

Gracias a la versatilidad que proporcionan a los equipos de hardware, la implementación en software de diversas funcionalidades brindadas por la tecnología de Radio Definida por Software, es posible implementar diversos sistemas de comunicaciones, principalmente inalámbricos. En este mismo contexto, las redes basadas en el estándar IEEE 802.11 WLAN han experimentado un crecimiento importante y se han convertido en el método preferido por los usuarios para acceder a Internet.

En este capítulo se describen las potencialidades que convierten al estándar IEEE 802.11 y a la Radio Definida por Software en tecnologías de uso avanzado en el campo de las telecomunicaciones, por su velocidad, movilidad, adaptabilidad y capacidad de reconfiguración. Se exponen las características, arquitectura, ventajas y desventajas del estándar IEEE 802.11 y se abordan la definición, las características generales, ventajas de la tecnología SDR, así como su implementación en plataformas de hardware.

1.1. Estándar IEEE 802.11

La introducción del estándar IEEE 802.11 supuso un gran impacto para la cobertura de red en hogares, oficinas y áreas públicas. Diversas organizaciones reguladoras en el entorno de las telecomunicaciones han definido los conceptos principales del estándar.

El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define las tecnologías 802.11 en el Nivel Físico y en la subcapa *Media Access Control* (MAC) del Nivel de Enlace del modelo Open System Interconnection (OSI)[8].

IEEE 802.11 es un estándar internacional desarrollado para redes de área local inalámbricas (WLAN). Ofrece grandes velocidades de transmisión de datos y utilizan un gran consumo de energía, permite implementar redes de topología ad-hoc, estrella, árbol y el cifrado de datos es a través de WEP, WPA o WPA2.

La familia de estándares de redes WLAN IEEE 802.11 ha sido la causa de la incorporación y el desarrollo rápido de las redes WLAN en el mercado. Dentro del grupo de trabajo IEEE 802.11 se pueden encontrar diferentes estándares[9]:

• IEEE 802.11a: Trabaja en la banda de 5GHz, y utiliza la técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) con 52 subportadoras. El estándar 802.11a tiene doce canales sin solapamiento, 8 para red inalámbrica y 4 para conexiones punto a punto.

• IEEE 802.11b: Funciona en la banda de frecuencia de 2.4 GHz. Tiene una velocidad máxima de transmisión de 11 Mbps y utiliza el método de acceso definido en el estándar original CSMA/CA. Debido al espacio ocupado por la codificación del protocolo CSMA/CA, la velocidad real de transmisión se reduce a 5.9 Mbps sobre TCP y 7.1 Mbps sobre UDP.

• IEEE 802.11g: En junio de 2003 aparece el estándar 802.11g con la idea de aumentar la velocidad sin renunciar a las ventajas de la banda de los 2.4 GHz. Esta norma, permite transmitir datos a 54 Mbps que en promedio es de 22 Mbps de velocidad real de transferencia. Es compatible con el protocolo 802.11b y puede trabajar con el protocolo 802.11a cambiando la configuración de los equipos. Esto es debido a que 802.11g, puede operar con las tecnologías OFDM y DSSS.

Pese a la compatibilidad, en redes bajo el estándar b, la presencia de nodos g reduce notablemente la velocidad de transmisión, debido a que los clientes 802.11b no comprenden los mecanismos de envío de OFDM.

• IEEE 802.11n: El estándar 802.11n fue ratificado en septiembre de 2009 por la organización IEEE. La base de su funcionamiento es la incorporación de varias antenas, que permiten utilizar varios canales para enviar y recibir datos simultáneamente, mejorando de forma sustancial la señal recibida por el receptor y multiplicándose de esta forma el ancho de banda utilizado. Esto es lo que se conoce como la tecnología MIMO

(Multiple Input Multiple Output).

• IEEE 802.11ac: Es una mejora de la norma 802.11n que se ha desarrollado entre 2012 y 2013. La industria ya trabaja en nuevos protocolos y dispositivos basados en el protocolo 802.11ac. El sistema permite unas tasas de transferencia de 1Gbps en la banda de 5GHz, un ancho de banda hasta 160 MHz, hasta ocho flujos MIMO y modulación de alta densidad. Otra de las ventajas con respecto a las versiones anteriores, es el alcance de cobertura, que llega hasta un máximo de 90-100 metros mediante el uso de tres antenas internas.

1.1.1. Arquitectura del estándar IEEE 802.11

La tecnología WLAN puede tomar el lugar de una red cableada tradicional o extender sus capacidades. De manera muy similar a sus contrapartes cableadas, el equipamiento WLAN consiste

en adaptadores clientes y *Access Points*. Se puede disponer de una topología punto-punto también conocida como Ad- Hoc con la utilización solamente de los adaptadores de cliente para el caso de instalaciones provisionales y pequeñas, mientras que si se requiere de mayor funcionalidad y prestaciones se incorporan los *Access Points* de forma que trabajan en topología estrella y se conoce con el nombre de red inalámbrica de infraestructura[10]. La figura 1 presenta un esquema de ambas topologías.

a) b)

Figura 1.1 Topología de red WLAN [11] (a) Ad-Hoc. (b) Infraestructura

Cuando se utiliza el modo ad hoc, todos los dispositivos de la red inalámbrica se comunican directamente entre sí, de igual a igual, en el modo de comunicación punto a punto. La red no tiene ninguna estructura o puntos fijos. No se requiere ningún punto de acceso o AP (*Access Point*) para la comunicación entre dispositivos. En este modo, las desconexiones al azar de dispositivos pueden ocurrir con frecuencia y también la gestión de la red. El modo ad hoc tiene otra limitación y es sin la instalación de router o gateways, las redes en modo ad hoc no pueden conectarse con una red de área local cableada y en consecuencia no puede acceder a Internet[12].

En modo infraestructura, todos los dispositivos están conectados a la red inalámbrica mediante AP (*Access Point*). La conexión de varios AP a través de una red troncal Ethernet por cable puede extender aún más la cobertura de la red inalámbrica permitiendo que un dispositivo móvil se salga fuera del rango de cobertura de un punto de acceso y entre en el rango de otro. Consecuentemente, los clientes inalámbricos pueden moverse libremente del dominio de un AP a otro y seguir manteniendo la conexión de red. El modo de infraestructura ofrece una mayor seguridad, facilidad

de gestión, y mucha más escalabilidad y estabilidad. Sin embargo, el modo de infraestructura incurre en un costo adicional debido al despliegue de puntos de acceso[13].

La arquitectura lógica del estándar 802.11 contiene varios componentes principales: la estación (STA), el punto de acceso inalámbrico (AP), el conjunto independiente de servicios básicos (IBSS), el conjunto de servicios básicos (BSS), la red de distribución (DS), y el conjunto de servicios extendidos (ESS). Algunos de los componentes de la arquitectura lógica 802.11 corresponden directamente a dispositivos de hardware, tales como estaciones y puntos de acceso inalámbricos. La estación contiene una tarjeta de adaptador, tarjeta PC o un dispositivo integrado para poder proporcionar conectividad inalámbrica. Las funciones del punto de acceso inalámbrico son servir como un puente entre las estaciones y la red troncal existente para el acceso a la red[14]**.**

El comité del estándar IEEE 802 define dos capas: Capa Física y de Enlace. Divide en dos subcapas la capa de enlace de datos del modelo de referencia OSI, la subcapa de control de enlace lógico (*Logical Link Control- LLC*) y la subcapa de control de acceso al medio (*Media Access Control-MAC*). Todos los componentes de la arquitectura 802.11 pertenecen a cualquiera de las dos capas, la subcapa de control de acceso al medio de la capa de enlace de datos o bien de la capa física (*Physical-PHY*). En la figura 2 se muestra la pila de protocolos del estándar 802.11[15].

La capa física es la interfaz entre la capa MAC y el medio inalámbrico por el que se propaga la señal. Entre sus funciones está realizar el intercambio de tramas con la capa MAC, transmitir las tramas a través del medio inalámbrico utilizando diferentes esquemas de modulación y brindar la posibilidad a la MAC de conocer si el medio está ocupado.

Figura 1.2 Pila de protocolos del estándar IEE 802.11[14]

La capa física proporciona una serie de servicios a la capa MAC o capa de acceso al medio. Diferentes tecnologías de capa física se definen para transmitir por el medio inalámbrico. La capa física de servicios consiste en dos protocolos[10]:

- Una función de convergencia de capa física, que adapta las capacidades del sistema físico dependiente del medio (PMD). Esta función es implementada por el protocolo PLCP (*Physic Layer Convergence Protocol*) o procedimiento de convergencia de capa física, que define una forma de mapear MPDUs o unidades de datos MAC en un formato de tramas susceptibles de ser transmitidas o recibidas entre diferentes estaciones o STASs a través de la capa PMD.
- Un sistema PMD, cuya función define las características para transmitir y recibir a través de un medio sin cables entre dos o más STAs.

El control de acceso al medio tiene como misión coordinar de la forma más eficiente posible el acceso al medio de transmisión de las distintas estaciones que lo comparten. El MAC de 802.11 adapta con éxito el MAC de Ethernet al contexto diferente de una red radio; esto se logra esencialmente reemplazando el mecanismo CSMA/CD por CSMA/CA. MAC enfrenta retos como la calidad fluctuante y no siempre óptima de los enlaces radio y el hecho de que los nodos colisionen entre sí, conocido como el fenómeno del nodo oculto, problema este que se enfrenta utilizando el mecanismo RTS/CTS[16].

La Capa MAC se encarga de[5]:

- Controlar el acceso al medio.
- Fragmentación, desfragmentación y encriptado.
- Gestión de potencia, sincronización y escaneo del medio.
- Control de flujo y el manejo de múltiples tasas de transmisión

1.1.2. Ventajas y desventajas del estándar IEEE 802.11

Algunas de las ventajas que supone la utilización de la tecnología inalámbrica son[14]:

- Accesibilidad y flexibilidad: Las comunicaciones inalámbricas llegan a lugares donde la comunicación cableada no tiene acceso.
- Coste: Las comunicaciones inalámbricas nos ahorran el coste asociado a la instalación del cableado y los derivados de los cambios de entorno físico, que podrían ser todavía más importantes.

- Movilidad: Las comunicaciones inalámbricas permiten tener información en tiempo real y en cualquier lugar del mundo. Esta funcionalidad puede permitir a muchas empresas mejorar su productividad y sus posibilidades de negocio.
- Escalabilidad. Las comunicaciones sin cables se adaptan fácilmente a los cambios de topología de la red y, además, la reubicación de los terminales se facilita enormemente.

Las limitaciones principales que podemos encontrar en las comunicaciones inalámbricas bajo el estándar 802.11 son las siguientes[14]:

- Consumo: Los terminales móviles suelen trabajar con baterías que limitan la potencia de transmisión de los dispositivos, lo que repercute directamente en el alcance de las redes.
- Capacidad de transferencia limitada: El espectro electromagnético es un recurso limitado.
- Calidad: Las transferencias inalámbricas se ven sometidas a interferencias y ruidos.
- Seguridad: La utilización del espectro electromagnético como medio de comunicación implica que cualquier persona puede acceder a la información sin ningún tipo de limitación física

1.2. Caracterización de la Radio Definida por Software

Durante el proceso de evolución de las telecomunicaciones inalámbricas se han generado gran cantidad de tecnologías que tienen como objetivo facilitar y optimizar el intercambio de información entre entidades geográficamente dispersas, pero las mismas diferencias técnicas crean incompatibilidades entre los estándares desarrollados y los equipos relacionados, complicando aspectos que van desde la prestación de servicios como el roaming, hasta la actualización y reemplazo de tecnologías a bajo costo. El concepto SDR surge para solucionar parcialmente estos inconvenientes de compatibilidad e interoperabilidad, ya que define un conjunto de procedimientos y técnicas orientadas a realizar el procesamiento de señales de información por medio de un dispositivo de propósito general, el cual puede ser modificado mediante software logrando así un cambio dinámico, automático y eficiente entre tecnologías sin tener que incurrir en gastos/costos por concepto de nuevos equipos y evitando incrementos considerables en el tamaño de éstos [17].

Las características, de forma general, que presenta la tecnología SDR son la reconfigurabilidad, conectividad ubicua, la multifuncionalidad, facilidad de actualización y movilidad mundial[7] .

La interoperabilidad entre diversas tecnologías es una característica distintiva de SDR. En los Estados Unidos de América se aplicó en el mercado militar el sistema de radio táctica conjunta (JTRS), especificación que proporciona interoperabilidad entre los equipos de radio utilizados por los aviones de combate, soportando múltiples formas de onda de diversos contratistas de defensa[18] .

AN/USC-61 Digital Modular Radio (DMR), diseñado por General Dynamics, es un equipo full-dúplex de cuatro canales, reconfigurable y controlado por software, incorporan tanto submarinos como barcos de la marina norteamericana. Soporta múltiples modulaciones implementadas vía software, como por ejemplo AM para aviación, FM, para voz y datos, FSK/BPSK/SBPSK/QPSK. Compañías como la *Sandbridge Technologies* han producido procesadores en banda base, capaces de manejar varios estándares de radiocomunicaciones como GSM/GPRS, WCDMA, WiFi y GPS, así como también han sido habilitados varios formatos de multimedia como H.264, MPEG-4, MP-3 y WMA [19].

1.2.1. Definición para Radio Definida por Software

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) definió en su Recomendación UIT-R M.1797 lo siguiente sobre la tecnología SDR: *"Una radio en la cual los parámetros de explotación RF, con inclusión, entre otros, de la gama de frecuencias, el tipo de modulación o la potencia de salida, pueden fijarse o alterarse mediante programas informáticos y/o la técnica mediante la cual esto se logra"* [20].

La Radio Definida por Software (*Software Defined Radio*, SDR) es una tecnología para radio comunicación. Está basada en protocolos inalámbricos definidos por software, a diferencia de soluciones basadas en hardware. Esto se traduce en la compatibilidad con diversas configuraciones y funcionalidades, como la actualización orientada a la reprogramación, sin necesidad de reemplazar el hardware en el que están son implementados. Esto abre las puertas a la posibilidad de realización de dispositivos inalámbricos multibanda y multifuncionales[21].

Aunque para [22] no hay una definición universalmente aceptada de la SDR, su principal característica es la flexibilidad que tiene para variar la forma de la onda de radio cambiando la aplicación o modificando sus parámetros, sin necesidad de cambiar la plataforma de la SDR, entendida como el equipo y el ambiente de operación donde la aplicación de la forma de onda está en ejecución. Se asume que la flexibilidad se refiere por lo menos a diferentes bandas (múltiples bandas) y a diferentes modulaciones (múltiples modulaciones).

Un foro especial que se ha formado, denominado "*Wireless Innovation Forum*", integrado por investigadores, fabricantes de equipos de telecomunicaciones y operadores de distintos servicios, se ocupa de impulsar estas nuevas tecnologías. Este foro ha definido el concepto de SDR como "equipos de radiocomunicaciones en los que una parte o la totalidad de las funciones de la capa física son ejecutadas por programas de software" [23].

Según [24], SDR es un concepto que permite cambiar los parámetros de radio, tales como frecuencia portadora, formato de modulación y ancho de banda de señal a través del software. La reconfigurabilidad dinámica en respuesta a niveles de relación señal/ruido (*Signal Noise Ratio*, SNR) instantáneos o a la disponibilidad de energía de la batería, es necesaria en SDR.

SDR utiliza esencialmente una combinación de software y hardware para soportar dinámicamente múltiples estándares de comunicación y ha sido reconocido como una de las tecnologías más importantes para la comunicación inalámbrica.

1.2.2. Arquitectura de la Radio Definida por Software

La capacidad de un sistema radio para habilitar múltiples interfaces aéreas, agregar nuevas a medida que se desarrollan, e incluso actuar como un puente entre sistemas que son incompatibles por naturaleza, se deriva de la capacidad soportada por SDR para agregar o reconfigurar interfaces aire utilizando software[25].

El esquema básico de SDR está conformado por tres bloques: Sección de Radio Frecuencia (*Radio Frequency-RF*), sección de Frecuencia Intermedia (*Intermediate Frequency-IF*) y sección de banda base [23]. La figura 1.2 muestra la arquitectura en bloques de la plataforma SDR.

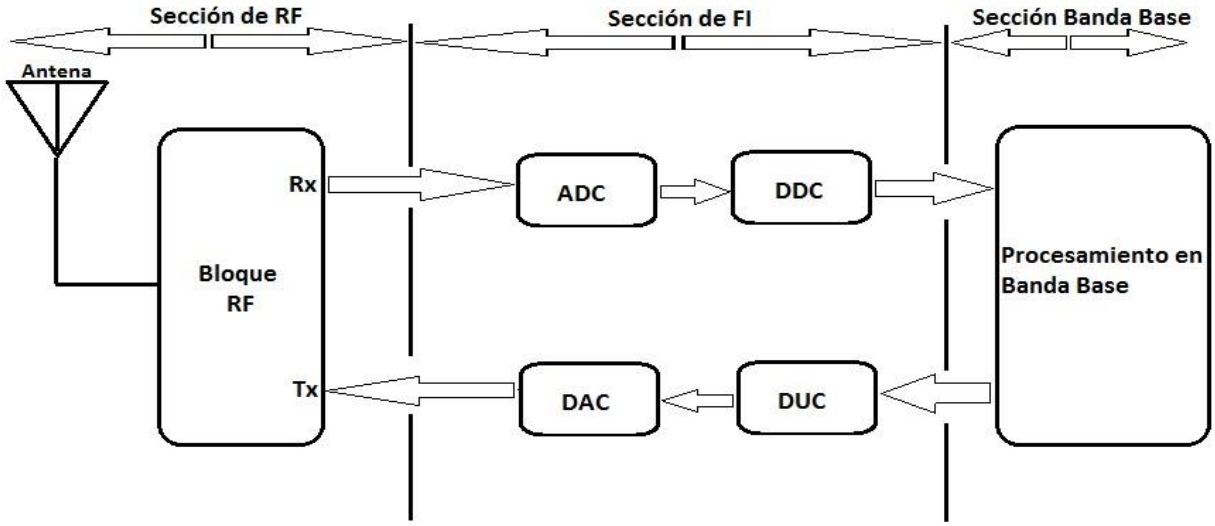

Figura 1.2 Arquitectura de SDR

El bloque de procesamiento analógico de señales, es donde se ubica la sección de RF y la sección de FI. Esta es la responsable de transmitir/recibir las señales de radiofrecuencia para adecuarlas y convertirlas en frecuencias intermedias, en el caso de la recepción, o amplificar y modular las señales de FI adecuándolas para la transmisión en el aire, en el caso de la transmisión. La sección de FI es la encargada de pasar la señal de FI a banda base y digitalizarla para la recepción o pasar

la señal de banda base a FI y hacer la conversión digital-analógica de la señal para la transmisión. Los encargados de la conversión analógica-digital o digital-analógica de la señal son los módulos ADC/DAC.

