



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica  
OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink**

AUTOR:

Jordan Zamora, Kerwin Israel

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de  
**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

Ing. Romero Rosero, Carlos Bolívar

Guayaquil, Ecuador

7 de marzo del 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Jordan Zamora, Kerwin Israel** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

Ing. Romero Rosero, Carlos Bolívar

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 7 días del mes de marzo del año 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Jordan Zamora, Kerwin Israel**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación “**Análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 7 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

---

JORDAN ZAMORA, KERWIN ISRAEL



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Jordan Zamora, Kerwin Israel**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 7 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

---

JORDAN ZAMORA, KERWIN ISRAEL

# REPORTE DE URKUND

**URKUND** ➔ Abrir sesi

<b>Documento</b>	<a href="#">TT Kerwin Jordan.docx</a> (D126816376)
<b>Presentado</b>	2022-02-01 19:57 (-05:00)
<b>Presentado por</b>	fernandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@analysis.urkund.com
<b>Mensaje</b>	Revisión urkund de Kerwin Jordan Zamora <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 1% de estas 22 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

**Lista de fuentes** Bloques

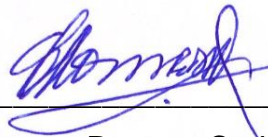
+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	-
+	>	<a href="http://201.159.223.180/bitstream/3317/171...">http://201.159.223.180/bitstream/3317/171...</a>	-
+		<a href="http://201.159.223.180/bitstream/3317/162...">http://201.159.223.180/bitstream/3317/162...</a>	-
+		<a href="http://201.159.223.180/bitstream/3317/162...">http://201.159.223.180/bitstream/3317/162...</a>	-
+		<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/...">http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/...</a>	-
+		<a href="https://core.ac.uk/download/pdf/11461001...">https://core.ac.uk/download/pdf/11461001...</a>	-

Fuentes alternativas

0 Advertencias. Reiniciar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA  
DE INGENIERÍA  
EN TELECOMUNICACIONES  
TEMA:  
Análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando  
la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación  
MatLab/Simulink  
AUTOR: Jordan Zamora, Kerwin Israel  
Trabajo de Integración Curricular  
previo a la obtención del título de INGENIERO EN  
TELECOMUNICACIONES  
TUTOR: Ing. Romero Rosero, Carlos Bolívar

TUTOR



Ing. Romero Rosero, Carlos Bolívar

## **DEDICATORIA**

El presente Trabajo de Titulación va dedicado a mis padres, a mi esposa y a mi hijo y de manera especial a mi Tutor y todos los docentes que siempre me extendieron su mano y me alentaron hasta llegar a la meta.

**EL AUTOR**

**JORDAN ZAMORA, KERWIN ISRAEL**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, mis padres, a mi esposa y mi hijo por haberme apoyado a lo largo de esta travesía que está llegando a su fin; sin ellos no hubiese sido posible y que mejor poder culminar esta etapa juntos.

EL AUTOR

JORDAN ZAMORA, KERWIN ISRAEL



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f.

**M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESUS**  
DECANO

f.

**M. Sc. HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO**  
COORDINADOR DEL ÁREA

f.

**M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**  
OPONENTE



## Índice General

Índice de Figuras .....	XI
Índice de Tablas .....	XIII
Resumen .....	XIV
Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación.....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes. ....	3
1.3. Definición del Problema.....	4
1.4. Justificación del Problema.....	4
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	4
1.5.1. Objetivo General.....	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Hipótesis. ....	5
1.7. Metodología de Investigación.....	5
Capítulo 2: Fundamentación Teórica .....	7
2.1. Introducción.....	7
2.2. Definición de redes inalámbricas.....	8
2.3. Clasificación de las redes inalámbricas. ....	9
2.4. Redes según el área de cobertura. ....	10
2.4.1. Redes WPAN. ....	10
2.4.2. Redes WLAN.....	14
2.4.3. Redes WMAN.....	16
2.5. Redes dependiendo de la infraestructura. ....	19
2.5.1. Redes de telefonía móvil. ....	20
2.6. 22	
2.7. Fundamentos de la técnica de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM).....	22

Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados .....	27
3.1. Análisis de la herramienta de simulación MatLab/Simulink.....	27
3.2. Descripción del modelo de simulación de la técnica OFDM. ....	30
3.3. Diseño del escenario de simulación 1: modulación y demodulación OFDM en un sistema de comunicación básico.....	30
3.4. Diseño del escenario de simulación 2: sistema basado en OFDM. ...	32
3.5. Análisis de resultados obtenidos en los escenarios de simulación propuestos. ....	33
3.5.1. Análisis de simulación del escenario 1.....	33
3.5.2. Análisis de simulación del escenario 2.....	37
3.5.3. Análisis comparativo entre los escenarios de simulación de los diseños de OFDM.....	41
Conclusiones.....	43
Recomendaciones.....	44
Bibliografía.....	45

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Comunicación inalámbrica con infraestructura.....	9
Figura 2. 2: Comunicación inalámbrica sin infraestructura. ....	9
Figura 2. 3: Topología de comunicación Bluetooth Piconet.....	11
Figura 2. 4: Topología de comunicación en redes ZigBee/IEEE 802.15.4....	12
Figura 2. 5: Esquema de la etiqueta autónoma con sensor NFC. ....	14
Figura 2. 6: Comunicación inalámbrica mediante AP.....	14
Figura 2. 7: Visión general de alto nivel de Wi-Fi Sensing (SENS). ....	15
Figura 2. 8: Esquema de comunicación del estándar IEEE 802.16.....	17
Figura 2. 9: Área de cobertura IEEE 802.16 - WiMAX fija.....	18
Figura 2. 10: Una hipotética red WiMAX fija IEEE 802.16.....	19
Figura 2. 11: Estructura de las redes de telefonía celular. ....	20
Figura 2. 12: Arquitectura de redes de telefonía celular 2G/3G. ....	21
Figura 2. 13: Arquitectura de red de telefonía celular 4G.....	22
Figura 2. 14: Principio de funcionamiento de OFDM.....	24
Figura 2. 15: Diagrama de bloques del modulador OFDM. ....	25
Figura 2. 16: Diagrama de constelación QAM-16 normalizada. ....	26
Figura 2. 17: Ejemplo para la modulación 16-QAM.....	26

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Conectividad de Raspberry Pi a un ordenador que ejecuta MatLab/Simulink. ....	28
Figura 3. 2: Diseño e implementación del escenario de simulación 1. ....	31
Figura 3. 3: Diseño del escenario de simulación 2.....	33
Figura 3. 4: Diagrama de constelación en el (a) transmisor y (b) receptor cuando SNR = 30 dB. ....	34
Figura 3. 5: Diagrama de constelación en el (a) transmisor y (b) receptor cuando SNR = 60 dB. ....	35

Figura 3. 6: Representación de resultados obtenidos del escenario 1 de la BER para diversos esquemas de modulación en canales de desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh con ruido.....	36
Figura 3. 7: Representación de resultados obtenidos del escenario 1 de la BER para diversos esquemas de modulación en canales de desvanecimiento multitrayecto de Rician con ruido.....	37
Figura 3. 8: Representación de resultados obtenidos del escenario 2 de la BER para diversos esquemas de modulación en canales de desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh con ruido.....	39
Figura 3. 9: Representación de resultados obtenidos del escenario 2 de la BER para diversos esquemas de modulación en canales de desvanecimiento multitrayecto de Rician con ruido.....	41

## Índice de Tablas

### Capítulo 3

Tabla 3. 1: Cuadro comparativo de herramientas de simulación utilizados en comunicaciones inalámbricas. ....	29
Tabla 3. 2: BER obtenida para técnicas de modulación diversas en un canal de desvanecimiento multitrayectoria de Rayleigh con ruido. ....	35
Tabla 3. 3: BER obtenida para técnicas de modulación diversas en un canal de desvanecimiento multitrayectoria de Rician con ruido. ....	37
Tabla 3. 4: BER obtenida para diferentes técnicas de modulación en un canal de desvanecimiento multitrayectoria de Rayleigh con ruido ....	38
Tabla 3. 5: BER obtenida para diferentes técnicas de modulación en un canal de desvanecimiento multitrayectoria de Rician con ruido. ....	40

## Resumen

Las tecnologías de radiocomunicación están inmersas en una búsqueda incesante de capacidad y, por tanto, de mayor rendimiento, unida a la necesidad constante de mejorar la calidad de la transmisión. Las redes inalámbricas tendrán que gestionar un número creciente de usuarios conectados y un aumento del tráfico multimedia, con una exigencia de calidad de servicio comparable a la de las redes alámbricas de alta velocidad. Si bien estos objetivos son compartidos por toda la industria de las telecomunicaciones y las redes, actualmente existe un consenso sobre la elección de las tecnologías para alcanzarlos. Los diseñadores de sistemas de transmisión inalámbricos buscan optimizar la calidad del servicio y superar los problemas que surgen durante el diseño y la implantación de sus sistemas. De acuerdo con la motivación expuesta, el presente trabajo se encarga de realizar el análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink.

**Palabras claves: MULTIPLEXACIÓN, FRECUENCIA, REDES, COMUNICACIONES, INALÁMBRICAS, RENDIMIENTO**

## Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación

### 1.1. Introducción.

Las redes LAN inalámbricas (WLAN) proporcionan conectividad inalámbrica de banda ancha entre ordenadores y otros dispositivos electrónicos de consumo, así como acceso a la red principal y a otros equipos en entornos corporativos, públicos y domésticos. Las WLAN también ofrecen una forma sencilla de configurar las redes informáticas al evitar la necesidad de instalar cables. Otra posible aplicación de las WLAN es como extensión de alta velocidad de las redes de acceso radioeléctrico celular. (Doufexi et al., 2002)

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal es una forma especial de modulación multiportadora que es particularmente adecuada para la transmisión a través de un canal dispersivo. Aquí los diferentes portadores son ortogonales entre sí, es decir, son totalmente independientes entre sí. La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) es un esquema de modulación de banda ancha diseñado para hacer frente a los problemas de la recepción por trayectos múltiples que se dan en los sistemas de comunicaciones inalámbricas. (Veglia, 2018)

Esencialmente, el canal de desvanecimiento selectivo de frecuencia de banda ancha se divide en muchos subcanales de banda estrecha. Si el número de subcanales es lo suficientemente alto, cada subcanal podría considerarse plano. Esto se debe a que se transmiten muchas señales digitales superpuestas de banda estrecha en paralelo, dentro de una banda ancha. Aumentar el número de canales de transmisión paralelos reduce la velocidad de datos que debe transmitir cada portadora individual y eso alarga el período del símbolo. Por lo tanto, el tiempo de retardo de las ondas reflejadas se suprime dentro del tiempo de 1 símbolo.

El desarrollo de los sistemas OFDM se puede dividir en tres partes: multiplexación por división de frecuencia, comunicación multiportadora y multiplexación por división de frecuencia ortogonal. La multiplexación por división de frecuencia es una forma de multiplexación de señales que implica asignar rangos o canales de frecuencia no superpuestos a diferentes rangos de frecuencia o canales a diferentes señales o a cada usuario de un medio.

No se puede ignorar la necesidad de mejorar la calidad de servicio para los datos heterogéneos. OFDM ofrece la ventaja de una alta eficiencia espectral. OFDM se ha considerado especialmente para mejorar la comunicación inalámbrica según los requisitos de conexión de datos de alta velocidad del tráfico heterogéneo. La tecnología OFDM para la conexión inalámbrica se ha convertido en la nueva cara de la próxima tecnología de transmisión ampliamente utilizada en las redes inalámbricas.

OFDM ha demostrado su valía en la radiodifusión digital de audio y vídeo, es decir, en (DAB) y (DVB) respectivamente. LTE e IEEE 802.20 también han considerado OFDM para aumentar su eficiencia espectral y la robustez de la red.

## **1.2. Antecedentes.**

En el trabajo de Rawat & Chaturvedi, (2017) analizan las características y los parámetros de un sistema OFDM para soportar calidad de servicio (Quality of Service, QoS) en una red inalámbrica. En este trabajo se utilizó el software de simulación MatLab/Simulink.

En el trabajo de investigación realizado por Singh & Tripathi, (2017), se analizan los resultados de la tasa de error de bits (BER) para la técnica OFDM usando diversas técnicas de modulación. OFDM es la popular técnica de modulación para muchos sistemas de comunicación inalámbrica. En el sistema inalámbrico, la señal transmitida en el canal rebota de las distintas superficies, lo que da lugar a múltiples versiones retardadas de la señal transmitida que llegan al receptor.



### **1.3. Definición del Problema.**

Necesidad de evaluar el rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink.

### **1.4. Justificación del Problema.**

MatLab/Simulink es una herramienta de simulación altamente escalable y extensible que proporciona un entorno interactivo para modelar y analizar sistemas complejos para problemas que se encuentran en diferentes dominios de ingeniería y científicos. MatLab incluye varios ToolBox, funciones incorporadas, algoritmos y protocolos para modelar, evaluar y realizar análisis comparativos en diferentes escenarios de simulación.

MatLab/Simulink incorpora la construcción de la arquitectura de hardware de los nodos transmisores, el diseño del canal de comunicación y el modelado de la arquitectura de los nodos mientras se simulan los modelos de WSN. MatLab/Simulink tiene todas las características de un buen simulador. Es un simulador escalable capaz de simular una gran red de nodos sensores. Es un paquete completo de cajas de herramientas, funciones incorporadas y algoritmos. Tiene una alta fidelidad de simulación y es capaz de capturar el comportamiento de los sistemas dinámicos a un grano fino. Considerar las sutiles interacciones entre los motes o nodos sensores y el nodo BS es importante tanto para las pruebas como para el análisis.

### **1.5. Objetivos del Problema de Investigación.**

#### **1.5.1. Objetivo General.**

Realizar el análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink

#### **1.5.2. Objetivos Específicos.**

1. Describir los fundamentos teóricos de las comunicaciones inalámbricas.

2. Diseñar dos escenarios de simulación del sistema OFDM en redes inalámbricas utilizando el software MatLab/Simulink.
3. Analizar los resultados obtenidos de rendimiento en los dos escenarios de simulación implementados.

### **1.6. Hipótesis.**

OFDM ha demostrado ser muy eficaz para mitigar los efectos adversos de las múltiples trayectorias de un canal de banda ancha. Las señales múltiples se obtienen debido a la difracción y reflexión de las ondas electromagnéticas alrededor de los objetos. Por ejemplo, el rendimiento de la tasa de error de bits (BER) de este tipo de sistemas se evalúa usando canales de ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN). El rendimiento de la BER de los modos de transmisión se calcula mediante la tasa de error de bits (BER) frente a la relación señal/ruido (SNR) en el canal de ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN).

