



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TEMA:

**Análisis de la tasa de error de bits (BER) utilizando diferentes  
modulaciones para sistemas de banda ancha inalámbrica**

AUTOR:

Herrera Rodríguez, Yadira Lilibeth

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

11 de Septiembre del 2018



**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 el Sr.  
**Herrera Rodríguez, Yadira Lilibeth** como requerimiento para la obtención  
del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DE CARRERA

---

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 11 días del mes de septiembre del año 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Herrera Rodríguez, Yadira Lilibeth**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación “**Análisis de la tasa de error de bits (BER) utilizando diferentes modulaciones para sistemas de banda ancha inalámbrica**” previo a la obtención del Título de **Ingeniera 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 11 días del mes de septiembre del año 2018

EL AUTOR

---

HERRERA RODRÍGUEZ, YADIRA LILIBETH



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Herrera Rodríguez, Yadira Lilibeth**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Análisis de la tasa de error de bits (BER) utilizando diferentes modulaciones para sistemas de banda ancha inalámbrica**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 11 días del mes de septiembre del año 2018

EL AUTOR

---

HERRERA RODRÍGUEZ, YADIRA LILIBETH

# REPORTE DE URKUND

The screenshot shows the URKUND interface. On the left, a document summary is provided: 'Documento: [Yadira Herrera\\_2018.docx](#) (D41017147)', 'Presentado: 2018-08-28 09:04 (-05:00)', 'Presentado por: fernandopm23@hotmail.com', 'Recibido: edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com', and 'Mensaje: Revisión Yadira Herrera [Mostrar el mensaje completo](#)'. A yellow highlight in the message states: '1% de estas 27 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.' On the right, the 'Lista de fuentes' tab is active, showing a table with columns 'Categoría' and 'Enlace/nombre de archivo'. One source is listed: 'Fuentes alternativas' with the URL 'https://edoc.site/capitulo-2-tecnicas-de-...'. Below the interface, a yellow warning box indicates '1 Advertenci...'. At the bottom, the document's institutional affiliation, topic, author, and tutor information are listed.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL  
DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN  
TELECOMUNICACIONES

TEMA: Análisis de la tasa de error de bits (BER)  
utilizando diferentes modulaciones para sistemas de  
banda ancha inalámbrica

AUTOR: Herrera Rodríguez, Yadira Lilibeth

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

TUTOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

## **DEDICATORIA**

A Dios, por brindarme la oportunidad de vivir, por permitirme disfrutar cada momento de mi vida y guiarme por el camino que ha trazado para mí. A mis padres que gracias a sus consejos y palabras de aliento me han ayudado a crecer como persona y a luchar por lo que quiero. Un agradecimiento especial a mi madre por darme la mejor educación y enseñarme que todas las cosas hay que valorarlas, trabajarlas y luchar para lograr los objetivos de la vida. Siempre brindándome su apoyo y confianza en todo lo necesario para cumplir mis objetivos. A mi abuela por enseñarme valores que me han llevado a alcanzar una gran meta, a mis hermanos y familia por estar en los momentos más importantes de mi vida este logro también es de ustedes.

**EL AUTOR**

**HERRERA RODRÍGUEZ, YADIRA LILIBETH**

## **AGRADECIMIENTO**

Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de esta etapa en mi vida. Agradezco a mis padres por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente. También quiero agradecer enormemente al Ing. Edwin Palacios director de tesis y maestro en toda mi carrera universitaria, por su valiosa colaboración, asesoramiento, paciencia y enseñanza. A la Universidad Católica Santiago de Guayaquil donde me he formado. Agradezco a los todos docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional.

EL AUTOR

HERRERA RODRÍGUEZ, YADIRA LILIBETH



**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. ZAMORA CEDEÑO, NESTOR ARMANDO**  
COORDINADOR DE ÁREA

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

**M. SC. VELEZ TACURI, EFRAIN OLIVERIO**  
OPONENTE



## Índice General

Índice de Figuras .....	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen .....	XIV
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	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 .....	6
2.1. Canal de comunicación inalámbrico.....	6
2.2.1. Características del canal .....	7
2.2.2. Modelos de canales inalámbricos.....	9
2.2.3. Capacidad del canal inalámbrico.....	11
2.2.4. Parámetros del canal inalámbrico.....	13
2.2.5. Clasificación de canales inalámbricos. ....	14
2.2.6. Técnicas de variación. ....	16
2.3. Sistemas de múltiples entradas y salidas múltiples (MIMO).....	19
2.4. Sistemas de comunicación celular. ....	22
2.4.1. Técnicas de acceso múltiple.....	23

2.4.2. Plan de temporización. ....	26
2.4.2.1. Diversidad multiusuario .....	27
2.4.2.2. Configuración oportunista.....	27
2.4.2.3. Plan de sincronización oportunista.....	29
CAPÍTULO 3: SIMULACION Y RESULTADOS OBTENIDOS .....	33
3.1. Comunicación simbólica.....	33
3.2. Transmisión de banda de transición.....	35
3.2.1. Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK). ....	35
3.2.2. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK). ....	35
3.2.3. Modulación por desplazamiento de fase (PSK).....	36
3.2.4. Modulación PSK binaria (BPSK).....	37
3.2.5. Modulación PSK cuaternaria (QPSK).....	37
3.2.6. Modulación de amplitud en cuadratura (QAM). ....	41
3.3. Desarrollo de simulación. ....	41
3.4. Estudio de simulación 1.....	42
3.5. Estudio de simulación 2.....	47
3.6. Resultados. ....	54
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
4.1. Conclusiones.....	56
4.2. Recomendaciones.....	56
Bibliografía .....	58

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Influencia de la propagación de ondas electromagnéticas debido a obstáculos en el entorno.....	6
Figura 2. 2: Cambio aleatorio de la potencia de la señal en el canal inalámbrico debido a desvanecimientos. ....	8
Figura 2. 3: Clasificación de las características del canal inalámbrico según el efecto de desvanecimiento.....	14
Figura 2. 4: Características del canal de desvanecimiento lento y rápido. ..	15
Figura 2. 5: Clasificación según los parámetros de señal y del canal de desvanecimiento.....	16
Figura 2. 6: Uso de la diversidad del transmisor/receptor en los sistemas MISO/SIMO.....	18
Figura 2. 7: La diversidad del receptor es también la combinación de las señales de los caminos de desvanecimientos independientes.....	19
Figura 2. 8: Modelo de sistema de múltiples entradas y salidas múltiples (MIMO).....	20
Figura 2. 9: Una arquitectura típica del sistema de comunicación celular ...	23
Figura 2. 10: Intercambio de canales con técnicas FDMA, TDMA, CDMA y SDMA. ....	24
Figura 2. 11: Compartición entre canales de enlace ascendente y descendente con técnicas de duplexación FDD y TDD. ....	25
Figura 2. 12: Ondulaciones artificiales en el canal con la ayuda de la configuración oportunista.....	28
Figura 2. 13: Implementación de la técnica TDMA con la ayuda de planes de tiempo recurrentes y oportunistas.....	30

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Evolución cronológica de los géneros de comunicación.....	33
Figura 3. 2: Una secuencia de código de banda base con el código 0010110010.....	36

Figura 3. 3: Representación gráfica de las modulaciones por desplazamiento de (a) amplitud, (b) frecuencia, y (c) fase. ....	36
Figura 3. 4: Sistema BPSK básico. ....	37
Figura 3. 5: Sistema 8PSK usando ocho símbolos diferentes. ....	37
Figura 3. 6: Visualización de la modulación QPSK en forma polar. ....	40
Figura 3. 7: Visualización de la modulación QPSK utilizando los canales I y Q. ....	40
Figura 3. 8: Sistema 16-QAM con amplitud y cambio de fase en conjunto..	41
Figura 3. 9: Probabilidad BER-SNR para MPSK.....	42
Figura 3. 10: Probabilidad de BER-SNR para MFSK con demodulación coherente.....	44
Figura 3. 11: Probabilidad BER-SNR para MQAM.....	44
Figura 3. 12: Comparación de las probabilidades BER-SNR para 4-PSK, 4-QAM, 8-PSK, 8QAM y 16QAM .....	45
Figura 3. 13: Comparación de las probabilidades de BER-SNR para M-PSK y M-QAM. ....	46
Figura 3. 14: Representación de símbolos en el plano complejo para valores de desplazamiento de fase = 0 y $d=1$ . ....	48
Figura 3. 15: Comparación BER-SNR para $d = 1, 2, 3$ y $4$ .....	48
Figura 3. 16: Representación de símbolos en el plano complejo para valores de $d=1$ y (a) la fase off-set = 1 rad, (b) la fase off-set = 2 rad, (c) la fase off-set = 3 rad, (d) la fase off-set = 4 rad.....	50
Figura 3. 17: Comparación de BER-SNR para diferentes valores de desfase de fase definidos en la figura 3.16. ....	51
Figura 3. 18: Representación de símbolos en el plano complejo para valores de (a) fase off-set = 1 rad y $d=1$ , (b) fase off-set = 2 rad y $d=2$ , (c) fase off-set = 3 rad y $d=3$ (d) fase off-set = 4 rad y $d=4$ .....	53
Figura 3. 19: Comparación de BER-SNR para diferentes desplazamientos de fase y valores $d$ definidos en la figura 3.18. ....	54

## Índice de Tablas

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Comparación de las tecnologías 2G, 3G y 4G.....	34
Tabla 3. 2: Visualización de símbolos según el ángulo de fase en la modulación QPSK.....	39
Tabla 3. 3: Eficiencia de ancho de banda con el aumento de número de bits y la comparativa de BER. ....	47

## Resumen

Los sistemas de comunicación digital son sistemas que transmiten datos numéricos al lado opuesto con un error mínimo por medio de protocolos que permiten el acceso múltiple mediante la multiplexación por división de código. En estos sistemas, las modulaciones de fase, frecuencia y amplitud son el soporte de los datos que se conmutan a altas velocidades según una determinada regla (PSK, FSK y ASK). La comunicación simbólica se realiza convirtiendo nuevamente a datos numéricos en el lado del receptor. Se han llevado a cabo varios estudios sobre el rendimiento de los símbolos seleccionados en la transmisión al lado opuesto de estos sistemas, la modulación realizada por otra conmutación alternativa y el rendimiento en el canal de transmisión. Además, la tasa de ruido involucrada en la señal en el canal de transmisión y el error causado por esta relación también son relevantes. En este estudio, el sistema W-CDMA se explica en detalle y las modulaciones simbólicas como BPSK, PSK y QAM utilizadas en este sistema tienen una relación señal / ruido (SNR)

**Palabras claves: MODULACIONES, FASE, FRECUENCIA, AMPLITUD, , SEÑAL-RUIDO, TRANSMISIÓN**

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción.

En el campo de las comunicaciones móviles, el movimiento hacia la próxima generación de sistemas de banda ancha inalámbrica ya está en marcha. Con el crecimiento en la ubicuidad de los servicios de comunicación móvil y la creciente demanda de estos servicios, el énfasis está cambiando de las llamadas de voz a las comunicaciones de datos. La distribución de una amplia gama de contenido móvil, incluidos correo, música, juegos, aplicaciones en espera y navegación se ha convertido en una parte integral de nuestra forma de vida y la demanda de comercio móvil, como pedidos por correo, emisión de boletos y subastas crece año tras año.

No se sabe hasta qué punto la creciente necesidad de servicios como la transferencia de archivos, la transmisión de video y los juegos impulsarán la demanda de comunicaciones de banda ancha. Además, el soporte para una gama diversa de aplicaciones ha llevado a que la QoS (calidad de servicio) se convierta en un problema técnico importante. En este contexto, la comercialización de los sistemas de banda ancha inalámbrica de próxima generación con un ancho de banda de sistema de 10 MHz o más ya está en marcha.

Según la FCC, los usuarios urbanos y rurales adoptan la banda ancha a las mismas tasas de disponibilidad. La educación, el cuidado de la salud, la banca, el entretenimiento y muchas otras industrias dependen de la banda ancha para prestar sus servicios. A medida que se desarrollan nuevas aplicaciones y servicios, los consumidores residenciales y comerciales continúan aumentando rápidamente su demanda de ancho de banda.

Los proveedores de banda ancha utilizan una variedad de redes basadas en tecnologías fijas o inalámbricas. La banda ancha proporcionada a través de redes inalámbricas desempeña sin duda un papel importante en la vida de los consumidores de hoy. Muchos consumidores confían en la banda ancha disponible en sus dispositivos móviles para acceder a redes

sociales, noticias, videos en pantallas pequeñas y muchas otras aplicaciones. Otro uso de la tecnología inalámbrica es la conexión inalámbrica terrestre fija, que algunos creen que podría ser una alternativa de menor costo a la banda ancha por cable, aunque para el presente trabajo de titulación no se considera en el estudio de los fundamentos teóricos.

## **1.2. Antecedentes.**

A continuación, se describen trabajos relacionados al estudio o análisis de BER utilizando diferentes esquemas de modulación

- 1) Rajesh, Shrishya, Rao, & Kumaraswamy, (2016) realiza un análisis de la comparación BER de varios esquemas de modulación digital utilizados para modulación adaptativa. En este trabajo, se propone un análisis comparativo del rendimiento de BER de varias técnicas de modulación digital de orden superior para la utilización del canal y el análisis se lleva a cabo con SNR como el parámetro de referencia. Este análisis de rendimiento cede a la técnica de modulación adaptativa que se puede usar para lograr una alta eficiencia espectral al modular la señal en esquemas de modulación de orden superior basados en la información de estado del canal (CSI) del receptor. Por lo tanto, se logra la eficiencia espectral que es el objetivo principal del documento propuesto.
- 2) Band, Dorle, & Dorle, (2016) realiza el análisis de rendimiento BER del sistema WIMAX utilizando la técnica de modulación de paquetes wavelet. Este documento investiga, la simulación de IEEE802.16 en el software Matlab utilizando la modulación de paquetes wavelet en WIMAX. Los resultados muestran que el rendimiento de BER del sistema de WPM es mejor que OFDM que usa un prefijo cíclico y, en consecuencia, tiene una SNR más alta. El estudio se simula a través de un canal AWGN y un canal de Rayleigh selectivo de frecuencia. El rendimiento de BER de diferentes familias de Wavelets se traza para las condiciones de este canal.
- 3) Sadinov, (2017) realiza el estudio de simulación de técnicas de modulación M-ARY QAM utilizando Matlab/Simulink. En este trabajo, se propone un modelo de simulación para estudiar diversas



técnicas de modulación M-ary QAM. El modelo de simulación se implementa en el entorno Matlab/Simulink y junto con el modelo también se utiliza BERTool. Se realiza la simulación para las técnicas de modulación 64-QAM y 256-QAM. Se examina el efecto del ruido de fase en el diagrama de la constelación para ambas M-QAM. También se estudia el impacto de cambiar la potencia de la señal de entrada, el ruido de fase y el desplazamiento de frecuencia en el rendimiento de tasa de errores de bit (BER) de 64-QAM y 256-QAM. Los resultados de la simulación en términos del diagrama de la constelación y la curva BER en diversas condiciones se presentan y analizan.

### **1.3. Definición del Problema.**

Necesidad de realizar pruebas mediante simulación en Matlab que permita el análisis de la tasa de error de bits (BER) empleando esquemas de modulación para sistemas de banda ancha inalámbrica.

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

El desarrollo de escenarios de simulación va a permitir realizar el análisis de la tasa de error de bits (BER) utilizando diferentes modulaciones para sistemas de banda ancha inalámbrica.

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

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

Analizar la tasa de error de bits (BER) utilizando diferentes modulaciones para sistemas de banda ancha inalámbrica utilizando el software de simulación Matlab.

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

- Describir la fundamentación teórica del canal de comunicación inalámbrica.
- Explorar los diferentes esquemas de modulación utilizados en sistemas de banda ancha inalámbrica.