La sección donde se ubican los procesadores especializados y el procesador de propósito general, también conocida como sección de software, es el núcleo de la tecnología SDR. Ya sea sobre una PC o sobre cualquier otro circuito especializado, se ejecuta un software el cuál manipulará los datos digitalizados en el bloque anterior; realizando infinidades de funciones sobre la señal tales como: demodulación/modulación, filtrado de ancho de banda, reducción del ruido, ajuste del control automático de ganancia, análisis del espectro, entre otros. Todas estas operaciones sobre la señal digitalizada son fáciles y menos costosas.

1.2.3. Ventajas y desventajas de la Radio Definida por Software

Las ventajas que esta arquitectura involucra, especialmente para los operadores y proveedores de servicios, van desde facilidades para el *roaming* global hasta la versatilidad del software para proporcionar nuevos y mejores servicios sin necesidad de cambiar los terminales u otros equipos relacionados. Las plataformas Software Define Radio(SDR) están siendo extensamente utilizadas para la implementación y evaluación de técnicas de comunicación *cross-layer*. Estas plataformas SDR presentan la gran ventaja de permitir una configuración total de los protocolos de comunicación, aunque supone un verdadero desafío alcanzar niveles de rendimiento similares a los obtenidos con dispositivos hardware comerciales debido a los tiempos de procesamiento del software[26].

En el caso de cualquier sistema móvil terrestre, SDR ofrece ventajas para estos sistemas en el nivel funcional y facilita el funcionamiento con otros sistemas y soportando la interoperabilidad de múltiples proveedores. Los fabricantes de equipos que atienden a condiciones de mercado cada vez más complejas y diversas pueden ser atraídos por la capacidad de configurar una plataforma de productos estándar para abordar múltiples mercados. Los beneficios incluyen

costos más bajos, productos de comercialización más rápidos y productos mejor adaptados a los mercados objetivo [25].

Las técnicas avanzadas del procesamiento de señales que implican múltiples antenas y técnicas de modulación adaptativas, se pueden implementar en SDR sin necesidad de hacer cambios importantes de hardware en el transceptor. Además, SDR puede mejorar la interoperabilidad de diferentes sistemas, en aplicaciones como las militares, la policía, o equipos de búsqueda y rescate, al eliminarse la incompatibilidad entre ellos [18].

Otra de las ventajas de SDR consiste en su papel en la Virtualización de Redes Inalámbricas. La radio definida por software (SDR) ofrece las mismas funciones para redes inalámbricas que la tecnología *Software Defined Network* (SDN) para redes cableadas. *OpenRadio* se propuso como una extensión de SDN para el dominio inalámbrico, donde el procesamiento de banda base se separa en el plano de procesamiento y el plano de decisión. La programación de ambos planos aumenta la flexibilidad del hardware para ser compartido entre diferentes protocolos [27].

Si bien los SDR ofrecen beneficios, como se indicó anteriormente, también hay desventajas en su diseño e implementación. Su principal dificultad radica en el diseño del software para los diversos sistemas o estándares debido a la complejidad de estos[18].

Por otro lado, el procesamiento en tiempo real que requeriría una señal digital muestreada a muy alta frecuencia está por encima de las capacidades de los procesadores modernos. Además, debido a que las no-linealidades son causantes de intermodulación entre las señales de la banda digitalizada, los módulos digitalizadores deben ser altamente lineales ya que un componente de intermodulación puede opacar una señal de interés[27].

1.2.4. Implementación de SDR en plataformas de hardware y software

Se han fabricado varios dispositivos de radio definidos por software para la comunidad de comunicación inalámbrica. El ancho de banda de frecuencia cubierto y la potencia de salida son parámetros importantes para construir una aplicación de Radio Definida por Software. Se han realizado varias pruebas de conceptos basadas en estos dispositivos y la plataforma de software. Es importante tener en cuenta que estos dispositivos se utilizan sin un conocimiento profundo de sus actuaciones. Sin embargo, los dispositivos de bajo costo y utilidad están diseñados a expensas de su potencia de salida, ancho de banda de frecuencia y capacidades de frecuencia de muestreo. Los dispositivos *RealTeck* SDR son baratos, pero con solo un receptor SDR y un rango de frecuencia limitado, hasta 2200 MHz. *HackRF* también es una solución asequible con una gran banda de frecuencia cubierta, hasta 6GHz, pero con una potencia de salida más baja, hasta 0dBm en una banda de frecuencia más alta. Los *Universal Software Radio Peripherical* (USRP) siguen siendo dispositivos prometedores con un alto rendimiento [15].

Hay tres plataformas que se utilizan principalmente para las aplicaciones de SDR: Procesadores de propósito general (*General Processor Purpose*, GPP), Procesadores de señal digital (*Digital Signal Processor*, DSP) y Arreglo de compuertas de campo programables (*Field Programable Gate Array*, FPGA). Últimamente, también hay una tendencia a utilizar Unidad de procesamiento de gráficos (*Graphics Processor Unit*). Estas plataformas utilizan ADCs y DAC de alta velocidad para la conversión de señal entre analógico a digital y digital a analógico respectivamente. Los GPP suelen ser lentos porque realizan el procesamiento secuencial pero debido a las técnicas *multi-core* y *multi-threading*, pueden hacer procesamiento complejo en tiempo real. DSPs son pocas veces más rápidos que un GPP típico porque tienen diferentes arquitecturas de bus. Los FPGA son más adecuados para el procesamiento de señales complejas y de alta frecuencia. por ejemplo, conversión digital ascendente o descendente, codificación de canal, etc. Estos procesos incluyen muchas multiplicaciones que son computacionalmente caras. FPGAs puede realizar un procesamiento simultáneo y tener multiplicadores de hardware dedicados. Esto resulta en baja latencia incluso para complejos algoritmos [28].

El procesamiento digital de las señales es configurado y programado de manera que ayude a desempeñar varias de las funcionalidades del radio. Estas funcionalidades pueden estar relacionadas con el manejo de varias formas de onda empleando distintas tasas de datos y a su vez diversos esquemas de modulación. Para lograr este objetivo, en la mayoría de las aplicaciones se hace uso de FPGA. De manera que el uso de FPGAs le proporciona al radio la capacidad de reconfiguración y reprogramación en tiempo real. En este caso, el tiempo real se refiere a obtener una respuesta a un cambio de reconfiguración o reprogramación rápidamente por parte del sistema [23].

Un FPGA es un circuito integrado consistente en la interconexión de bloques llamados Bloques Lógicos Configurables o CLB (*Configurables Logic Blocks*). Cada CLB está compuesto de *slices* y cada *slice* está compuesto por bloques construidos de forma digital como *Look Up Tables* (LUT), *flip-flops,* etc. Un LUT puede ser programado para realizar lógica combinacional y cuando son combinados con *flip-flops* y otros recursos de hardware, pueden sintetizar cualquier sistema digital pequeño, en el rango de un circuito simple a una Unidad Central de Procesamiento (*Central Processor Unit*) o una computadora a escala completa corriendo en un sistema operativo. Los FPGA son diseñados para ser configurados usando lenguaje de descripción de hardware como VHDL o Verilog. Ellos son lenguajes de programación similares en cuánto a sintaxis, pero su correcto funcionamiento posee una naturaleza de hardware, estados que son ejecutados de forma secuencial. Ambos son reconfigurables, por esto los FPGA son referidos en varias ocasiones como de lógica programable [18].

Otra de las plataformas más utilizadas para el desarrollo de SDR es *Raspberry Pi*. El *Raspberry Pi,* es una pequeña computadora desarrollada en Reino Unido por la Fundación *Raspberry Pi,* en este dispositivo se puede conectar varios periféricos como monitor, teclados, cámaras; además, de pequeños componentes electrónicos como interruptores y sensores, el dispositivo fue desarrollado para el aprendizaje de informática, especialmente a personas de bajos recursos, una de sus principales aplicaciones es el desarrollo de proyectos electrónicos. Existen una gran variedad de periféricos compatibles para el *Raspberry Pi,* uno de ellos son las cámaras, existen 2 tipos, principalmente las cámaras normales y las infrarrojas, en este caso el modelo PI NoIR (*No Infrared*.). Esta cámara posee un filtro infrarrojo; de esta manera, es posible poder tomar

fotos en la oscuridad, gracias a la iluminación infrarroja. El *Raspberry Pi* modelo 2, posee varias características adicionales a su predecesor incluyendo más puertos USB, mayor capacidad de memoria; además de un nuevo procesador, gracias a éste, es compatible con varias distribuciones Linux; también de Windows [29].

Para controlar el hardware e implementar las funcionalidades del dispositivo se debe usar un conjunto de librerías o herramientas con capacidad para el procesamiento de señales. Dos de las herramientas de software más conocidas son GNU Radio y MATLAB.

GNU Radio es un conjunto de herramientas gratuitas y de código abierto para implementar aplicaciones SDR. Combina la programación en lenguajes como *Python* y C, lo que facilita la administración de recursos y la ejecución de tareas. Adicionalmente tiene una aplicación para programar mediante una interfaz gráfica, arrastrando componentes y configurándolos de una manera más sencilla. Está disponible para sistemas operativos Linux, Windows y Mac y es compatible con todas las versiones de USRP, que no son más que las plataformas de hardware[30].

MATLAB es una herramienta para programación, análisis de datos y modelamiento matemático. Soporta la conexión con dispositivos hardware a través de *Simulink* y facilita el análisis de la información utilizando sus destacadas funcionalidades para el procesamiento digital de señales. El costo de su licencia comercial es alto y requiere la utilización de paquetes adicionales como *Communications System Toolbox*, *DSP System Toolbox* y *Signal Processing Toolbox*.

1.3 Investigaciones realizadas sobre WLAN y SDR

Son pocos los investigadores que en sus publicaciones han abordado estudios relacionados con la implementación de redes WLAN en SDR de forma específica, sin que sea este un asunto ampliamente abordado en la bibliografía. Aunque varios artículos refieren de manera teórica de las redes WLAN lo relacionado con la capa física y el acceso, hay pocas referencias bibliográficas sobre la manera experimental, mediante simulaciones, de estudiar la temática.

En el trabajo de Arnanz Arroyo [31] se realiza un análisis sobre el acceso al medio en las redes WiFi, con énfasis en sus prestaciones. Aquí se relaciona la evolución de los diferentes estándares WLAN, teniendo en cuenta que la modificación de las técnicas de acceso al medio ha incrementado la velocidad de transmisión en los estándares, así como la técnica MIMO empleada, permitió también que el alcance que tiene la señal posibilite al usuario mayor movilidad.

Por su parte, en [9] Jaramillo Vinueza expone, como se muestra en la figura 1.3, una tabla con las características de las distintas tecnologías de redes inalámbricas. En el trabajo propone un diseño de red WiFi, que solo queda en el esbozo del diagrama físico de la red, sin proponer simulaciones al respecto que monitoreen los resultados de dicha red.

Tipo de red	WWAN (Wireless Wide Area Network)	WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)	WLAN (Wireless Local Area Network)	WPAN (Wireless Personal Area Network)
Estándar	GSM/GPRS/UMTS	IEEE 802.16	IEEE 802.11	IEEE 802.15
Denominación/ Certificación	2G/3G	WiMAX	WiFi	Bluetooth, ZigBee
Velocidad	9.6/170/2000 Kb/s	15 - 134 Mb/s	1-2-11-54-300-600 Mb/s - 1Gb/s	721 Kb/s
Frecuencia	0,9/1,8/2,1 GHz	2-66 GHz	2,4 y 5 GHz, Infrarrojos	2,4 GHz
Rango	Limitado por células (máx. 35 Km por célula)	1.6 - 50 Km	30 - 150 m	10 m
Técnica radio	Varias	Varias	FHSS, DSSS, OFDM	FHSS
Itinerancia (roaming)	Sí	Sí, (802.16e)	Sí	No
Equivalente a:	Conex. telef. (módem)	ADSL, CATV	LAN	Cables de conexión

Figura 1.3. Características de las tecnologías inalámbricas según [9]

En el trabajo de Stefan y Venkatesha [32] expone un diseño prototipo del estándar IEEE 802.11ah en SDR. En el esquema mostrado en la figura 1.4, diseñado para trabajar en la banda de frecuencia

industrial de los 900 MHz, conocida como sub-1GHz (S1G), incluyen la tecnología MIMO-OFDM, empleando SDR y su plataforma de software GNU Radio y de hardware USRP. Aquí la configuración se hace M2M (*Machine to Machine*), describiendo el equipamiento a utilizar en el diseño, así como los parámetros técnicos que miden el desempeño de la red WLAN con SDR. Sin embargo, en el artículo, solo se muestra el esquema conceptual del diseño y una gráfica con el montaje del esquema, sin mostrar la simulación ni los resultados experimentales.

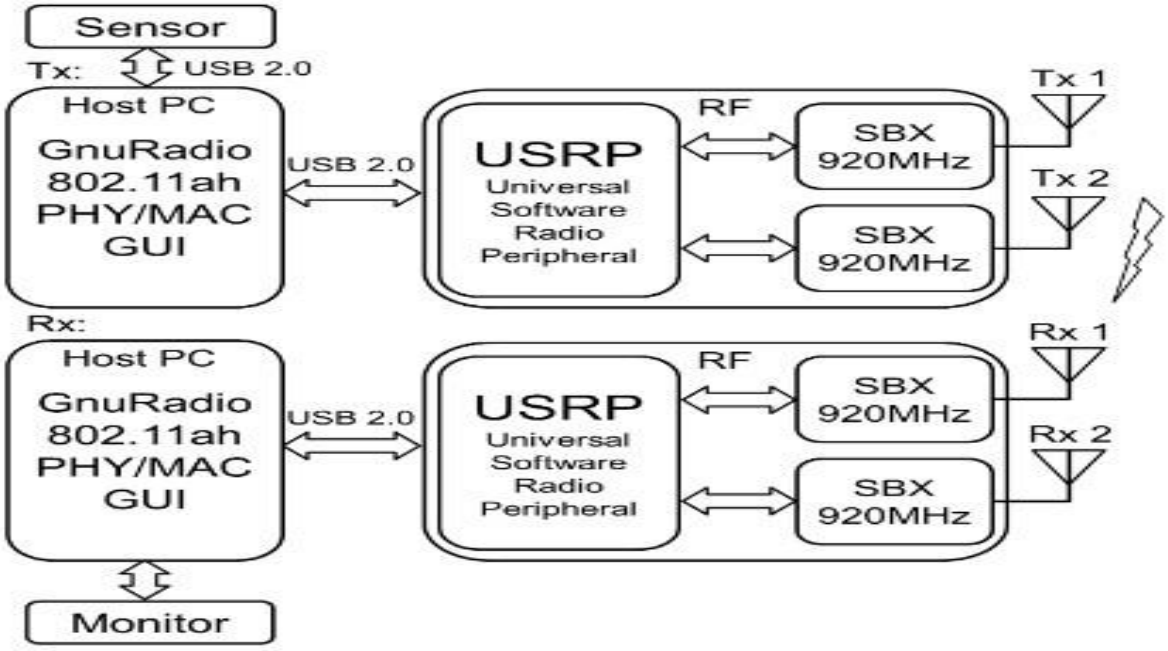

Figura 1.4 Configuración M2M de S1G WLAN empleando SDR según [32]

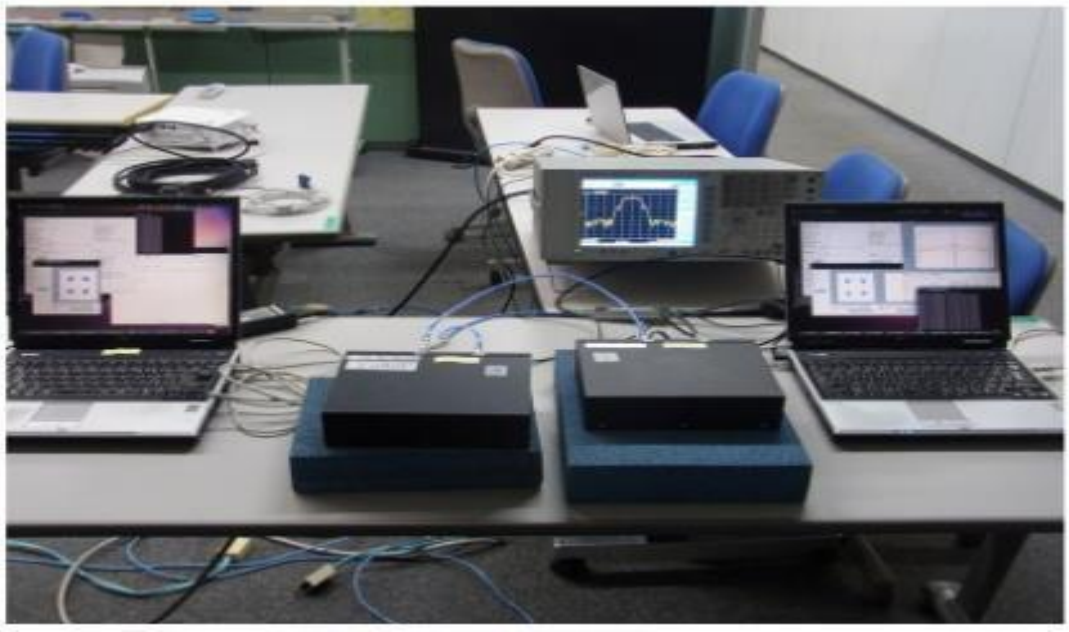

Figura 1.5 Imagen con el montaje M2M de S1G WLAN empleando SDR según [32]

En [33] Yang y Jaewook, trabajan con el estándar IEEE 802.11ac y su diseño con SDR, empleando un módem, para lograr 1Gbps de velocidad en la comunicación. Describen la arquitectura del modelo que siguieron y los datos que necesitaría el dispositivo de hardware para procesar en su implementación. En la figura 1.5 se muestra como lo describieron Yang y Jaewook. Se relaciona la arquitectura en bloques a seguir para su implementación en la FPGA. En el artículo, los autores no explican la plataforma de software usada para la implementación, ni se muestra simulación y resultados de la misma.