### **1.7. Metodología de Investigación.**

Existen varias definiciones generalizadas de un concepto. "Metodología":

- 1) es la doctrina de los principios, formas y métodos del conocimiento o la investigación científica;
- 2) es la ciencia de los métodos de conocimiento y los métodos de investigación científica, es decir, la ciencia de la ciencia;
- 3) es la ciencia que determina la dirección general del desarrollo de la investigación, sus objetivos, límites, principios; la forma científica de sentar las bases con énfasis en el significado de los conceptos;
- 4) es el campo científico que estudia los métodos generales y especiales de la investigación científica, así como los principios de recorrido de los diferentes tipos de objetos de la realidad y de las diferentes clases de problemas científicos.

El tema de la metodología es el proceso de investigación científica en su totalidad, es decir, todas las actividades científicas y cognitivas. En las definiciones anteriores, la metodología se relaciona únicamente con el

proceso de cognición. Es importante tener clara la inclinación de la metodología no sólo a la cognición, sino también a la transformación de la realidad.

La investigación es sistemática en el sentido de que sigue unos pasos lógicamente ordenados:

1) comprender la naturaleza del problema estudiado e identificar los campos de conocimiento relacionados con dicho problema;

2) establecer el estado del arte, es decir, recopilar/estudiar la literatura para entender cómo otros investigadores han abordado el problema;

3) recoger datos de forma organizada y controlada para llegar a decisiones válidas;

4) analizar los datos adecuados al problema estudiado;

5) sacar conclusiones apropiadas y hacer lo que corresponda. Sacar conclusiones adecuadas y hacer generalizaciones apropiadas.

En consecuencia, el presente trabajo de titulación utiliza la investigación sistemática, ya que identifica el área del conocimiento y establece el estado del arte de las comunicaciones inalámbricas. Adicional, se recopilan los datos y analizan los resultados obtenidos en la simulación propuesta en el capítulo 3.

## Capítulo 2: Fundamentación Teórica

El presente capítulo se describen los fundamentos teóricos de las comunicaciones inalámbricas que sirven como base para el desarrollo de la propuesta de simulación en el capítulo 3.

### 2.1. Introducción.

El desarrollo de las tecnologías inalámbricas está abriendo nuevas perspectivas en el campo de las telecomunicaciones. La reciente evolución de los medios de comunicación inalámbricos ha hecho posible la manipulación de la información a través de unidades informáticas portátiles que tienen características particulares (baja capacidad de almacenamiento, fuente de energía autónoma, etc.) y acceden a la red a través de una interfaz de comunicación inalámbrica. (Yépez Lapo, 2021)

En comparación con el antiguo entorno (el entorno estático), el nuevo entorno resultante, denominado entorno móvil, permite la libre movilidad de las unidades informáticas y no restringe la ubicación de los usuarios. La movilidad (o nomadismo) y el nuevo modo de comunicación utilizado, dan lugar a nuevas características propias del entorno móvil: desconexión frecuente, rendimiento y recursos de comunicación modestos y fuentes de energía limitadas. Los entornos móviles ofrecen una gran flexibilidad de uso. En particular, permiten la conexión en red de sitios que serían demasiado costosos de conectar en red en su totalidad.

La evolución de los dispositivos informáticos y los avances en las infraestructuras de comunicación han propiciado el rápido crecimiento de las redes inalámbricas. Estos son geográficamente extensos (LTE, Wimax), locales (802.11, Zigbee) o personales (Bluetooth). También hay comunicaciones de campo remoto (Near Field Communications, NFC) que se utiliza para nuevos servicios (pago del transporte, visualización de información contextual, etc.) y RFID que permite optimizar el funcionamiento de los procesos internos de la empresa, como la logística, la trazabilidad o la producción, por ejemplo.

Hay un crecimiento exponencial de las redes celulares que se basan en una combinación de tecnologías alámbricas e inalámbricas. En las redes celulares, como LTE, cada antena cubre un área definida y, a medida que el usuario se desplaza, el teléfono móvil cambia de celda. Se dice que este tipo de red tiene una infraestructura fija bien definida.

Cuando no hay una infraestructura que gestione la red, se denomina red Ad-hoc (véase la figura 2.2). Una red de este tipo se caracteriza, por tanto, por la ausencia de infraestructuras para los nodos que la componen. Los nodos desempeñan, por tanto, un papel esencial en la transferencia de información y la gestión de su encaminamiento, teniendo que gestionar, entre otras cosas, las reconfiguraciones topológicas. Esta característica, unida a la fuerte implicación de los nodos en la transferencia de información a través de las tecnologías inalámbricas, hace que la calidad del servicio, el encaminamiento y la seguridad sean mucho más complejos de conseguir.

En este capítulo, se describen los temas dentro de la temática de las redes inalámbricas. Se presentan los principios y características de las redes inalámbricas y sus áreas de aplicación.

## **2.2. Definición de redes inalámbricas.**

Una red inalámbrica es una computadora o red digitalizada que conecta diferentes estaciones de trabajo o sistemas entre sí mediante ondas de radio. La red inalámbrica puede asociarse a una red de telecomunicaciones para lograr interconexiones entre nodos. El estándar actualmente más utilizado para redes inalámbricas es el estándar IEEE802.11.

La radiación geográfica de las ondas es relativamente limitada dada la baja potencia de transmisión de las soluciones de hardware actuales. Por esta razón, las redes inalámbricas se han desarrollado principalmente como redes internas específicas de edificios, ya sea como una red corporativa o como una red doméstica.

### 2.3. Clasificación de las redes inalámbricas.

Una red inalámbrica es una red en la que al menos dos nodos pueden comunicarse sin una conexión por cable. Estas redes de comunicaciones permiten a los usuarios aprovechar todos los servicios de red tradicionales independientemente de su posición geográfica. Las redes inalámbricas pueden tener una clasificación según dos criterios. El primero es el área de cobertura de la red. En vista de este criterio, existen cuatro categorías: redes personales, redes locales, redes de área metropolitana y redes de área amplia (son tratados en la sección 2.4.1). El segundo criterio es la infraestructura y el modelo adoptado (son tratados en la sección 2.4.3). Con respecto a este criterio, las redes inalámbricas se pueden dividir en: redes con infraestructura y redes sin infraestructura, tal como se muestran las figuras 2.1 y 2.2.



Figura 2. 1: Comunicación inalámbrica con infraestructura.  
Fuente: (Hoang et al., 2015; Yépez Lapo, 2021)

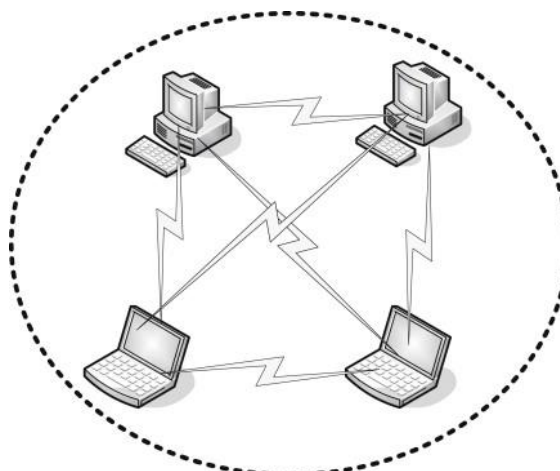


Figura 2. 2: Comunicación inalámbrica sin infraestructura.  
Fuente: (Caputo, 2014)

## **2.4. Redes según el área de cobertura.**

### **2.4.1. Redes WPAN.**

A medida que aumentan los dispositivos electrónicos que se utilizan en todo el mundo, crece la demanda de interconectar estos dispositivos de una manera manejable y, preferiblemente, inalámbrica (Wang et al., 2016). Por ello, se espera que las redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal Area Networks, WPAN), que funcionan alrededor de un espacio operativo personal (POS), desempeñen un papel esencial en los sistemas de comunicación 4G al permitir la conectividad Ad-hoc inalámbrica de corto alcance.

Actualmente, el uso más popular de la tecnología de 60 GHz es la construcción de redes inalámbricas de área personal (WPAN). Estas pequeñas redes proporcionan servicios inalámbricos en interiores, como la visualización inalámbrica, la distribución de televisión de alta definición y carga/descarga rápida. Aunque, la intensidad de la señal recibida puede ser relativamente débil si la trayectoria de la línea de visión está bloqueada por obstáculos. Un enfoque de cooperación entre dispositivos, que combate eficazmente la grave pérdida de la trayectoria, mejorando así el rendimiento global de las redes inalámbricas de área personal (WPAN).

Las WPAN tienen algunas similitudes con las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN) fijas con algunas diferencias importantes. Por ejemplo, una WPAN se caracteriza por un número reducido de nodos y por el patrón específico de movilidad en grupo a velocidades de peatón. Sin embargo, las WSN se componen de un gran número de nodos sensores con una movilidad limitada o estática. Actualmente, se han desarrollado dos estándares WPAN para las comunicaciones inalámbricas avanzadas de corto alcance: IEEE 802.15.3 para WPAN de alta velocidad (HR-WPAN) e IEEE 802.15.4 para WPAN de baja velocidad (LR-WPAN).

Las WPANs desempeñan un papel fundamental en la tecnología de redes de área local, complementando las tecnologías tradicionales de redes de área local inalámbricas. Bluetooth, ZigBee y NFC (Near Field

Communications) han surgido como tecnologías WPAN clave, con los estándares UWB (Ultra Wide Band) actualmente en evolución (Hunt, 2012). A continuación, se describen estas tecnologías de WPAN:

➤ Bluetooth

Es una tecnología inalámbrica utilizada para la comunicación de datos a corta distancia mediante ondas de radio de ultra alta frecuencia en la banda ISM (Industrial, Científica y Médica) (2.4 a 2.485 GHz). Se utiliza generalmente para construir redes de área personal tanto para dispositivos fijos como móviles. Un dispositivo/módulo Bluetooth contiene una radio Bluetooth y un software que facilita la conexión con otro dispositivo, tal como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2. 3: Topología de comunicación Bluetooth Piconet.  
Fuente: (Lonzetta et al., 2018)

Cuando dos dispositivos Bluetooth quieren comunicarse, utilizan señales de apretón de manos y, por tanto, se produce el emparejamiento. La comunicación entre los dos dispositivos Bluetooth sólo es posible en un rango corto. Bluetooth es compatible con las redes inalámbricas Ad-hoc, que son redes descentralizadas y no dependen de una infraestructura



preexistente, como los routers de las redes por cable o los puntos de acceso de las redes inalámbricas gestionadas (infraestructura).

Bluetooth admite dos topologías: Piconet (véase la figura 2.3) y Scatternet. Piconet no es más que la conexión de dos o un máximo de ocho dispositivos Bluetooth entre los que uno actúa como maestro y los demás como esclavos. Scatternet se forma cuando dos o más Piconets se interconectan. La interconexión se produce cuando un miembro de una Piconet (ya sea el maestro o uno de los esclavos) decide participar como esclavo en la otra Piconet. Admite la comunicación entre más de ocho dispositivos.

#### ➤ ZigBee

Es una tecnología inalámbrica que se utiliza para crear redes de área personal utilizando ondas de radio de muy baja potencia para la transferencia de datos de corto alcance y baja velocidad de transferencia de datos. Se basa en el estándar IEEE 802.15.4. Se considera más sencilla y menos costosa en comparación con otras tecnologías inalámbricas como Bluetooth. (Yépez Lapo, 2021) La figura 2.4 muestra la topología de comunicación ZigBee.

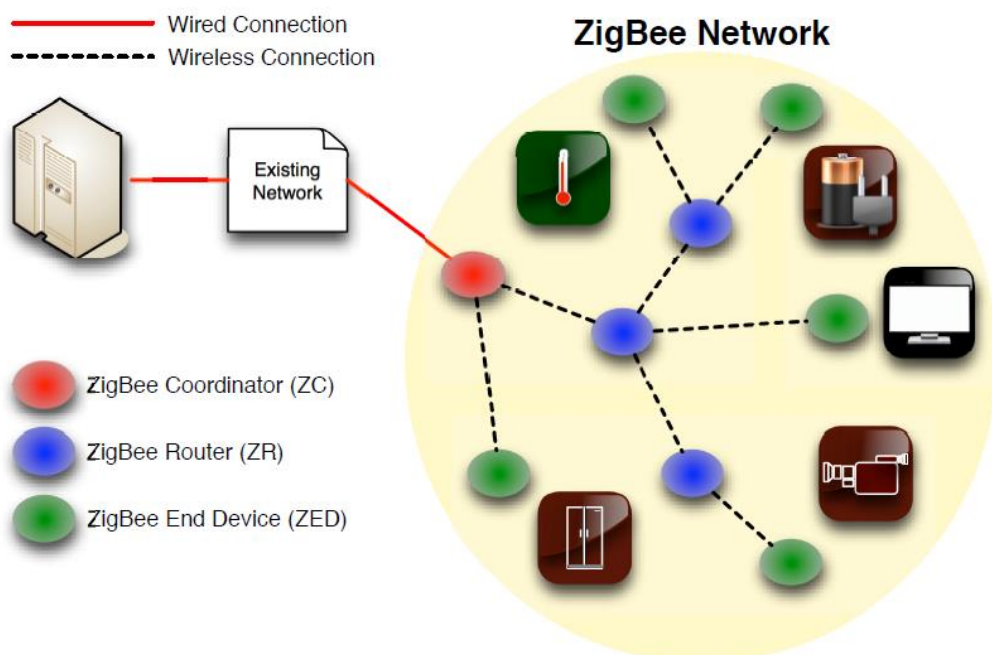


Figura 2. 4: Topología de comunicación en redes ZigBee/IEEE 802.15.4.  
Fuente: (Collotta et al., 2012)

Tiene una velocidad definida de 250 Kbps y utiliza una red de malla para enviar datos a largas distancias. ZigBee se utiliza generalmente en aplicaciones que implican una baja tasa de datos, pero necesitan una larga duración de la batería y una red segura. Una red ZigBee está protegida mediante una encriptación simétrica de 128 bits.

Funciona en la banda ISM que va de 2.4 GHz a 2.485 GHz. Sin embargo, las frecuencias de transmisión difieren de un país a otro. En EE.UU. y Australia, ZigBee funciona a 915 MHz, en Europa a 868 MHz y en China a 784 MHz, y las velocidades de transmisión varían entre 20 kbps en la banda de 868 MHz y 250 Kbps en la de 2.4 GHz.