- Implementar algoritmos de los esquemas de modulación escogidos utilizando Matlab.
- Evaluar los resultados obtenidos de BER y SNR con diferentes esquemas de modulación.

### **1.6. Hipótesis.**

Mediante el análisis de la BER se comprobará que tipo de modulación escogido es el apropiado en sistemas de banda ancha.

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

Una de las claves vitales para cualquier trabajo de titulación es la investigación y el análisis de los pasos que se implementan. Estos pasos deben ser apropiados para probar hipótesis o preguntas de la investigación y también para facilitar la capacidad de acceso del diseño general de la investigación, como la recopilación de datos y el análisis de datos. La investigación es un arte ayudado por las habilidades de investigación, diseño experimental, recopilación de datos, medición y análisis, por interpretación y por presentación. Una habilidad adicional, que se puede adquirir y desarrollar, es la creatividad o la invención.

## CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1. Canal de comunicación inalámbrico.

El rendimiento de los sistemas inalámbricos depende de las condiciones del canal. Debido a la naturaleza desprotegida del canal inalámbrico, los efectos de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) y de interferencia entre símbolos (ISI) están presentes en la onda de radio transmitida. Además, como se muestra en la figura 2.1, debido a las leyes físicas de la teoría de ondas electromagnéticas, la propagación de ondas de radio debido a obstáculos artificiales (edificios y carreteras en áreas urbanas) y obstáculos naturales (árboles y montañas en áreas rurales), reflexión, difracción y dispersión como la dispersión. La señal recibida de esta manera es mucho más débil de lo que se envió.

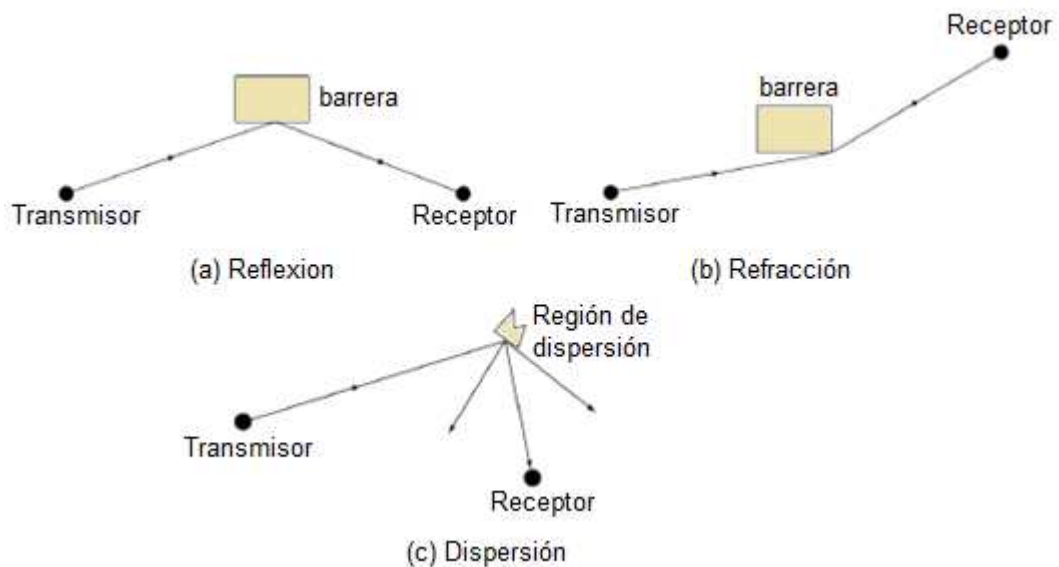


Figura 2. 1:Influencia de la propagación de ondas electromagnéticas debido a obstáculos en el entorno  
Elaborado por: Autor.

La onda electromagnética reflejada, cuando se compara con la longitud de onda, se refleja en la dimensión física muy grande ( $d \gg \lambda$ ) si choca con un obstáculo como la superficie del suelo o los edificios en él. Sin embargo, cuando la trayectoria de radio entre el receptor y el transmisor se corta por puntas agudas desiguales y aberturas cortas, se produce la difracción. En este caso, se observa que la guía de ondas electromagnética se dobla

alrededor del pequeño obstáculo en el entorno o la guía de ondas se expande al pasar a través de las pequeñas aberturas.

Incluso si no hay línea de visión directa, el enlace entre el receptor y el transmisor se proporciona debido a las ondas secundarias que surgen de la difracción. Además, la propagación de ondas electromagnéticas se conoce como dispersión divergente (Babu y Rao, 2011) debido a uno o más obstáculos en un tamaño menor ( $d < \lambda$ ) en comparación con las longitudes de onda tales como hojas, farolas y postes de luz.

### **2.2.1. Características del canal**

La característica básica del canal de comunicación inalámbrico es el efecto de desvanecimiento. La atenuación y las oscilaciones que se ven como el resultado de repeticiones de señal debido a obstáculos en el entorno que llegan al receptor en diferentes amplitudes y fases desde diferentes direcciones en diferentes momentos se denominan desvanecimiento.

La potencia instantánea de la señal debido al desvanecimiento cambia aleatoriamente al considerar el tiempo, la frecuencia y la ubicación geográfica. El fuerte efecto de interferencia en la dirección destructiva que ocurre cuando la repetición de la señal que causa el desvanecimiento llega al receptor de una manera que se debilita entre sí dependiendo de las condiciones del canal se denomina desvanecimiento profundo. En el caso del desvanecimiento profundo, se observan interrupciones en la comunicación (Tse y Viswanath, 2005; Goldsmith, 2005).

En la fuente del desvanecimiento, existen factores destructivos como la pérdida de trayectoria, sombreado (shading) y la propagación multitrayecto. Debido a la pérdida de trayectoria en los sistemas inalámbricos, la intensidad de la señal disminuye según la longitud de la ruta entre la fuente y el destino. Cuando la intensidad de la señal recibida cae por debajo de un cierto nivel de umbral, el receptor no podrá resolver la señal transmitida. Sin embargo, si

la señal se bloquea debido al obstáculo en el entorno, la intensidad de la señal recibida se reduce significativamente.

Esto se llama sombreado. Además, la repetición de la señal transmitida se produce al multiplicar los obstáculos en el medio y la repetición de señal resultante de la superficie del suelo se denomina propagación por trayectos múltiples. La superposición de las repeticiones de señal que llegan al receptor conduce a un desplazamiento de fase por interferencia constructiva y destructiva en la señal recibida (Rappaport, 2002; Pätzold, 2002).

El efecto de pérdida de trayectoria y sombreado en sistemas de comunicación inalámbrica se evalúa como desvanecimiento a gran escala y el efecto de la propagación multitrayecto se considera como desvanecimiento a pequeña escala. Tanto la amortiguación a gran escala (larga distancia) como a pequeña escala (corta distancia) se observan en la propagación de ondas de radio en una gran área geográfica, como se muestra en la Figura 1.2 (Goldsmith, 2005).

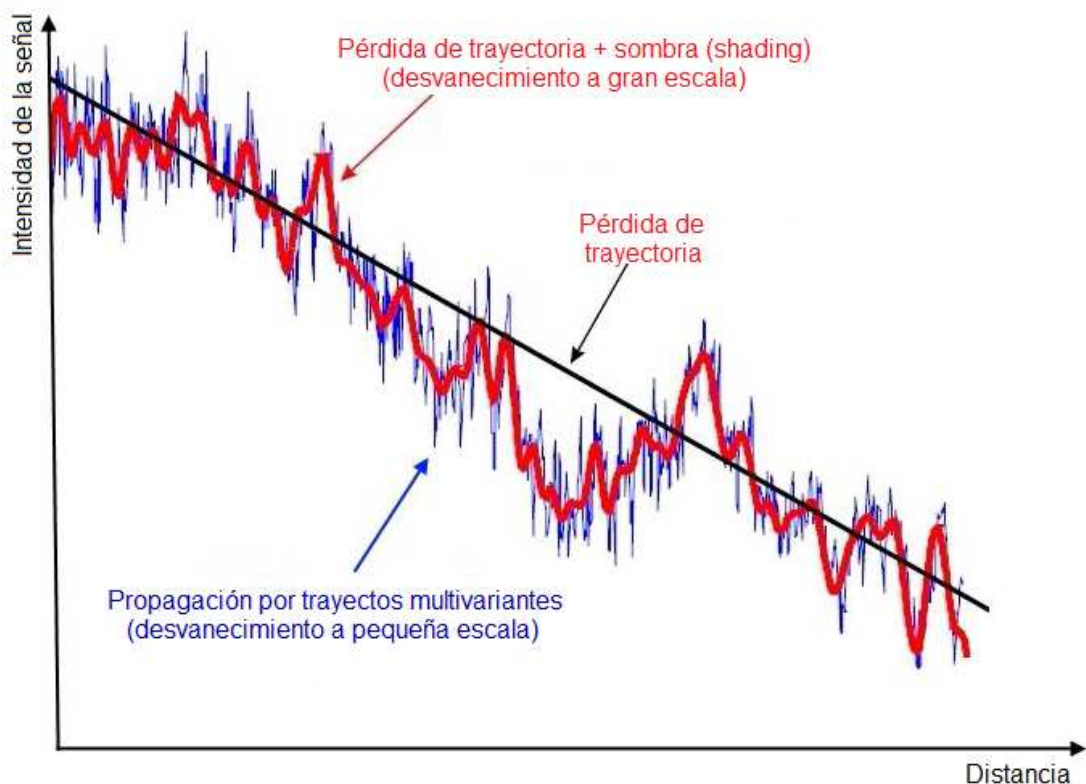


Figura 2. 2:Cambio aleatorio de la potencia de la señal en el canal inalámbrico debido a desvanecimientos.

Fuente:(Martínez Arlandis, 2017)

La estimación de la propagación de ondas de radio es un problema muy difícil porque el desvanecimiento cambia aleatoriamente a lo largo del tiempo en el canal. Debido a que las características del canal no se pueden conocer de antemano para muchos sistemas de comunicación en la práctica, el intercambio de la potencia de la señal al receptor generalmente se considera como un proceso aleatorio (Wen, 2011).

### **2.2.2. Modelos de canales inalámbricos.**

En los sistemas inalámbricos, la propagación de la onda electromagnética en el canal y, por lo tanto, la intensidad de la señal recibida cambia constantemente debido a los obstáculos en el entorno. Dependiendo de la señal transmitida, es posible determinar la señal recibida solo si el modelo de canal se conoce con precisión. Se han desarrollado diferentes modelos de canales para determinar el efecto del desvanecimiento en la propagación de la señal.

En sistemas inalámbricos, la propagación de ondas de radio generalmente se examina utilizando modelos de canales de Rayleigh y Rician. Los modelos de canal Rayleigh y Rician son válidos para sistemas de banda plana (banda estrecha) y no tienen el efecto de desplazamiento Doppler debido al movimiento de los obstáculos en el transmisor, receptor y/o entorno.

Cuando la componente de señal directa de la onda de radio transmitida en el canal de desvanecimiento de Rayleigh está completamente bloqueada por el obstáculo en el entorno, un gran número de componentes multitrayectos llegan al receptor con amplitudes débiles. En el caso del canal de Rayleigh, los coeficientes de ganancia se modelan como  $h = a + bi$ . Donde  $a$  y  $b$  son variables gaussianas aleatorias independientes e idénticamente distribuidas,  $a, b \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ . La función de densidad de probabilidad (*Probability Density Function, PDF*) y la función de distribución acumulada (*Cumulative Distribution Function, CDF*) son expresiones para  $r = |h| = \sqrt{a^2 + b^2}$ , respectivamente

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (r \geq 0)$$

Y

$$F_r(r) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

Aquí,  $2\sigma^2$  denota la potencia promedio de las señales multitrayecto recibidas. Del mismo modo, la expresión PDF para la intensidad de la señal recibida  $r^2 = |h|^2$  es,

$$f_{r^2}(r^2) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (r \geq 0)$$

Para Du & Swamy, (2010), y Shankar, (2012) utilizando el modelo de canal de desvanecimiento de Rayleigh, se puede examinar el efecto de la comunicación sobre la troposfera/ionosfera y la propagación de ondas de radio en áreas urbanas (Wen, 2011).

La intensidad de la señal recibida se expresa estadísticamente usando la distribución de Rician, mientras que el Rician recibe un pequeño número de componentes multitrayecto débiles junto con la componente de señal directa fuerte de la onda de radio transmitida en el canal de desvanecimiento. En el caso del canal de Rician, los coeficientes de ganancia se modelan como  $h = (a + \tau) + bi$ . Donde  $\tau$  denota el valor máximo de la amplitud de la señal directa. La amplitud de señal recibida  $r = |h|\sqrt{(a + \tau)^2 + b^2}$  Para expresiones PDF,

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{(r^2 + \tau^2)}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{r\tau}{\sigma^2}\right) \quad (r \geq 0)$$

Donde  $\tau^2$  es la potencia de la señal directa,  $2\sigma^2$  es la potencia promedio de las señales multitrayecto recibidas, y

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-xcos\theta} d\theta$$

muestra la función de Bessel modificada en el grado cero.

### 2.2.3. Capacidad del canal inalámbrico.

En los sistemas inalámbricos, el criterio de capacidad del canal se utiliza a menudo para medir la calidad de la conexión. La relación entrada-salida para el canal AWGN en el modelo de sistema de entrada única y salida única (*Single Input – Single Output, SISO*),

$$y = \sqrt{P}x + z$$

Donde P es la potencia de la señal, x es la entrada del canal, y es la salida del canal, z es la media cero, y  $\sigma^2$  es el término de ruido Gaussiano blanco aditivo complejo con varianzas. En la teoría de la información desarrollada por Shannon (1948), el concepto de capacidad se explica como el límite superior de la cantidad de información que se puede transmitir sin errores en el canal. La capacidad del canal AWGN está determinada por Shannon,

$$C = B \log_2(1 + \bar{\gamma})$$

Donde B es el ancho de banda del canal  $\bar{\gamma} = P/\sigma^2$  es el valor de relación señal/ruido (*Signal Noise Ratio, SNR*). La capacidad del canal de Shannon es el límite superior teórico, que es difícil de lograr en la práctica.

Las medidas de eficiencia espectral y eficiencia energética también se pueden utilizar para medir la calidad de la conexión en sistemas inalámbricos. La eficiencia espectral de la tasa de error de bit (BER) en unidades de ancho de banda por unidad de tiempo indica el número total de bits que pueden ser enviadas a través del canal.

La eficiencia energética, por otro lado, es la energía requerida para transmitir el número de bits determinado por la BER y el ancho de banda dado a través del canal (Ullah y Priantoro, 2009). Con el límite de Shannon, la eficiencia espectral es,

$$\Psi = \frac{C}{B} = \log_2(1 + \bar{\gamma})$$



La eficiencia espectral, como se ve a partir de la expresión encontrada, es la velocidad de datos por ancho de banda. El valor promedio de SNR debe aumentarse para incrementar la eficiencia espectral. De esta forma, se puede lograr un aumento de capacidad independientemente del ancho de banda. Al medir el rendimiento en sistemas inalámbricos, la eficiencia espectral y los conceptos de capacidad a menudo se superponen (Pérez-Neira y Campalans, 2009).

En el caso de un canal de desvanecimiento, la capacidad depende de la presencia de información de estado de canal en el transmisor y/o el receptor. Si tanto el receptor como el transmisor tienen información de estado del canal, se produce una pequeña pérdida en la capacidad del canal debido a la falta de desvanecimiento, y la señal transmitida solo se ve afectada por el ruido.