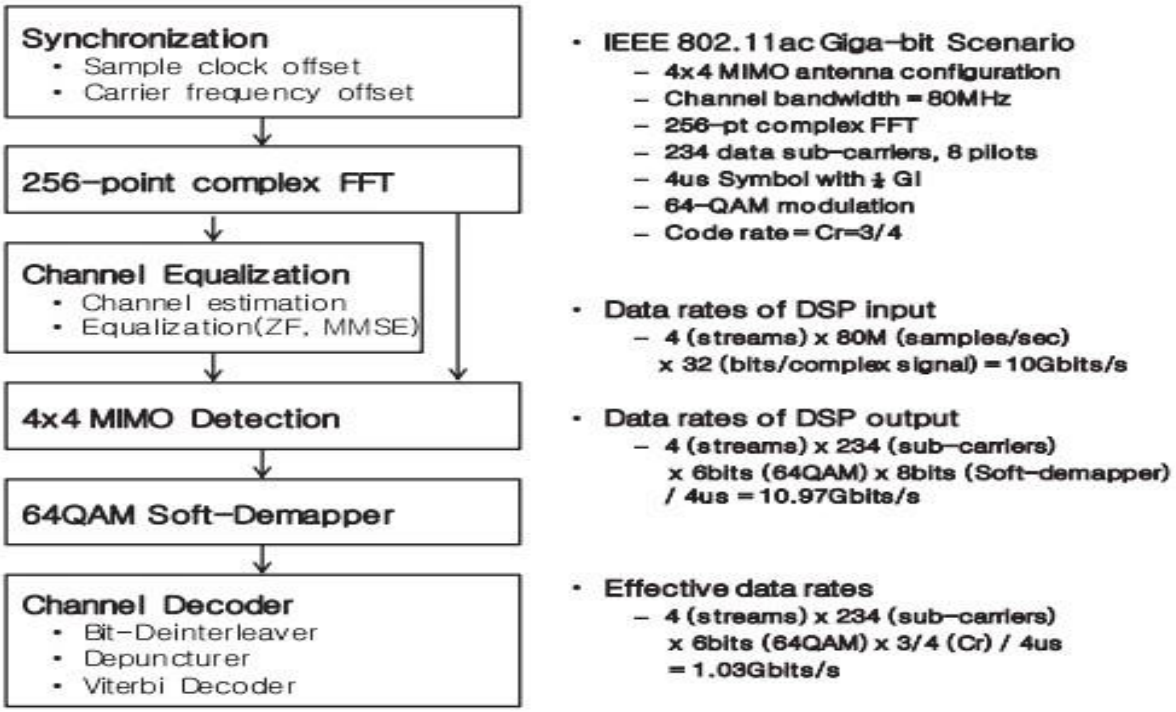

Figura 1.5 Receptor WLAN para un flujo de datos de 1Gbps según [33]

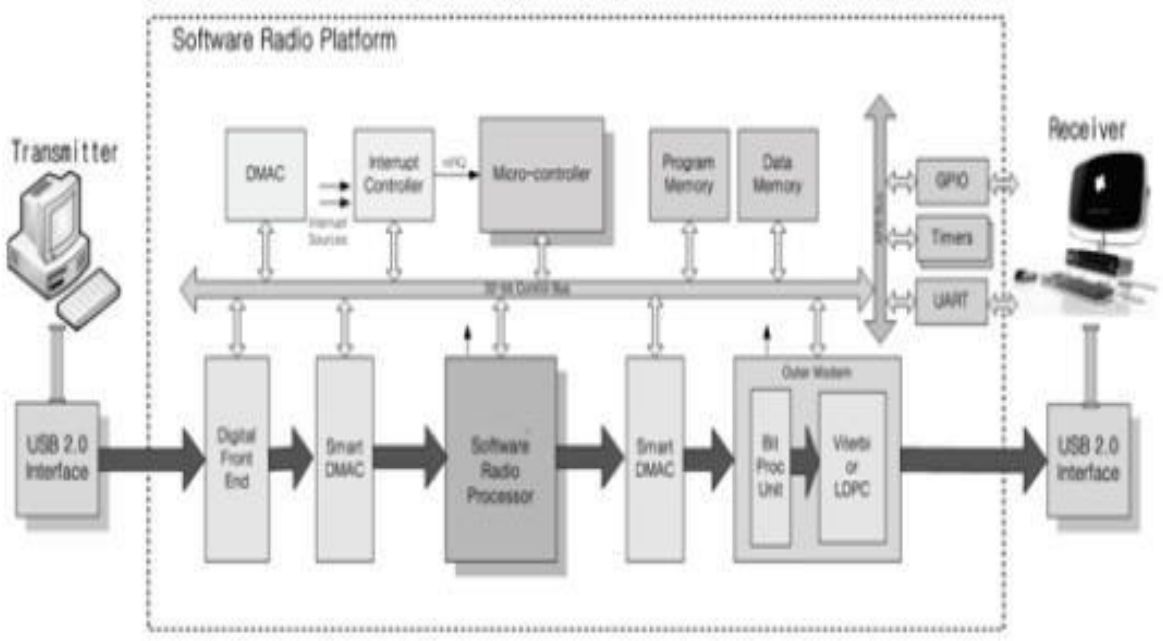

Figura 1.6 Arquitectura en bloques SDR para WLAN Giga-bit según [33]

En el trabajo de Lara-Cuevas y Fernández [34] se realiza un análisis de desempeño de un enlace basado en el estándar IEEE 802.11b y IEEE 802.11n. Los autores describen los niveles de desempeño de los estándares de IEEE 802.11 para ambientes interiores. En ellas tienen en cuenta aspectos del plano radio como el indicador de señal RSSI (*Radio Signal Strength Indicator*), área de cobertura y la medición de las interferencias entre canales, donde se arriba a la conclusión de que en distancias más grandes el estándar IEEE 802.11b posee mayor RSSI que IEEE 802.11n y g. El estudio se concentra en el desempeño en el plano de red, considerando parámetros como el *throughput*, *delay*, el *jitter* y el *packetloss* para el modo infraestructura de IEEE 802.11b, n, y WDS, en un escenario simulado con obstáculos y distintas distancias entre transmisor y receptor, refrendado en las figuras 1.7; 1.8 y 1.9. De acuerdo al análisis realizado de todos los parámetros de desempeño se estableció que la red desplegada con WDS es la mejor, en todos los casos se tienen los menores valores de delay, jitter y el menor porcentaje de *packetloss*, además que la eficiencia con WDS al tener la presencia de obstáculos es la más alta.

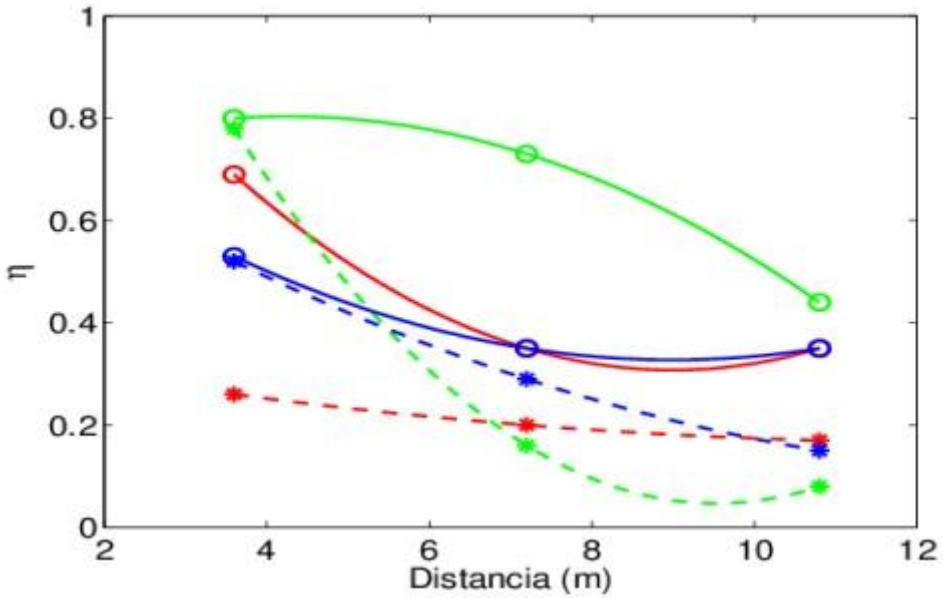

Figura 1.7 Eficiencia de las redes en función de la distancia según [34]. Rojo: IEEE 802.11b, Verde: IEEE 802.11n, Azul: WDS.

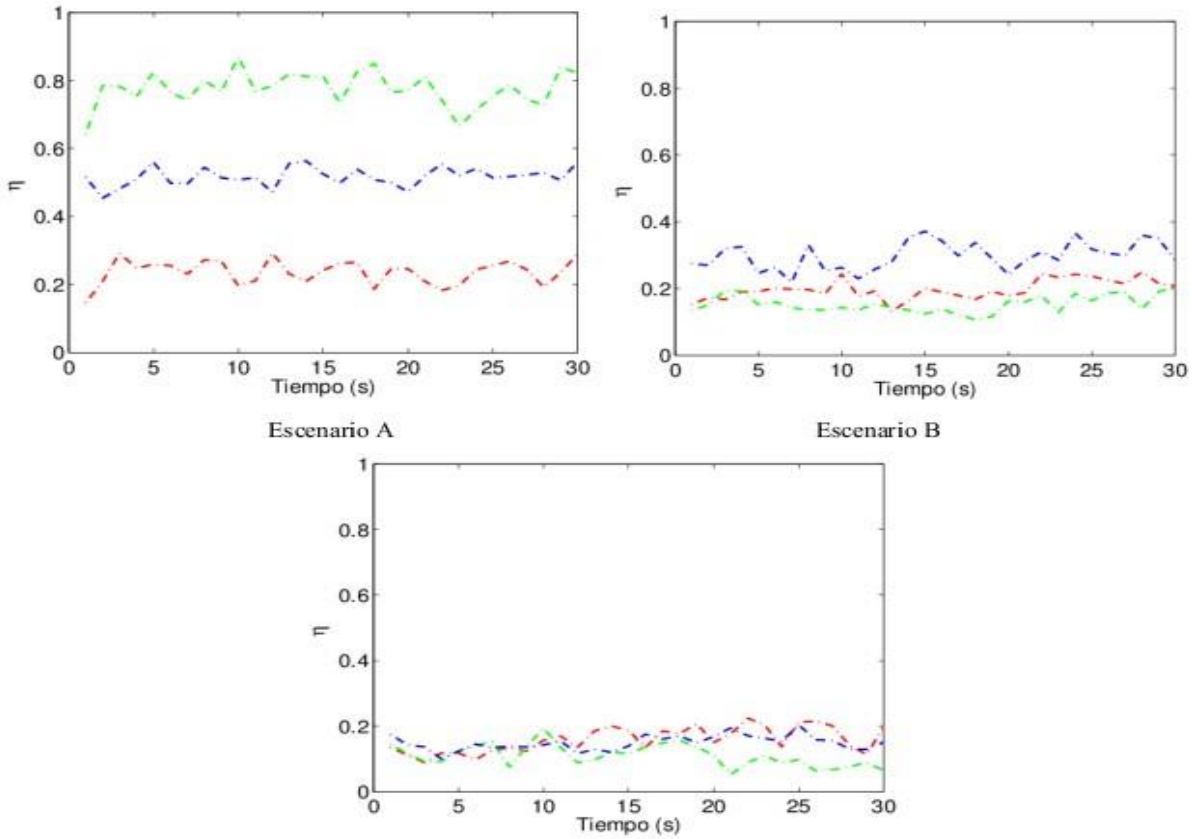

Figura 1.8 Comportamiento del *throughput* para 3 escenarios distintos según [34] con igual leyenda que la figura anterior

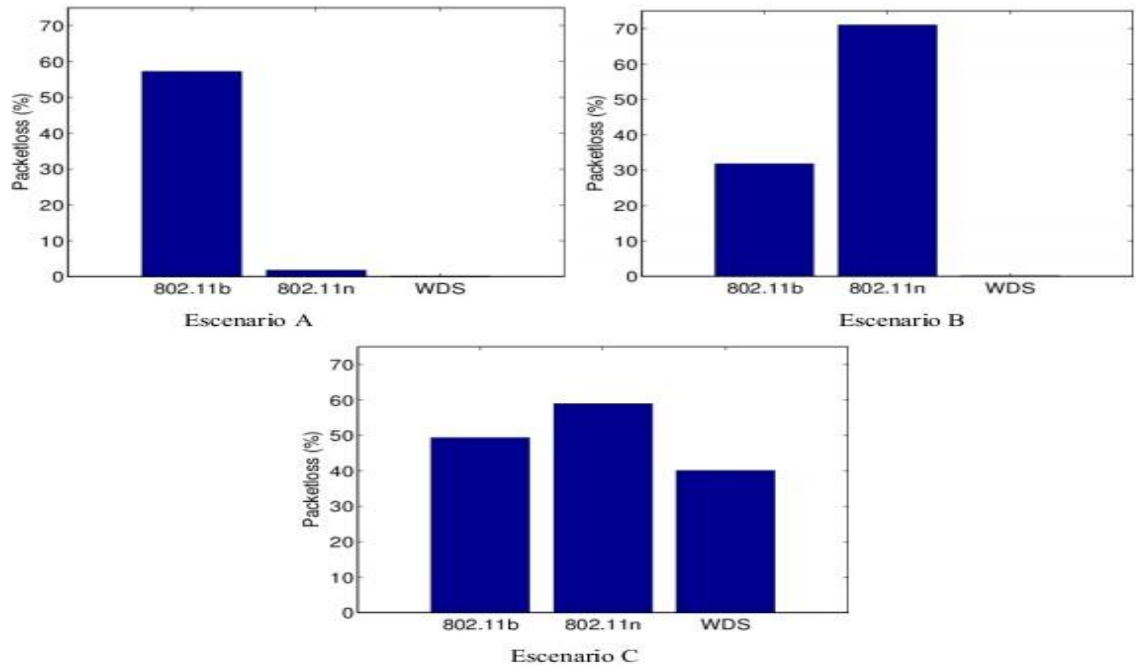

Figura 1.9 Comportamiento del *packetloss* según [34] para 3 escenarios

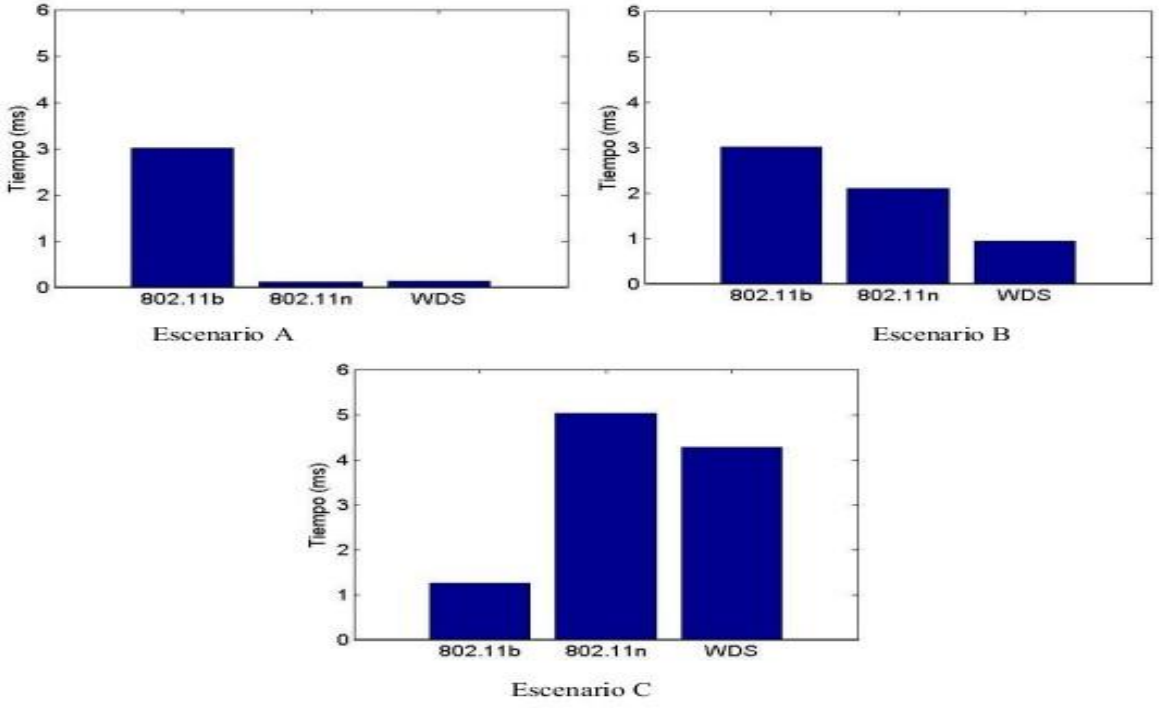

Figura 1.10 Comportamiento del *delay* según [34] para 3 escenarios

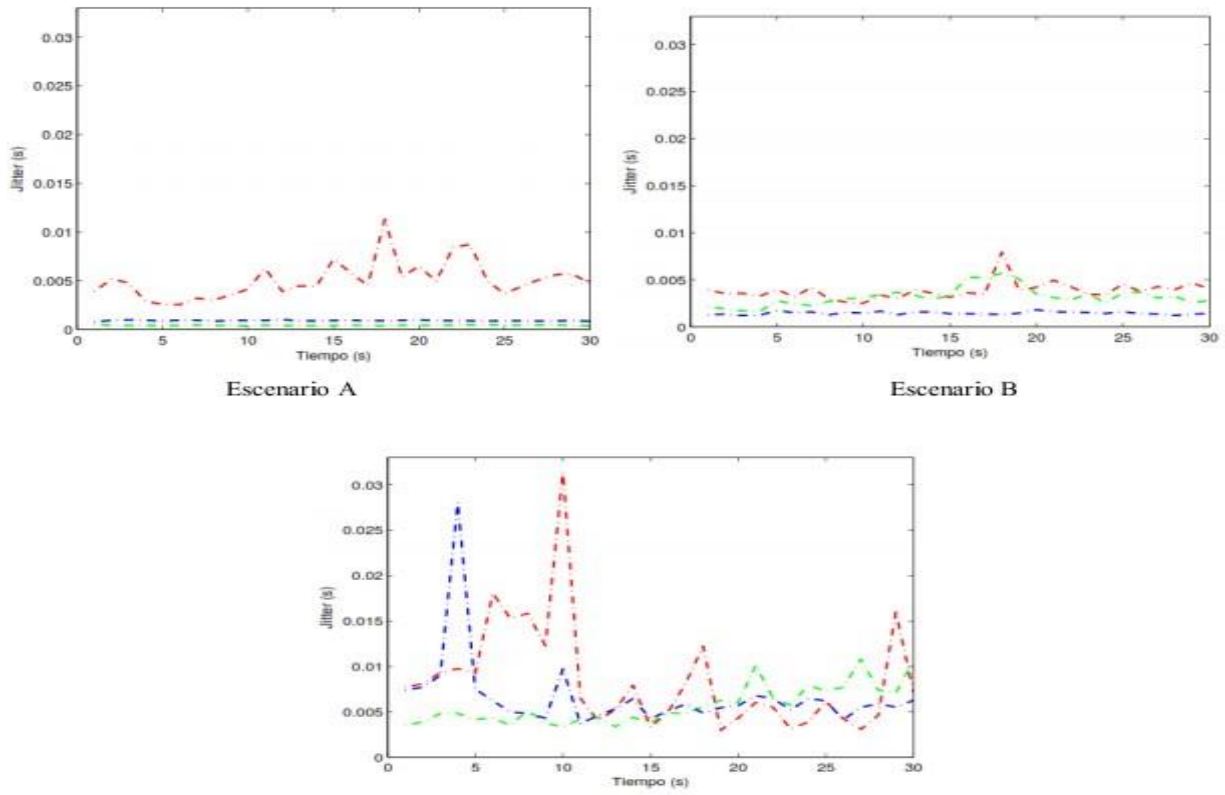

Figura 1.11 Comportamiento del *jitter* según [34] para 3 escenarios

En el caso de los autores cubanos, la bibliografía científica relacionada con el tema es bien escasa. Solo se explican las principales cuestiones teóricas de la temática, fundamentalmente los componentes del sistema y mencionan sin profundizar, las tecnologías que se pueden implementar con SDR. Por otra parte, existen trabajos relacionados con las cuestiones de seguridad en la implementación de las redes WLAN y lo en la implementación de estas. No se aborda en profundidad la implementación de la tecnología WLAN, como una tecnología inalámbrica, en SDR.