➤ NFC y RFID:

Las etiquetas de comunicación de campo cercano (NFC) y de identificación por radiofrecuencia (RFID) proporcionan acceso instantáneo a los datos digitales de un objeto individual. Por ejemplo, Giuliano et al., (2013) han utilizado las etiquetas electrónicas o identificación por radiofrecuencia para la gestión de inventarios en museos, Mostarda et al., (2008) propusieron un sistema de autenticación de lugar y tiempo para los bienes culturales y Shang et al., (2011) implementaron un sistema de guía móvil para museos basado en la ubicación local.

Por ejemplo, la integración de sensores ambientales en las etiquetas de activos digitales proporciona información adicional sobre el estado de un objeto de arte y ofrece un registro electrónico de su exposición ambiental. La figura 2.5 muestra el funcionamiento de novedosas etiquetas sensoriales autónomas y de bajo consumo energético con tecnología NFC que sirven de apoyo al flujo de trabajo de los museos en lo que respecta a la gestión de las colecciones, la supervisión del estado de la exposición y el almacenamiento, el embalaje, el traslado y la gestión de las visitas, así como el mantenimiento de registros generales en una única plataforma tecnológica unificada.

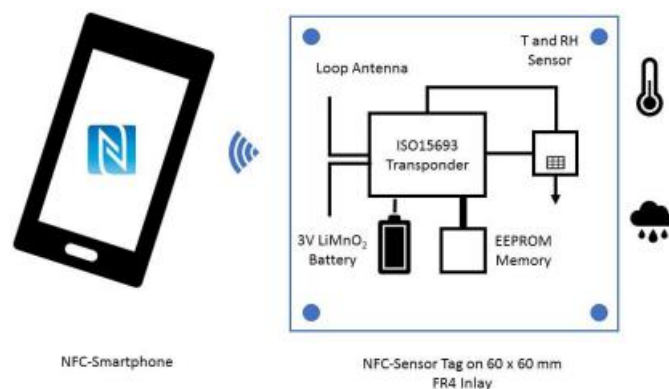


Figura 2. 5: Esquema de la etiqueta autónoma con sensor NFC.  
Fuente: (Lonzetta et al., 2018)

#### 2.4.2. Redes WLAN.

Por otro lado, las redes inalámbricas de área local (Wireless Local Area Networks, WLAN) se clasifican como sistemas de largo alcance con mayor complejidad para gestionar la itinerancia y el reenvío de mensajes sin fisuras. Una WLAN consta de un nodo central conocido como Punto de Acceso (AP) que gestiona el acceso al canal de comunicación a un número de nodos finales, tal como se muestra en la figura 2.6. Un nodo WLAN típico está diseñado como una tarjeta de PC adecuada para un ordenador de sobremesa o portátil.

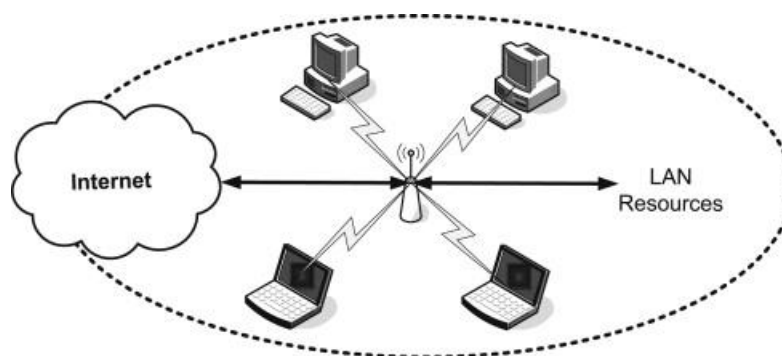


Figura 2. 6: Comunicación inalámbrica mediante AP.  
Fuente: (Caputo, 2014)

Sin embargo, de todos estos estándares, WLAN y los desarrollos recientes de la tecnología WLAN es la principal área de estudio en este trabajo. IEEE 802.11 es la tecnología WLAN más extendida en la actualidad. Otra muy conocida es la norma HiperLAN del ETSI. Ambas tecnologías están unidas bajo la alianza Wireless Fidelity (Wi-fi). Sin embargo, en la literatura, IEEE802.11 y Wi-fi se utilizan indistintamente. Las WLANs son

desplegadas dentro de edificios empresariales, hoteles, campus universitarios, y en especial muy utilizado en redes residenciales. A continuación, se describen las redes inalámbricas:

➤ IEEE 802.11, WiFi:

La norma 802.11, la más extendida, tiene muchas ampliaciones y muchas más están en desarrollo. Introducido por primera vez en 1999, el estándar IEEE 802.11 se desarrolló principalmente teniendo en cuenta el entorno doméstico y de oficina para la conectividad de área local inalámbrica. Los estándares iniciales ofrecían una velocidad de datos máxima de 2 Mbps por punto de acceso, que aumentó a 11 Mbps por punto de acceso con el despliegue de IEEE 802.11b. (Banerji & Chowdhury, 2013)

Las extensiones más recientes, como IEEE 802.11g e IEEE 802.11a, ofrecen una velocidad de datos máxima de 54 Mbps por punto de acceso, utilizando diversos métodos para aumentar la velocidad máxima de datos. Los dispositivos WLAN basados en IEEE 802.11g ofrecen actualmente una velocidad de datos de 100-125 Mbps.

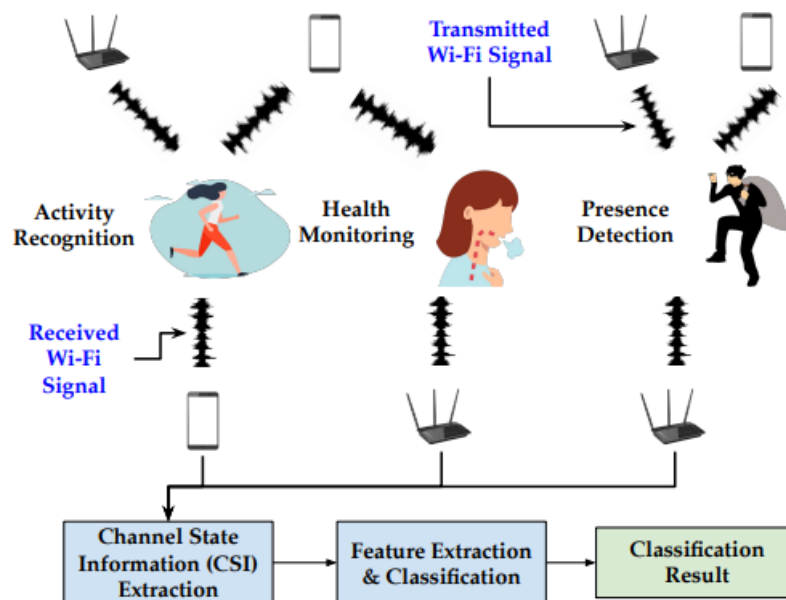


Figura 2. 7: Visión general de alto nivel de Wi-Fi Sensing (SENS).  
Fuente: (Restuccia, 2021)

La figura 2.7 muestra una visión general de muy alto nivel de la detección WiFi, también llamada SENS en la comunidad IEEE 802.11. La

idea principal de SENS es aprovechar las mediciones de la información del estado del canal (CSI) para detectar (y posiblemente rastrear) la presencia de obstáculos entre un transmisor y un receptor. De este modo, se pueden realizar tareas de clasificación complejas como el reconocimiento de la actividad humana (HAR), la supervisión de la salud y la detección de objetos, por ejemplo, mediante el cálculo de las diferencias de fase o los desplazamientos Doppler.

➤ Hiperlan 1 y 2:

Parte del proyecto BRAN del ETSI es la red de área local radioeléctrica de alto rendimiento (HiperLAN), que también se denomina red de área local inalámbrica. HiperLAN/1, el primer estándar desarrollado en 1996 permitía velocidades de datos de hasta 20 Mbps. En el año 2000 se implantó otro estándar, HiperLAN/2, que ofrecía velocidades de datos de hasta 54 Mbps. Las redes HiperLAN se desarrollaron con mecanismos de capa MAC más detallados que su homólogo IEEE. (Yépez Lapo, 2021)

HiperLAN no tuvo mucho éxito como estándar IEEE a pesar de ofrecer inicialmente velocidades de datos más altas que algunas de las extensiones anteriores como IEEE 802.11a y mecanismos mejorados de la capa MAC. En la actualidad no se ha informado de que se estén desarrollando nuevos estándares HiperLAN. (Banerji & Chowdhury, 2013)

HIPERLAN/2 utiliza este modo para crear subredes Ad-hoc sin depender de la infraestructura de cables. En este caso, se selecciona dinámicamente un controlador central (Central Controller, CC) entre los dispositivos portátiles. El nodo CC es capaz de soportar aplicaciones multimedia proporcionando mecanismos para gestionar las reservas de QoS y asignar el ancho de banda, al igual que un AP.

### **2.4.3. Redes WMAN.**

Las redes inalámbricas de área metropolitana (Wireless Metropolitan Area Network, WMAN) se utilizan para establecer conexiones inalámbricas entre varias ubicaciones dentro de un área metropolitana, como por ejemplo

entre varios edificios de oficinas en una ciudad o en un campus universitario, sin el elevado coste que supone el tendido de fibra o el alquiler de líneas. En el caso de las comunicaciones por cables ópticos, se puede utilizar la luz infrarroja para transmitir datos.

Las redes de acceso inalámbrico de banda ancha pueden proporcionar acceso de alta velocidad a Internet. Por ejemplo, se pueden conseguir altas velocidades de datos punto a punto (de 100 Mbps a decenas de Gbps) en distancias cortas utilizando la comunicación FSO con láseres infrarrojos, sin licencia, que requiere línea de visión (LOS) y se ve afectada por las condiciones meteorológicas. La figura 2.8 muestra la arquitectura del estándar IEEE 802.16 WMAN.

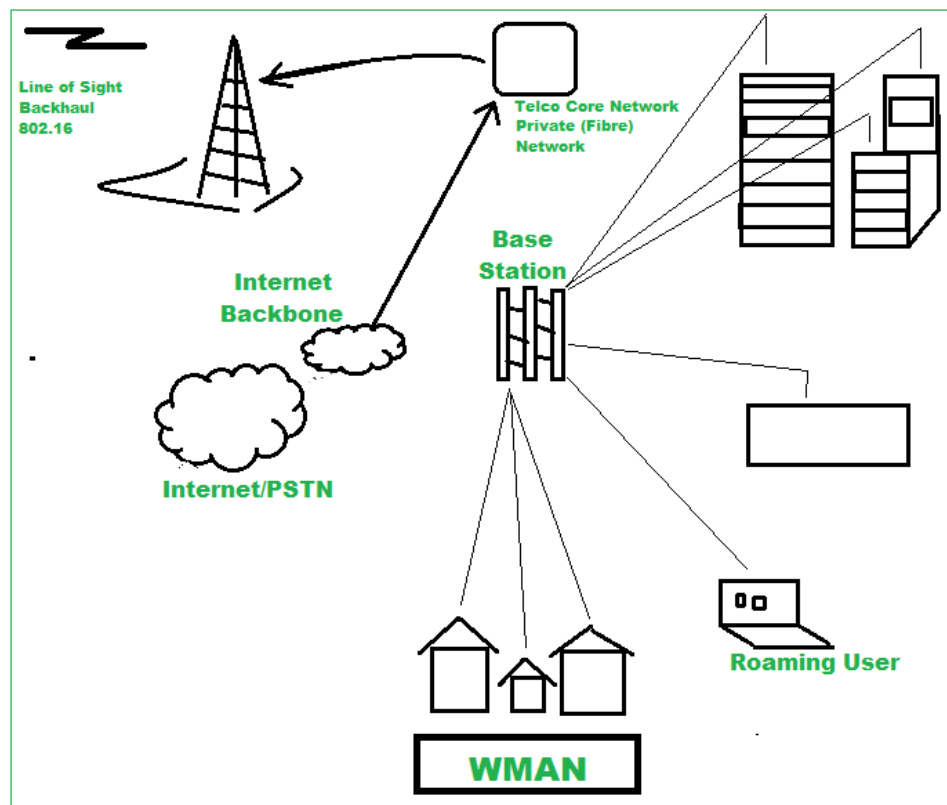


Figura 2. 8: Esquema de comunicación del estándar IEEE 802.16.

Fuente: (Satyabrata, 2021)

La familia del estándar IEEE 802.16 WMAN ha sido desarrollada por el grupo de trabajo IEEE 802.16 para responder a la demanda del mercado de BWA. Este grupo de trabajo lleva activo desde 1999, publicando numerosas versiones de la norma para dar respuesta a la evolución de las necesidades de los usuarios y de los modelos de negocio.

La naturaleza de IEEE 802.16 es significativamente diferente a la de otros estándares IEEE, ya que la tecnología está más orientada a los proveedores de servicios celulares. Además, IEEE 802.16 deja muchas de las decisiones de implementación en manos del implementador, especialmente en el lado de la estación base. Esta flexibilidad permite al desarrollador del sistema configurar una red que puede ser rentable y sencilla o significativamente más sofisticada para ofrecer servicios de mayor calidad al usuario final con el fin de obtener un precio más elevado.

Los dispositivos IEEE 802.16 pueden clasificarse como estaciones de abonado (SS) (para aplicaciones fijas), estaciones móviles (MS) o estaciones base (BS). La arquitectura de la red IEEE 802.16 connota la presencia de emplazamientos infraestructurales fijos. De hecho, el modelo arquitectónico de IEEE 802.16 es bastante similar al modelo empleado en las redes de telefonía celular.

Cada área de cobertura de IEEE 802.16 comprende una BS y uno o más SS. Las BS proporcionan conectividad a las redes centrales, mientras que las SS, el conjunto de equipos en la ubicación del cliente o los equipos en las instalaciones del cliente, proporcionan acceso al usuario final a la red inalámbrica de banda ancha. En la figura 2.9 se representa una zona de cobertura IEEE 802.16.