Por otro lado, si el receptor tiene información de estado del canal, pero no transmisor, la señal transmitida se ve afectada tanto por el ruido como por el desvanecimiento. Especialmente cuando se produce un desvanecimiento profundo, la señal recibida se interrumpe y la capacidad del canal disminuye considerablemente. La relación entrada-salida para el canal de desvanecimiento plano es,

$$y = \sqrt{P}hx + z$$

Donde  $h$  es el coeficiente de ganancia de canal aleatorio.  $E[|h|^2] = 1$ , la capacidad del canal de desvanecimiento,

$$C = E[B \log_2(1 + |h|^2 \bar{\gamma})] = B \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma$$

Aquí  $\gamma = |h|^2 \bar{\gamma}$  muestra la representación en PDF de la SNR recibida. Esta capacidad también se denomina capacidad ergódica si es igual al valor promedio de la capacidad del canal AWGN (Choudhury y Gibson, 2007). Utilizando la expresión de capacidad del canal encontrado, la eficiencia espectral para el canal de desvanecimiento es,

$$\Psi = E[\log_2(1 + |h|^2 \bar{\gamma})] = \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma$$

#### 2.2.4. Parámetros del canal inalámbrico.

Al caracterizar el canal de comunicación inalámbrica, los parámetros del canal tales como el tiempo de coherencia, la dispersión Doppler, la dispersión del retardo y el ancho de banda de coherencia se utilizan a menudo para determinar el efecto del desvanecimiento. Con estos parámetros, la respuesta de pulso se utiliza para determinar las características del canal en diferentes condiciones. Cada parámetro en la dimensión de tiempo tiene una contraparte en la dimensión de frecuencia. Usando la transformada de Fourier, se puede detectar la dependencia de frecuencia de las características del canal.

El tiempo de adaptación ( $T_C$ ) especifica el intervalo de tiempo durante el cual las características del canal, es decir, la respuesta del impulso, permanecen sin cambios. Si la duración del símbolo de la señal transmitida es menor que el tiempo armónico del canal, la señal puede transmitirse en el canal sin distorsión. La propagación Doppler ( $B_D$ ) es el rango de frecuencia en el que la frecuencia de la señal transmitida es diferente de cero y es una medida de la rapidez con que cambia la respuesta del impulso del canal. La dispersión Doppler y el tiempo de adaptación del canal varían en proporción inversa,  $T_C \approx 1/B_D$ .

Las repeticiones de señal debidas al obstáculo en el entorno llegan al receptor en diferentes momentos, cubriendo diferentes distancias de las diferentes rutas. La diferencia de tiempo entre el componente multitrayecto que llega más temprano (generalmente la señal directa) y el último componente multitrayecto que llega se llama propagación de retardo ( $\sigma_C$ ). La dispersión de retardo proporciona información sobre la cantidad de componentes de múltiples rutas en el canal inalámbrico.

El ancho de banda adaptativo ( $B_C$ ) es el rango de frecuencia a través del cual todas las componentes de frecuencia de la señal transmitida se pasan a través del canal con la misma ganancia y desplazamiento de fase (es decir, las características del canal permanecen iguales). El ancho de banda de adaptación y la dispersión de retardo varían inversamente,  $B_C \approx 1/\sigma_C$ .

### 2.2.5. Clasificación de canales inalámbricos.

Dependiendo de la relación entre los parámetros de señal y canal, se produce en las características de desvanecimiento de las diferentes características de los sistemas de comunicación inalámbrica. Cuando se examina el efecto del desvanecimiento en los sistemas inalámbricos, la clasificación generalmente se hace considerando la tasa de cambio del canal y la selectividad de frecuencia a lo largo del tiempo. Además, si los obstáculos en el transmisor, receptor y/o medio se están moviendo, las características del canal cambian. La comunicación inalámbrica se clasifica en el canal, de acuerdo con su tipo de desvanecimiento, en varias características que se muestran en la figura 2.3.

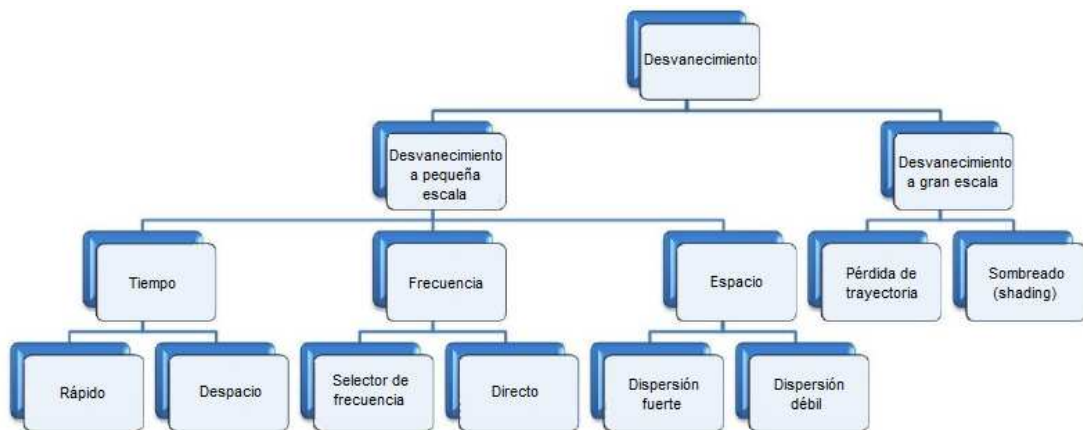


Figura 2. 3: Clasificación de las características del canal inalámbrico según el efecto de desvanecimiento.

Elaborado por: Autor.

Al examinar la tasa de cambio de amplitud y fase de la señal transmitida con respecto al tiempo, se decide que el canal debe ser de desvanecimiento rápido o lento. El tiempo de ajuste y los parámetros de propagación Doppler se utilizan para determinar la tasa de cambio de canal.

Para un canal de desvanecimiento lento, la duración del símbolo es más corta que el tiempo de adaptación del canal ( $T_S \ll T_C$ ) y el ancho de banda de la señal es mayor que la dispersión Doppler ( $B_S \gg B_D$ ).

Sin embargo, para un canal de desvanecimiento rápido, la duración del símbolo es más larga que el tiempo de adaptación del canal ( $T_S > T_C$ ) y el ancho de banda de la señal es menor que el margen Doppler ( $B_S < B_D$ ). La dispersión Doppler aumenta cuando aumenta la velocidad de movimiento de los obstáculos en el transmisor, receptor y/o entorno. En este caso, el tiempo de adaptación del canal se acorta y el canal cambia más rápidamente. Las características del canal de desvanecimiento lento y rápido se muestran en la figura 2.4, teniendo en cuenta la duración del símbolo y los parámetros del tiempo de adaptación del canal.

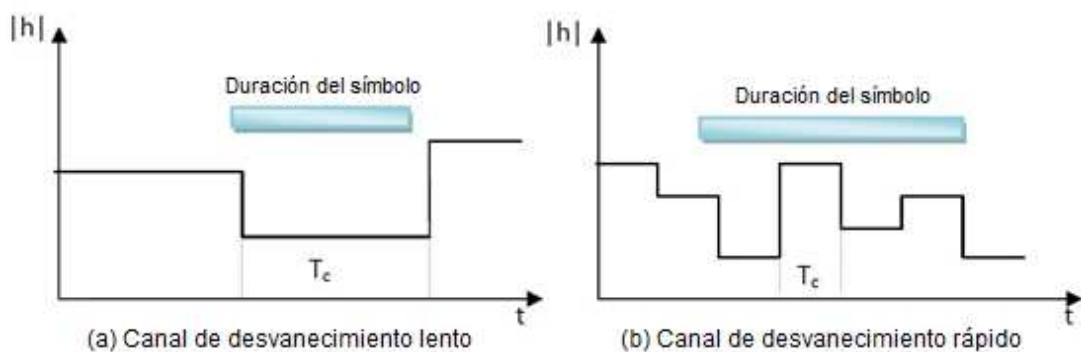


Figura 2. 4:Características del canal de desvanecimiento lento y rápido.

Fuente: (Wen, 2011)

Al examinar la amplitud y la fase de la señal transmitida con respecto a la frecuencia, se decide que el canal sea un desvanecimiento directo o selectivo de frecuencia. Los parámetros adaptativos de ancho de banda y propagación de retardo se utilizan para determinar la dependencia de la frecuencia del canal.

En el caso de un canal de desvanecimiento directo (no selectivo de frecuencia) en el que se preserva la característica de frecuencia de señal, el ancho de banda de señal es menor que el ancho de banda de adaptación de canal ( $B_S \ll B_C$ ) y la duración del símbolo es mayor que la dispersión de retardo de canal ( $T_S \gg \sigma_C$ ). Las propiedades del canal de desvanecimiento

directo se ven en los sistemas de banda estrecha y todas las componentes espectrales de la señal transmitida se ven afectadas de la misma manera en el canal.

Sin embargo, en el caso del canal selectivo de frecuencia, las componentes espectrales de la señal transmitida se distorsionan en el canal debido a diferentes ganancias de amplitud y cambios de fase. Para el desvanecimiento selectivo de frecuencia, el ancho de banda de la señal es mayor que el ancho de banda adaptativo ( $B_s > B_c$ ) y la duración del símbolo es más corta que la dispersión de retardo ( $T_s < \sigma_c$ ).

El desvanecimiento selectivo de frecuencia se observa en los sistemas de banda ancha y la señal recibida contiene una gran cantidad de repeticiones de la señal transmitida. El efecto de desvanecimiento en el canal inalámbrico de acuerdo con los parámetros de señal y canal se muestran en la figura 2.5.

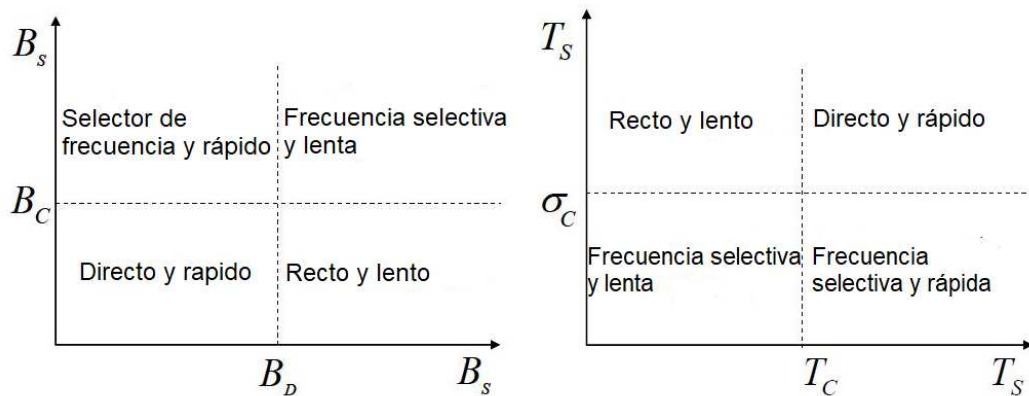


Figura 2. 5: Clasificación según los parámetros de señal y del canal de desvanecimiento.

Elaborado por: Autor.

### 2.2.6. Técnicas de variación.

El problema más importante que afecta negativamente al rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbricos es el efecto perturbador sobre la señal recibida del desvanecimiento a pequeña escala causada por la propagación multitrayecto como se mencionó anteriormente. Las técnicas de diversidad se utilizan para eliminar el desvanecimiento del centro.

En técnicas variadas, se pretende que múltiples repeticiones de la señal transmitida sean entregadas al receptor desde trayectorias de desvanecimientos independientes. Se pueden crear rutas de variación usando las dimensiones de tiempo, frecuencia y espacio del canal inalámbrico. Cuando aumenta el número de trayectos de diversidad de desvanecimiento independientes, la BER disminuye a medida que aumenta la calidad de la señal recibida (Tse y Viswanath, 2005).

En el dominio del tiempo, la señal se envía en diferentes momentos con intervalos más grandes que el tiempo de adaptación del canal. La codificación y el entrelazado se usan para esto. Por medio de estos métodos, la información se codifica primero y luego los símbolos codificados se distribuyen en diferentes períodos de adaptación con amortiguación independiente en el eje del tiempo.

Dado que la misma señal se envía en más de un intervalo de tiempo, la velocidad de transferencia de datos se reduce en el dominio del tiempo. También causa una dispersión retrasada. La diversidad de tiempo no se puede aplicar en sistemas donde el tiempo de adaptación del canal es demasiado largo y/o el retardo es sensible (Tse & Viswanath, 2005; Lozano & Jindal, 2010).

En el dominio de la frecuencia, la señal se envía desde diferentes canales separados por un intervalo mayor que el ancho de banda de adaptación del canal. El número de rutas de diversidad de desvanecimiento independientes está limitado por el ancho de banda del sistema. De esta manera, se necesita más potencia de transmisión, ya que las señales se envían a través de portadoras (Carriers) de diferentes frecuencias en múltiples bandas de frecuencia. La diversidad de frecuencia se puede usar fácilmente en el caso de un canal selectivo de frecuencia. Por otro lado, la diversidad de frecuencia en el canal de desvanecimiento directo no da el resultado esperado (Goldsmith, 2005; Tse y Viswanath, 2005).

Se crean trayectos de desvanecimiento independientes en diferentes espacios en la diversidad de antenas utilizando múltiples antenas en el transmisor (Tx) y/o en el receptor (Rx). Para que estas rutas sean independientes entre sí, debe dejarse un espacio de media onda ( $\lambda/2$ ) entre los elementos de la antena en función de la frecuencia de la portadora.

La diversidad de la antena se realiza de dos maneras diferentes, como se muestra en la figura 2.6, como la diversidad del receptor y la diversidad del transmisor. En un sistema de múltiples entradas y salida única (MISO) que utiliza múltiples antenas en el transmisor, la misma señal se codifica con la ayuda de la diversidad del transmisor (codificación del tiempo espacial) y se transmite a través de múltiples antenas en diferentes momentos. En sistemas de entrada única, salida múltiple (SIMO) donde se usan múltiples antenas en el receptor, la misma señal se capta en múltiples antenas con la ayuda de la diversidad del receptor.



Figura 2. 6:Uso de la diversidad del transmisor/receptor en los sistemas MISO/SIMO

Fuente:(Bravo, Trujillo C., & Barrera C., 2014)

Las señales de los trayectos de diversidad de desvanecimiento independientes en la diversidad del receptor se amplifican mediante técnicas de combinación lineal, como se muestra en la figura 2.7. Para la combinación lineal, generalmente se prefieren las técnicas de combinación de selección (*Select Combining, SC*) y combinación de relación máxima (*Maximum Ratio Combining, MRC*).

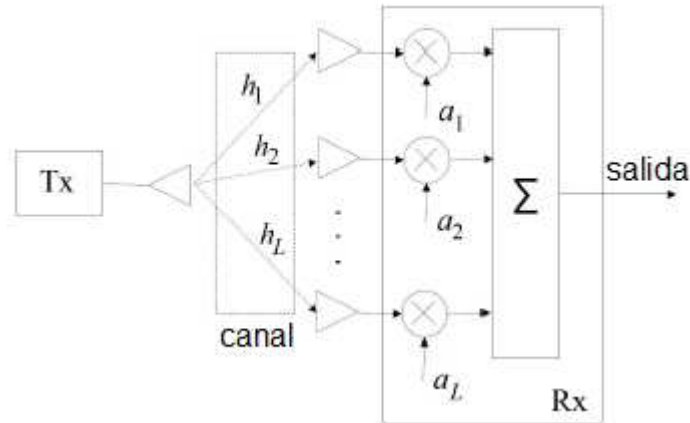


Figura 2. 7: La diversidad del receptor es también la combinación de las señales de los caminos de desvanecimientos independientes  
Fuente: (Bravo et al., 2014)

### 2.3. Sistemas de múltiples entradas y salidas múltiples (MIMO).

Si se usan múltiples antenas en ambos extremos del enlace inalámbrico para crear una diversidad de antena, entonces la diversidad del transmisor y del receptor se realiza al mismo tiempo. De esta forma, las repeticiones de señales de desvanecimiento independientes se envían y reciben juntas para aumentar la ganancia de diversidad. En el modelo de sistema de entrada múltiple, salida múltiple (MIMO) que se muestra en la figura 2.8, se utiliza la dimensión espacial del canal inalámbrico, así como las dimensiones de tiempo y frecuencia como en el modelo de sistema SISO.