Autores como Amadro Fundora y Alonso Torres [35], en sus investigaciones dan algunas consideraciones en el plano teórico de la tecnología SDR, relacionadas con los conceptos manejados de la tecnología, dados por entidades internacionales reguladoras en esta temática y otros autores. Abordan específicamente los elementos que componen la interfaz radio de SDR, detallando en aspectos a tener en cuenta como el ruido y las no linealidades.

En el trabajo de González Paz y Beltrán Casanova [2] se detalla una propuesta de protocolos de seguridad para una red WLAN en el escenario de la Universidad de Cienfuegos. Se caracterizan las posibles amenazas en redes inalámbricas, los protocolos de seguridad creados para las redes WLAN como: WEP, 802.11i, WPA y WPA2, así como un análisis comparativo de los mismos basado fundamentalmente en cuanto al método de autenticación y la técnica de cifrado. Se detallan diversos mecanismos de seguridad para redes LAN como SSH, HTTPS, SSL que pueden ser aplicados a redes WLAN, así como los protocolos WEP, WPA y WPA2.

1.4. Conclusiones parciales

En este capítulo se abordó lo relacionado con la definición, arquitectura, ventajas y desventajas del estándar de comunicaciones inalámbricas IEEE 802.11, que dejan por sentado que ésta se presenta como una de las tecnologías de comunicaciones más ampliamente utilizadas en el mundo, dada su velocidad de transmisión, y la flexibilidad que posee en cuanto a la movilidad y la interoperabilidad con otras tecnologías de comunicaciones. Igualmente se mostraron la definición, arquitectura, ventajas, desventajas e implementación en plataformas de hardware y software, que posee la tecnología de Radio Definida por Software, capaz de resolver problemas de compatibilidad, seguridad y eficiencia en cuánto a sistemas de radiocomunicaciones, permitiendo la configuración y diseño de varios estándares de comunicación como el IEEE 802.11.

CAPÍTULO 2. TRANSMISIÓN DE DATOS EN SDR DE LA CAPA FÍSICA DE IEEE 802.11

En este capítulo se abordan las características que presenta la capa física del protocolo IEEE 802.11, así como las distintas técnicas de transmisión de datos y acceso al medio. Se enfatiza en la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonales (OFDM), el Espectro Extendido por Secuencia Directa (DSSS) y en los algoritmos de Galois, como propuesta de algoritmos a emplear en la codificación de la transmisión de datos en redes WLAN. Finalmente se aborda el software de simulación MATLAB 2016 como una de las herramientas de simulación mayormente empleadas para el diseño de tecnologías inalámbricas en SDR.

2.1. Caracterización de la Capa Física de IEEE 802.11

La capa física es el primer nivel del modelo OSI. Su función es proveer a las capas superiores servicio de transmisión y recepción de flujo de bits ya que trabaja con señales de radio e impulsos eléctricos.

La capa física es la que se encarga de definir las características mecánicas, eléctricas y funcionales del canal de comunicación. Intercambia tramas entre PHY y MAC, utiliza portador de señal y modulación de espectro ensanchado para transmitir tramas a través del medio y proveer al MAC de un indicador de detección de portadora para señalizar actividad en el medio. La capa física se ocupa de definir los métodos por los que se difunde la señal. Para hacer esto, la capa física de IEEE 802.11 se divide en dos subcapas conocidas como PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*) la cual se encarga de convertir los datos a un formato compatible con el medio físico y PMD (*Physical Medium Dependent*) se encarga de la difusión de la señal [36].

La subcapa PLCP define una forma de mapear unidades de datos MAC en un formato de tramas susceptibles de ser transmitidas o recibidas entre diferentes estaciones a través de la capa PMD.

La subcapa PMD su función es definir las características y el medio inalámbrico a transmitir y recibir a entre dos o más estaciones.

Según [5] la subcapa PMD se encarga de la transmisión de las tramas. En tanto, la subcapa PLCP es la interfaz entre la subcapa MAC y la capa Física y proporciona el mecanismo de detección de portadora y la CCA (*Clear Channel Assessment*). El CCA es una señal que la capa MAC tiene que identificar para determinar si el canal está libre u ocupado en el proceso de transmisión, la subcapa MAC indica a la subcapa PLCP que prepare MPDUs. De igual manera, en el proceso de recepción, la subcapa PLCP ofrece tramas de entrada del medio inalámbrico a la subcapa MAC. Bajo la dirección de la subcapa PLCP, la subcapa PMD proporciona transmisión y recepción de unidades de datos de capa física entre dos estaciones a través del medio inalámbrico y ofrece modulación y demodulación de las transmisiones de la trama. Los tipos de modulaciones y codificaciones dependerán de los protocolos existentes en éste estándar.
La figura 2.1 muestra cómo se realiza el encapsulado de trama en la capa física.

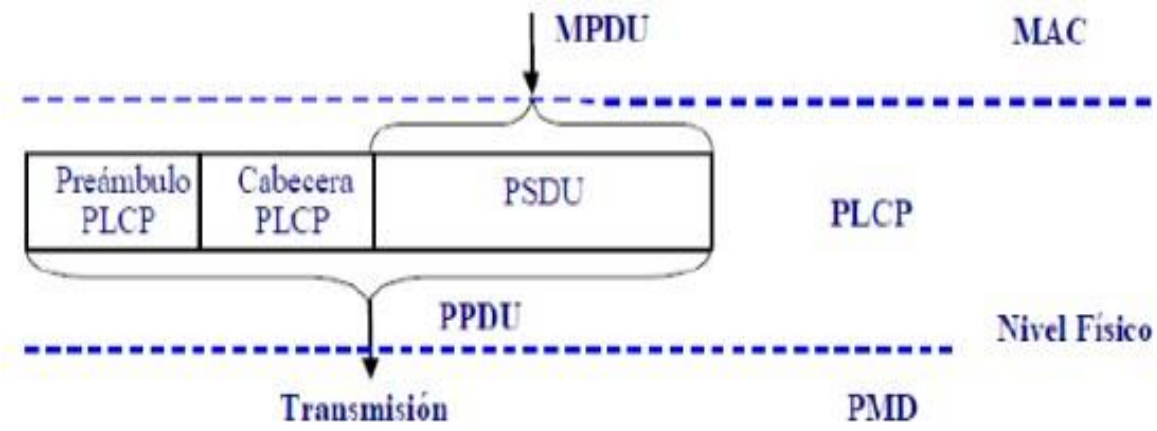

Figura 2.1 Encapsulado en la Capa Física [5]

Entre las funciones fundamentales de PLCP y PMD están las de proporcionar señal para la detección si el canal está libre y la modulación y codificación respectivamente. Cada subnivel Dependiente del Medio Físico (PMD) puede necesitar la definición de un único PLCP. Pero si el subnivel PMD ya ofrece los servicios definidos en la capa física, la función de convergencia no sería necesaria [37].

Sin embargo, en su trabajo[12] explica que el estándar 802.11 describe la funcionalidad de las capas y subcapas y las relaciones entre ellas, pero no especifica cómo se tienen que hacer; solo indica cómo se debe comportar el equipo y deja vía libre al fabricante en la manera de implementarlo.

2.2. Técnicas de transmisión de datos en la capa física

El protocolo IEEE 802.11 define cuatro técnicas de transmisión para la capa física: Espectro Extendido de Salto de Frecuencia (*Frequency Hopping Spread Spectrum*, FHSS), Espectro Extendido de Secuencia Directa (*Direct Sequency Spread Spectrum*, DSSS), Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexer*, OFDM) e Infrarrojo (IR). Por ser las técnicas más utilizadas actualmente por los estándares de WLAN, se profundizarán más en DSSS y OFDM.

La figura 2.2 hace alusión a lo anterior en el modelo de referencia de IEEE 802.11.

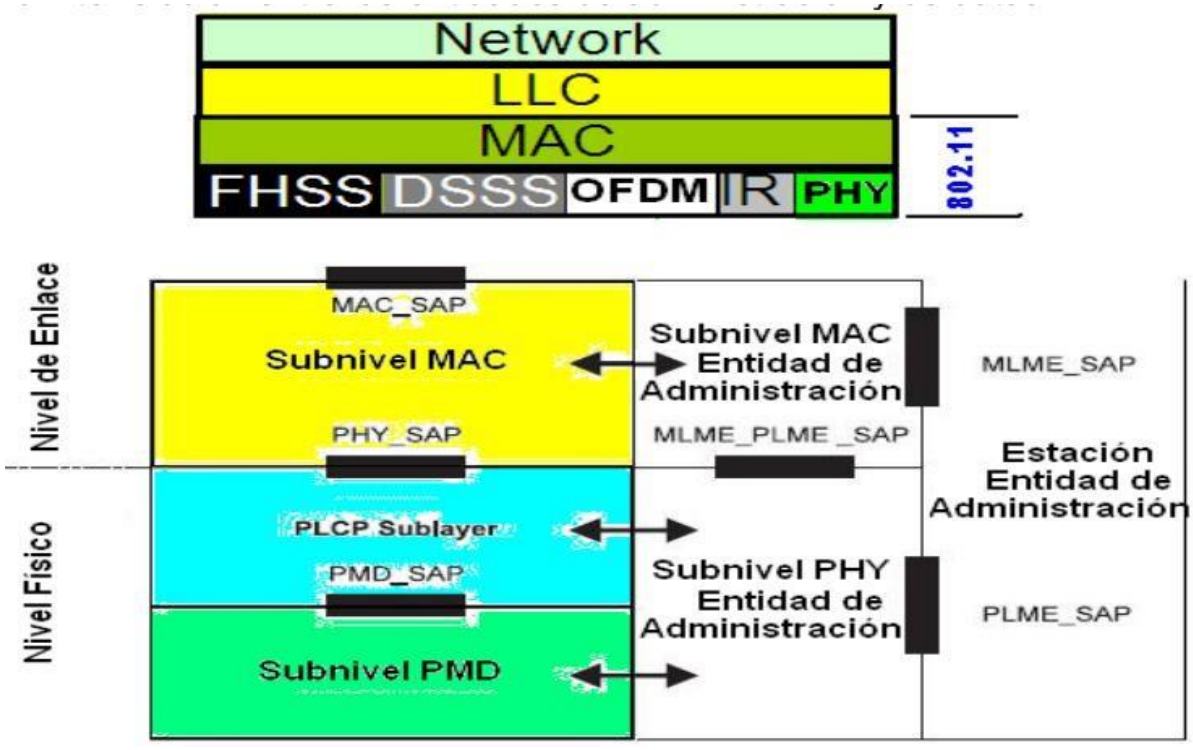

Figura 2.2 Modelo de referencia IEEE 802.11 [38]

2.2.1 Espectro Extendido de Salto de Frecuencia

Esta es una técnica que consiste en que la información que se va trasmitir se lo realizara en frecuencias distintas con pequeños intervalos de tiempo a los cuales se los denomina *dwell tim*e (tiempo de permanencia) cuyo valor es inferior a los 400ms. Cuando ya pasa este tiempo se continúa con la trasmisión en otra frecuencia. Esta técnica de transmisión utiliza la frecuencia de 2,4Ghz la cual está constituida por 79 canales, cada uno posee 1MHz de ancho de ancho de banda[39].

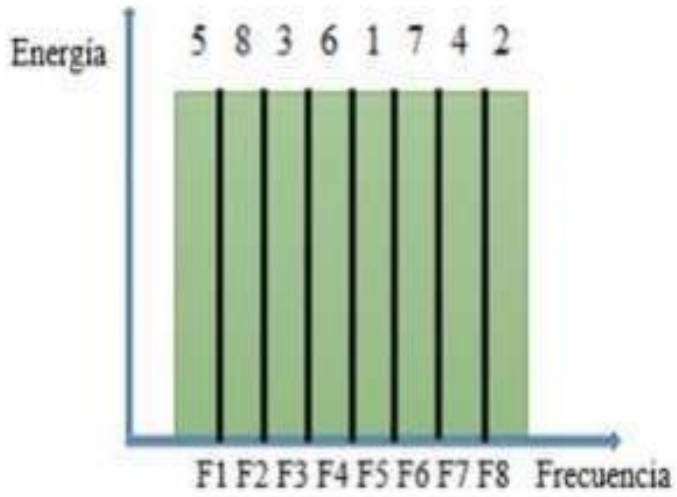

Figura 2.3 Representación de FHSS[39]

En [39] los autores argumentan que FHSS permite velocidades de conexión más bajas que otras técnicas como DSSS, en el orden de 1-3 Mbps, además que la itinerancia es más complicada, debido a la transmisión en un mismo canal.

Por su parte en [40] los autores agregan que se utiliza para combatir interferencias, consistente en expandir la señal que se transmite en una banda de frecuencia mayor, proporcionando mayor robustez frente al desvanecimiento. La señal banda base se expande en base a un código *spreading* o pseudoaleatorio, el cual maneja un sintetizador de frecuencias para ir de una de frecuencia del generador a otra.

2.2.2 Espectro Extendido de Secuencia Directa

La técnica de Espectro Extendido de Secuencia Directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DSSS) ha sido ampliamente utilizada en todos los sistemas de comunicaciones inalámbricos comerciales. Gran parte de los estándares actuales utilizan esta técnica de transmisión.

La técnica de espectro extendido se desarrolló inicialmente para aplicaciones militares y para servicios de inteligencia. La idea básica consiste en expandir la información de la señal sobre un ancho de banda mayor, para con ello dificultar las interferencias y su posible intercepción. Las interferencias pueden ser el resultado de canales inducidos con interferencia ínter-símbolos, debido al efecto del multicamino en un canal limitado en banda. La técnica de espectro extendido puede ocultar una señal para transmitirla en baja potencia. Extendiendo la energía de la señal sobre el ancho de banda disponible y usando la mínima potencia necesaria, la señal puede ocultarse en un canal ruidoso. Esto significa que cualquier interceptor no autorizado tendrá una baja probabilidad de detectar la señal asociada al receptor intencional [41].

En la figura 2.4 se muestra el diseño general de un sistema DSSS.

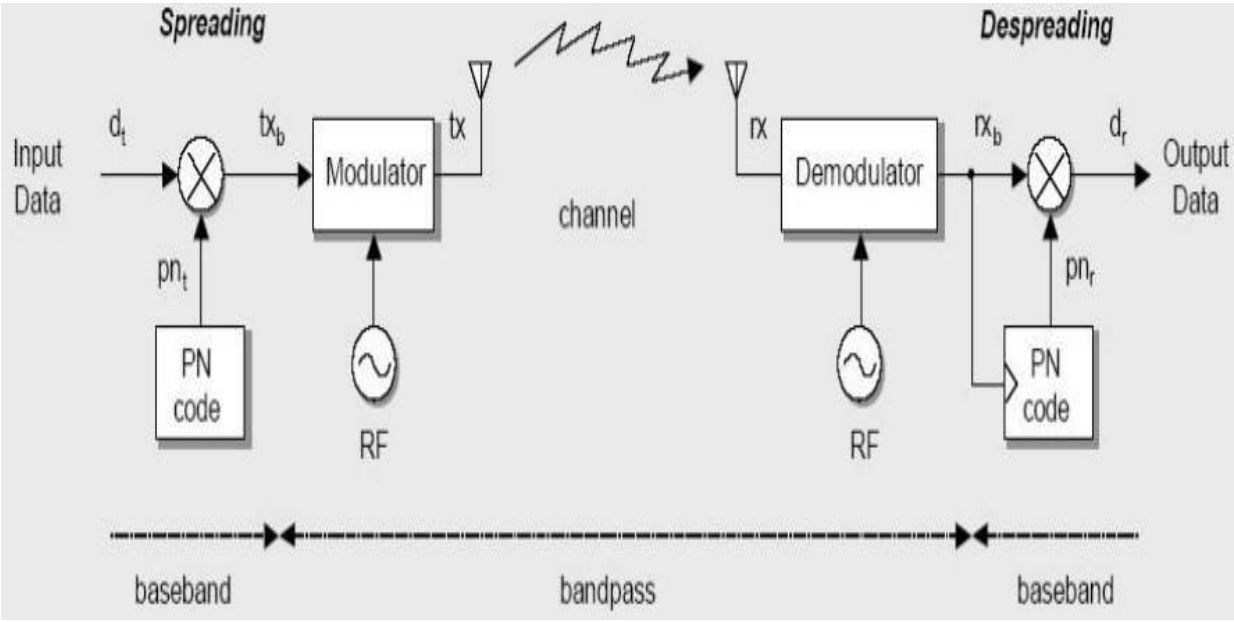

Figura 2.4 Sistema DSSS [41]

En el trabajo de [10] el autor explica que técnica consiste en la generación de un patrón de bits redundante llamado señal de chip para cada uno de los bits que componen la señal de información y la posterior modulación de la señal resultante mediante una portadora de RF. En recepción es necesario realizar el proceso inverso para obtener la señal de información original. La secuencia de bits utilizada para modular cada uno de los bits de información es la llamada secuencia de Barker (son secuencias binarias bipolares aleatorias de longitud finita) y tiene la siguiente forma:

Para un 1 lógico: +1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1
Para un 0 lógico: -1, +1, -1, -1, +1, -1, -1, -1, +1, +1, +1

En la figura 2.5 se muestra la forma en que la señal es modulada empleando la secuencia de Barker.