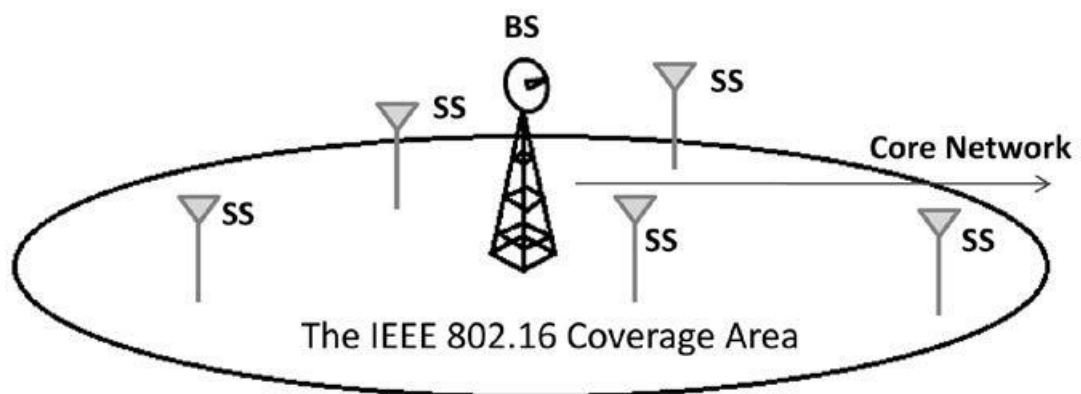


Figura 2. 9: Área de cobertura IEEE 802.16 - WiMAX fija.  
Fuente: (Burbank et al., 2013)

La arquitectura representada en la figura 2.9 representa una única célula de cobertura de red. Estas células IEEE 802.16 pueden agruparse

para formar una red 802.16 más amplia, en la que los emplazamientos de las BS's están interconectados a través de una red central, como se muestra en la figura 2.10. En el modelo IEEE 802.16, el acceso al canal está muy centralizado, es decir, la BS tiene un control total sobre cómo y cuándo los SS acceden al medio inalámbrico.

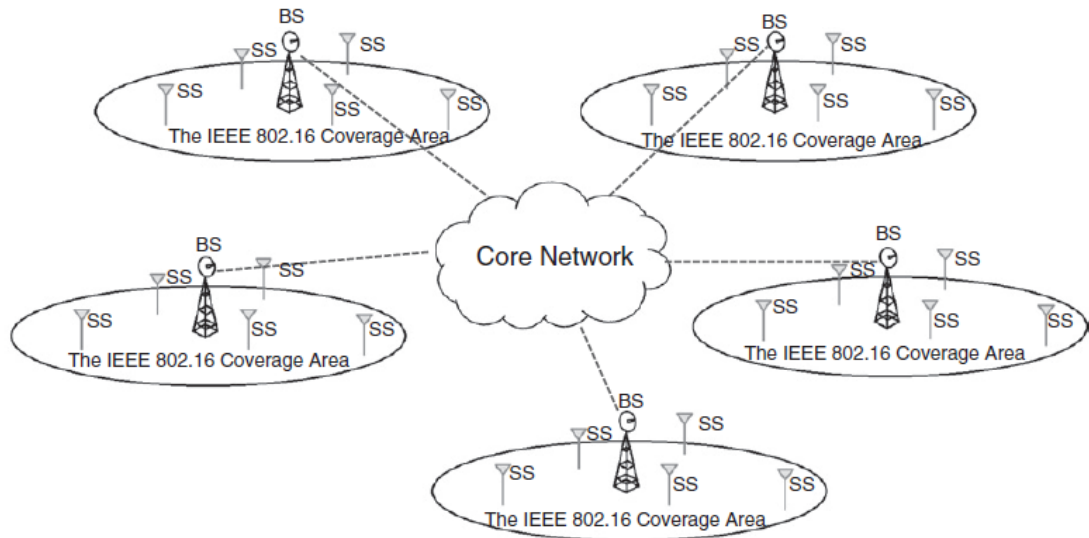


Figura 2. 10: Una hipotética red WiMAX fija IEEE 802.16.  
Fuente: (Burbank et al., 2013)

## 2.5. Redes dependiendo de la infraestructura.

La evolución de las comunicaciones telefónicas e informáticas en los últimos años ha dado lugar a un creciente uso de las redes de comunicación. La aparición de Internet y su éxito, así como la evolución de los terminales (ordenadores, PDAs, teléfonos, etc.) son elementos que están cambiando nuestra forma de vida y el uso de estas tecnologías. Este cambio también se ha producido en la relación con los canales de comunicación. En este contexto, no es de extrañar la aparición de soluciones de comunicación inalámbrica cada vez más potentes y avanzadas. Las redes inalámbricas móviles se clasifican en redes celulares (con infraestructura) y redes MANET (sin infraestructura)

Por ejemplo, las redes Ad-hoc satisfacen esta necesidad al eliminar la necesidad de una infraestructura fija para comunicarse. La actividad del grupo IETF MANET demuestra que el desarrollo de estas redes inalámbricas



y sin infraestructura está en auge. Sin embargo, esta falta de infraestructura fija plantea una serie de problemas no triviales.

### 2.5.1. Redes de telefonía móvil.

Las redes de comunicación celular ofrecen la posibilidad de encaminar automáticamente una llamada al destinatario dondequiera que se encuentre dentro del límite de cobertura de la red, independientemente de que el emisor de la llamada pertenezca a la red conmutada o al sistema celular. La estructura típica de una red celular se ilustra en la figura 2.11. Se encargan de que esta comunicación se mantenga durante el viaje. Coexisten dos generaciones de estos sistemas, la primera llamada analógica tiende a desaparecer en favor de la segunda, basada en la tecnología digital.

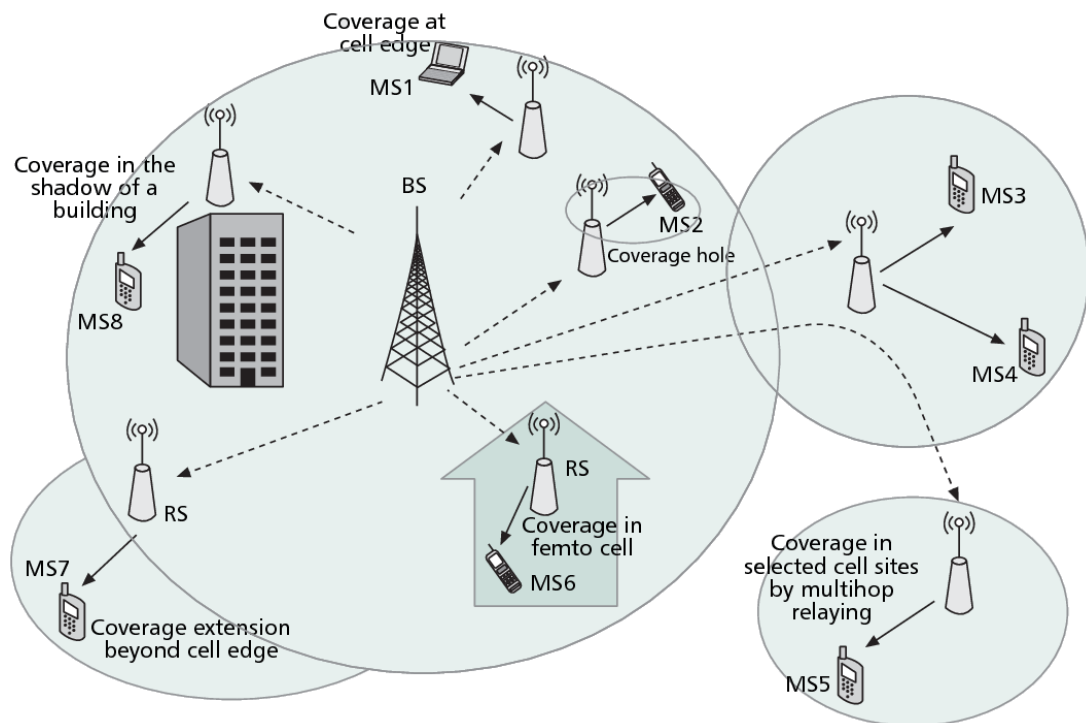


Figura 2. 11: Estructura de las redes de telefonía celular.

Fuente: (Sydir & Taori, 2009)

#### ➤ Primera generación:

Las redes celulares analógicas surgieron en la década de los 70, ofreciendo servicio telefónico a los usuarios móviles a larga distancia. Las celdas eran grandes, lo que impedía llevar mucho tráfico. Esta generación utilizaba la tecnología de acceso FDMA y la transmisión de voz se basaba en la modulación de frecuencia; (Balapuwaduge & Li, 2018b)

➤ Segunda generación:

Con el desarrollo de las técnicas de codificación digital de la voz, las redes celulares de esta generación permiten el uso de TDMA y CDMA como alternativa a FDMA. Así, el espectro radioeléctrico es más rentable y el número de abonados aumenta considerablemente. Como el GSM (Global System for Mobile communications) es el estándar de telefonía móvil más utilizado en Europa a principios del siglo XXI. Es un estándar telefónico de "segunda generación" (2G). (Balapuwaduge & Li, 2015a)

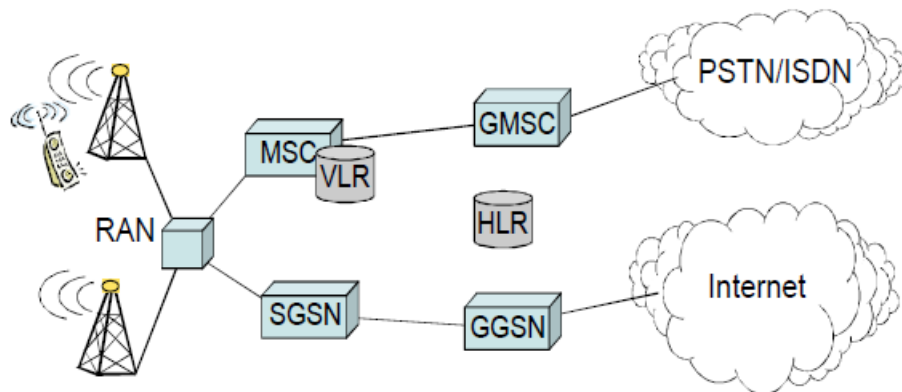


Figura 2. 12: Arquitectura de redes de telefonía celular 2G/3G.

Fuente: (Balapuwaduge & Li, 2015a)

➤ Tercera generación (3G):

La tercera generación de móviles, como el UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles), propone definir un sistema de comunicación inalámbrica para lograr la convergencia fijo-móvil. Los móviles de tercera generación son terminales con mayor velocidad de datos que los actuales. Así, son capaces de ofrecer una amplia gama de servicios multimedia;

➤ Cuarta generación:

La cuarta generación de móviles e inalámbricos pretende no sólo mejorar el rendimiento, sino reunir la gran variedad de soluciones móviles, que a menudo se complementan, y ofrecerlas de forma unificada, en un único dispositivo terminal. La quinta generación pretende ir aún más lejos en la misma dirección, unificando las interfaces de radio, las técnicas de acceso y los servicios.

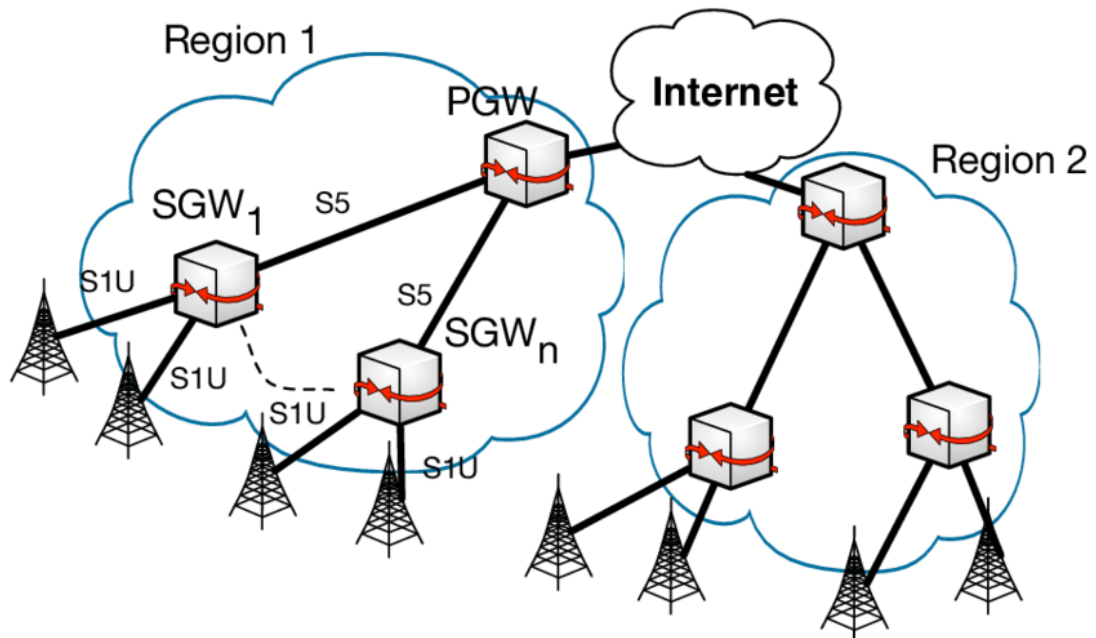


Figura 2. 13: Arquitectura de red de telefonía celular 4G.

Fuente: (Moradi, 2018)

➤ Quinta generación:

Las redes móviles de 5ª generación o sistemas inalámbricos de 5ª generación es un nombre utilizado en algunos trabajos de investigación y proyectos para denotar la siguiente fase importante de los estándares de telecomunicaciones móviles más allá de los próximos estándares 4G, que se espera que estén finalizados entre 2011 y 2013 aproximadamente. En la actualidad, 5G no es un término que se utilice oficialmente para ninguna especificación concreta ni en ningún documento oficial que hayan hecho público las empresas de telecomunicaciones o los organismos de normalización, como el 3GPP, WiMAX o UIT-R. Las nuevas versiones de las normas del 3GPP más allá de 4G y LTE Advanced están en curso, pero no se consideradas como nuevas generaciones de móviles.

## 2.6. Fundamentos de la técnica de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM)

El principio básico de OFDM es convertir los flujos de datos en serie de alta velocidad en flujos paralelos de menor velocidad que se transmiten simultáneamente a través de varias subportadoras. Debido al aumento de la duración del símbolo de las subportadoras, se reduce la cantidad relativa de

dispersión en el tiempo causada por la dispersión del retardo por trayectos múltiples. Para evitar ICI (Interferencia entre portadoras), es importante insertar un intervalo de guarda entre los símbolos OFDM. La estructura del sistema OFDM se muestra en la figura 2.14.