El rendimiento de los sistemas inalámbricos se mejora utilizando dos mecanismos diferentes: diversidad espacial y multiplexación espacial. Cuando se usa la técnica de diversidad espacial, la fiabilidad del enlace aumenta y, por lo tanto, la BER se reduce. Sin embargo, cuando se utiliza la técnica de multiplexación espacial, la capacidad del canal aumenta sin cambiar el ancho de banda y la potencia de transmisión existentes (Paulraj et al., 2003).



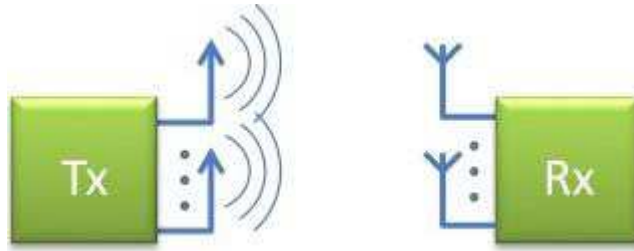


Figura 2. 8: Modelo de sistema de múltiples entradas y salidas múltiples (MIMO)  
 Fuente: (Castillo S., Sánchez G., Parra M., Flores T., & Fernández T., 2016)

En la técnica de multiplexación espacial, la comunicación se separa entre sí por canales paralelos. De forma similar, toda la secuencia de datos se divide en flujos de subdatos, y cada flujo de datos se envía desde un subcanal diferente (es decir, un subcanal diferente) en el transmisor (Shin & Lee, 2003). Cada antena en el receptor tiene una firma espacial diferente en el receptor.

Si el receptor tiene suficiente potencia de procesamiento de señal, los algoritmos de supresión de interferencia pueden separar y recuperar flujos de datos independientes enviados a través de diferentes subcanales. En la técnica de multiplexación espacial, el número de flujos de datos es igual al número mínimo de antenas en el receptor y el transmisor.

Si hay información de estado del canal en ambos extremos de la conexión inalámbrica, la capacidad del canal aumenta en términos del número de flujos de datos secundarios en comparación con el modelo del sistema SISO (Bölcskei et al., 2006). Los estudios teóricos sobre el aumento de la capacidad del canal mediante el uso de antenas múltiples fueron iniciados por Winters (1987) y luego los cálculos necesarios fueron realizados por Foschini y Gans (1998) y Telatar (1999). Un ejemplo del trabajo para aumentar la capacidad del canal con multiplexación espacial se utiliza el esquema o técnica de espacio-tiempo en capas de Bell Labs (Bell Labs ILayered Space-Time, BLAST).

En la técnica de diversidad espacial, cada par de antenas en el receptor y el transmisor forma una conexión independiente entre ellas. La cantidad de trayectorias de señal de desvanecimiento independientes,

llamada grado de diversidad, es igual a la cantidad de números de antena en el receptor y el transmisor. A medida que aumenta la cantidad de antenas, se producirán más conexiones y aumentará el nivel de diversidad. Cuando se usa la diversidad espacial, se reduce la BER observada en la señal recibida en la relación señal/ruido constante, se mejora la fiabilidad del enlace y se extiende la distancia de comunicación.

Además, la BER deseada se logra con un valor de SNR más bajo, lo que resulta en ahorros de energía. Por ejemplo, el plan Alamouti, los códigos de trama espacio-tiempo y los códigos ortogonales de bloques espacio-tiempo. Cuando está equipado con múltiples antenas de transmisión de la información de estado de canal no está disponible, la estrategia óptima con la ayuda de diversidad de transmisores de espacio-tiempo de codificación (Space Time Coding, STC) se codifica utilizando el diversificador de estrategias. Cuando la información del estado del canal no está disponible, la mejora del rendimiento se puede lograr mediante técnicas de adaptación como el plan de temporización, el control de potencia y la formación del haz (Lozano & Jindal, 2010).

En el modelo de sistema MISO de capa única, las antenas direccionales se crean aplicando diferentes pesos a los elementos del conjunto de antenas en el transmisor con la técnica de formación de haces. De esta forma, la intensidad de la señal se maximiza en el receptor dirigiendo las ondas de radio en la dirección deseada.

Por otro lado, en el modelo de sistema MIMO, la intensidad de la señal se puede maximizar a través de las antenas receptoras mediante la aplicación de precodificación en la conformación del haz de múltiples capas. En los sistemas inalámbricos, es posible ampliar el área de cobertura y reducir el consumo de energía en la transmisión de datos mediante la aplicación de una técnica de formación de haces.

En los sistemas MIMO, las ganancias de diversidad y multiplicación no se pueden maximizar al mismo tiempo. Existe una compensación entre los beneficios de la diversificación y la multiplicación (Zheng & Tse, 2003). En

este sentido, aunque se prefiere la diversidad de enlaces espaciales en aplicaciones que requieren una alta fiabilidad de enlace, las técnicas de multiplexación espacial se utilizan en aplicaciones que requieren altas tasas de transferencia de datos (Lozano & Jindal, 2010).

Por ejemplo, si la calidad de señal deseada no se proporciona en las redes de sensores inalámbricos, la fiabilidad del enlace se reduce y los paquetes transmitidos no se pueden recibir con éxito. En el caso de una transmisión de paquetes fallida, el consumo de energía de los nodos del sensor aumenta. La transferencia de paquetes se puede realizar con mayor potencia de transmisión para aumentar la calidad de la señal de los paquetes transmitidos.

En este caso, sin embargo, el consumo de energía aumentará y la vida útil de la red se acortará. Como resultado, el uso de técnicas de diversidad espacial para entregar paquetes exitosos con bajo consumo de energía es más importante para las redes de sensores inalámbricos.

#### **2.4. Sistemas de comunicación celular.**

En términos de estructura arquitectónica, las redes inalámbricas se examinan en dos clases diferentes, redes celulares y ad-hoc. En lugar de la transmisión de radio de alta potencia en una amplia área geográfica de las redes celulares, se crean células macro y microescala y se realiza una transmisión de radio de baja potencia con la ayuda de estaciones base ubicadas dentro de cada célula. Los usuarios se comunican con la estación base de dos formas diferentes, independientemente de su ubicación física (móvil) o ubicación fija.

La estación base sirve como un relé para que los usuarios de la celda se conecten entre sí y al mismo tiempo administren los recursos del sistema centralmente. En redes ad-hoc, los usuarios se comunican directamente entre sí sin ninguna infraestructura. Dado que cada usuario realiza sus propias funciones de gestión, los recursos del sistema se gestionan de forma distribuida. Las redes celulares tienen la ventaja de realizar una gestión de

recursos eficiente porque la topología de red permanece constante a pesar de la necesidad de una infraestructura constante.

Un sistema de comunicación celular típico se muestra en la figura 2.9. Aquí, la comunicación bidireccional se lleva a cabo desde dos canales diferentes, desde el enlace descendente de la estación base hasta el usuario y el enlace ascendente desde los usuarios hasta la estación base.

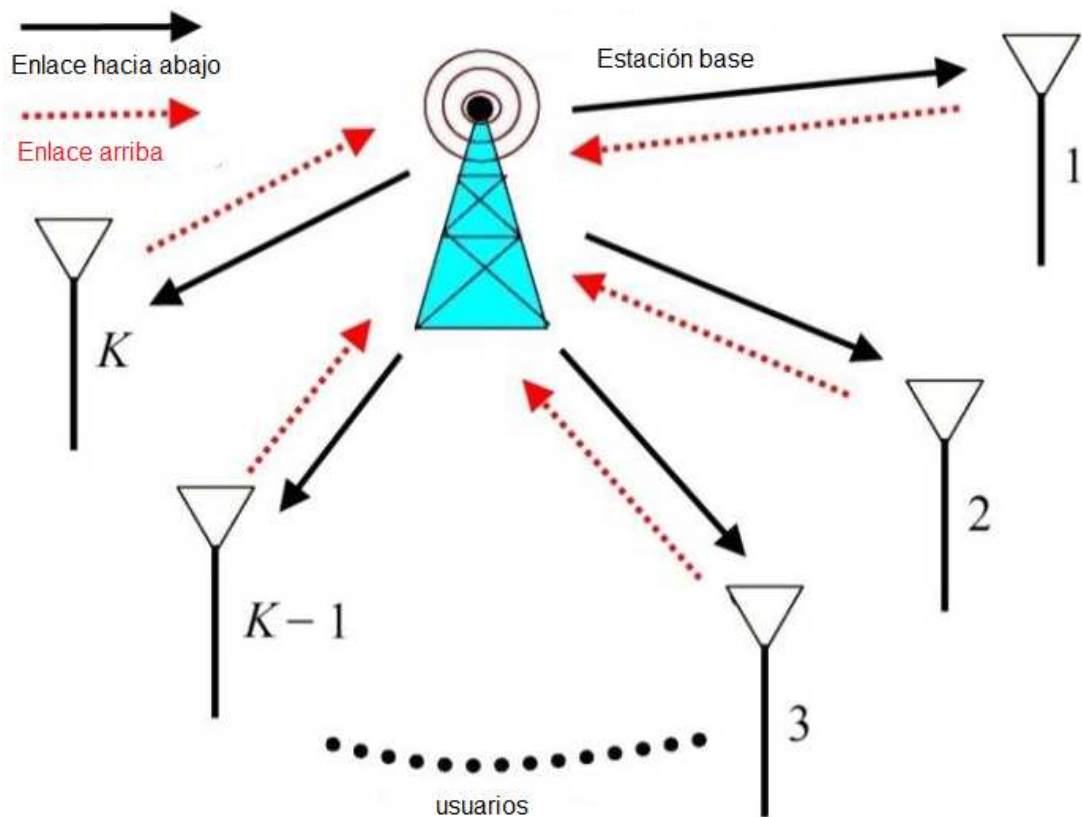


Figura 2. 9: Una arquitectura típica del sistema de comunicación celular  
Elaborado por: Autor.

El enlace descendente sirve como un canal de difusión para el flujo de información desde la estación base a los usuarios. Sin embargo, el enlace ascendente se usa como un canal de acceso múltiple para el flujo de información de los usuarios a la estación base.

#### 2.4.1. Técnicas de acceso múltiple.

En las redes celulares, el intercambio del canal de comunicación entre usuarios se lleva a cabo mediante técnicas de acceso múltiple. Las técnicas de acceso múltiple permiten que las señales de diferentes usuarios se combinen en bloques de forma que no se superpongan entre sí y se envíen

a través del canal. Se crean canales independientes para que los usuarios no puedan interferir entre sí. Para el intercambio de recursos en los sistemas de comunicación celular, se usan técnicas de acceso múltiple con tiempo, frecuencia, código y división del espacio, tal como se muestra en la figura 2.10.

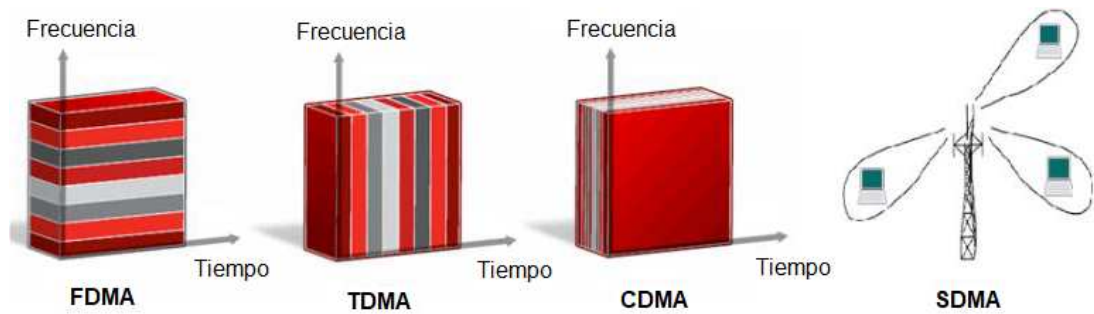


Figura 2. 10: Intercambio de canales con técnicas FDMA, TDMA, CDMA y SDMA.  
Fuente: (Flores Espinoza & Guzmán Robles, 2009)

En la técnica de acceso múltiple por división de tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*), cada usuario usa todo el ancho de banda solo en su propio intervalo de tiempo. Para la técnica de acceso múltiple por división de frecuencia (*Frequency Division Multiple Access, FDMA*), a cada usuario se le asigna su propia frecuencia de portadora y ancho de banda. Mientras, que para la técnica de acceso múltiple por división de código (*Code Division Multiple Access, CDMA*), los usuarios comparten la banda de frecuencia completa de forma continua entre ellos mientras están separados unos de otros por códigos únicos. Como el receptor conoce los códigos de todos los usuarios, obtiene la información original decodificando el código relacionado de la señal enviada.

Finalmente, la técnica de acceso múltiple por división espacial (*Space Division Multiple Access, SDMA*), se colocan antenas direccionales en la estación base para permitir que los usuarios se separen entre sí en diferentes espacios y para comunicarse con la estación base simultáneamente. En este caso, dado que el ancho de banda del sistema se comparte entre usuarios a través de diferentes antenas, la eficacia espectral aumenta significativamente en comparación con las técnicas TDMA y FDMA.

El número de haces que puede generar la técnica SDMA está limitado por la cantidad de antenas en el transmisor. Sin embargo, para utilizar la técnica SDMA, el estado del canal de todos los usuarios debe ser conocido por la estación base. En las redes celulares, el intercambio de recursos entre los usuarios y la realización de comunicación bidireccional entre los usuarios y la estación base revelan otro problema de intercambio de recursos.

La compartición del canal de comunicación entre los canales de enlace descendente y de enlace ascendente se proporciona mediante técnicas de duplexación. En la técnica de multiplexación por división de frecuencia (*Frequency Division Duplexing, FDD*), todo el ancho de banda se divide en dos partes para formar dos bandas de frecuencia diferentes. Uno de ellos es dúplex completo usando uno para el canal de enlace descendente y el otro para el canal de enlace ascendente. En la técnica de multiplexación por división de tiempo (TDD), cada intervalo de tiempo formado usando TDMA se divide en dos partes en sí mismo. Uno de ellos se usa para el canal de enlace descendente y el otro para el canal de enlace ascendente, de modo que se obtiene la semi-duplexación. El intercambio descendente y el enlace ascendente del canal inalámbrico usando técnicas FDD y TDD se muestran gráficamente en la figura 2.11.

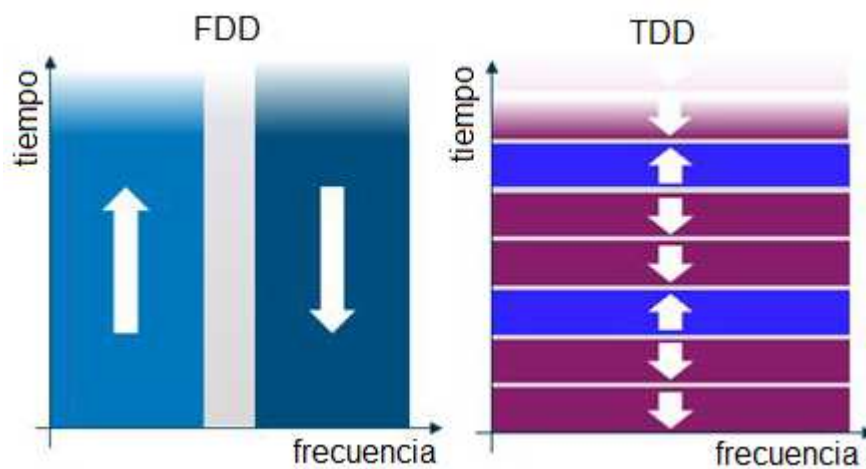


Figura 2. 11:Compartición entre canales de enlace ascendente y descendente con técnicas de duplexación FDD y TDD.