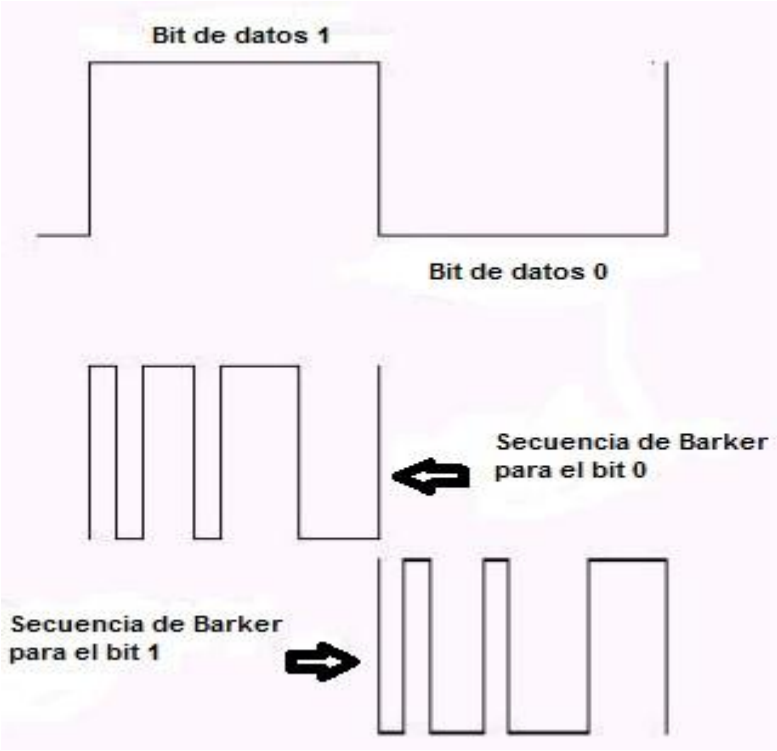

Figura 2.5 Modulación de la información mediante la secuencia de Barker [10]

DSSS tiene definidos dos tipos de modulaciones a aplicar a la señal de información una vez se sobrepone la señal de chip tal y como especifica el estándar IEEE 802.11: la modulación DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) y la modulación DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*) proporcionando unas velocidades de transferencia de 1 y 2 Mbps respectivamente [10].

La señal de chip empleada para modular la portadora aumenta el ancho de banda de transmisión y reduce la densidad espectral. La razón con que se transmite la señal de chip (Razón de Chip) tiene que ser mayor que la razón a la que se transmiten los bits de datos, para garantizar que los datos que se decodifiquen luego en el extremo receptor lleguen con menor razón de error de bit (*Bit Error Rate*, BER).

En el artículo de [30] , los autores implementan en MATLAB un transmisor IEEE 802.11, utilizando DSSS. Según Sarfaraz y Khurram, los datos en la banda se extienden en una magnitud no menos de diez veces mayor que la capacidad de transmisión utilizando una sucesión de chips pseudoaleatorias. La señal propagada se hace con el propósito de hacer la banda mucho más extensa que los datos que están transmitiendo. La señal en el rango extendido es difícil de reconocer, eso dificulta por ende la demodulación o captura de la señal. La figura 2.6 muestra el proceso de extensión y de-extensión de la señal.

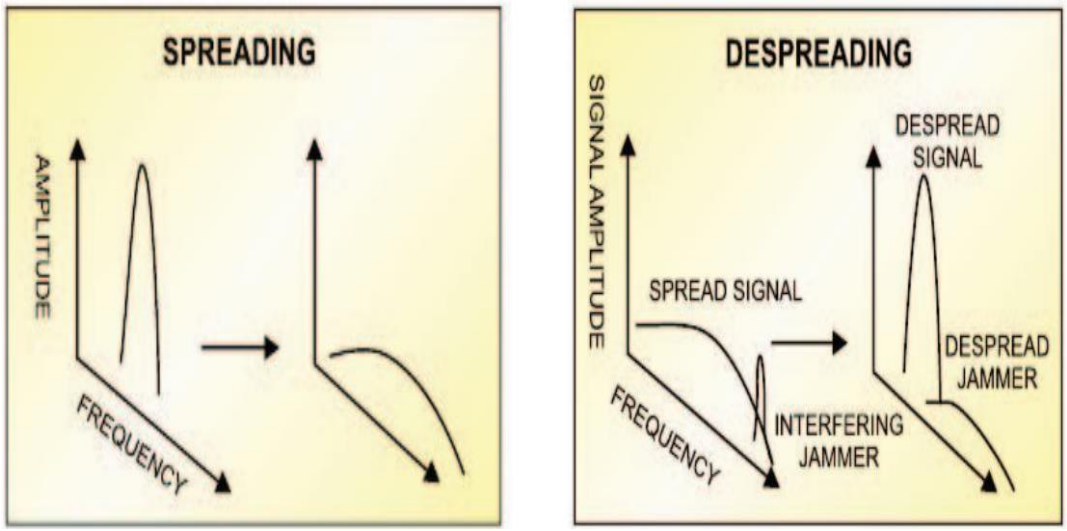

Figura 2.6 Proceso de extensión y de-extensión de la señal utilizando DSSS [30]

En el trabajo de [42], el autor en el diseño de un sistema de acceso al medio y modulación en banda base, utilizando SDR, selecciona la técnica de DSSS, empleando secuencias de Barker, considerándola suficiente para el modelo, no solo por ser muy empleada por el estándar IEEE 802.11, sino por permitir que la señal en banda base cuente con resistencia frente a ruido e interferencias al mejorar la relación señal a ruido (*Signal to Noise Rate*, SNR) ofreciendo también una ganancia de procesamiento, según la ecuación (1)

$$Gp = 10 * log_{10}(\frac{Rc}{Rb}) \quad (1)$$

Donde Gp es la ganancia de procesamiento, Rc la razón de chip y Rb, la razón de bit.

En el artículo de [22] los autores abordan un algoritmo para la detección de ráfagas en forma de onda de redes de banda ancha implementado en SDR, donde plantean igualmente como variante el empleo de DSSS por ser el espectro de propagación de secuencia directa adecuado para estas redes, debido a su anti-interferencia, anti-interferencia, alta frecuencia y robustez frente al desvanecimiento por trayectos múltiples, aspectos estos que afectan notablemente a las redes inalámbricas, aunque reconoce que la sincronización de tiempo es uno de los principales problemas de estos sistemas. Aquí introduce a la Transformada Wavelet Haar (*Haar Wavelet Transform*, HWT) como otro algoritmo alternativo a la secuencia de Barker, para la detección de señales DSSS en canales con ruido aditivo blanco gaussiano (*Aditive White Gaussian Noise*, AWGN).

En el trabajo de [43] que aborda el diseño de una red WiFi de largo alcance en una zona rural de Ecuador, para la conexión a Internet de banda ancha, presenta una tabla que relaciona las principales características de DSSS en la capa física de IEEE 802.11, teniendo en cuenta modulación, longitud de la secuencia de chip, velocidad de transmisión.

Tabla 2.1 Características de DSSS en la capa física de IEEE 802.11[43]

Tasa de transmisión	Chipping code lenght	Modulación	Tasa de símbolo	Bits/Símbolo
1 Mbps	11 (Barker sequence)	DBPSK	1 Msps	1
2 Mbps	11 (Barker sequence)	DQPSK	1 Msps	2

El ruido que se introduce en cada canal debido a su ancho de banda es compensado por cada bit de datos que se convierten en una serie de patrones de bits redundantes. La redundancia que presenta cada chip, combinado con el ensanchamiento de la señal a través de los 22 MHz de ancho de banda en la banda de 2.4 GHz, provee un mecanismo sólido de detección y corrección de errores, minimizando las retransmisiones.

2.2.3 Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales

OFDM consiste en la multiplexación de un conjunto de portadoras ortogonales entre sí. Este tipo de modulación multiportadora es frecuentemente utilizada en esquemas de comunicaciones de banda ancha, además de WiFi, como ADSL, DVB-T, WiMAX, LTE. Su objetivo es el de transmitir y recibir datos a la mayor velocidad posible, intentando además conseguir la mínima tasa de error (BER) posible.

Esta técnica divide un canal de comunicaciones en una cierta cantidad de bandas de frecuencia que se encuentran separadas por el mismo espacio. OFDM utiliza múltiples sub-portadoras, con un total de 52, demostrando diferencia con una modulación simple de portadora, empleando la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT). Los datos se transmiten en las 48 sub-portadoras simultáneamente, cada sub-portadora transporta una porción de los datos del usuario, mientras que las restantes se utilizan para alinear las frecuencias en el receptor. Las subportadoras son ortogonales entre sí. Para eso las subportadoras adyacentes están separadas a una frecuencia de 1/T [44].

Una señal OFDM es la suma de un número de subportadoras ortogonales, donde cada subportadora se modula independientemente usando QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) o PSK (*Phase Shift Key*). La tabla 2.2 muestra las distintas velocidades que presenta OFDM, con relación al tipo de modulación que se emplee.

Tabla 2.2 Velocidades vs Modulaciones OFDM [33]

Tasa de transferencia de datos (Mbps)	Tipo de modulación
6	BPSK
9	BPSK
12	QPSK
18	QPSK
24	16-QAM
36	16-QAM
48	64-QAM
54	64-QAM

En el trabajo de [45] se expone que la transmisión está basada en el uso de múltiples portadoras lo que se consigue dividiendo el flujo de datos con tasa de símbolo Rs en N subflujos de tasa Rs/N, de tal forma que cada uno de estos subflujos modulará una subportadoras con un ancho de banda Bs/N. De ahí que se pueda decir que se trata de la transmisión de N símbolos en N subportadoras en paralelo. En cuanto al tiempo de símbolo Ts, se verá aumentado en un factor N, dando lugar a un periodo de símbolo N*Ts. En la figura 2.7 se muestran las tramas OFDM en tiempo y frecuencia, en la figura 2.8 el espectro de la señal.

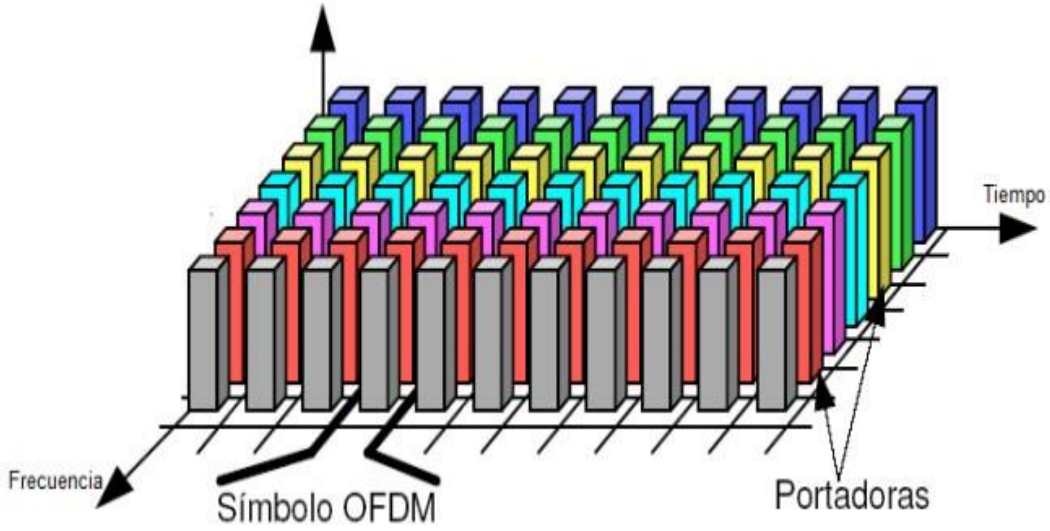

Figura 2.7 Tramas OFDM en tiempo y frecuencia [45]

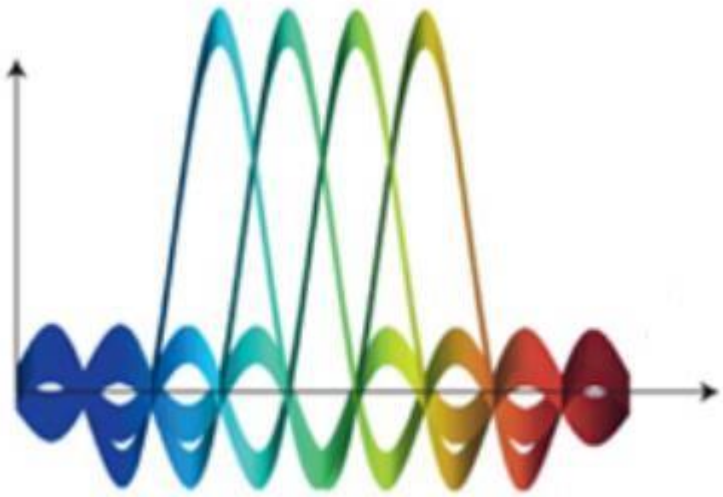

Figura 2.8 Espectro de la señal OFDM [45]

En el artículo de [46] proponen un modelo para la transmisión de los datos de control y tráfico de forma simultánea por el canal de comunicaciones, basado en redes WLAN utilizando OFDM e implementado en GNU Radio, al que le llaman hJam, el cual explora completamente las características de la capa física de OFDM y permite que un paquete de datos y un número de mensajes control sean transmitidos juntos Los autores muestran la infraestructura de OFDM en un sistema de transmisión, tal y como se observa en la figura 2.9. El paradigma de hJam incluye en el transmisor un generador de interferencia, para permitir una transmisión acoplada en caso

necesario, mientras que el receptor introduce un detector de interferencia para las señales interferentes y un analizador acoplado para decodificar los datos del generador de interferencia.

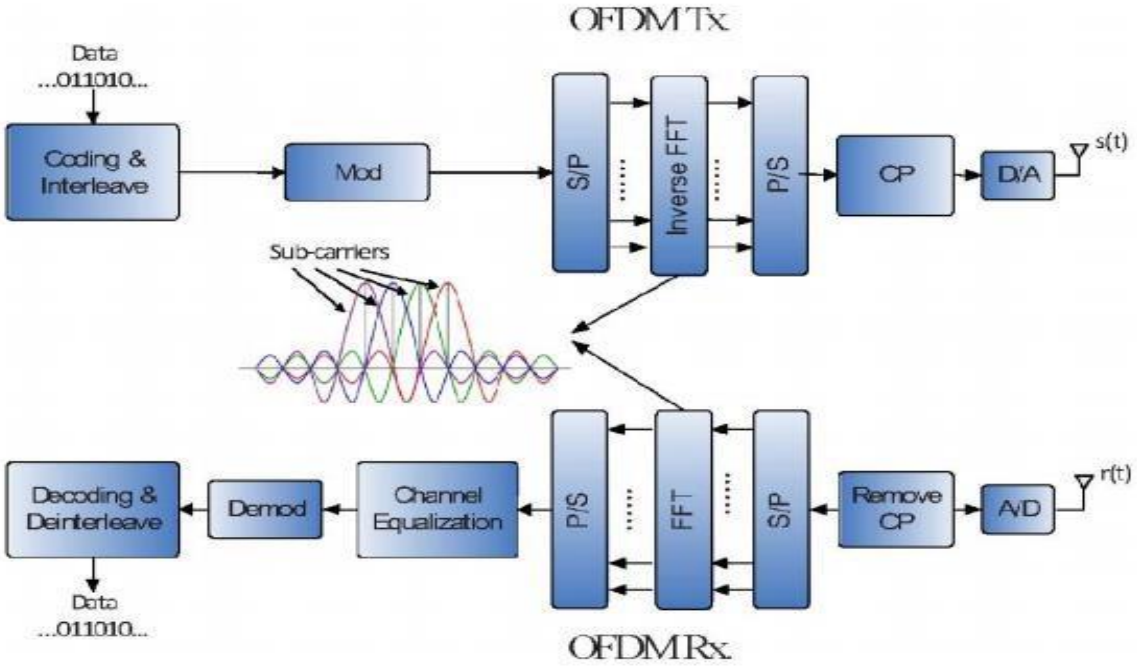

Figura 2.9 Infraestructura OFDM [46]

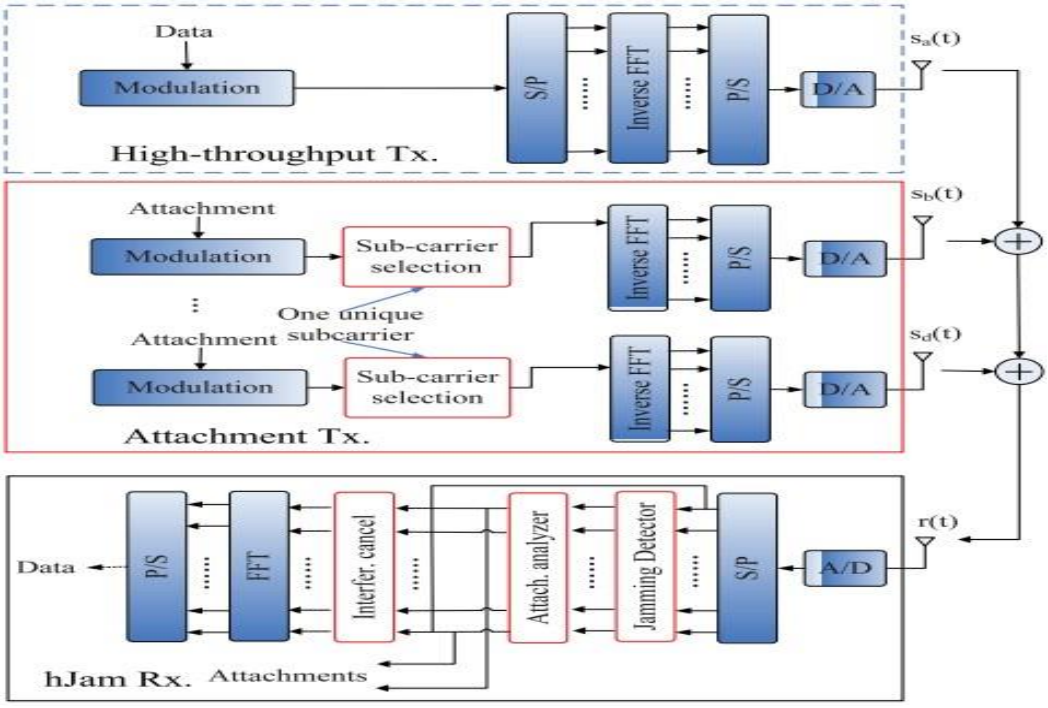

Figura 2.10 Arquitectura propuesta por [46] para hJam

En [37] los autores realizan un diseño de la capa física de IEEE 802.22 (redes *Wireless Regional Area Network*) utilizando SDR, empleando el software MATLAB/SIMULINK, e implementado en GNU Radio. Aquí la técnica de transmisión seleccionada fue OFDM, por las ventajas que presenta anteriormente descritas y por ser frecuentemente utilizada por los estándares inalámbricos actuales. En la figura 2.11 se muestra el esquema propuesto por (No.41) implementación en MATLAB se modelaron el conjunto de un sistema básico transmisor y receptor basado en OFDM para capa física IEEE 802.22. Aquí incorporaron al canal de comunicaciones, además del AWGN, el desvanecimiento de Rayleigh, para simular un ambiente en condiciones aún más críticas en cuanto a SNR. En el artículo no profundizan en las características de los bloques del esquema, ni los parámetros de desempeño del sistema que tuvieron en cuenta, ni los resultados finales obtenidos.