Para Sirait & Dhuha, (2020) siempre se debe realizar el aumento del área de cobertura de la red de telecomunicaciones con tecnología 4G Long Term Evolution (LTE), considerando las crecientes necesidades y número de usuarios. En las zonas urbanas, con la construcción de rascacielos y la alta tasa de crecimiento de los usuarios de la red, los servicios de telecomunicaciones que obtienen los usuarios no son óptimos.

La implementación original de la OFDM se basa en la generación de las múltiples portadoras a través de un banco de filtros de conformación que proporcionan la ortogonalidad entre las portadoras. Las portadoras ortogonales generadas de este modo pueden ser recuperadas por un banco de filtros emparejados con cada filtro emparejado a un canal, donde el filtro emparejado elimina todas las portadoras excepto la con la que el filtro está emparejado. Esta relación de ortogonalidad permite que las portadoras superponerse en frecuencia, eliminando la necesidad de las bandas de guarda entre los canales. (Tigrek, 2010)

OFDM pertenece a una clase más amplia de modulación multiportadora (*Multiple-Carrier Modulation, MCM*) en la que la información de datos se transporta a través de muchas subportadoras de menor velocidad. Dos de las ventajas fundamentales de la OFDM son su robustez frente a la dispersión del canal y su facilidad para la estimación de la fase y el canal en un entorno variable en el tiempo. (Shieh & Djordjevic, 2010)

La OFDM es una técnica de modulación multiportadora. Su principio básico es dividir un flujo de datos en serie de alta velocidad en varios flujos paralelos de menor velocidad que se modulan en subportadoras separadas y se transmiten simultáneamente por el canal de transmisión. Modulando en N

portadoras, es posible utilizar símbolos  $N$  veces más largos manteniendo la misma velocidad de datos que con la modulación de una sola portadora.

La banda espectral se comparte entre las diferentes subportadoras, por lo que cada subportadora puede ocupar una banda de frecuencias  $B_S$ , que es menor que la banda de coherencia del canal  $B_C$ . El interés de esta modulación es situar la información en una ventana de tiempo-frecuencia tal que su duración  $T_S$  sea mucho mayor que la dispersión del retardo del canal de propagación  $T_d$ . La figura 2.14 muestra el principio de funcionamiento de OFDM.

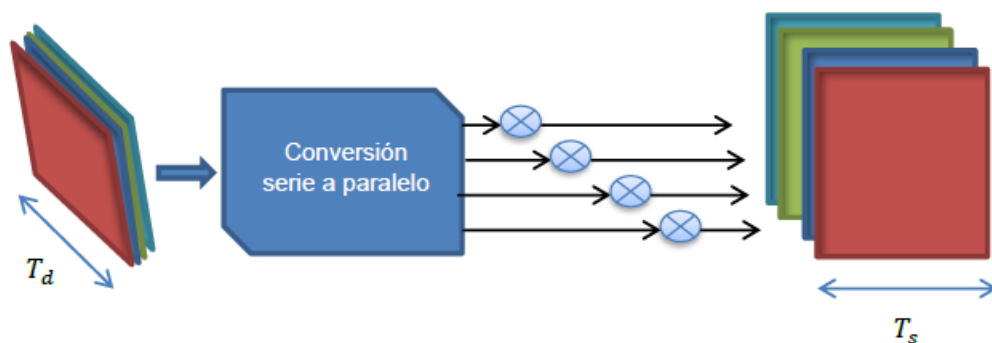


Figura 2. 14: Principio de funcionamiento de OFDM.

Fuente: (Moradi, 2018)

Para que la señal tenga una alta eficiencia espectral, las frecuencias de las subportadoras deben estar lo más cerca posible asegurando que el receptor sea capaz de separarlas y recuperar el símbolo transmitido en cada una de ellas. El método más común para hacerlo es utilizar portadores ortogonales.

La primera ventaja de OFDM es intuitiva. Dado que se utilizan varios canales (subportadoras) para transportar la información, la pérdida o el extravío de uno de los canales hace que se pierda sólo una parte de la información, en comparación con la modulación estándar de una sola portadora. Esto hace que esta modulación sea muy práctica en un entorno donde el canal es selectivo en frecuencia. Por otro lado, OFDM se diferencia de otras modulaciones multiportadora en que sus subportadoras se solapan, lo que proporciona la eficiencia espectral que tanto se busca hoy en día. Un

modulador OFDM puede representarse como diagrama de bloques, tal como se muestra en la figura 2.15.

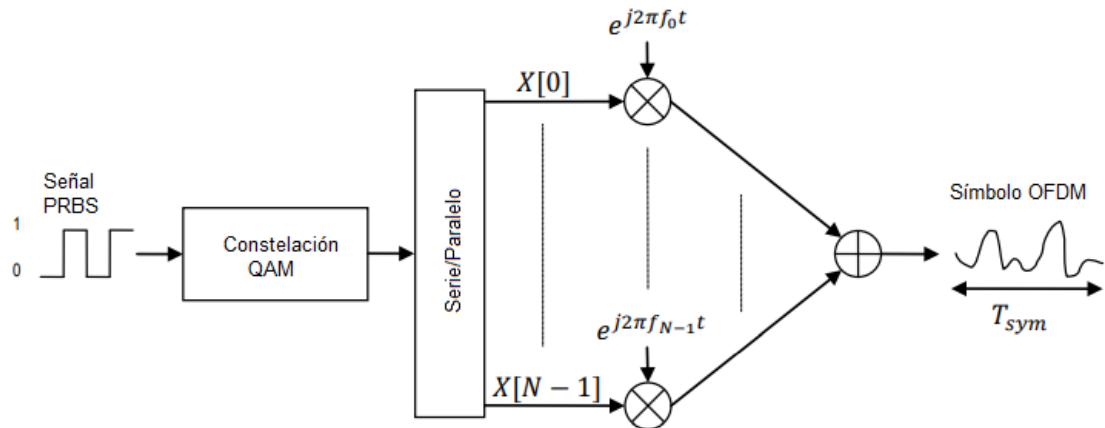


Figura 2. 15: Diagrama de bloques del modulador OFDM.

Fuente: (Moradi, 2018)

Según la figura 2.15, primero se envía una secuencia binaria al primer bloque para generar una secuencia de números complejos. Esto se para y cada uno de los números complejos  $X[n]$  se mezcla con una exponencial compleja. Posteriormente, la salida de cada mezclador se suma para generar un símbolo OFDM de longitud  $T_{sym}$ . La longitud de este símbolo está intrínsecamente ligada al número de mezcladores utilizados.

En este caso, se trata de la generación de la secuencia de números complejos. La generación de los números complejos suele hacerse implementando la modulación de amplitud en cuadratura, más conocida por las siglas QAM. En primer lugar, se elige una constelación de  $M$  puntos en función de la velocidad de datos deseada. A continuación, la secuencia de bits se divide en  $\log_2(M)$  bloques de bits y, dependiendo de la constelación elegida, se generarán dos secuencias distintas: la secuencia en fase y la secuencia en cuadratura. En la figura 2.16, se tiene un ejemplo del mapeo de una constelación normalizada de 16 puntos, es decir, que  $M = 16$ .

Como la constelación tiene 16 puntos distintos, se necesitan 4 bits para seleccionar todos los números complejos posibles. Posteriormente, dependiendo de la constelación utilizada, la generación de los números complejos se realiza simplemente mediante una tabla de consulta (LUT) y,

por tanto, es fácil de implementar en la práctica. La figura 2.17 muestra la modulación de una secuencia binaria corta en símbolos QAM, utilizando la constelación mostrada en la figura 2.16.

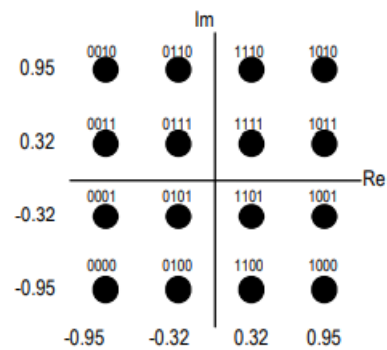


Figura 2. 16: Diagrama de constelación QAM-16 normalizada.  
Fuente: (Moradi, 2018)

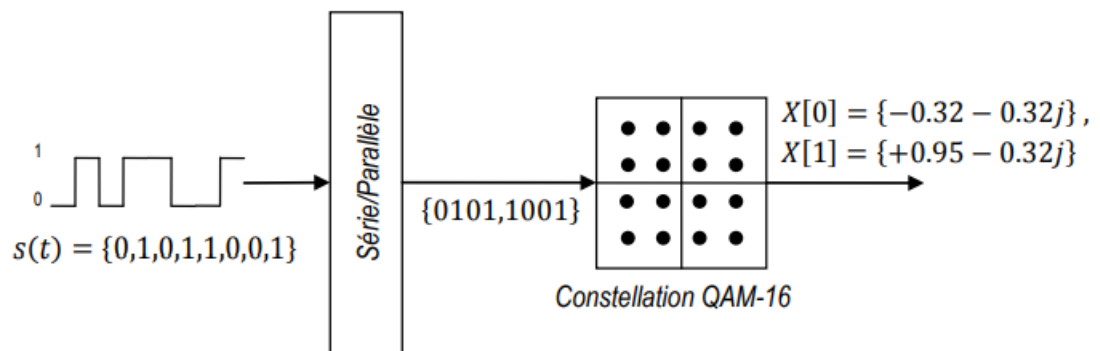


Figura 2. 17: Ejemplo para la modulación 16-QAM.  
Fuente: (Moradi, 2018)

## Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados

En este capítulo se presenta la herramienta de simulación MatLab/Simulink, el diseño e implementación de los escenarios de simulación del estándar IEEE 802.11 usando la técnica OFDM, y análisis de los resultados obtenidos.

### 3.1. Análisis de la herramienta de simulación MatLab/Simulink.

Matlab/Simulink es un paquete de software de simulación de eventos discretos (DES) para el cálculo y el análisis numérico desarrollado y gestionado por MathWorks Inc. Simulink es un paquete de software para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos, de telecomunicaciones, eléctricos, maquinarias, sistemas de energías renovables, entre otras áreas de la ingeniería. El software puede instalarse en diferentes sistemas operativos como Windows, OS X y Linux.

Simulink es compatible con una gran variedad de conjuntos de herramientas, como el conjunto de herramientas de procesamiento de señales digitales, el conjunto de herramientas de comunicaciones, el sistema de control y el conjunto de herramientas de controladores integrados. Como resultado, permite a los usuarios realizar diseños personalizados con Matlab/Simulink sin problemas.

La principal ventaja de Matlab/Simulink es que todos estos conjuntos de herramientas están documentados con ejemplos. Otra ventaja de Matlab/Simulink es la generación automática de código, que favorece la integración de los procesadores en tiempo real con el modelo de simulación. El requisito de diseño de la investigación se centra en el desarrollo de un sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.11 personalizado, y que inclusive permite la integración con el procesador Arduino.

La figura 3.1 se muestra un diagrama esquemático de la comunicación del software MatLab/Simulink con dos poderosas plataformas Arduino y



Raspberry Pi. Debido a que MatLab es un lenguaje interpretado de alto nivel, es fácil crear prototipos y perfeccionar los algoritmos para sus proyectos de Raspberry Pi. Además, MatLab incluye miles de funciones matemáticas y de trazado integradas que puedes utilizar para la programación de Raspberry Pi en áreas como el aprendizaje profundo, el procesamiento de imágenes y vídeos, la optimización, la estadística y el procesamiento de señales. (MathWorks, 2022)

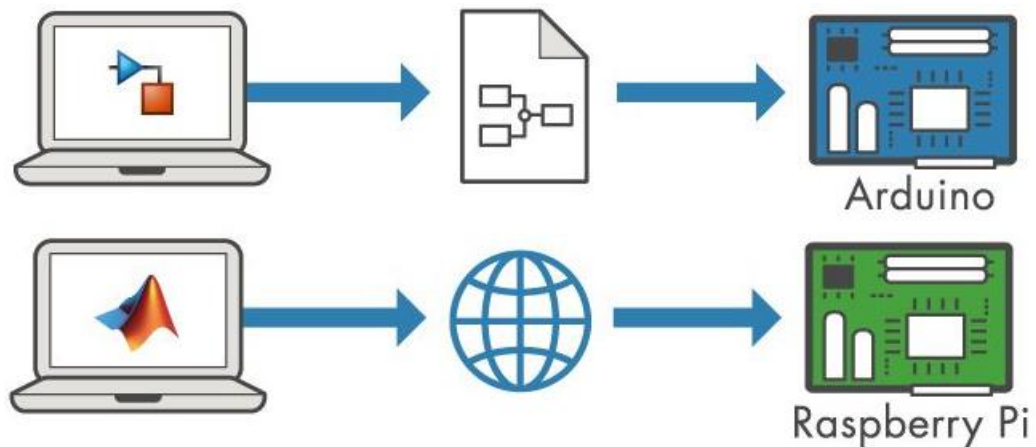


Figura 3. 1: Conectividad de Raspberry Pi a un ordenador que ejecuta MatLab/Simulink.

Fuente: (MathWorks, 2022).

Con Simulink, por ejemplo, se puede desarrollar una comunicación de nodos personalizada a través del protocolo ZigBee. Con las capacidades de generación de código de Matlab, el modelo de simulación puede integrarse con un procesador Arduino fácilmente. Debido a las razones mencionadas, el uso de Matlab/Simulink es más fiable en comparación con otros paquetes de software que se discutieron anteriormente. Por lo tanto, se eligió Matlab/Simulink para el diseño. La tabla 3.1 muestra una comparación entre todos los paquetes de software disponibles para la simulación de comunicaciones inalámbricas.

MatLab no es sólo un paquete estadístico, sino un entorno de cálculo numérico que ofrece mucha más flexibilidad que los programas estadísticos puros, especialmente para los análisis más avanzados. No es una aplicación que se arrastra desde la barra de menús, y es necesario aprender el lenguaje de programación de alto nivel. MatLab se utiliza más en el campo

de la ciencia y la ingeniería, pero la caja de herramientas de estadística y la caja de herramientas de econometría son muy potentes y útiles también para el análisis de datos de las ciencias sociales.

Tabla 3. 1: Cuadro comparativo de herramientas de simulación utilizados en comunicaciones inalámbricas.