Fuente: (C. Chan et al., 2006)

### **2.4.2. Plan de temporización.**

En las redes celulares, la técnica TDMA generalmente se usa para compartir el canal de acceso múltiple entre los usuarios y la estación base. Cuando se usa la técnica TDMA, cada usuario se comunica con la estación base en un período de tiempo cuando otro usuario abandona la sesión sin estar expuesto a la sesión. En la técnica TDMA, los accesos a los canales de los usuarios se organizan con la ayuda de un esquema de programación.

Cuando se utiliza un esquema de planificación, el intercambio eficiente de los recursos limitados del sistema entre los usuarios en la dimensión temporal resulta naturalmente en un problema de optimización. Por otro lado, cuando se utilizan técnicas FDMA y CDMA, no se necesita ninguna temporización porque todos los usuarios pueden usar canales en el mismo marco de tiempo.

Generalmente, los criterios de calidad del servicio, como aumentar la capacidad del canal, reducir el consumo de energía, reducir la latencia y garantizar la equidad entre los usuarios, se toman en cuenta al crear un plan de temporización que determina cuándo se permitirá a los usuarios acceder al canal (Shin y Lee, 2003). El algoritmo más simple en el diseño del plan de temporización es aplicar el tiempo de turno rotativo, que permite a los usuarios acceder a los canales secuencialmente.

En el esquema TDMA estático obtenido con la ayuda de la sincronización cíclica, se garantiza la máxima equidad ya que el acceso al canal es permitido periódicamente por los usuarios. Sin embargo, dado que las condiciones del canal de los usuarios no se consideran en el acceso al canal, el aumento de la eficiencia espectral no puede realizarse en el plan de temporización cíclica.

Para obtener un plan de temporización que sea ventajoso en términos de eficiencia espectral, todos los usuarios de la red deben supervisar las condiciones del canal al instante y dar prioridad a los usuarios con buenas condiciones de canal en consecuencia.

#### **2.4.2.1. Diversidad multiusuario**

En las arquitecturas de redes celulares, las distribuciones de ganancia del canal son diferentes cuando las posiciones de los usuarios se comparan con la estación base. Además, las condiciones del canal de los usuarios cambian aleatoriamente debido al desvanecimiento. Por lo tanto, en algún momento, algunos usuarios tienen malas condiciones de canal y sus conexiones se interrumpen, mientras que algunos niveles de señal se acercan al valor máximo.

Este efecto, que es causado por el hecho de que las condiciones del canal de los usuarios son diferentes entre sí dependiendo de la hora y la posición, se llama diversidad multiusuario. La diversidad de usuarios múltiples se aplicó por primera vez al canal de enlace ascendente por Knopp y Humblet (1995) para servir al usuario con las mejores condiciones de canal, luego Tse (1997) obtuvo resultados similares mediante el canal de enlace descendente.

En lugar de aumentar la confiabilidad de las conexiones mediante la creación de repeticiones de señales de desvanecimiento independientes como en las técnicas de diversidad clásicas, está dirigido a aumentar la capacidad del canal al aprovechar la diversidad de las condiciones del canal de los usuarios con diversidad multiusuario. La ganancia de diversidad multiusuario depende de la distribución del desvanecimiento en el canal. Si la distribución estadística del atenuador es más estrecha en las condiciones del canal de desvanecimiento de Rician con una línea de visión directa entre el receptor y el transmisor, la ganancia de diversidad del usuario que se puede lograr es menor que el canal de desvanecimiento de Rayleigh.

#### **2.4.2.2. Configuración oportunista.**

El efecto de desvanecimiento en el canal tiene requisitos previos críticos para lograr una ganancia de diversidad multiusuario explotando la diferencia en las condiciones del canal de los usuarios. A medida que aumenta la velocidad de cambio del canal de desvanecimiento, se amplía el



rango de oscilación de las señales recibidas por los usuarios, aumentando así la ganancia de la diversidad de muchos usuarios.

Por otro lado, en condiciones de canal AWGN con desvanecimiento lento o sin desvanecimiento, las oscilaciones de señal son limitadas, por lo que no hay variación entre los usuarios. En este caso, especialmente dado que ciertos usuarios cercanos a la estación base tendrán mejores condiciones de canal que otros, se producen tiempos de retardo prolongados en el acceso al canal de usuarios con malas condiciones de canal.

Para aprovechar la diversidad multiusuario en el caso del canal de desvanecimiento lento, la técnica de conformación oportunista (aleatoria) se utiliza para aprovechar la diversidad de usuarios múltiples. La expansión de la gama de ganancias instantáneas de ganancias de los usuarios con la ayuda de una configuración oportunista se muestra gráficamente en la figura 2.12.

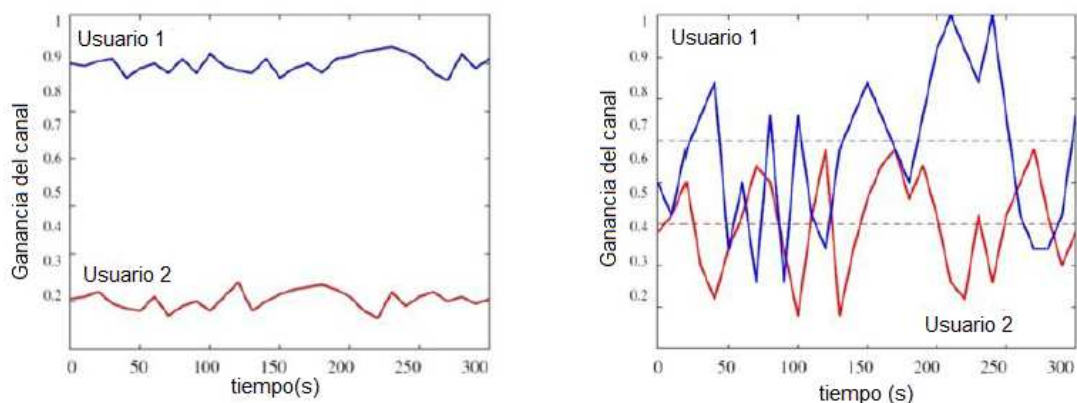


Figura 2. 12: Ondulaciones artificiales en el canal con la ayuda de la configuración oportunista

Fuente: (Flores Espinoza & Guzmán Robles, 2009)

Para beneficiarse de la técnica de configuración oportunista de haces, se colocan múltiples antenas en la estación base y la operación de formación de haces se realiza asignando pesos aleatorios a la señal transmitida cada vez independientemente de las condiciones del canal de los usuarios. Las fluctuaciones artificiales se crean en el canal al cambiar aleatoriamente el vector de conformación del haz que contiene los coeficientes de ponderación en cada intervalo de tiempo. Por lo tanto, el canal de desvanecimiento lento se transforma en el canal de

desvanecimiento rápido, lo que permite el acceso al canal para diferentes usuarios.

La capacidad del canal que se puede obtener con la diversidad multiusuario es la función de la cantidad de usuarios. Cuando aumenta el número de usuarios en el sistema, aumenta la probabilidad de encontrar un usuario cuyo estado de canal esté cerca del valor máximo en cualquier momento, de modo que la ganancia de la diversidad del usuario aumenta.

Alcanzar el rendimiento real de formación de haces de las condiciones del canal de los usuarios conocidos por la estación base mediante la aplicación de formación de haces oportunista depende de la presencia de un usuario cuyo estado de canal coincida con el vector de formación de haces seleccionado en todo momento. En este sentido, el aumento del rendimiento aplicando la configuración oportunista depende de la disponibilidad de suficientes usuarios en el sistema.

#### **2.4.2.3. Plan de sincronización oportunista.**

En los sistemas de comunicación inalámbricos basados en la transmisión de paquetes de transmisión de datos, se da ventaja en términos de eficacia espectral cuando se proporciona la programación mediante el uso de la técnica TDMA al usuario con mejores condiciones de canal en cada zona horaria. Cuando se crea este tipo de esquema de planificación oportunista, la capacidad del canal aumenta de acuerdo con el calendario alternativo.

La organización de los accesos de canal para los usuarios con la ayuda de esquemas de temporización recursivos y oportunistas se ilustra gráficamente en la figura 2.13. 1xEVDO, HSDPA y WiMAX se benefician de un esquema de sincronización oportunista para mejorar la calidad del servicio enfocado en la eficiencia espectral en los sistemas de comunicación de próxima generación.

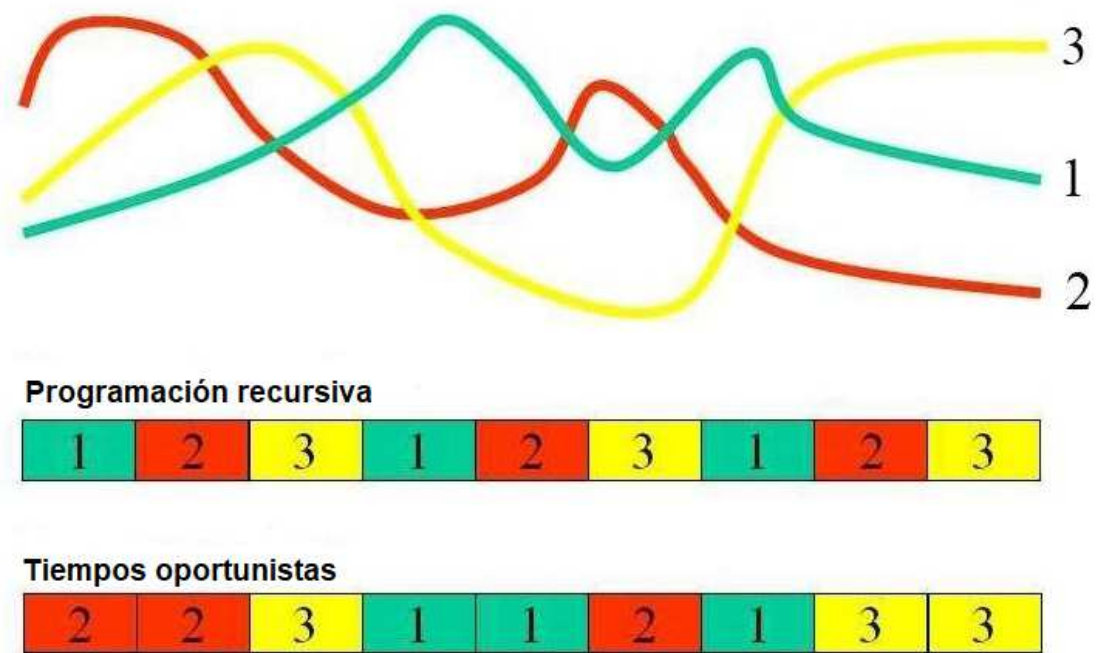


Figura 2. 13: Implementación de la técnica TDMA con la ayuda de planes de tiempo recurrentes y oportunistas  
Fuente: (ITU, 2018)

Para implementar un esquema de sincronización oportunista en redes inalámbricas, los usuarios primero deben conocer el estado de sus canales. Con el fin de determinar las condiciones del canal de los usuarios, las señales piloto se transmiten periódicamente por la estación base en el canal de enlace descendente. La calidad de la señal la miden los usuarios en la señal piloto de difusión para determinar las ganancias de canal instantáneas que se denominan información de estado de canal.

En los sistemas que utilizan la técnica TDD, la estación base puede establecer un esquema de temporización en el canal de enlace ascendente usando información de estado de canal obtenida para el enlace descendente de acuerdo con el principio de oposición de canal. En los últimos años se han llevado a cabo una serie de estudios sobre la creación de un plan de tiempo oportunista.

En redes inalámbricas, los esquemas de sincronización oportunistas se pueden crear de dos maneras diferentes, tales como centralizados y dispersos. En la sincronización de planificación oportunista central, los

estados de los canales de los usuarios activos son monitoreados continuamente por un planificador que se ejecuta en la estación base.

Para que esto suceda, los usuarios envían información de estado del canal a la estación base a través del enlace ascendente. La estación base da prioridad al usuario con las mejores condiciones de canal en todo momento. Con este esquema de tiempo perfecto creado de esta manera, la máxima ganancia se obtiene de la misma diversidad de usuarios.

El esquema de planificación central puede aplicarse tanto a los canales de enlace descendente como a los de enlace ascendente. Si se aplica un esquema de temporización oportunista en el canal de enlace descendente, la estación base envía paquetes al usuario con la mejor ganancia de canal. Si se aplica un esquema de temporización oportunista en el canal de enlace ascendente, la identidad transmitida por la estación base envía el paquete a la estación base.

En aplicaciones donde el número de usuarios es muy grande y/o el canal cambia demasiado rápido, el esquema de sincronización central no proporciona el rendimiento esperado debido a la carga de retroalimentación excesiva y los largos tiempos de demora. La planificación o configuración oportunista distribuida utiliza CSI descentralizada para los usuarios. De esta forma, las decisiones de entrega de paquetes las toman los propios usuarios, independientemente de la autoridad central. Cada usuario en el sistema conoce su estado de canal, pero no el estado del canal de otros usuarios.

Para crear un esquema de sincronización oportunista desordenado, generalmente se envía un paquete de nivel de umbral. Los usuarios deciden enviar paquetes comparando la información del estado de la canal obtenida a través de la señal de la señal piloto emitida en el canal de enlace descendente con el nivel de umbral predeterminado.

La necesidad de retroalimentación periódica proporciona una ventaja significativa en un esquema de configuración oportunista desorganizado. El

problema más importante que surge al crear un plan de temporización sin autoridad central de esta manera es el evento de colisión que ocurre como resultado de la transmisión simultánea de paquetes de múltiples usuarios.

Los paquetes enviados en caso de una colisión no se pueden tomar con éxito debido al efecto de interferencia entre ellos. Se han llevado a cabo varios estudios en la bibliografía para obtener la capacidad de recepción de paquetes múltiples para el receptor utilizando técnicas avanzadas de procesamiento de señales. Sin embargo, el número de aplicaciones para las cuales la estación base tiene la capacidad de procesamiento de señal y un tiempo de procesamiento suficiente para ejecutar estos complejos algoritmos es muy limitado.

En este sentido, la optimización del nivel de umbral es un problema importante para maximizar la probabilidad de una transmisión de paquetes exitosa cuando se está creando un esquema de temporización oportunista disperso.

## CAPÍTULO 3: SIMULACION Y RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.1. Comunicación simbólica.

Existen procesos de modulación de la frecuencia, de amplitud o de fase de la señal portadora con código de datos numéricos en la base de la comunicación simbólica. Con este proceso de modulación, los códigos de datos digitales que consisten en “0” y “1” se convierten en señales analógicas y el canal se mueve a la frecuencia alta apropiada. El beneficio de la comunicación simbólica es que en lugar de mover bits uno por uno, es posible cargar múltiples secuencias de bits en símbolos de acuerdo con una determinada regla para encajar en más bandas de transmisión y por lo tanto realizar flujos de datos masivos como multimedia fácilmente con un error mínimo.

La comunicación simbólica inalámbrica comenzó con el nacimiento de la humanidad. Por ejemplo, en el pasado, las personas usaban algunas herramientas como fuego, humo y banderas para comunicarse de forma inalámbrica entre sí. La forma de comunicación hecha con estas herramientas también se puede considerar comunicación simbólica. En los dispositivos de comunicación digital de telefonía móvil (2G, 3G y 4G), la comunicación simbólica (convertida a símbolos de datos y dada al canal de comunicación) se usa en gran sentido. Estas generaciones de comunicación desarrolladas desde el nacimiento de la humanidad hasta la actualidad se muestran en la figura 3.1.