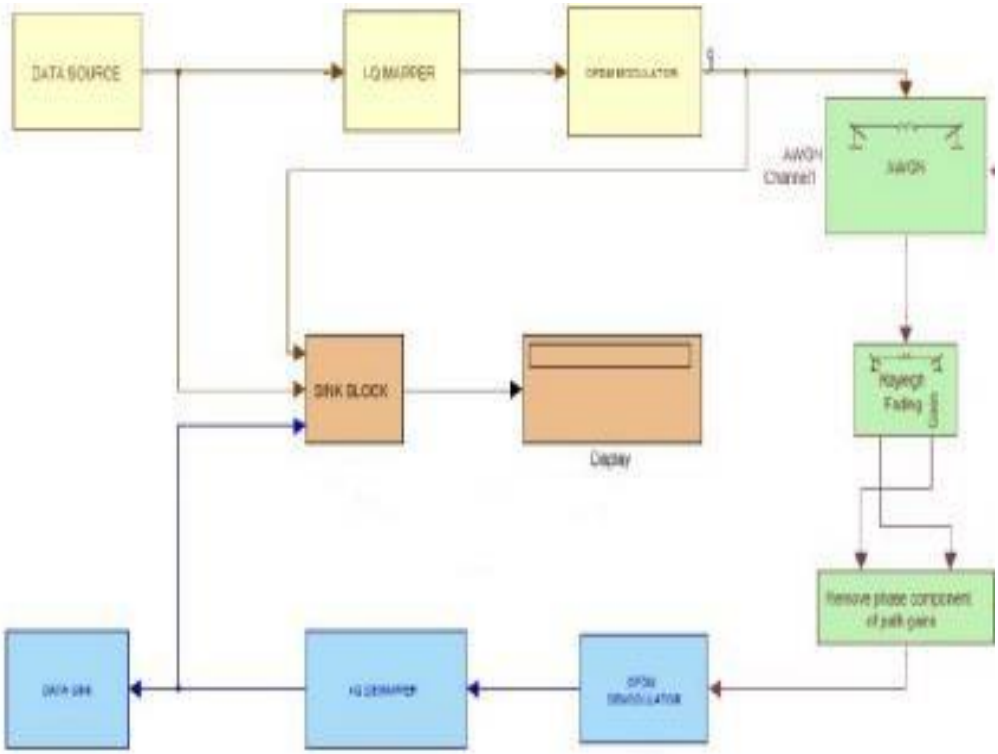

Figura 2.11 Modelo del transceiver OFDM según [37]

2.3. Codificación en la capa física

La codificación es el método utilizado para convertir un stream de bits de datos en un código predefinido. Los códigos son grupos de bits utilizados para ofrecer un patrón predecible que pueda reconocer tanto el emisor como el receptor. La utilización de patrones predecibles permite distinguir los bits de datos de los bits de control y ofrece una mejor detección de errores en los medios. Además de crear códigos para los datos, los métodos de codificación en la capa física también pueden proporcionar códigos para control, como la identificación del comienzo y el final de una trama. El host que realiza la transmisión transmitirá el patrón específico de bits o un código para identificar el comienzo y el final de la trama. Igualmente, para la señalización de las señales que se realiza en la capa física se emplean codificación binaria del tipo NRZ y Manchester.

Las técnicas de codificación utilizan patrones de bits denominados símbolos. Es posible que la capa física utilice un conjunto de símbolos codificados, denominado grupos de códigos, para representar la información de control o datos codificados. Un grupo de códigos es una secuencia consecutiva de bits de código que se interpretan y asignan como patrones de bits de datos. Tiene como ventaja la reducción del nivel de error de bits, limitación de la energía efectiva transmitida a los medios, ayuda para distinguir los bits de datos de los bits de control.

Los estándares de capa física emplean codificación de canal, para añadir redundancia a los datos de manera controlada para que su transmisión sea más confiable. Mientras más redundancia se agregue, más robusta y lenta será la tasa efectiva de transferencia de bits. Para reducir el número de bits transmitidos e incrementar la tasa de bits codificados se realiza *puncturing* a la salida del codificador convolucional [47]. En la ecuación 2 relaciona la tasa de codificación a la salida del codificador convolucional

$$R = \frac{\mathrm{L}}{M} \qquad (2)$$

Donde R es la tasa de codificación, L es el número de bits de entrada del codificador y M los bits que son mapeados.

Otro tipo de codificación empleada son los denominados códigos espacio-temporales, que añaden redundancia a los bits de información de tal modo que los bits de código resultante permiten señalizar una forma de onda por cada antena transmisora (si la técnica de transmisión utilizada es MIMO). De este modo, la redundancia del codificador, se traduce no sólo en la habitual redundancia temporal, sino que, además se utiliza para la señalización en un sistema con diversidad espacial [36].

Por ejemplo, en el caso de IEEE 802.11ac mantiene la mayoría de las características PHY obligatorias de 802.11n, tales como la codificación convolucional binaria (BCC) para la corrección de errores, MIMO básico, los esquemas de modulación y codificación de 0 a 7, y el intervalo de guarda regular de 800 ns

Los códigos de control de paridad de baja densidad (*Low Density Parity Check*, LDPC) han ganado gran atención desde su redescubrimiento por McKay y Neal en 1996 y se han convertido en serios competidores de los códigos turbo, debido a su capacidad de desempeño cercano al límite de Shannon. Los códigos LDPC se utilizan en varios estándares, como WLAN (IEEE 802.11n), WIMAX (IEEE 802.16e) y en sistemas de almacenamiento de datos. La evaluación del rendimiento de corrección de errores de los códigos LDPC a través de simulaciones, requieren gran cantidad de tiempo, especialmente para códigos largos. Por lo tanto, es necesario utilizar simuladores de alta velocidad dedicados para este propósito. Debido a la reconfigurabilidad y la alta velocidad, los arreglos de puertas programables en campo (FPGA) son excelentes candidatos para evaluar el desempeño de los códigos LDPC[48].

En estándares de comunicación inalámbricos como WiMAX se emplea la técnica de modulación adaptativa, capaz de adaptarse de una forma efectiva al usuario en función de un canal variable en el tiempo maximizando de este modo el caudal de información. Esta técnica soporta un número de esquemas de modulación y de mecanismos de corrección de errores (FEC) permitiendo que el esquema sea cambiado por usuario y estructura básica, teniendo en cuenta la SNR instantánea que el receptor WiMAX recibe en un instante de tiempo. Se denomina adaptativa ya que utiliza la codificación o modulación más favorable para cada subtrama de usuario mejorando así la velocidad de transmisión [36].

En el campo de la codificación, según [49] destaca los campos aritméticos de Galois como un componente crítico en las comunicaciones y en el hardware relacionado con la seguridad, requiriendo arquitecturas aritméticas dedicadas para mejorar el desempeño. Los campos de Galois tienen aplicaciones ampliamente extendidas en la criptografía, códigos correctores de errores, procesamiento de señales. El tamaño de los campos (y por ende de la palabra de código de operación) puede ser muy larga. El *National Institute for Standards and Technology* (NIST) recomienda el uso de campos de Galois correspondiente a 163 bits de tamaño camino de datos.

Un campo de Galois es un campo con un número finito de elementos. El número de elementos q del campo, es un número primo entero $q = p^k$ donde p es el número primo, y $k \geq 1$ es un entero positivo. Los campos de Galois se denotan como $GF(q = p^k)$ o F_q. Como en el caso de las redes WLAN se trabaja con señales binarias, $p=2$ y $k>1$, conocidos como campos de Galois de extensión binaria $GF(q = 2^k)$ o F_{2k}. Para diseñar F_{2k} se toma un conjunto polinomial $F_2[x]$ donde $F_2 = \{0,1\}$ y un polinomio $\mathrm{P(x)}$ de grado k que pertenece a $F_2(x)$. Luego se construye F_{2k} como $F_2[x](mod\ P(x))$. Por ejemplo para el caso de $k=3$, quedaría $F_8 = F_2[x](mod\ x^3 + x + 1)$. En la codificación, lo anterior se emplea frecuentemente en el diseño de registros de desplazamiento de realimentación lineal extendida.

2.4. Herramienta de simulación MATLAB en el diseño de SDR

MATLAB es un software propietario desarrollado por la compañía MathWorks que contiene programación de alto nivel y se acompaña de un conjunto de librerías o herramientas (toolboxes). Dentro de sus prestaciones se encuentran: la manipulación de matrices, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario, la comunicación con programas en otros lenguajes y con dispositivos de hardware. SIMULINK es un ambiente de software que corre sobre el MATLAB y utiliza una interfaz de usuario gráfica (GUI) que es utilizada para construir modelos de sistemas (como los sistemas de comunicaciones inalámbricos), en el dominio del tiempo o la frecuencia, para alguna operación específica de procesamiento, simulación, así como análisis de los resultados. En SIMULINK los modelos son jerárquicos y pueden ser discretos, continuos o híbridos [7].

Según [50] un desafío importante relacionado con las implementaciones de SDR son los entornos de software utilizados para el diseño del sistema. Una herramienta de software de uso común para el diseño y creación de prototipos de implementaciones de SDR es MATLAB, una herramienta de software versátil con un soporte de usuario sustancial y muchos módulos y bloques de procesamiento diferentes disponibles para su uso.

En el trabajo de [18] se diseñan moduladoras digitales empleando la tecnología SDR. Los autores señalan que MATLAB dispone de herramientas adicionales que expanden sus prestaciones como SIMULINK, un software para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. SIMULINK proporciona una interfaz de usuario gráfica para construir los modelos como diagramas de bloques. Además, incluye una amplia biblioteca de fuentes y herramientas de visualización que lo hacen valioso para el diseño de sistemas.

En el trabajo de [51] se simula en MATLAB la capa física del estándar IEEE 802.22, redes WRAN. Según los autores, es una herramienta muy utilizada en el ámbito académico y en el caso de la de redes WRAN para MATLAB, no se encuentra implementado este sistema.

Sin embargo, en el trabajo de [37] modelan en MATLAB, mediante una plataforma SDR, la capa física de IEEE 802.22, empleando OFDM. Los autores se aprovechan de las bondades que brindan los distintos bloques existentes en la librería de Simulink, en materia de comunicaciones, manejo de señales, cálculos matemáticos, etc, para obtener los resultados en la simulación, que posteriormente implementan en un USRP, evidenciando lo recurrente del uso de esta herramienta de software para simular estándares inalámbricos utilizando SDR.

2.5. Conclusiones parciales

Entre las técnicas de transmisión definidas para la capa física del estándar IEEE 802.11, la técnica de Espectro Extendido por Secuencia Directa y la de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, son las mayormente utilizadas por las fortalezas que presentan en cuanto a la robustez de la codificación que emplean, la eficiencia espectral en cuanto al ancho de banda en la transmisión. De los algoritmos de codificación existentes, los algoritmos de Galois extendidos se encuentran entre los más utilizados en las comunicaciones inalámbricas,

por la fortaleza que representan en cuanto a seguridad, dada las características matemáticas de los mismos. Para el diseño de un sistema de comunicaciones inalámbrico que agrupe lo anterior, el software MATLAB 2016 constituye una herramienta ampliamente utilizada por las bondades que brinda, al permitir modelar estos sistemas y con la simulación, obtener resultados que permitan evaluar parámetros de desempeño de los mismos.

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL MODELO DE CAPA FÍSICA WLAN

En este capítulo se realiza el diseño de la capa física del estándar IEEE 802.11 en SIMULINK, seleccionando ambas técnicas de transmisión de datos abordadas en el capítulo anterior: DSSS y OFDM. En el primero de los casos, se simularán dos escenarios, uno empleando algoritmos de Galois y el otro empleando secuencias de Barker. Finalmente se evalúa el desempeño de la misma, realizando un análisis teniendo en cuenta el parámetro BER (*Bit Error Rate*) para diferentes relaciones de Eb/No (Energía de bit-Densidad espectral de ruido) presentes en la transmisión.

3.1. Diseño en MATLAB/SIMULINK de la capa física WLAN

La Radio Definida por Software presenta gran vinculación con las herramientas de simulación, pues son en ellas donde se desarrollan aplicaciones de esta tecnología, por lo que constituyen el corazón de cualquier sistema SDR y ahí también radica su fortaleza.

Por esta razón se modeló la capa física de WLAN en SIMULINK, teniendo en cuenta los elementos que fueron expuestas en el capítulo anterior, en cuanto a las técnicas de transmisión de datos que son empleadas en estos sistemas de comunicaciones inalámbricos. Se realizaron tres modelos: dos que emplean la técnica de espectro extendido por secuencia directa con algoritmos de Galois y Secuencias de Barker y el otro modelo utilizando OFDM.

3.1.1. Modelo de capa física de IEEE 802.11 empleando DSSS

En este modelo se analiza su desempeño, cuando se utiliza técnica de transmisión DSSS. Se modelaron dos diseños con DSSS: para el primero se creó un subsistema que constituye un generador de secuencias pseudoaleatorias que opera bajo el principio de los campos de Galois, para la mezcla con la señal de datos y para el segundo se empleó el bloque de SIMULINK *Barker Code* G*enerator*. Otro de los elementos que diferencian ambos diseños es la modulación utilizada, en un caso fue QPSK y en el otro BPSK. Se incluyeron elementos además como la codificación convolucional e *interleaving*.

El modelo que incluye un bloque subsistema que emplea el generador de secuencias pseudoaleatorias, con campos de Galois, fue estructurado según GF (2^8). Las etapas de realimentación fueron 4. Debido a los altos costes computacionales en cuanto a procesamiento, fue conveniente emplear ese tamaño de cuerpo de Galois. La figura 3.1 muestra el diseño y en la figura 3.2 se muestra la configuración del bloque *Subsystem*.

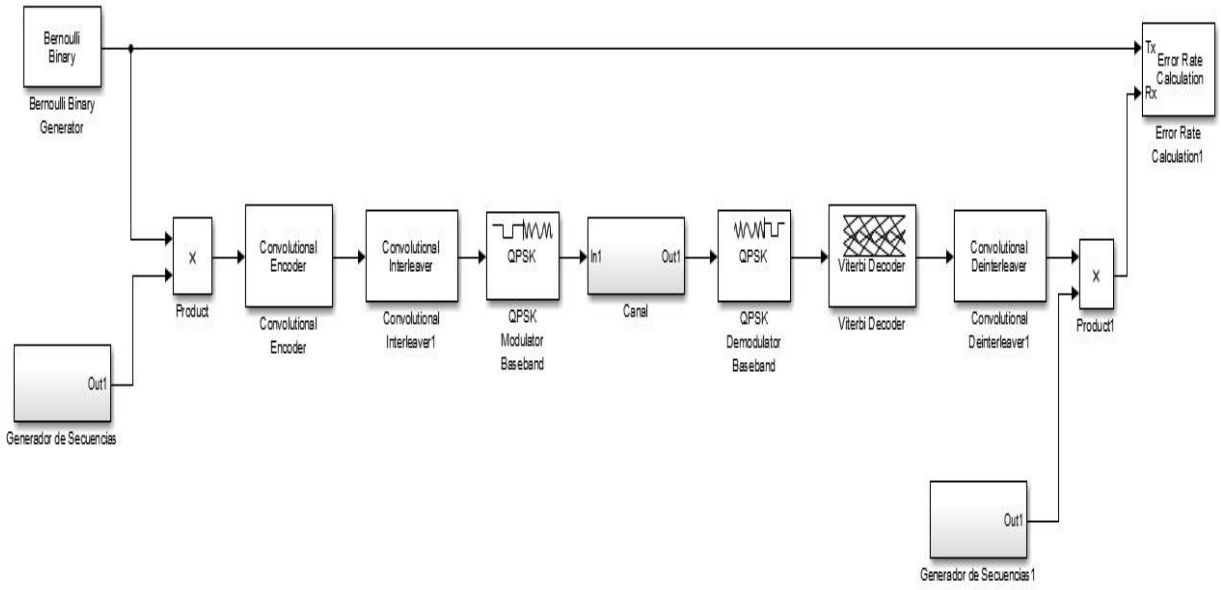

Figura 3.1 Diseño de capa física WLAN con campo de Galois

.

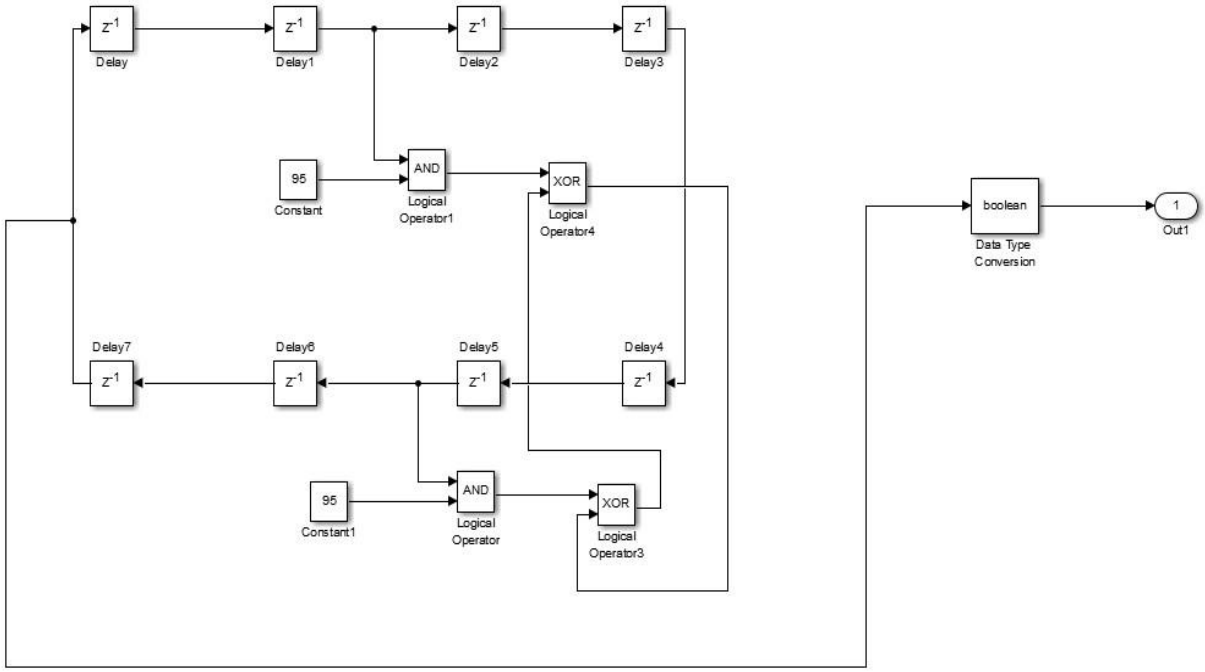

Figura 3.2 Configuración del bloque *Subsystem*

Por otra parte, SIMULINK contiene bloques predeterminados que realizan estas mismas funciones como el *PN Sequences* y el *Scrambler*. La figura 3.3 muestra el modelo diseñado a partir de utilizar un bloque generador de secuencias de Barker.