<b>Simulador</b>	<b>Tipo de simulación</b>	<b>Lenguaje de programación</b>	<b>Plataforma del SO</b>	<b>Funcionalidad soportada con respecto a comunicaciones inalámbricas</b>
NS-2	DES	C++, OTcl	Linux, Solaris, MAC OS X, Windows	802.11, 802.16, 802.15.4, IR-UWB, TCP/IP, protocolos de capa MAC, FTP, Telnet, tasa de bits constante, tasa de bits variable, vectorización de distancia con secuencia de destino, AODV, DSR
QualNet	DES	PARSEC y C	Windows (64 bits)	AODV, DSR, protocolo de enrutamiento de estado de enlace optimizado, 802.11a, función de coordinación puntual 802.11 y función de coordinación distribuida 802.11
OMNeT++	DES	C++	Linux, MAC OS X, Windows	TCP/IP, Interfaz de sistemas de pequeños ordenadores (SCSI), modelo de interfaz de datos distribuidos por fibra (FDDI), 802.11
MatLab	DES	C y JAVA	Windows, Linux, MAC OS X	802.11, 802.16, 802.15.4, CAN, Ethernet, EtherCAT, J1939, TCP, UDP en tiempo real, norma recomendada 232
NS-3	DES	C++ y Python	Linux, Solaris, MAC OS X, Windows	802.15.4, Protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y con pérdidas (RPL), Protocolo de Internet 6 (IPv6) y redes de área personal inalámbricas de baja potencia (LoWPAN), TCP, UDP, Protocolo de mensajes de control de Internet (ICMP), IPv4.

Opnet	DES	C y C++	Linux y Windows	TCP/IP, Ethernet, 802.11, 802.16, AODV, Protocolo de Enrutamiento de Estado de Enlace Optimizado (OSLR), Algoritmo de Enrutamiento Ordenado Temporalmente (TORA), Protocolo de Enrutamiento Basado en Reuniones (GRP), DSR, 802.15.4
-------	-----	---------	-----------------	--

Elaborado por: Autor.

### **3.2. Descripción del modelo de simulación de la técnica OFDM.**

El estudio sobre el rendimiento de OFDM se realiza en base a dos diseños: (a) Sistema de modulación y demodulación OFDM y (b) Modelo basado en OFDM. Ambos diseños se desarrollan de acuerdo con los componentes básicos del sistema de comunicación digital que consiste en el transmisor, el canal y el receptor. Ambos diseños se crean para mejorar el rendimiento de la tasa de error de bits (BER) en el sistema de comunicación inalámbrica. Los parámetros utilizados en ambos diseños, como el número de portadoras, el periodo IFFT/FFT, la duración de la secuencia, los bits codificados y los bits de datos por símbolos OFDM, se basan en (Benarji et al., 2015; Rawat & Chaturvedi, 2017) según el estándar IEEE 802.11.

### **3.3. Diseño del escenario de simulación 1: modulación y demodulación OFDM en un sistema de comunicación básico.**

El diseño se ha creado con el fin de analizar el rendimiento de la modulación y demodulación de la técnica OFDM en un sistema básico de comunicación inalámbrica, tal como se muestra en la figura 3.1. En el diseño del bloque transmisor, se utiliza el generador de bits de Bernoulli para generar números binarios aleatorios utilizando una distribución Bernoulli y el bit se modula utilizando los esquemas de modulación digital, tales como, modulación por desplazamiento de fase binaria (Binary Phase Shift Keying, BPSK), modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), y M-PSK (M-ary Phase Shift Keying, MPSK) o modulación de amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) para modificar la señal portadora de entrada en función de la información como señal de mensaje.

El bit se normaliza antes de pasar por el diseño del bloque transmisor OFDM para asegurar que la salida tiene dimensiones similares a la entrada. El transmisor OFDM es un subsistema que consiste en la combinación de varios diagramas de bloques como el generador de secuencias PN, el selector multipuerto, la concatenación de matrices, las almohadillas de cero para OFDM, la IFFT y el prefijo cíclico.

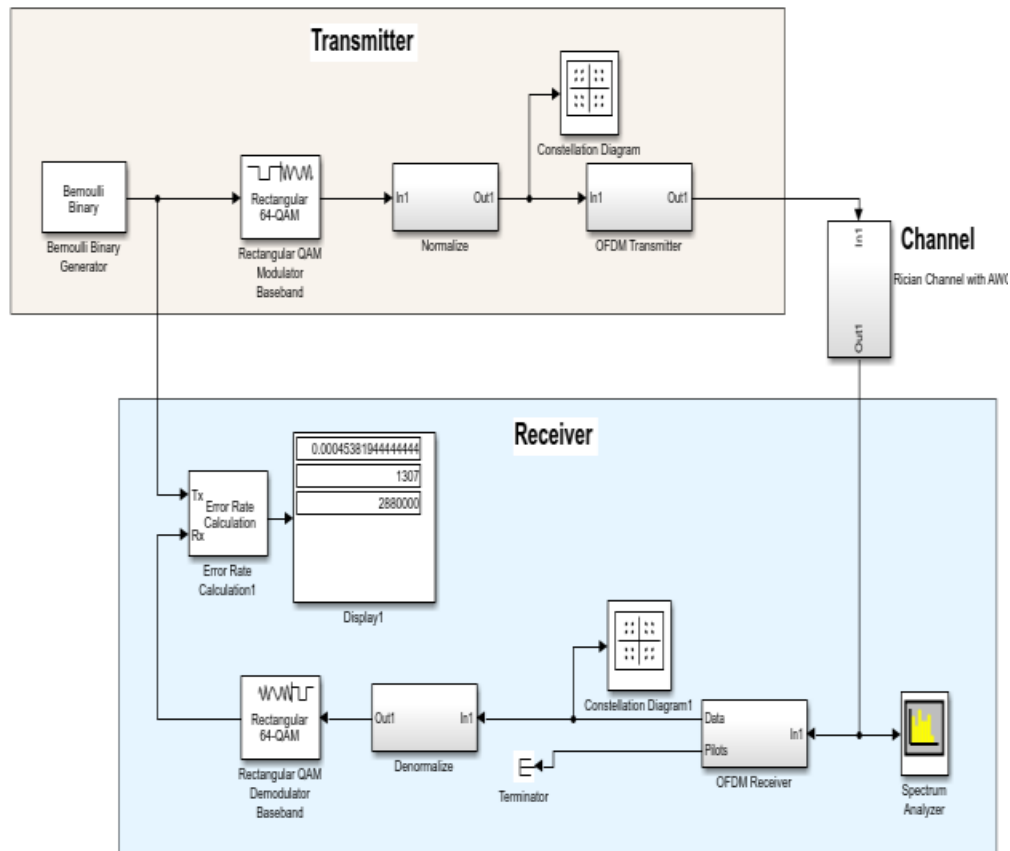


Figura 3. 2: Diseño e implementación del escenario de simulación 1.  
Elaborado por: Autor.

La información del generador crea un flujo de bits. El esquema del modulador se utiliza para delinear la información en símbolos. A continuación, los símbolos se envían a través del diseño del bloque IFFT (Transformada rápida de Fourier inversa) para realizar la operación IFFT y crear N flujos de información paralelos. IFFT/FFT se aplican en el sistema para reducir el coste, la complejidad y el tamaño del sistema.

La FFT (Transformada rápida de Fourier) convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, mientras que la IFFT vuelve a convertir la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. Para

reducir la interferencia entre símbolos (ISI), se incluye un prefijo cíclico (CP) antes de la transmisión.

El bit normalizado atraviesa el ruidoso canal multitrayectoria de Rician con AWGN y es recibido por el diseño del bloque receptor que consta de receptor OFDM, desnormalizador y demodulador QAM. En el receptor del sistema OFDM, se eliminan las almohadillas de cero y el prefijo cíclico que se añaden en el transmisor.

El diagrama de bloques FFT convierte entonces la señal recuperada del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Para utilizar la señal recuperada para su posterior procesamiento, se elimina la portadora piloto. La salida generada después de la eliminación de la portadora piloto está en forma paralela. La señal del receptor se demodula y se compara con la señal del transmisor, lo que permite medir la tasa de error.

Los diagramas de constelación se utilizan para comparar la información antes del transmisor OFDM y después del receptor OFDM. Los procesos de detección y corrección de los errores de la información recibida del canal de desvanecimiento multitrayecto se realizan mediante la técnica de corrección de errores hacia delante (FEC), en la que el control de errores se realiza asegurando que el receptor sólo reconoce la parte de la información que no contiene errores evidentes.

#### **3.4. Diseño del escenario de simulación 2: sistema basado en OFDM.**

El objetivo del segundo diseño que se muestra en la figura 3.3 es analizar la BER utilizando diferentes técnicas de modulación (BPSK, QPSK, MPSK y QAM) basadas en el sistema OFDM. En ambos diseños de los escenarios 1 y 2 se compara la señal de los canales de desvanecimiento multitrayectoria Rician y multitrayectoria Rayleigh, con lo que aumenta la relación señal/ruido (SNR) hasta 60 dB. La figura 3.3 muestra la modulación/demodulación 8-PSK y son modificados para evaluar los esquemas de modulación B-PSK, QPSK y QAM.

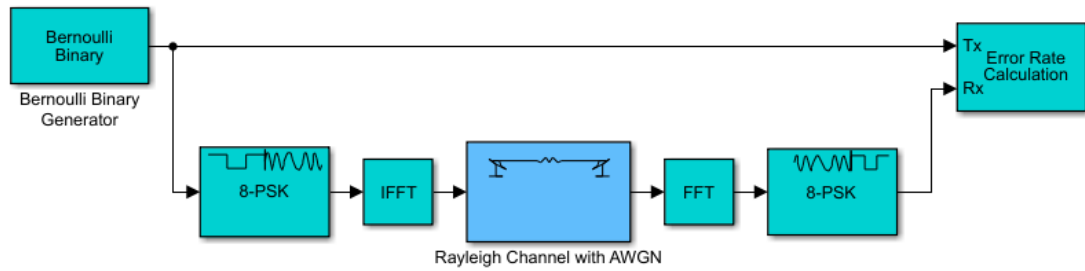


Figura 3. 3: Diseño del escenario de simulación 2.  
Elaborado por: Autor.

### 3.5. Análisis de resultados obtenidos en los escenarios de simulación propuestos.

Se desarrollaron dos diseños de sistemas basados en la técnica de multiplexación OFDM para estudiar su rendimiento en comunicaciones inalámbricas que puede generar una tasa de error de bits (BER) menor. Se compara la BER de varios esquemas de modulación (BPSK, QPSK, MPSK y QAM) digital basados en sistemas OFDM.

La BER es uno de los parámetros de rendimiento del sistema de comunicación inalámbrica en el que se mide la posibilidad de errores durante la transmisión de la señal basándose en las ecuaciones siguientes:

$$BER = \frac{N_E}{N_{Tbtx}}$$

$$A = \frac{1}{2}(1 - erf) \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$$

Donde,

$N_E$ : es los números de errores,

$N_{Tbtx}$ : es el total de bits transmitidos,

erf: es la función de error,

$E_b$  representa la energía en un bit y

$N_0$ : se refiere a la densidad espectral del ruido.

#### 3.5.1. Análisis de simulación del escenario 1.

La señal del transmisor OFDM y del receptor OFDM para la Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK), la Modulación por

Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK) y la Modulación de Amplitud en Cuadratura (64 QAM) se compara en base al diagrama de constelación. El ruido disminuye a medida que aumenta la relación señal/ruido (SNR).

La figura 3.4 muestra el diagrama de constelación de la señal que entra en el transmisor OFDM y sale del receptor OFDM para una relación señal a ruido (SNR) aproximadamente de 30 dB. La figura 3.4(b) muestra que los símbolos se mapean fuera de las áreas del punto de referencia ideal debido a niveles de ruido o interferencia más altos.

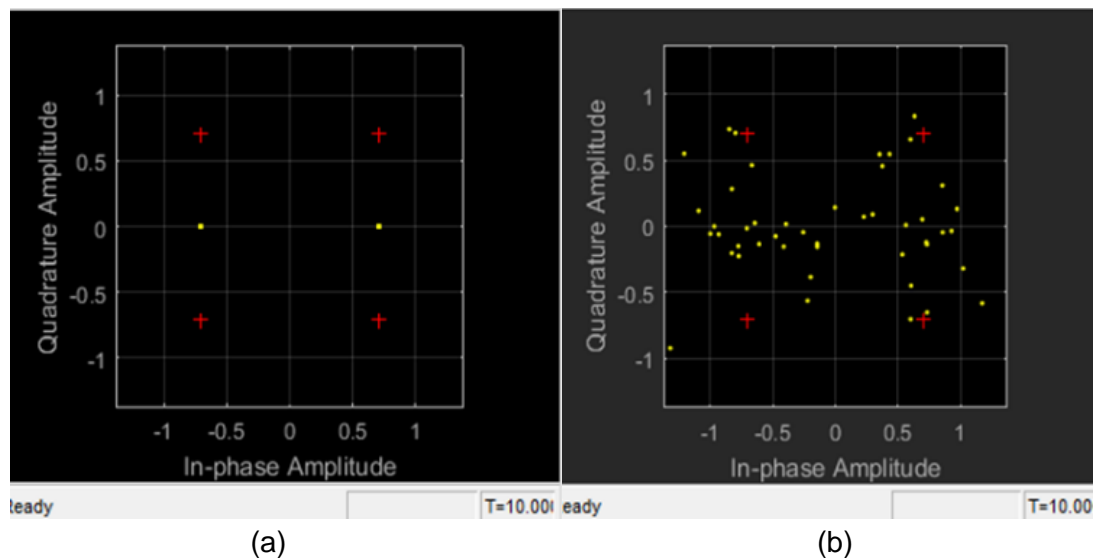


Figura 3. 4: Diagrama de constelación en el (a) transmisor y (b) receptor cuando SNR = 30 dB.

Elaborado por: Autor.

Cuando la SNR aumenta hasta 60 dB, tal como se observa en la figura 3.5, los símbolos se mapean en los puntos de referencia, lo que indica que el receptor tiene muy poco ruido e interferencia. Una mayor SNR generará símbolos en el receptor similares a los del transmisor. Esto se debe a una menor BER. La relación entre la SNR y la BER se muestran en la tabla 3.2. También se observan fenómenos similares para QPSK y QAM.