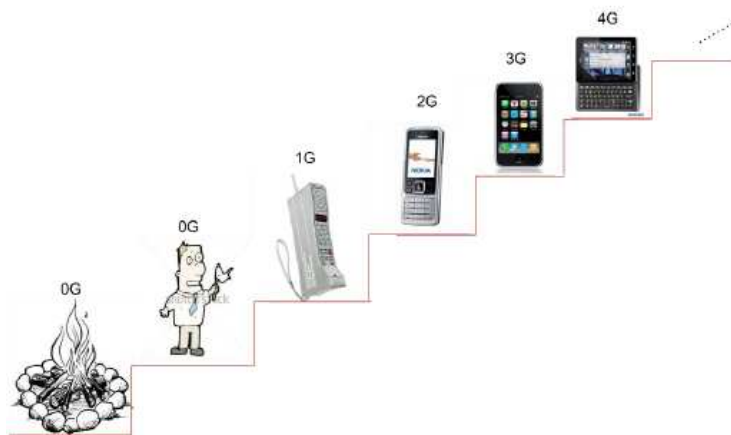


Figura 3. 1: Evolución cronológica de los géneros de comunicación  
Elaborado por: Autor.

Los años de desarrollo, la velocidad y las tecnologías utilizadas para estas generaciones se resumen en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Comparación de las tecnologías 2G, 3G y 4G.

<b>Fecha</b>	<b>Generación</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Utilizado Tecnología</b>	<b>Velocidad</b>
Hasta 2000	2G	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Telefonía</li> <li>• Mensajes</li> <li>• SMS</li> </ul>	AMPS GSM	10 kbps
2001-2002	2.5G	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banca de viajeros</li> <li>• Correo de voz, web</li> <li>• Navegador con reproductor de sonido</li> <li>• Publicación de periódico digital</li> <li>• Distribución de audio digital</li> <li>• Radio de viajero</li> <li>• Servicios basados en la ubicación, mapas interactivos de la ciudad</li> </ul>	GPRS BORDE	64-144 kbps
2003 – 2009	3G	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navegador con videoconferencia</li> <li>• Video teléfono/mensaje</li> <li>• Navegador TV</li> <li>• Guía de la ciudad</li> <li>• Distribución de audio/video digital</li> </ul>	UMTS	144 kbps – 2 Mbps
2009-	4G	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene todas las facilidades proporcionadas por 2G, 2.5G y 3G a velocidades más altas</li> <li>• Soporte de comunicación instantánea</li> <li>• Televisión de alta definición</li> </ul>	LTE	100 Mbps- 1 Gbps

Elaborado por: Autor.

### 3.2. Transmisión de banda de transición.

Las señales de mensaje generadas por la fuente se expresan como señales de banda base. La próxima vez que el transportista module estas señales, se denominan señales de paso de banda. El ancho de banda de estas señales es usualmente más pequeño que el ancho de banda del operador. Las señales de la banda de transición se expresan de tres maneras, estos son: representaciones de envolvente de amplitud y fase, cuadratura o real/virtual y compleja.

Las señales sinusoidales se usan como portadoras en el proceso de modulación. Una señal sinusoidal tiene tres variables. estos son: amplitud, fase y frecuencia. La transmisión de la banda de transición usando estas variables se divide en tres grupos principales, estos son las modulaciones:

1. por desplazamiento de amplitud (*Amplitude Shift Keying, ASK*).
2. por desplazamiento de frecuencia (*Frequency Shift Keying, FSK*).
3. por desplazamiento de fase (*Phase Shift Keying, PSK*).

#### 3.2.1. Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK).

En la modulación por desplazamiento de amplitud, la frecuencia y la fase de la portadora se mantienen constantes y la amplitud se cambia por conmutación. Los cambios de amplitud se indican utilizando los bits "1" y "0". Esta conmutación también se conoce como manipulación encendido-apagado (*Keying On – Off, OOK*).

#### 3.2.2. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).

En este tipo de conmutación, la frecuencia de portadora se cambia y se da la conmutación. Nuevamente, se puede dar un binario usando los bits "0" y "1". Si cualquier señal sinusoidal con frecuencia  $f_1$  es "1" bit y la señal con frecuencia  $f_2$  es "0" bit, entonces la modulación FSK puede expresarse como:

$$FSK(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_1 t), & 1 \\ \sin(2\pi f_2 t), & 0 \end{cases} \quad (1)$$



### 3.2.3. Modulación por desplazamiento de fase (PSK).

La conmutación se realiza cambiando la fase de la portadora y manteniendo constante la amplitud y la frecuencia. Usando de nuevo los bits “0”y “1”, la señal de portadora puede conmutarse desplazando la fase 180°.

$$PSK(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft), & 1 \\ \sin(2\pi ft + \pi), & 0 \end{cases} \quad (2)$$

En la figura 3.2, la banda base es una secuencia de códigos, y en la figura 3.3 se intenta mostrar cómo cambia la señal portadora usando la modulación por desplazamiento de amplitud, frecuencia y fase usando esta secuencia de códigos. Las líneas punteadas en la figura representan la señal de la banda base y las líneas continuas representan la señal de portadora.

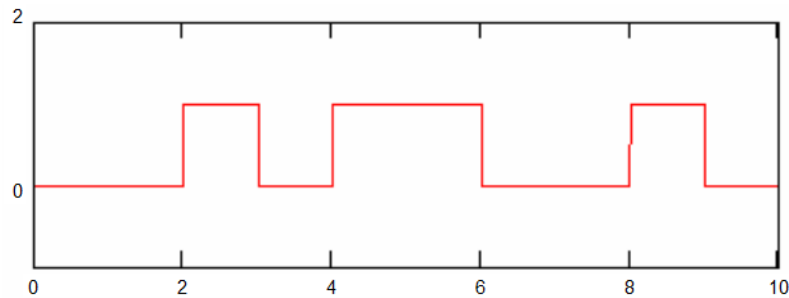


Figura 3. 2: Una secuencia de código de banda base con el código 0010110010.  
Elaborado por: Autor.

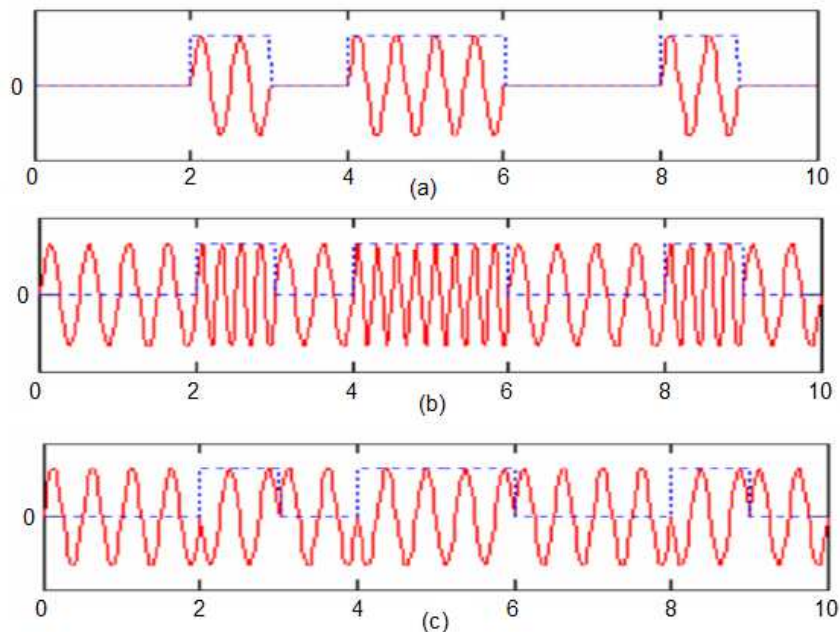


Figura 3. 3: Representación gráfica de las modulaciones por desplazamiento de (a) amplitud, (b) frecuencia, y (c) fase.  
Elaborado por: Autor.

### 3.2.4. Modulación PSK binaria (BPSK).

Como se mencionó anteriormente, la conmutación realizada mediante el uso de los bits "0" y "1" de los cambios se denomina modulación por desplazamiento de fase binaria (*Binary Phase Shift Keying, BPSK*). En BPSK, solo se puede cargar un bit por símbolo. Sin embargo, en sistemas de comunicación, es deseable cargar tantos bits como sea posible en cada símbolo. El sistema BPSK se muestra en la figura 3.4.

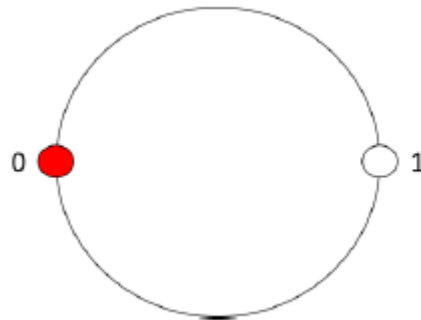


Figura 3. 4: Sistema BPSK básico.  
Elaborado por: Autor.

### 3.2.5. Modulación PSK cuaternaria (QPSK).

Los sistemas de modulación por desplazamiento de fase cuaternaria (*Quadrature Phase Shift Keying, QPSK*) se pueden considerar como sistemas BPSK. Hay cuatro situaciones diferentes en este cambio. Cada símbolo puede representar dos bits. Como QPSK es un sistema bidimensional, proporciona el doble de velocidad para el usuario. Este sistema se puede mostrar en la figura 3.5.

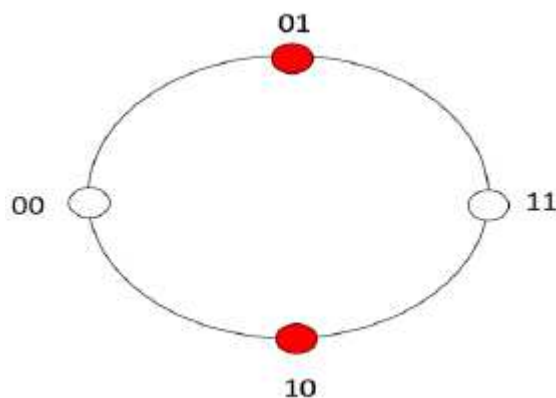


Figura 3. 5: Sistema 8PSK usando ocho símbolos diferentes.  
Elaborado por: Autor.

Como resultado, un sistema con modulación M-PSK se puede expresar matemáticamente como,

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi i}{M}\right) \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

donde,  $\sqrt{\frac{2E_s}{T}}$ , es una amplitud constante;  $2\pi f_c t$ , es la componente de ángulo variable en el tiempo; y  $\frac{2\pi i}{M}$ , es el ángulo variable que cambia dependiendo del mensaje. La ecuación anterior está más claramente expresada,

$$\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B \quad (4)$$

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi i}{M} + \frac{\pi}{4}\right)$$

se puede expresar como,

$$= \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \left[ \cos\left(\frac{2\pi i}{M} + \frac{\pi}{4}\right) \cos(2\pi f_c t) - \sin\left(\frac{2\pi i}{M} + \frac{\pi}{4}\right) \sin(2\pi f_c t) \right] \quad (5)$$

En la ecuación 5, la fase se toma como un ángulo inicial de  $45^\circ$ . Se obtienen cuatro señales de banda base para el valor de 0. Anteriormente, se ha expresado el uso de señales cosenoidales y sinusoidales, que son perpendiculares entre sí en función de la base. Estas señales son:

$$\phi_1(t) = \cos \omega_c t \quad (6)$$

$$\phi_2(t) = \sin \omega_c t \quad (7)$$

Usando estas funciones base, se obtienen dos canales perpendiculares entre sí, como I y Q,

$$I = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos(2\pi f_c t) \quad (8)$$

$$Q = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \sin(2\pi f_c t) \quad (9)$$

Si estos canales se multiplican por las componentes de ángulo en la ecuación (3), los valores finales I y Q se definen como:

$$I = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos(2\pi f_c t) \left( \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) \cos\left(\frac{5\pi}{4}\right) \cos\left(\frac{7\pi}{4}\right) \right) \quad (10)$$

$$Q = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \sin(2\pi f_c t) \left( \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) \sin\left(\frac{5\pi}{4}\right) \sin\left(\frac{7\pi}{4}\right) \right) \quad (11)$$

En la ecuación (3) los valores de 0, 1, 2 y 3 de  $i$  se calculan respectivamente en la expresión  $\frac{2\pi i}{M}$ . También se toma  $M = 4$  porque se considera la modulación QPSK. Finalmente, la ecuación de modulación se puede escribir en términos más generales como en la ecuación (12).

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos(\theta(t)) \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \sin(\theta(t)) \sin(2\pi f_c t) \quad (12)$$

La ecuación (12) también es cuadrática de la ecuación de modulación al mismo tiempo. Como se puede ver en la ecuación, la amplitud de la señal ya no es un número fijo sino una variable que cambia de fase. Las señales en la ecuación de modulación, es decir las componentes I y Q, también se pueden definir como dos componentes vectoriales en las direcciones  $x$  y  $y$ .

La modulación QPSK utiliza 4 símbolos de 2 bits cada uno. Las ecuaciones descritas anteriormente se resumen en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Visualización de símbolos según el ángulo de fase en la modulación QPSK.

Símbolo	Bits	S(t)	Ángulo de fase	I	Q
S1	00	$\sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right)$	45°	1	1
S2	01	$\sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right)$	135°	-1	1
S3	11	$\sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{5\pi}{4}\right)$	225°	-1	-1
S4	10	$\sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{7\pi}{4}\right)$	315°	1	-1

Elaborado por: Autor.

El cambio de fase se realizó en la tabla 3.2 iniciando el ángulo de fase de  $45^\circ$  y cambiándolo por  $90^\circ$ . Los valores I y Q se calculan tomando los siguientes valores,

$$\sqrt{\frac{2E_s}{T}} = \sqrt{2} \text{ y } f_c = 0$$

A continuación, la modulación QPSK se muestra en diagramas de bloques de las figuras 3.6 y 3.7. Por ejemplo, en la figura 3.7 se muestra una modulación en coordenadas polares, y la figura 3.8 se muestra una modulación en cuadratura que utilizan los componentes I y Q.

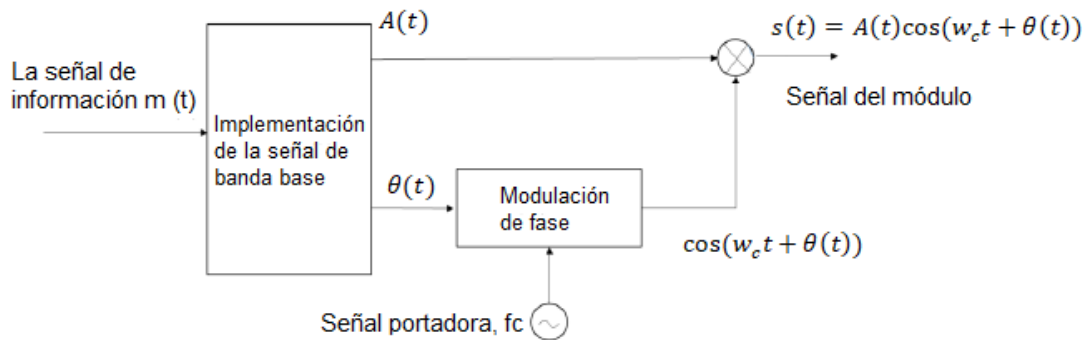


Figura 3. 6: Visualización de la modulación QPSK en forma polar.  
Elaborado por: Autor.