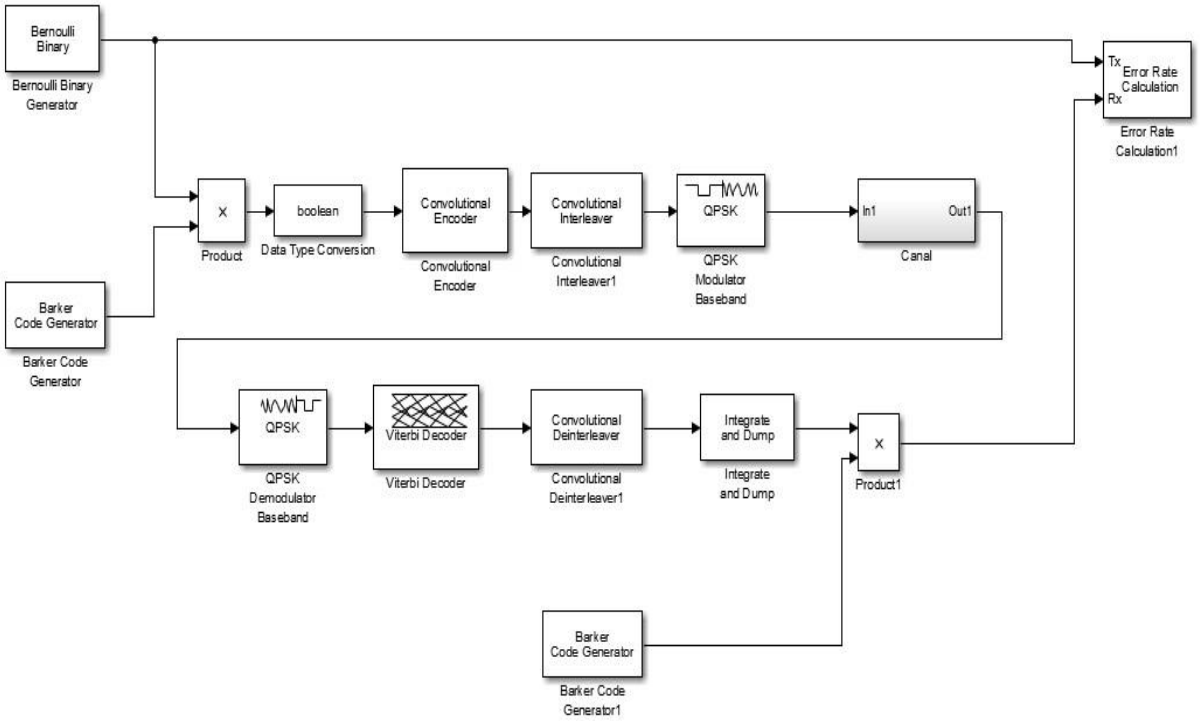

Figura 3.3 Diseño de capa física WLAN empleando el bloque *Barker Code Generator*

Más adelante, cuando se aborde la evaluación de los modelos, se podrá analizar la diferencia en el comportamiento de la capa física con DSSS cuando se utiliza un *Barker Code Generator* predeterminado de SIMULINK, y el generador de secuencias con aritmética de Galois. No obstante, se creó el subsistema con campos de Galois, por lo analizado en el capítulo anterior con respecto a esta temática porque con las secuencias pseudoaleatorias, se logran robustecer más la señal a ser transmitida, debido a que ésta se mezcla con el ruido y mejora en cuanto a la seguridad, todo esto a costa del aumento del ancho de banda y la complejidad en el procesamiento en el receptor.

La codificación convolucional es un elemento que tradicionalmente se emplea por definición en IEEE 802.11. Para el diseño del modelo, se escogió el bloque *Convolutional Encoder*, que tiene la característica de ser configurado con un polinomio de *Trellis* de longitud 7, agregándole además la técnica de *puncturing*, para evitar errores en ráfagas en el código y que la tasa de corrección sea mucho mejor en el receptor. En el extremo receptor el decodificador utiliza el algoritmo de Viterbi, obtenido de la misma librería.

El modulador QPSK utiliza constelación de Gray y desplazamiento de fase de valor $\pi/4$. El bloque de *Convolutional Interleaver* se escogió para entrelazar aleatoriamente los bits transmitido y realizar similar proceso con los bits recibidos. Esto se realiza para proteger la información de los efectos de los errores en ráfagas debido a que al dispersar en el tiempo los bits ligados por la codificación, no todos ellos se afectan simultáneamente, facilitando así la corrección de errores.

Se utilizó un bloque subsistema, donde se incluyó, además del canal con ruido blanco gaussiano, un canal afectado por desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh y se agregó un ecualizador. Esto se muestra en la figura 3.4

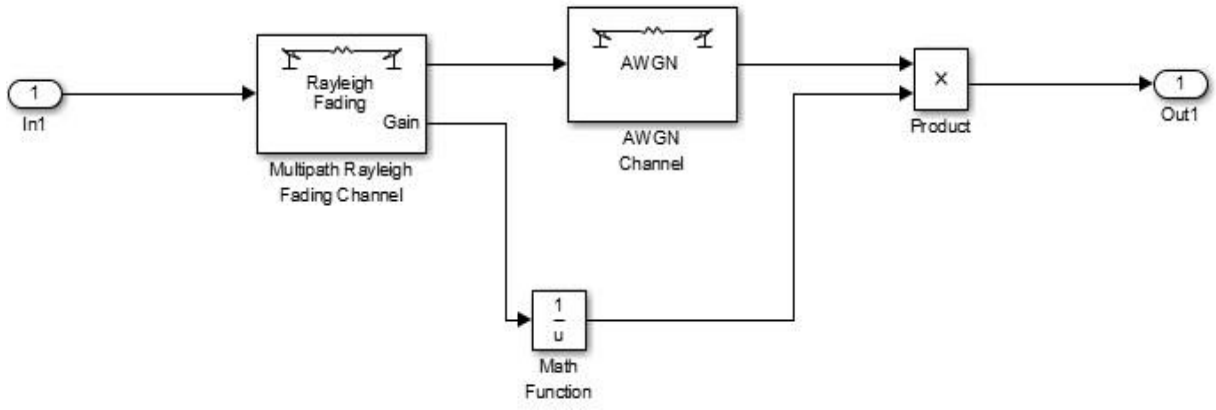

Figura 3.4 Diseño del subsistema Canal

3.1.2. Modelo de capa física de IEEE 802.11 empleando OFDM

En el subepígrafe anterior se había abordado dos modelos de capa física WLAN con técnica DSSS: uno que consistió en mezclar la señal de datos con un generador de secuencias pseudoaleatorias, empleando aritmética de Galois y otro con un bloque predeterminado del SIMULINK que opera bajo el principio de transmisión de secuencias de Barker.

Otra de las técnicas distinguidas en la capa física de IEEE 802.11 es OFDM, ampliamente empleada por las velocidades de transmisión que brinda. El modelo que se diseñó, como se observa en la figura 3.5, emplea esta técnica, destacando la posibilidad que brinda la herramienta de simulación en poder contar con un bloque que realiza la operación de OFDM.

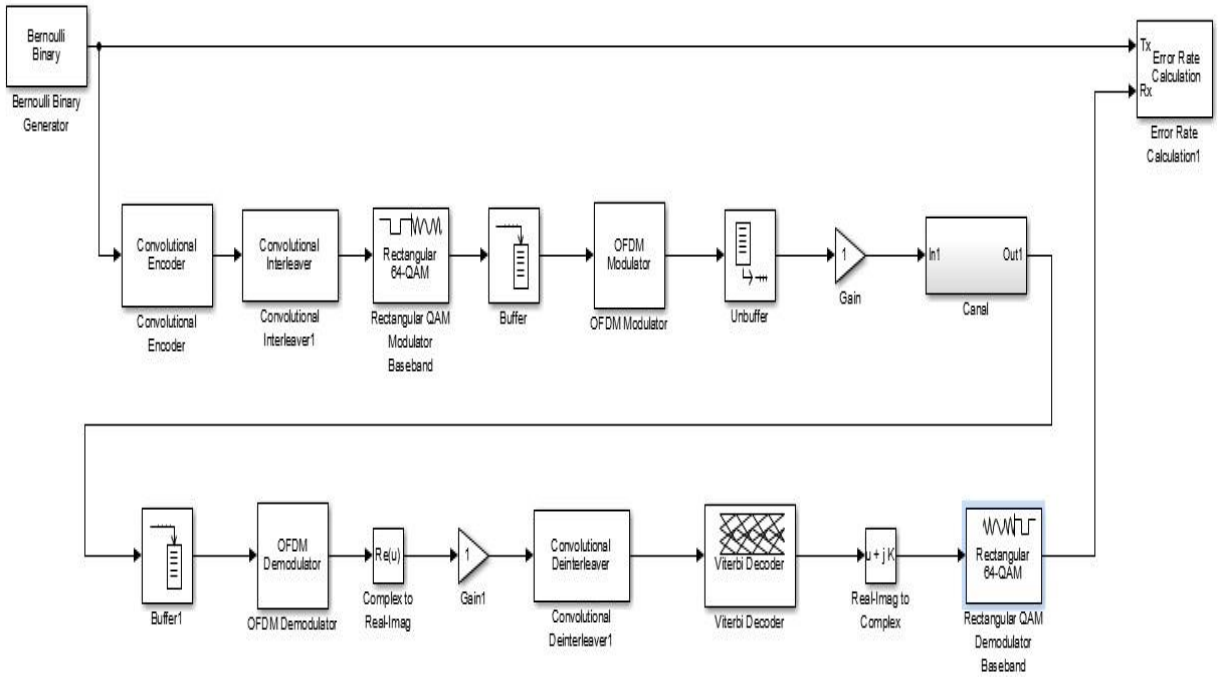

Figura 3.5 Diseño de capa física WLAN con OFDM

Se utilizó QAM, ya que constituye una de las modulaciones extensamente usadas en esta técnica de transmisión. El bloque que propiamente realiza la función de modulador OFDM (así como su equivalente en el extremo receptor) aplica esta técnica a la señal de datos ya modulada, ejecutando todas las operaciones aritméticas relacionadas (dígase aplicación de la Transformada de Fourier, insertar/remover pilotos, establecer la longitud prefijo cíclico), las cuales son configuradas en el bloque.

3.2. Evaluación de desempeño de capa física WLAN

En el diseño de los sistemas de comunicaciones se tienen en cuenta criterios de análisis paramétricos de desempeño, para determinar si los modelos cumplen con los requerimientos para los cuáles fueron diseñados. Uno de los parámetros clásicos que se tienen en cuenta en las telecomunicaciones es la Razón de Error de Bit (*Bit Error Rate*, *BER*). La BER es una medida cuantitativa de extremo a extremo en un enlace que permite evaluar la calidad de la información

recibida y relaciona, de los bits recibidos, cuántos de ellos son errados con respecto al número total de bits que se transmiten, obteniéndose de ésta forma su tasa.

3.2.1. Desempeño del modelo de capa física con DSSS

En el primer modelo de capa física de IEEE 802.11, se había empleado técnica de transmisión DSSS, con un subsistema generador de secuencias aleatorias que utilizaba un algoritmo de Galois y otro con un generador de secuencias aleatorias de Barker, predeterminado en SIMULINK.

Para el análisis de la BER en ambos modelos, se empleó la simulación de Monte Carlo, que consiste en una técnica empleada para estudiar cómo responde un modelo a entradas generadas de forma aleatoria. El lenguaje de MATLAB proporciona una serie de funciones matemáticas de alto nivel que permiten crear un modelo para la simulación Monte Carlo y ejecutar simulaciones de este tipo. El diseño y las pruebas de estos sistemas complejos implican varios pasos, incluyendo la identificación de los parámetros del modelo que tendrán un mayor impacto en los requisitos y el comportamiento, el registro y el análisis de los datos de simulación y la verificación del diseño del sistema.

En la figura 3.6 y 3.7 se muestra el análisis de la BER para ambos diseños con DSSS.

Como se puede observar en las figuras, las curvas obtenidas muestran el comportamiento del parámetro BER con respecto a la variación de Eb/No. La relación Eb/No es fundamental para cualquier sistema de comunicación, pues es muy útil para modelar el canal y ofrece información sobre cuán fidedigna es la transmisión y con qué calidad se recibe la información a transmitir.

Como se observa en el primero de los casos, la transmisión que emplea DSSS con algoritmos de Galois, tiene un comportamiento cuasi-lineal en cuanto a la relación BER vs Eb/No. A partir de una Eb/No de 14.5dB, la razón de error de bit decrece y comienza o tener valores aceptables para garantizar en el sistema, calidad en cuanto a la transmisión-recepción de la señal inalámbrica, en el orden de 10^{-4}. Teniendo en cuenta lo analizado en este capítulo y el anterior, se explica que el comportamiento sea ligeramente superior, al del sistema con secuencias de Barker, pues la fortaleza en la codificación permite lograr mejores resultados en cuanto al parámetro BER. En el segundo

caso el comportamiento en similar al primero, sin embargo, la curva de la BER comienza a tener un comportamiento aceptable a partir de aproximadamente 13dB de Eb/No, pero en resultados de BER inferior al modelo.

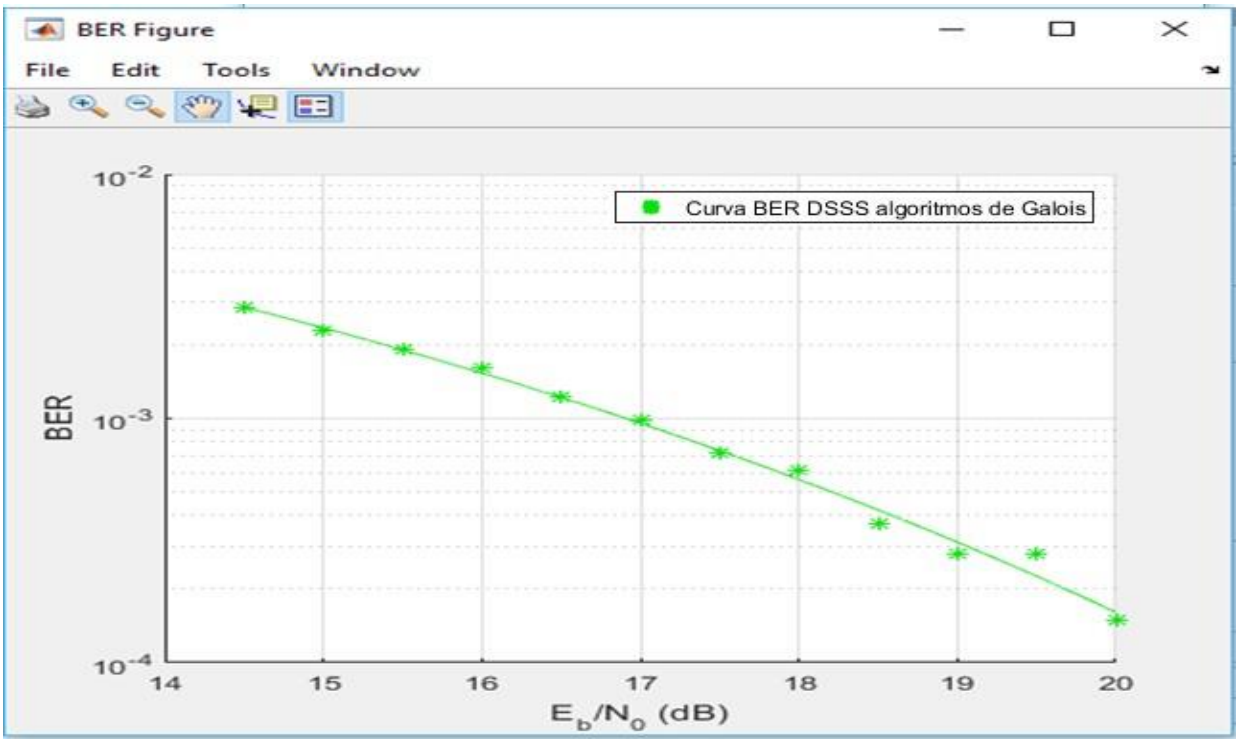

Figura 3.6 Comportamiento de la BER para el modelo DSSS con algoritmo de Galois

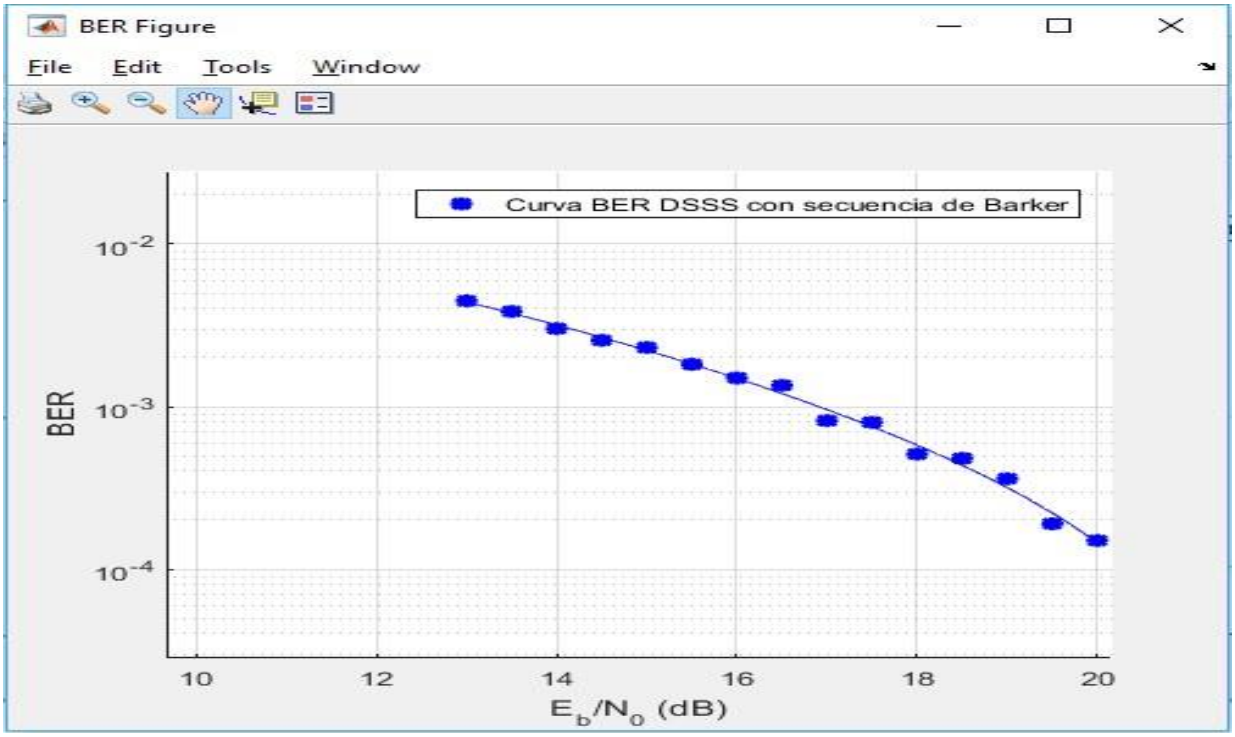

Figura 3.7 Comportamiento de la BER para el modelo DSSS con *Barker Code Generator*

3.2.2. Desempeño del modelo de capa física con OFDM

El modelo de capa física WLAN utilizando Radio Definida por Software fue diseñado utilizando igualmente técnica de transmisión de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales. Para los análisis comparativos de esta simulación con el sistema explicado en el subepígrafe anterior, se tuvo en cuenta de igual manera el parámetro de la BER. En la figura 3.8 se muestra el análisis del comportamiento de la BER para el modelo utilizando OFDM.