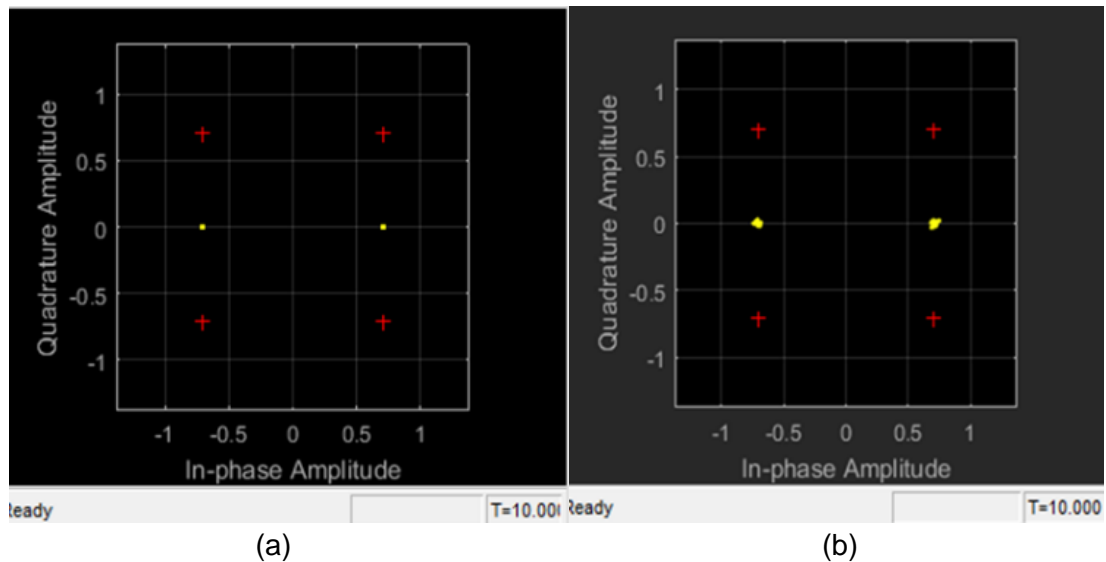


Figura 3. 5: Diagrama de constelación en el (a) transmisor y (b) receptor cuando SNR = 60 dB.

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.2 presenta la tasa de error de bit (BER) para BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM en un sistema OFDM utilizando el bloque canal multitrayecto de Rayleigh ruidoso. Se observa que la BER disminuye cuando la SNR se incrementa, tal como se muestra en la tabla 3.2 y en la figura 3.6.

Tabla 3. 2: BER obtenida para técnicas de modulación diversas en un canal de desvanecimiento multitrayectoria de Rayleigh con ruido.

SNR (dB)	Bit Error Rate (BER)			
	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
0	0.4738	0.4875	0.4676	0.4586
10	0.4187	0.4595	0.4499	0.4539
20	0.2693	0.3748	0.3827	0.3541
30	0.0700	0.1808	0.2048	0.1692
40	0.0082	0.0315	0.0450	0.0363
50	0.0010	0.0034	0.0051	0.0041
60	0.0001	0.0004	0.0006	0.0005

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.6 se observa que el patrón de disminución de la BER es bastante similar para las técnicas de modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM, mientras que la BER disminuye bruscamente para la modulación BPSK. Por



ejemplo, cuando la BER es de  $10^{-3}$ , los valores de SNR para los esquemas de modulación BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM son de 50 dB, 55 dB, 56 dB y 58 dB respectivamente. Se observa que cuando la SRN es 60 dB, la BER para BPSK es casi 0. Estos resultados demuestran que la BPSK tiene una BER más baja para un valor específico de SNR que otras técnicas de modulación, lo que la convierte en la técnica de modulación más adecuada para la transmisión de datos en el canal multitrayecto de Rayleigh con ruido.

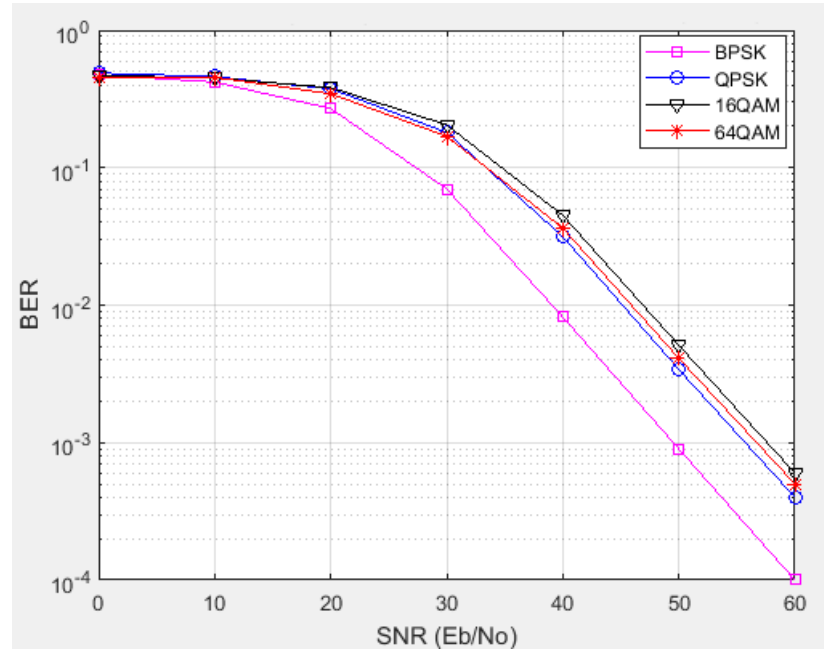


Figura 3. 6: Representación de resultados obtenidos del escenario 1 de la BER para diversos esquemas de modulación en canales de desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh con ruido  
Elaborado por: Autor.

Además, también se estudia el rendimiento de OFDM mediante un desvanecimiento multitrayecto de Rician con ruido utilizando las modulaciones BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM respectivamente. La tabla 3.3 y la figura 3.7 muestran que BPSK ofrece el mejor rendimiento en comparación con otras técnicas de modulación. Los datos de la tabla 3.3 y la figura 3.7 indican que la modulación BPSK es la técnica de modulación más adecuada para la transmisión de la señal en el canal multitrayecto de Rician con ruido. En la figura 3.7 se observa que el rendimiento de la BER para los canales multitrayecto de Rayleigh y Rician son prácticamente similares.

Tabla 3. 3: BER obtenida para técnicas de modulación diversas en un canal de desvanecimiento multitrayectoria de Rician con ruido.

SNR (dB)	Bit Error Rate (BER)			
	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
0	0.4695	0.4805	0.4621	0.4514
10	0.4201	0.4515	0.4451	0.4299
20	0.2675	0.3694	0.3749	0.3983
30	0.0598	0.1655	0.1908	0.1589
40	0.0081	0.0261	0.0389	0.0299
50	0.0011	0.0037	0.0051	0.0041
60	0.0001	0.0004	0.0007	0.0005

Elaborado por: Autor.

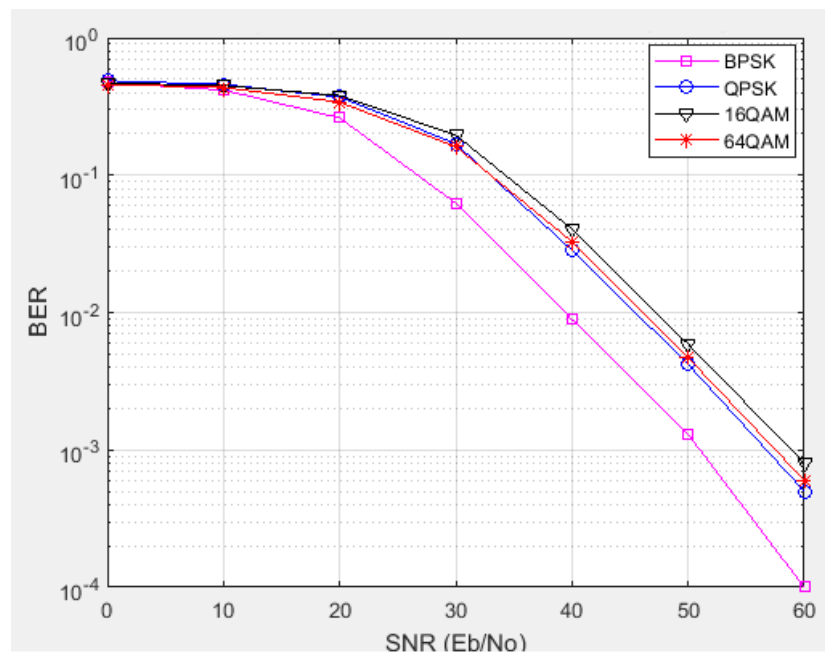


Figura 3. 7: Representación de resultados obtenidos del escenario 1 de la BER para diversos esquemas de modulación en canales de desvanecimiento multitrayecto de Rician con ruido.

Elaborado por: Autor.

### 3.5.2. Análisis de simulación del escenario 2.

Esta sección analiza los resultados obtenidos del sistema OFDM basado en la modulación, y también se analiza la BER utilizando los esquemas de modulación BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, 16-QAM y 64-QAM

a través de los canales de desvanecimiento de Rayleigh y Rician respectivamente. En el diseño del sistema basado en OFDM a través del canal de Rayleigh (escenario 1), el valor de la SNR varía entre 0 dB y 20 dB. En la tabla 3.4 y en la figura 3.8 se observa claramente que la BER disminuye a medida que aumenta el valor de la relación señal a ruido (SNR).

Tabla 3. 4: BER obtenida para diferentes técnicas de modulación en un canal de desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh con ruido

SNR (dB)	Bit Error Rate (BER)					
	BPSK	QPSK	8-PSK	16-PSK	16-QAM	64-QAM
0	0.2270	0.5619	0.7118	0.8205	0.4939	0.4817
2	0.1821	0.4225	0.6428	0.7811	0.3989	0.3948
4	0.1008	0.3471	0.5830	0.7616	0.2719	0.2666
6	0.0551	0.2781	0.4442	0.7311	0.1345	0.1338
8	0.0232	0.1571	0.3753	0.6625	0.0507	0.0527
10	0.0041	0.0683	0.2563	0.5734	0.0165	0.0132
12	0	0.0162	0.2266	0.4449	0.0007	0
14	0	0.0041	0.0982	0.3751	0	0
16	0	0	0.0585	0.2370	0	0
18	0	0	0.0088	0.1079	0	0
20	0	0	0	0.0581	0	0

Elaborado por: Autor.

Para la modulación BPSK se muestra la menor BER, lo que indica el mejor rendimiento del sistema basado en OFDM, mientras que la modulación 16-PSK muestra una BER mayor, lo que significa el peor rendimiento del sistema basado en OFDM. La BER tanto para la modulación BPSK y 16-QAM llega a 0 con una SNR de 12dB, lo que demuestra el mejor rendimiento del diseño basado en OFDM en un sistema de comunicación inalámbrica. Estos resultados muestran que las modulaciones BPSK y 64-QAM introducen menos interferencias y ruido en el sistema.

El peor rendimiento del sistema basado en OFDM es el que se obtiene utilizando la modulación 8-PSK, donde el sistema necesita una SNR de 20

dB para obtener una BER de 0. Aunque BPSK tiene un buen rendimiento en el diseño del sistema basado en OFDM, es preferible utilizar la técnica de modulación 64-QAM para la transmisión de datos en el canal de desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh con ruido. Esto se debe a que la técnica de modulación 64-QAM puede transportar una gran cantidad de datos, que son 288 bits codificados por OFDM.

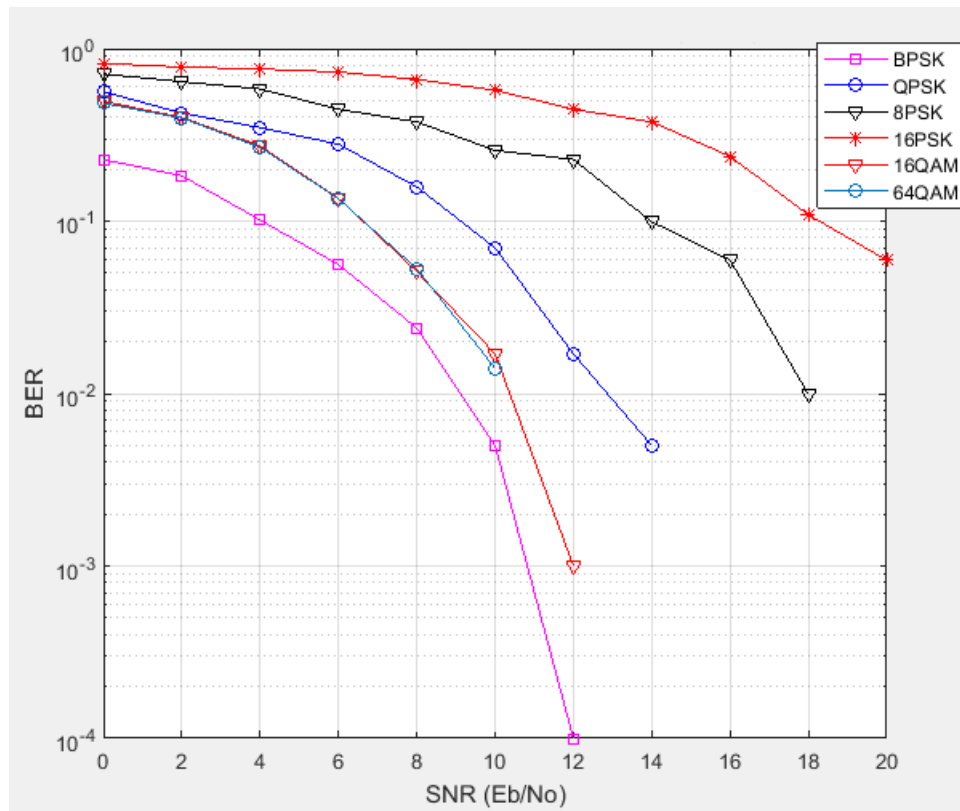


Figura 3. 8: Representación de resultados obtenidos del escenario 2 de la BER para diversos esquemas de modulación en canales de desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh con ruido.  
Elaborado por: Autor.

El sistema basado en la técnica OFDM también se ha diseñado para el canal de desvanecimiento multitrayecto de Rician con ruido, y los resultados obtenidos se observan en la tabla 3.5. Se observa claramente que la BER también se reduce a medida que aumenta el valor de la SNR. La modulación BPSK sigue ofreciendo el mejor rendimiento en comparación con otras técnicas de modulación, alcanzando una BER de 0 a una SNR de 10 dB.

Mientras tanto, 16-QAM y 64-QAM necesitan 14 dB para alcanzar la BER de 0. El peor rendimiento lo muestran las modulaciones 8-PSK y 16-

PSK, donde las técnicas de modulación necesitan una SNR de 20 dB para alcanzar una BER de 0. Esta información puede verse claramente en la figura 3.9. La técnica de modulación BPSK es la preferida para transmitir datos en el canal de desvanecimiento de Rician con ruido.