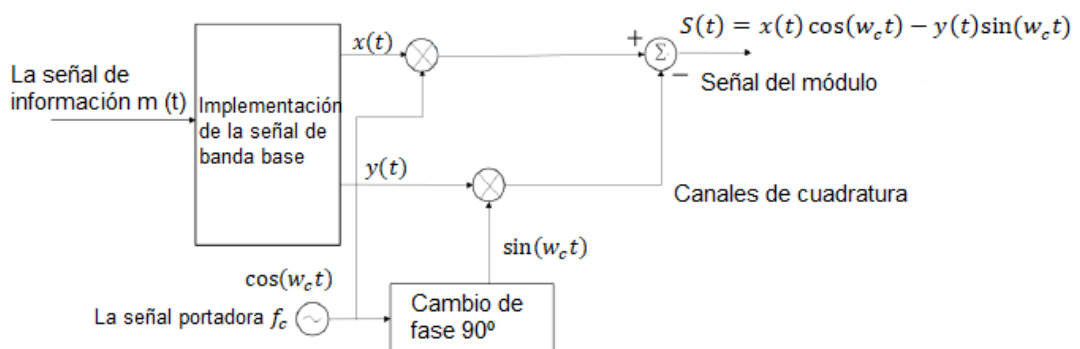


Figura 3. 7: Visualización de la modulación QPSK utilizando los canales I y Q.  
Elaborado por: Autor.

La modulación PSK ya se ha mencionado anteriormente, incluidos QPSK, 8-PSK y 16-PSK. Pero después de la modulación 16-PSK este aumento se ha detenido. No se prefieren los sistemas como 32-PSK y 64-PSK, debido a que permiten el envío de más bits con un símbolo. Esto se debe a que la probabilidad de BER aumenta significativamente en 16-PSK y

sistemas posteriores. Esta es una situación indeseable en los sistemas de comunicación. Por lo tanto, se han desarrollado sistemas de modulación de amplitud en cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation, QAM*) que combinan amplitud y desplazamiento de fase para crear un sistema más robusto y una BER más baja.

### 3.2.6. Modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

QAM es un tipo de modulación en la cual la amplitud, la fase y la modulación por desplazamiento de frecuencia no pueden satisfacer las necesidades de los sistemas de comunicación actuales. En este tipo de modulación, tanto la modulación de desplazamiento de amplitud, la modulación de amplitud de portadora y la modulación de desplazamiento de fase son utilizados para modificar la fase de la onda portadora.

Como se muestra en la figura 3.8, estos sistemas se denominan cuadratura porque la ubicación de los bits en los sistemas QAM suele ser cuadrada. Al igual que en otros tipos de conmutación, QAM tiene 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM.

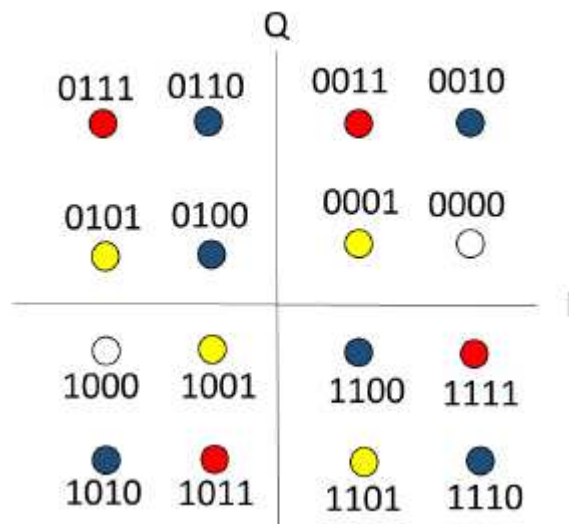


Figura 3. 8: Sistema 16-QAM con amplitud y cambio de fase en conjunto  
Elaborado por: Autor.

### 3.3. Desarrollo de simulación.

El objetivo principal en los sistemas de comunicación digital es entregar la información de la fuente al usuario con un error mínimo. Al diseñar

cualquier sistema por este motivo, este error se realiza teniendo en cuenta la probabilidad. Esta probabilidad se define como la probabilidad de error de bit (BER) o la tasa de error de símbolo (SER) en los sistemas de comunicación.

En diferentes publicaciones recientes, se han realizado cálculos de BER para diferentes técnicas de modulación. Un estudio exhaustivo de análisis de error que involucra una gran parte de estos estudios se ha llevado a cabo nuevamente mediante la simulación de sistemas que utilizan diferentes técnicas de modulación. Los gráficos de los resultados obtenidos después de la ejecución de la simulación son trazados para respectiva comparación.

### 3.4. Estudio de simulación 1.

En primer lugar, para la modulación BPSK, 4PSK, 8PSK y 16PSK, se obtiene la variación BER de acuerdo con la relación señal/ruido (*Signal-Noise Ratio, SNR*) del canal AWGN, tal como se muestra en la figura 3.9. Como puede verse, la relación de BER disminuye para todos los tipos de PSK a medida que la relación de SNR aumenta tanto para la teoría como para el estado de simulación.

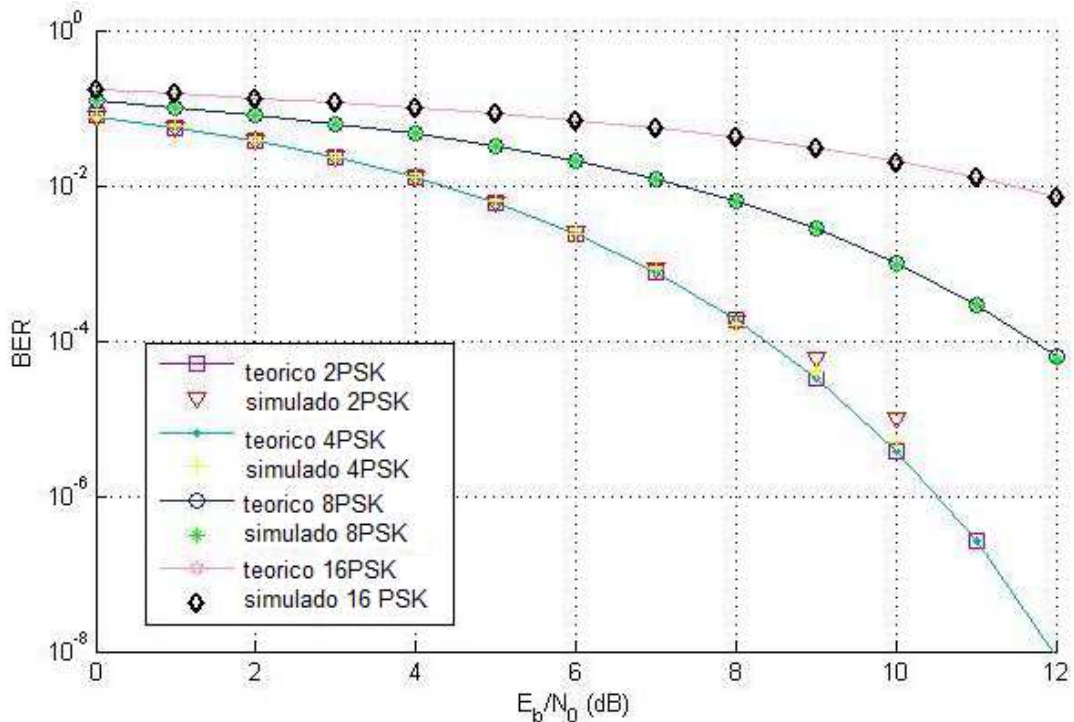


Figura 3. 9: Probabilidad BER-SNR para MPSK  
Elaborado por: Autor.

También se observa que a medida que aumenta el número de bits  $M$  al enviar en un símbolo con la misma SNR, el valor de BER también aumenta. La razón para esto es que la cantidad de símbolos aumenta en el espacio de la señal, los símbolos en el círculo unitario en el diagrama de fases se aproximan entre sí. En tales sistemas, se produce un mayor error de estimación durante la percepción de los datos.

Como resultado de estudios de simulación relacionados con PSK, se ha señalado como única desventaja, que el sistema tiene una ventaja en términos de capacidad de canal al aumentar el número de bits cargados en cada símbolo en la modulación PSK al tiempo que aumenta el valor de BER. En este estudio (véase la figura 3.9), los resultados teóricos y de simulación para las modulaciones BPSK y 4PSK muestran valores de BER muy cercanos.

En la figura 3.9 se muestra que hay un aumento significativo en los valores BER cuando se cambian más fases de señal (es decir, aumenta el número de bits cargados en el símbolo), donde la variación BER está muy cerca de los valores SNR de hasta 4-PSK. Por lo tanto, si el proceso de transmisión de datos es importante, la cantidad de datos mucho más allá de la tasa de error en ese momento, pueden preferirse a sistemas tales como 8-PSK, 16-PSK y 32-PSK, pero si los datos transmitidos son de alta calidad, es decir sin distorsión, no debe exceder 4PSK si es necesario.

La figura 3.10 muestra las relaciones BER-SNR para los valores  $M=2$ ,  $M=4$ ,  $M=8$ ,  $M=16$ ,  $M=32$  para modulación M-FSK en un canal AWGN con una demodulación coherente. Aquí nuevamente se ve que la relación BER disminuye a pesar del aumento de la relación SNR. Sin embargo, a diferencia de otras técnicas de modulación, el número  $M$  se incrementa en la misma SNR pero la BER disminuye.



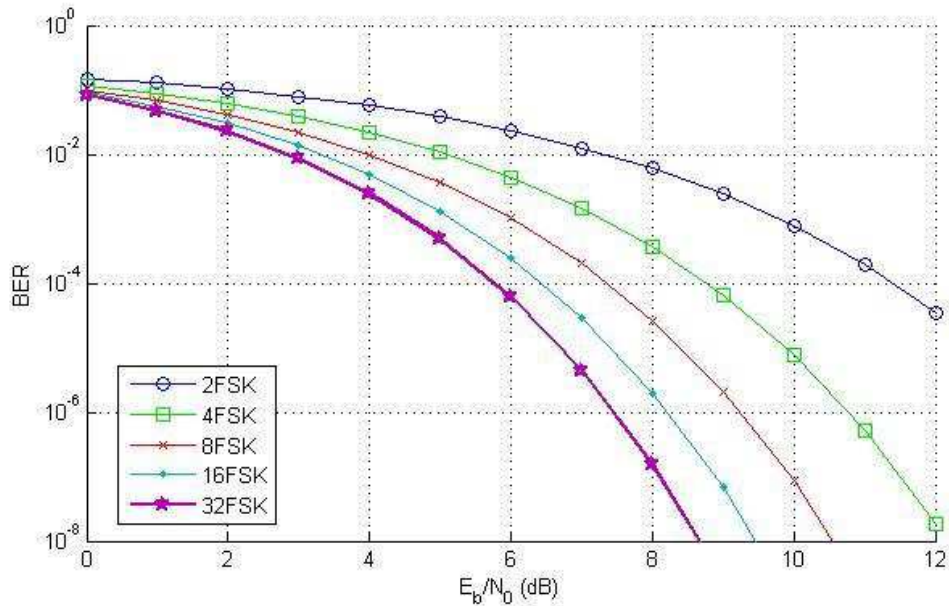


Figura 3. 10: Probabilidad de BER-SNR para MFSK con demodulación coherente  
Elaborado por: Autor.

En la modulación QAM, como en otras modulaciones, la relación BER aumenta con el número M. La figura 3.11 muestra claramente esta situación. Se muestran los gráficos resultantes para valores de M=4, M=8, M=16, M=32, y M=64 en la modulación M-QAM. En M-QAM se entiende que muestran los mismos cambios que M-PSK, pero no cambian de la misma manera y se comparan los gráficos de cada modulación M-QAM.

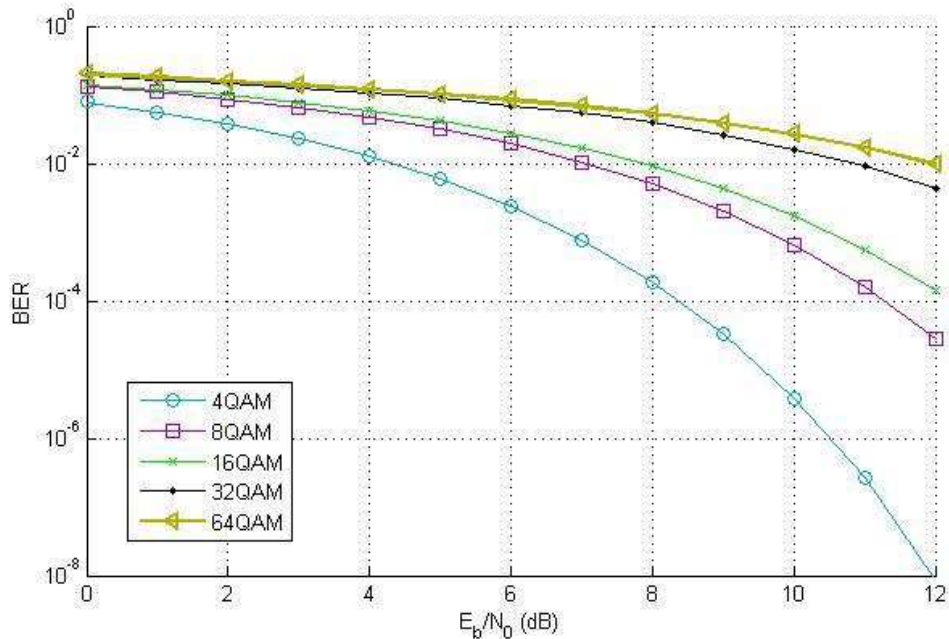


Figura 3. 11: Probabilidad BER-SNR para MQAM  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.11 compara las tasas de error para 4-QAM, 4-PSK, 8-QAM, 8-PSK y 16-QAM. Como se puede ver en el gráfico, la proporción de SNR aumentada y la relación de BER mostraron una disminución en todos los valores de M. Se ha observado que 4-QAM tiene una tasa de error menor que 4-PSK en los valores de M que tienen la misma tasa de error de PSK y QAM en el caso de M=4. Al comparar la BER para la misma relación de SNR, es posible ordenar de menor a mayor 4-PSK=4-QAM <8-QAM <8-PSK <16-QAM.

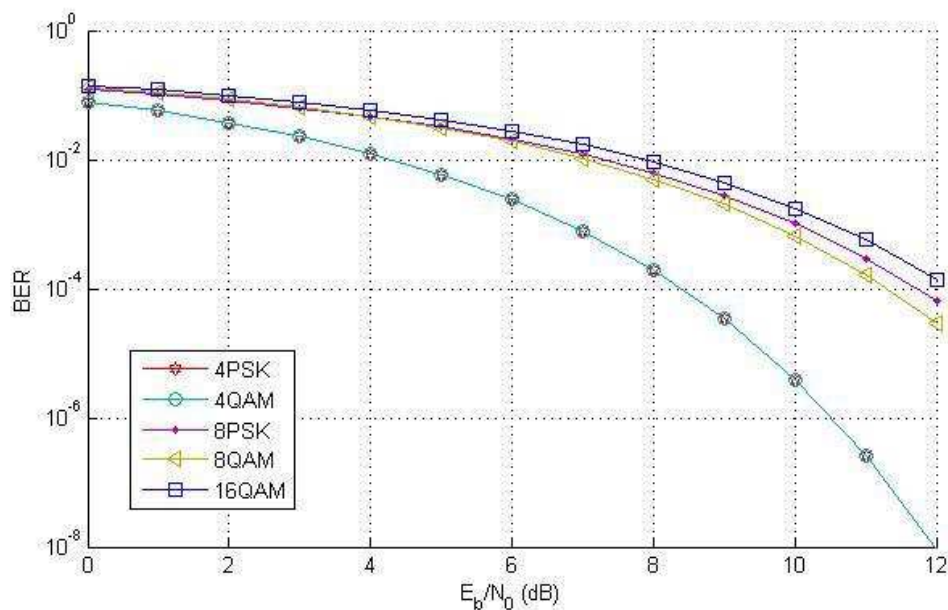


Figura 3. 12: Comparación de las probabilidades BER-SNR para 4-PSK, 4-QAM, 8-PSK, 8QAM y 16QAM  
Elaborado por: Autor.