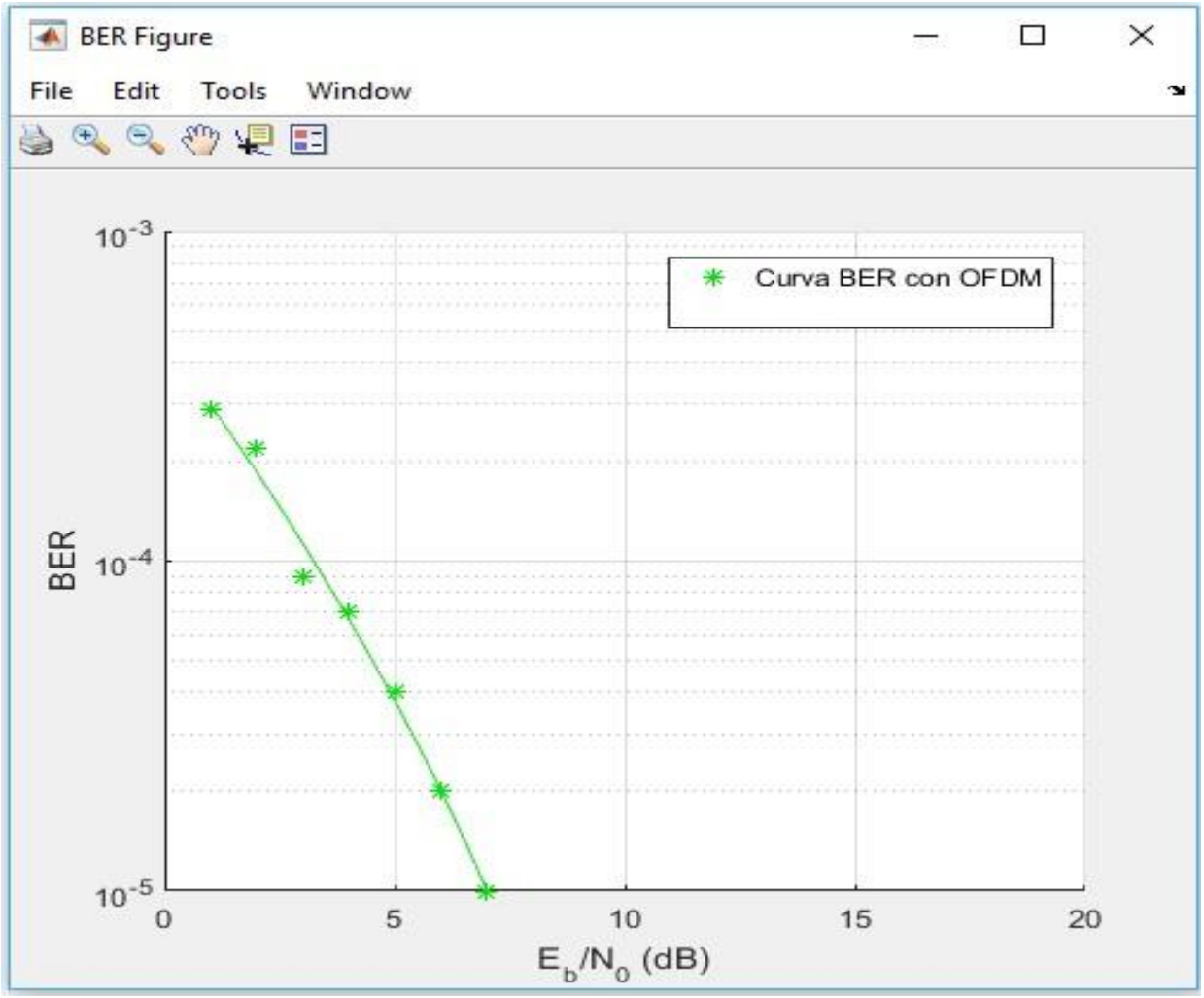

Figura 3.8 Comportamiento de la BER para el modelo con OFDM

Se empleó de igual manera la simulación de Monte Carlo, teniendo en cuenta la variación de la Eb/No, para modelar el canal de comunicaciones. El comportamiento de la curva de BER vs Eb/No como puede observarse tiene una tendencia monótona decreciente a partir de 1.5 dB de Eb/No, donde la BER decrece hasta alcanzar un valor de 10^{-5}, lo cuál representa un valor óptimo para garantizar una calidad en la transmisión de los datos con respecto a las pérdidas producto de del medio inalámbrico.

El resultado de la simulación corrobora lo analizado al inicio de este capítulo y lo abordado sobre OFDM en el capítulo anterior. OFDM mantiene un comportamiento superior en cuanto a la razón

de error de bit, que tiene que ver con las fortalezas en la codificación que emplea esta técnica, así como la modulación. Es importante observar que el comportamiento del sistema empleando OFDM es muy superior al modelo cuando emplea técnica DSSS, tanto con secuencias de Barker como con algoritmos de Galois.

3.3. Conclusiones parciales

En este capítulo se realizó la modelación y simulación de la capa física del estándar IEEE 802.11 utilizando Radio Definida por Software en la herramienta de software MATLAB/SIMULINK, seleccionando dos técnicas de transmisión de datos: DSSS y OFDM. Se compararon el comportamiento de ambos modelos teniendo en cuenta el parámetro BER, lo cual arrojó que el modelo con OFDM tiene un comportamiento superior al modelo DSSS en cuanto a cantidad de bits errados recibidos en la transmisión-recepción de la señal inalámbrica, lo cual es correspondiente con los elementos analizados en el capítulo anterior sobre las dos técnicas y su empleo generalizado en sistemas de comunicaciones inalámbricos.

CONCLUSIONES

A partir de lo fundamentado en esta tesis, de los objetivos propuestos y teniendo en cuenta los resultados expuestos se pueden arribar a las siguientes conclusiones:

- La tecnología Radio Definida por Software es capaz de resolver problemas de compatibilidad, seguridad y eficiencia en cuánto a sistemas de radiocomunicaciones como WLAN, y las tendencias actuales en cuanto al estudio de la temática, ratifican la importancia de su estudio.
- La técnica de Espectro Extendido por Secuencia Directa y la de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, son las mayormente utilizadas por el estándar, debido a las fortalezas que presentan en cuanto a la robustez de la codificación que emplean y la eficiencia espectral en cuanto al ancho de banda de transmisión.
- El modelo de capa física desarrollado, tanto para OFDM como DSSS, evidencia la posibilidad que brinda la herramienta de simulación MATLAB/SIMULINK en construir el modelo, teniendo en cuenta los elementos fundamentales que pueden optimizar el diseño.
- Los resultados en la simulación del modelo de capa física en OFDM, en cuanto a los parámetros de comparación fueron superiores con respecto al modelo de capa física con DSSS que empleó secuencias de Barker y Algoritmo de Galois, lo cual corrobora lo planteado en el marco teórico de este estudio, dado que OFDM permite menores niveles en cuánto a la BER con relación al otro modelo debido a su estructura de codificación y modulación como técnica de transmisión.

RECOMENDACIONES

Como futuros estudios que profundicen lo abordado en esta investigación se propone:

- Realizar la implementación en una plataforma de hardware de los modelos diseñados en el MATLAB/SIMULINK para analizar su comportamiento práctico.
- Valorar la inclusión de la temática abordada, así como los diseños realizados, para la introducción de ésta tecnología en alguna asignatura optativa en la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. Akeela y B. Dezfouli, «Software-defined Radios: Architecture, State-of-the-art, and Challenges», *Internet Things Res. Lab Dep. Comput. Eng. St. Clara Univ. USA*, mar. 2018.

[2] A. González Paz, D. Beltrán Casanova, y E. Fuentes Gari, «Propuesta de protocolos de seguridad para la red inalámbrica local de la Universidad de Cienfuegos», *Rev. Científica Multidiscip. Univ. Cienfuegos*, dic. 2016.

[3] S. Alblwi y K. Shujaee, «A Survey on Wireless Security Protocol WPA2», *Intl Conf Secur. Manag.*, 2017.

[4] A. Mukherjee, A. A. Fakoorian, J. Huang, y A. L. Swindlehurst, «Principles of Physical Layer Security in Multiuser Wireless Networks: A Survey», *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, p. 24, 2014.

[5] F. J. Guerra Manchego, «Sistema de Seguridad en Capa Física empleando Descomposición Algebraica del Canal para Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas OFDM», Universidad Católica de San Pablo, Arequipa, Perú, 2017.

[6] C. Villasante Marcos, «Análisis del efecto de la aleatorización de las direcciones MAC de las estaciones en IEEE 802.11R», Universidad Carlos III, Madrid, España, 2015.

[7] J. C. Cruz Sandoval, «Desarrollo de aplicaciones para la Radio Definida por Software», Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, 2014.

[8] E. J. Guaña Moya, «Diseño de una red de sensores inalámbricos (WSN) para monitorear parámetros relacionados con la agricultura», Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2016.

[9] E. D. Jaramillo Vinueza, «Diseño de una red WiFi para brindar servicios de Internet inalámbrico a Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas», Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2016.

[10] F. López Ortiz, «El estándar IEEE 802.11 Wireless LAN», 2015.

[11] J. Salazar, «Redes Inalámbricas», República Checa, 2016.

[12] J. Prieto Blázquez, *Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos*. Universidad de Cataluña, 2015.

[13] J. A. Herrera Machado, «Diseño de un protocolo de comunicación inalámbrico para la transmisión de información de telemetría hidrometeorológica utilizando radios reconfigurables USRP N210», Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2016.

[14] E. Ospina-Martínez y L. Betancur Agudelo, «FBMC, una opción para un uso óptimo del espectro electromagnético», *Rev. En Telecomunicaciones E Informática*, vol. 3, jun. 2013.

[15] F. Granelli, A. A. Gebremariam, y M. Usman, «Software Defined and Virtualized Wireless Access in future Wireless Network: Scenarios and Standard», *IEEE Commun. Mag. — Commun. Stand. Suppl.*, jun. 2015.

[16] G. Vázquez Pedraza, «Estudio de protocolos de comunicación para el envío de información médica mediante dispositivos móviles inteligentes», Universidad Autónoma Metropolitana, México, 2018.

[17] B. Naeem y A. Nyamapfene, «A Software Radio Design Approach for Heterogeneous Wireless Access Protocol Transceivers», *Pac. J. Sci. Technol.*, vol. 14, n.º 1, may 2013.

[18] Y. Rodríguez-Gallo Guerra, «Moduladores digitales para la Radio Definida por Software utilizando herramientas de diseño de FPGA», Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Villa Clara, Cuba, 2013.

[19] R. Supriya, S. Murugan, y R. Biradar, «Design and Implementation of Software Defined Radio Using Xilinx System Generator», *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, n.º 12, dic. 2012.

[20] ITU-R, «Software-defined radio in the land mobile, amateur and amateur-satellite services», nov-2012.

[21] D. Rother, F. Jackisch, y J. Zöllner, «A Generic Framework for Evaluating the Performance of Software Defined Radio Algorithms», *IEEE Int. Conf. Consum. Electron.*, 2016.

[22] M. Zeeshan, S. Ahmed Khan, y Z. Mehtab, «Data Aided Algorithm for Burst Detection in Wideband Networking Waveform with FPGA Implementation on SDR Platform», *IEEE*, 2014.

[23] A. Castro Lechtale, «Utilización de los Espacios Blancos: Una solución al problema de la saturación del espectro de frecuencias», Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2015.

[24] D. F. Macedo, L. F. M. Vieira, y M. A. M. Vieira, «Programmable Networks—From Software-Defined Radio to Software-Defined Networking», *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 17, 2015.

[25] UIT-R, «Vocabulario de términos relativos al servicio móvil terrestre», March 2007.

[26] A. Moraleda-Soler, B. Coll-Perales, y J. Gozalvez, «Comunicaciones D2D Oportunistas: Evaluación Experimental del rendimiento en términos de Energía, Capacidad y QoS», *IEEE Commun. Mag.*, 2014.

[27] G. González Martínez, «Diseño de un sistema de acceso al medio y modulación en banda base utilizando radio definido por software para comunicación de largo alcance entre boyas», Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 2016.

[28] K. Vachhani y R. Arvind Mallari, «Experimental study on Wide Band FM Receiver using GNURadio and RTL-SDR», *IEEE*, 2015.

[29] Z. Zhao, Y. Shen, y Y. Bai, «Design and Implementation of the BPSK Modem Based on Software Defined Radio», *Int. Conf. Instrum. Meas. Comput. Commun. Control*, 2011.

[30] S. Ahmed y M. Khurram, «MATLAB Based Implementation of IEEE 802.11b DSSS Transmitter», *13th Int. Bhurban Conf. Appl. Sci. Technol.*, 2016.

[31] Á. Arnanz Arroyo, «Análisis de las prestaciones del acceso al medio CSMA en redes WiFi», Universidad Carlos III, Madrid, España, 2015.

[32] S. Aust y R. Venkatesha Prasad, «Advances in Wireless M2M and IoT: Rapid SDR-prototyping of IEEE 802.11ah», *Delft Univ. Technol.*, p. 3, 2017.

[33] H. Yang, J. Shim, J. Bang, y Y. Lee, «Software-based Giga-bit WLAN Platform», *IEEE Int. Conf. Consum. Electron.*, 2014.

[34] R. Lara Cueva, C. Fernández Jiménez, y C. Morales Maldonado, «Análisis del desempeño en un enlace descendente de redes basadas en los estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11n y WDS», *Rev. Iberoam. Las Cienc. Comput. E Informática*, 2016.

[35] N. Alonso Torres, «RDS (Radio Definido por Software). Desafíos y consideraciones para su implementación», Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría», La Habana. Cuba, 2012.

[36] M. Moreno Martín, «Análisis, diseño y despliegue de una red WiFi en Santillana del Mar», UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID, 2015.

[37] A. S. Bañacia y M. G. Miko Gelu, «A Simplified IEEE 802.22 PHY layer in Matlab-Simulink and SDR Platform», *IEEE*, p. 4, 2016.

[38] F. Álvarez Paliza, «Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN)», Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.

[39] L. . García Cabezas y S. . Logroño Naranjo, «Diseño e implementación de un kiosco tecnológico mediante el uso del protocolo IEEE 802.11X para los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes de la ESPOCH», Escuela Politécnica de Chimborazo, Ecuador, 2016.

[40] J. Siguenza Ramos, «Evaluación de la capa física del estándar IEEE 802.11p para redes vehiculares en un canal AWGN», Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2017.

[41] J. C. Cruz Sandoval y C. Roche Beltrán, «Modelo de seguridad en redes WLAN utilizando Radio Definida por Software», *9na Conf. Científica Int.*, p. 10, 2019.

[42] X. Xiong y T. Wu, «Implementation and Performance Evaluation of LECIM for 5G M2M Applications with SDR», *Globecom 2014 Workshop- Telecommun. Stand. IEEE*, p. 6, 2014.

[43] D. F. Peñarrieta Bravo, «Diseño de una red WiFi de largo alcance, a través del espectro no licenciado, para permitir el acceso al servicio de Internet de banda ancha, en los sectores más poblados de la zona rural del Cantón Junín», Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador, 2015.

[44] X. Xiong y K. Zheng, «Low Power Wide Area Machine-To-Machine Networks: Key Techniques and prototype», *IEEE Commun. Mag. — Commun. Stand. Suppl.*, sep. 2015.

[45] L. Rojo Celemín, «Implementación de un sistema de comunicaciones OFDM IEEE 802.11a sobre un dispositivo SFF SDR», Universidad Carlos III, Madrid, España, 2014.

[46] K. Wu y H. Li, «hJam: Attachment Transmission in WLANs», *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 12, dic. 2013.

[47] Á. D. Llerena Camacho, «Análisis y documentación de la implementación de la capa física IEEE 802.11p en el simulador de red NS-3», Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018.

[48] S. A. Ali Zaidi y M. Awais, «FPGA accelerator of Quasi Cyclic EG-LDPC Codes decoder for NAND flash memories», *IEEE Mag.*, p. 6, 2017.

[49] J. Lv, P. Kalla, y F. Enescu, «Efficient Gröbner Basis Reductions for Formal Verification of Galois Field Arithmetic Circuits», *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 32, p. 12, sep. 2013.

[50] Y. Vardhan Varshney y A. Kumar Sharma, «Design & Simulation of Zigbee Transceiver System Using Matlab», *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 4, abr. 2013.

[51] L. Vázquez Romaguera, L. Romero Amondaray, y F. Perdigón Romero, «Simulación de la capa física del estándar IEEE 802.22», *XV Conv. Feria Int. Informática*, p. 8, 2013.