Tabla 3. 5: BER obtenida para diferentes técnicas de modulación en un canal de desvanecimiento multitrayecto de Rician con ruido.

SNR (dB)	Bit Error Rate (BER)					
	BPSK	QPSK	8-PSK	16-PSK	16-QAM	64-QAM
0	0.1991	0.4539	0.7219	0.8111	0.4661	0.4600
2	0.1791	0.3946	0.6528	0.7817	0.3488	0.3731
4	0.1095	0.3119	0.5638	0.7619	0.2219	0.2271
6	0.0501	0.2348	0.4450	0.6629	0.1195	0.1140
8	0.0302	0.1206	0.3451	0.5738	0.0435	0.0415
10	0	0.0625	0.2668	0.5342	0.0115	0.0125
12	0	0.0175	0.1183	0.4450	0.0001	0.0005
14	0	0.0001	0.0490	0.3613	0	0
16	0	0	0.0292	0.1876	0	0
18	0	0	0.0001	0.0787	0	0
20	0	0	0	0.0589	0	0

Elaborado por: Autor.

El sistema OFDM que utiliza BPSK produce menos ruido e interferencias, pero transporta menos datos. Para un sistema de transmisión de datos complejo y grande, se prefiere la modulación QAM. A partir de estos datos, se analiza el rendimiento de la BER entre estos dos canales de desvanecimiento multitrayectoria ruidosos diferentes.

Los resultados muestran que el sistema basado en OFDM utilizando el canal de desvanecimiento multitrayecto de Rician ruidoso tiene un mejor rendimiento que el sistema basado en OFDM utilizando el canal de desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh ruidoso. La BER obtenida por todas las técnicas de modulación en el canal de desvanecimiento multitrayecto de Rician es menor que en el canal de desvanecimiento

multitrayecto de Rayleigh. Esto se debe a que la línea de vista (LOS) es más aplicable en el canal de Rician que en el de Rayleigh. En el canal Rayleigh, hay muchos objetos en el entorno que interfieren o dispersan la señal antes de que ésta pueda llegar al receptor.

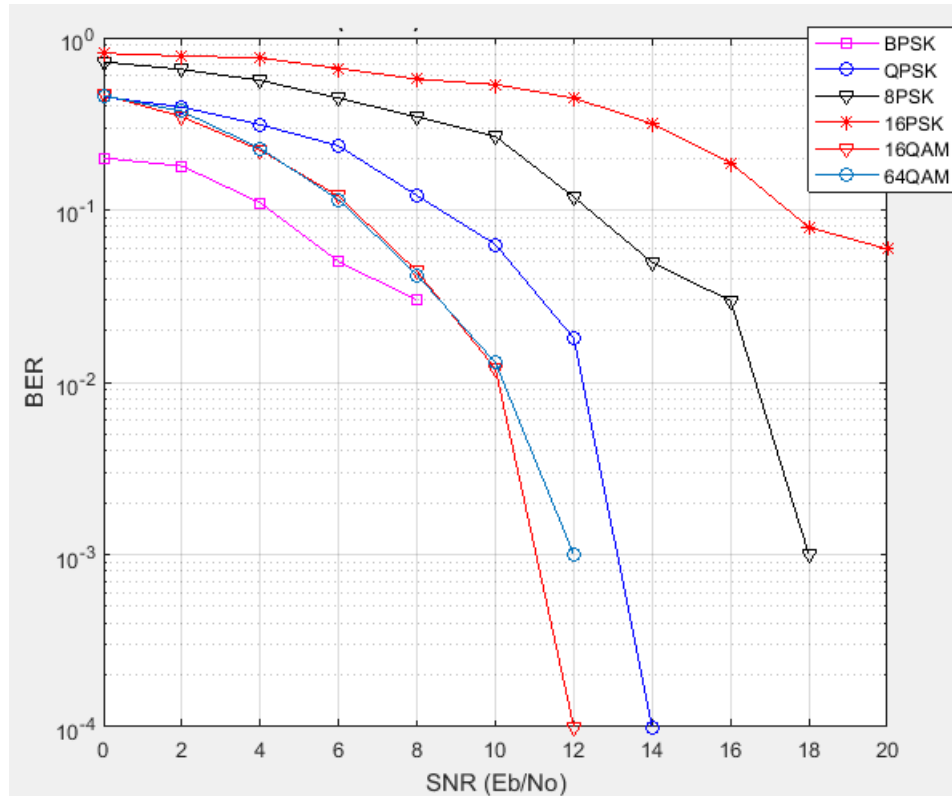


Figura 3. 9: Representación de resultados obtenidos del escenario 2 de la BER para diversos esquemas de modulación en canales de desvanecimiento multitrayecto de Rician con ruido.

Elaborado por: Autor.

### 3.5.3. Análisis comparativo entre los escenarios de simulación de los diseños de OFDM.

El rendimiento de la BER de los sistemas basados en OFDM se analiza a partir de dos diseños desarrollados. El escenario de simulación 1 es más complejo que el diseño del escenario de simulación 2, pero la BER puede reducirse utilizando un esquema de modulación adecuado. Sin embargo, la BER no puede reducirse a 0 ni siquiera para una SNR alta, es decir de 60 dB. Para el diseño del escenario de simulación 2, la BER puede reducirse a 0 cuando la SNR es superior a 12 dB. Para ambos escenarios de simulación diseñados, la modulación BPSK muestra el mejor rendimiento de la BER en comparación con otros esquemas de modulación. El rendimiento de la BER

a través de los canales de Rayleigh y Rician es similar en el diseño del escenario de simulación 1. Sin embargo, el rendimiento de la BER a través del canal de Rician es mejor que el canal de Rayleigh en el diseño del escenario de simulación 2.

## Conclusiones.

- La fundamentación teórica permitió conocer las bases conceptuales de las redes inalámbricas y de la multiplexación OFDM.
- Se modeló y analizó el rendimiento de la BER en el sistema completo de modulación y demodulación OFDM y en el sistema basado en OFDM sobre desvanecimiento multitrayecto de Rayleigh y desvanecimiento multitrayecto de Rician. Se construye el estándar 802.11a para el sistema OFDM y se realiza el proceso de simulación del sistema. El estudio también se analizó los efectos de diferentes canales y técnicas de modulación en el rendimiento del sistema OFDM.
- El esquema de modulación más sencillo, como BPSK, produce menos BER en comparación con QPSK y MPSK. A partir del análisis anterior, es posible mejorar el rendimiento de OFDM en las comunicaciones inalámbricas. Los diseños OFDM pueden mejorarse cambiando los parámetros y los requisitos del sistema. Por lo tanto, OFDM es un candidato potencial para el sistema de quinta generación (5G) o las futuras generaciones de comunicación inalámbrica.



## **Recomendaciones.**

- Análisis comparativo del rendimiento de WLAN en diferentes técnicas de acceso inalámbrico (DCF, PCF, HCF).
- Mejoramiento de la red WLAN IEEE802.11e mediante un estudio de simulación en tiempo real.
- Estrategias inalámbricas de software y hardware para control flexible y unificado de la radio y la red.

## Bibliografía

- Balapuwaduge, I. A. M., & Li, F. (2015a). Cellular Networks: An Evolution from 1G to 4G. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 3. <https://www.semanticscholar.org/paper/Evolution-of-Mobile-Communication-Network%3A-from-1G-Agrawal-Patel/819d115a2a3afb26bef9e6c8397f52c557eba4bb>
- Balapuwaduge, I. A. M., & Li, F. Y. (2018b). Cellular Networks: An Evolution from 1G to 4G. En X. Shen, X. Lin, & K. Zhang (Eds.), *Encyclopedia of Wireless Networks* (pp. 1–6). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32903-1\\_214-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32903-1_214-1)
- Banerji, S., & Chowdhury, R. S. (2013). On IEEE 802.11: Wireless Lan Technology. *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics*, 3(4), 45–64. <https://doi.org/10.5121/ijmnc.2013.3405>
- Benarji, B., Rao, S., & Setty, S. (2015). BER Performance of OFDM System with various OFDM frames in AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channel. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 3(4), 6–11.
- Burbank, J. L., Andrusenko, J., Everett, J. S., & Kasch, W. T. M. (Eds.). (2013). Wireless Metropolitan Area Networks. En *Wireless Networking* (pp. 195–249). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118590775.ch5>
- Caputo, A. C. (2014). Wireless Networked Video. En *Digital Video Surveillance and Security* (pp. 145–204). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420042-5.00005-8>
- Collotta, M., Pau, G., Salerno, V. M., & Scat, G. (2012). Wireless Sensor Networks to Improve Road Monitoring. En M. Matin (Ed.), *Wireless Sensor Networks—Technology and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/48505>

- Doufexi, A., Armour, S., Butler, M., Nix, A., Bull, D., McGeehan, J., & Karlsson, P. (2002). A comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a wireless LAN standards. *IEEE Communications Magazine*, 40(5), 172–180. <https://doi.org/10.1109/35.1000232>
- Giuliano, R., Mazzenga, F., Petracca, M., & Vatalaro, F. (2013). Application of Radio Frequency Identification for Museum Environment. *2013 Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*, 190–195. <https://doi.org/10.1109/WETICE.2013.86>
- Hoang, D. T., Lu, X., Niyato, D., Wang, P., Kim, D. I., & Han, Z. (2015). Applications of Repeated Games in Wireless Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2102–2135. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2445789>
- Hunt, R. (2012). Emerging Wireless Personal Area Networks (WPANs): An analysis of techniques, tools and threats. *2012 18th IEEE International Conference on Networks (ICON)*, 274–279. <https://doi.org/10.1109/ICON.2012.6506569>
- Lonzetta, A., Cope, P., Campbell, J., Mohd, B., & Hayajneh, T. (2018). Security Vulnerabilities in Bluetooth Technology as Used in IoT. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 7(3), 28. <https://doi.org/10.3390/jsan7030028>
- MathWorks. (2022). *Raspberry Pi Programming with MATLAB and Simulink*. <https://www.mathworks.com/discovery/raspberry-pi-programming-matlab-simulink.html>
- Moradi, M. (2018). *Software-Driven and Virtualized Architectures for Scalable 5G Networks*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15596.82569>
- Mostarda, L., Dong, C., & Dulay, N. (2008). *Place and Time Authentication of Cultural Assets: 4th IFIP WG International Conference*. 4th IFIP WG International Conference, Morioka, Japan.

- Rawat, S., & Chaturvedi, P. (2017). Performance Analysis of QoS Parameters in OFDM Based Network. *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*, 5(3), 128–132.
- Restuccia, F. (2021). IEEE 802.11bf: Toward Ubiquitous Wi-Fi Sensing. *arXiv:2103.14918 [cs]*. <http://arxiv.org/abs/2103.14918>
- Satyabrata, J. (2021). Overview of Wireless Metropolitan Area Network (WMAN). *GeeksforGeeks*. <https://www.geeksforgeeks.org/overview-of-wireless-metropolitan-area-network-wman/>
- Shang, J., Yu, S., Gu, F., Xu, Z., & Zhu, L. (2011). A mobile guide system framework for museums based on local location-aware approach. *2011 International Conference on Computer Science and Service System (CSSS)*, 1935–1940. <https://doi.org/10.1109/CSSS.2011.5974578>
- Shieh, W., & Djordjevic, I. (2010). OFDM Principles. En *OFDM for Optical Communications* (pp. 31–52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374879-9.00002-2>
- Singh, Miss. S. K., & Tripathi, M. A. (2017). BER Performance of OFDM System in Rayleigh Fading Channel Using Cyclic Prefix. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(11), 8–13. <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.11.2>
- Sirait, R., & Dhuha, R. F. (2020). Kajian Perencanaan Jaringan Long Term Evolution (LTE) Pada Node B 4G di Kota Tangerang Selatan. *Techno.Com*, 19(2), 178–189. <https://doi.org/10.33633/tc.v19i2.3326>
- Sydir, J., & Taori, R. (2009). An evolved cellular system architecture incorporating relay stations. *IEEE Communications Magazine*, 47(6), 115–121. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5116808>

- Tigrek, R. F. (2010). *A processing technique for OFDM-Modulated wideband radar signals* [Thesis]. Delft University of Technology.
- Veglia, J. E. (2018). *Sistemas de comunicación robustos para infraestructuras avanzadas de medición de energía implementadas sobre PLC (power line communications)* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Nordeste]. <http://repositorio.unne.edu.ar/xmlui/handle/123456789/27884>
- Wang, Y., Motani, M., Garg, H. K., Kang, X., & Chen, Q. (2016). Throughput maximization for cooperative 60 GHz wireless personal area networks. *Computer Networks*, 110, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.09.010>
- Yépez Lapo, J. A. (2021). *Diseño de una red inalámbrica (Wi-Fi) para servicio de internet público en el barrio Las Gaviotas ubicado en el recinto Matilde Esther, del cantón Bucay de la provincia del Guayas*. [Trabajo de Titulación, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/17165>



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Jordan Zamora, Kerwin Israel** con C.C: # 171959603-1 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 7 de marzo del 2022

f. \_\_\_\_\_

Nombre: Jordan Zamora, Kerwin Israel

C.C: 171959603-1

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink		
<b>AUTOR(ES)</b>	Jordan Zamora, Kerwin Israel		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Romero Rosero, Carlos Bolívar		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	7 de marzo del 2022	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	47
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas de Comunicaciones, Comunicaciones Inalámbricas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Multiplexación, Frecuencia, Redes, Comunicaciones, Inalámbricas, Rendimiento		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>Las tecnologías de radiocomunicación están inmersas en una búsqueda incesante de capacidad y, por tanto, de mayor rendimiento, unida a la necesidad constante de mejorar la calidad de la transmisión. Las redes inalámbricas tendrán que gestionar un número creciente de usuarios conectados y un aumento del tráfico multimedia, con una exigencia de calidad de servicio comparable a la de las redes alámbricas de alta velocidad. Si bien estos objetivos son compartidos por toda la industria de las telecomunicaciones y las redes, actualmente existe un consenso sobre la elección de las tecnologías para alcanzarlos. Los diseñadores de sistemas de transmisión inalámbricos buscan optimizar la calidad del servicio y superar los problemas que surgen durante el diseño y la implantación de sus sistemas. De acuerdo con la motivación expuesta, el presente trabajo se encarga de realizar el análisis de rendimiento del estándar IEEE 802.11 utilizando la técnica OFDM sobre la herramienta de simulación MatLab/Simulink</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593 99 929 6961	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:isjor23@gmail.com">isjor23@gmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-67608298		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			