Se hace otro análisis comparativo, comparando las probabilidades de error de los tipos de modulación para valores de M altos, tal como se muestra en la figura 3.13. En el gráfico, 64-PSK, que tiene casi el mismo valor de BER que 32-QAM con 16-PSK, tiene un valor de BER superior a 128-QAM, 256-QAM, y 512-QAM. Esto indica que QAM es una modulación que debe preferirse sobre la modulación PSK para valores grandes de M.

El ancho de banda necesario y la eficiencia de ancho de banda son temas de importancia en los sistemas de comunicación, al menos la tasa de error. A continuación, se proporciona información sobre el cálculo de los

valores de ancho de banda y eficiencia de ancho de banda y se realiza una comparación para los tipos de modulación mencionados anteriormente.

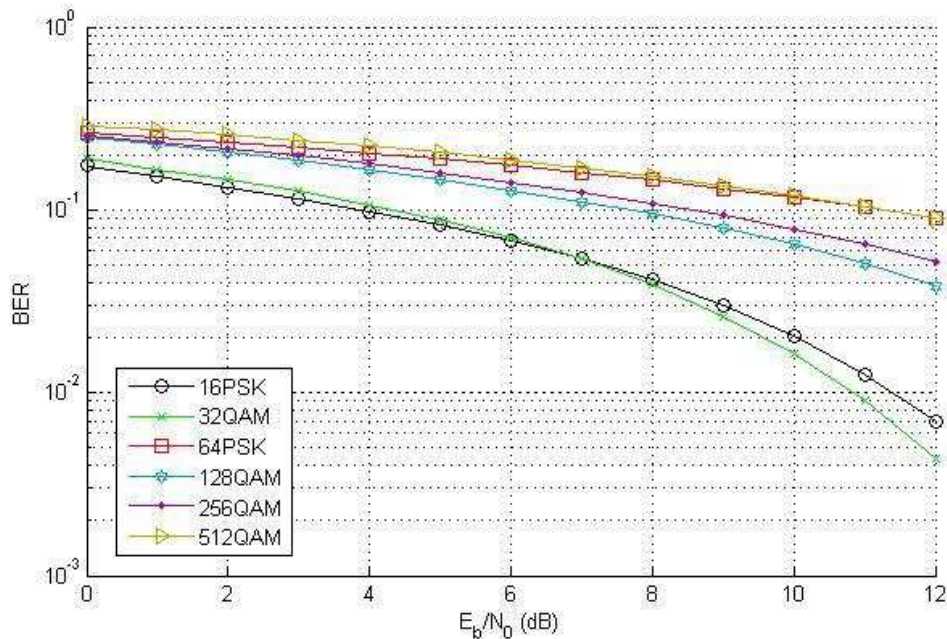


Figura 3. 13: Comparación de las probabilidades de BER-SNR para M-PSK y M-QAM.

Elaborado por: Autor.

Ancho de banda para ASK / PSK / QAM:

$$B_{ASK/PSK/QAM} = 2R_s = \frac{2}{b} R_b = \frac{2R_b}{b = \log_2 M}$$

Eficiencia de ancho de banda:

$$\frac{R_b}{B_{ASK/PSK/QAM}} = \frac{b = \log_2 M}{2}$$

Ancho de banda para FSK coherente:

$$B_{coh,FSK} = 2R_s + (M - 1) \frac{R_s}{2} = \frac{(M + 3) \frac{R_b}{\log_2 M}}{2}$$

Eficiencia de ancho de banda:

$$\frac{R_b}{B_{coh,FSK}} = \frac{2 \log_2 M}{M + 3}$$

$R_b$ : tasa de bits de datos

$R_s$ : tasa de símbolos de datos

b: la cantidad de bits en cada símbolo

Para todos los tipos de modulación, la BER y la eficiencia del ancho de banda a SNR=8 dB, con un número creciente de bits, se tabulan a continuación (véase la tabla 3.3). El valor de SNR se eligió para que fuera de 8 dB para una visión más clara de los valores de BER. El mismo resultado se obtiene para todos los demás valores de SNR.

Tabla 3. 3: Eficiencia de ancho de banda con el aumento de número de bits y la comparativa de BER.

b	Eficiencia del ancho de banda			$\frac{E_b}{N_0} = 8 \text{ dB para BER}$		
	PSK	FSK	QAM	PSK	FSK	QAM
1	0.5	0.4000	×	$10^{-3.8}$	$10^{-2.3}$	×
2	1	0.5714	1	$10^{-3.8}$	$10^{-3.4}$	$10^{-3.8}$
3	1.5	0.5455	1.5	$10^{-2.4}$	$10^{-4.6}$	$10^{-2.5}$
4	2	0.4211	2	$10^{-1.4}$	$10^{-5.8}$	$10^{-2.1}$
5	2.5	0.2857	2.5	$10^{-1.1}$	$10^{-6.8}$	$10^{-1.4}$
6	3	0.1791	3	$10^{-0.8}$	×	$10^{-1.3}$
7	3.5	0.1069	3.5	×	×	$10^{-1}$
8	4	0.0618	4	×	×	$10^{-0.9}$

Elaborado por: Autor.

(x) = indica las partes que no pueden ser probadas.

### 3.5. Estudio de simulación 2.

En el estudio de simulación 2, se investigó la distancia entre los símbolos y la variación del valor de BER. Para la distancia entre dos símbolos  $d= 1,2,3,4$  unidades (véase la figura 3.14), se realiza una simulación utilizando el sistema 16-QAM y los gráficos SNR-BER obtenidos se dan en la figura 3.15. Como se puede ver, el valor de BER disminuye a medida que la distancia entre símbolos (distancia euclidiana) aumenta en el espacio de fase.

Sin embargo, aumentar la distancia entre símbolos en el sistema QAM significa aumentar la amplitud de la señal. Esto puede permitirse hasta una

vez, debido a que el cambio de señales de gran amplitud a altas frecuencias, por supuesto, no es posible con las condiciones y la tecnología actuales.

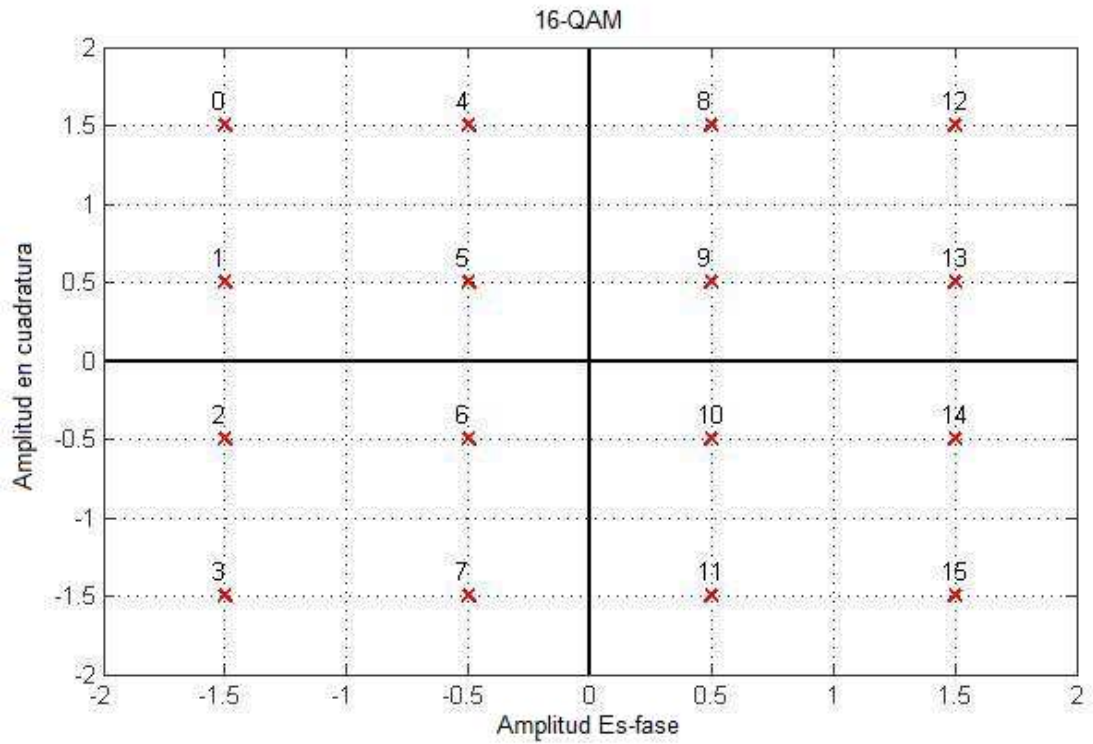


Figura 3. 14: Representación de símbolos en el plano complejo para valores de desplazamiento de fase = 0 y  $d=1$ .  
Elaborado por: Autor.

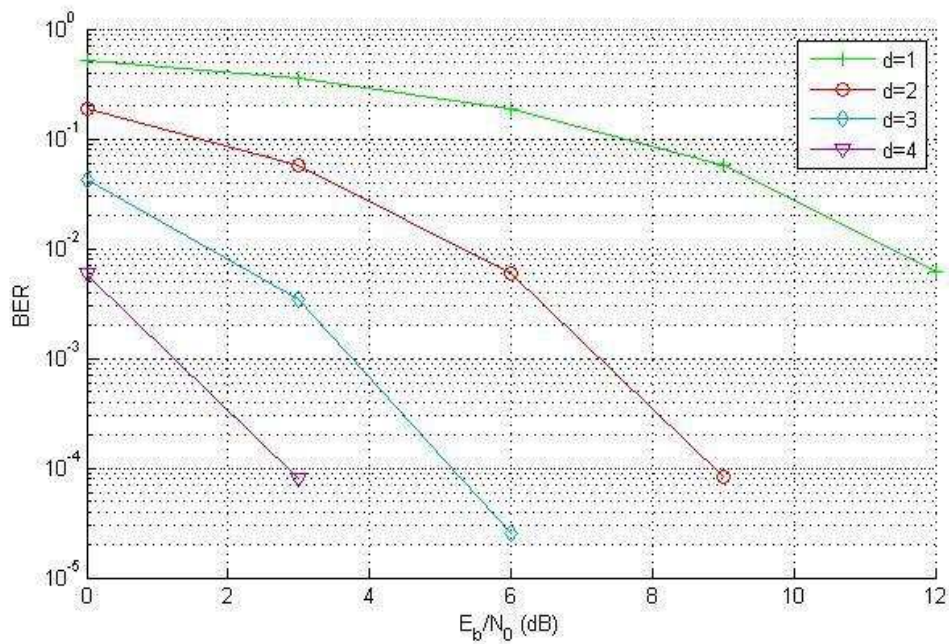
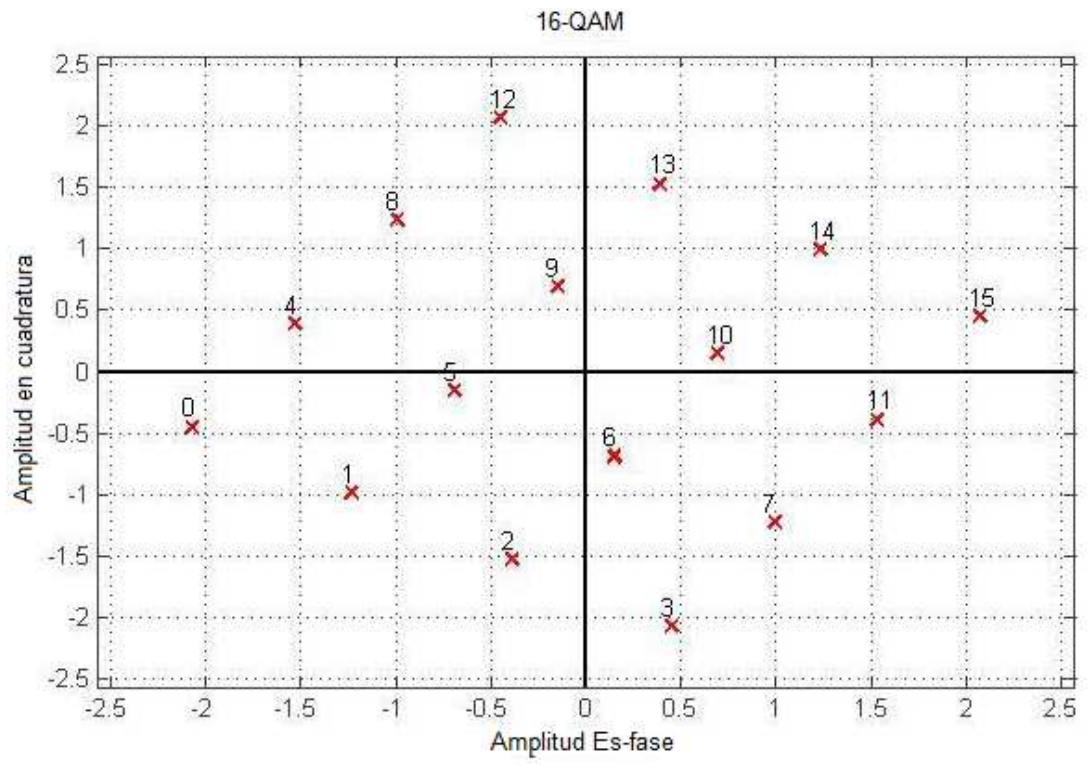
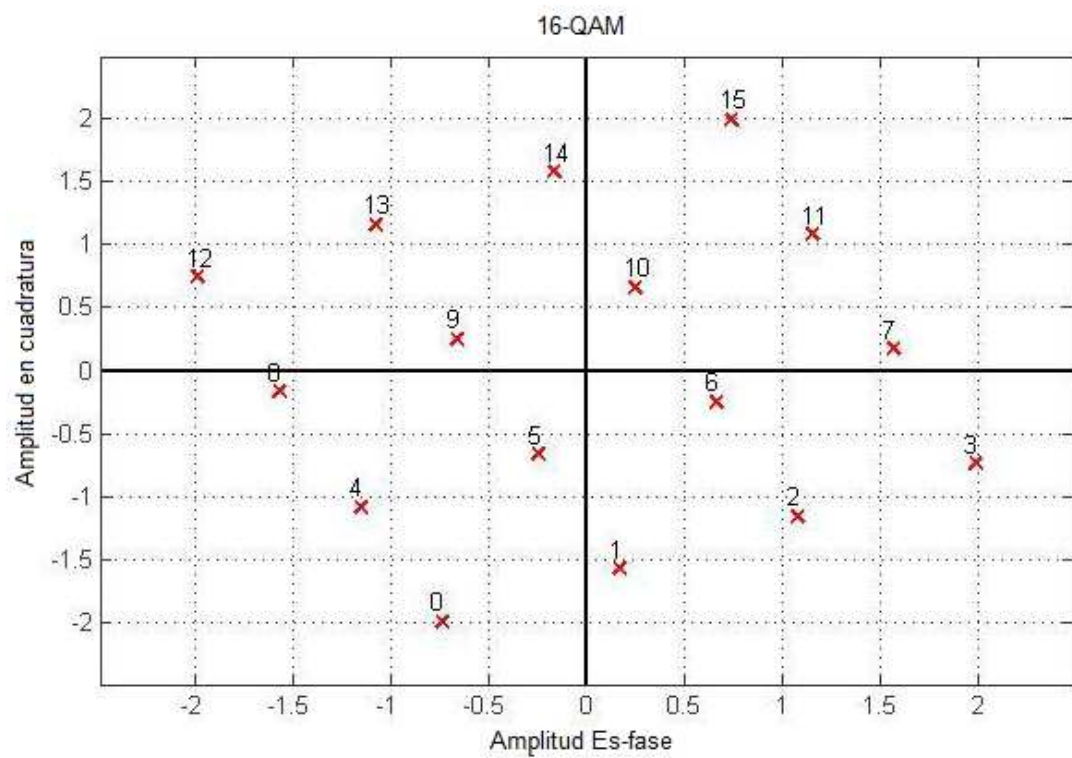


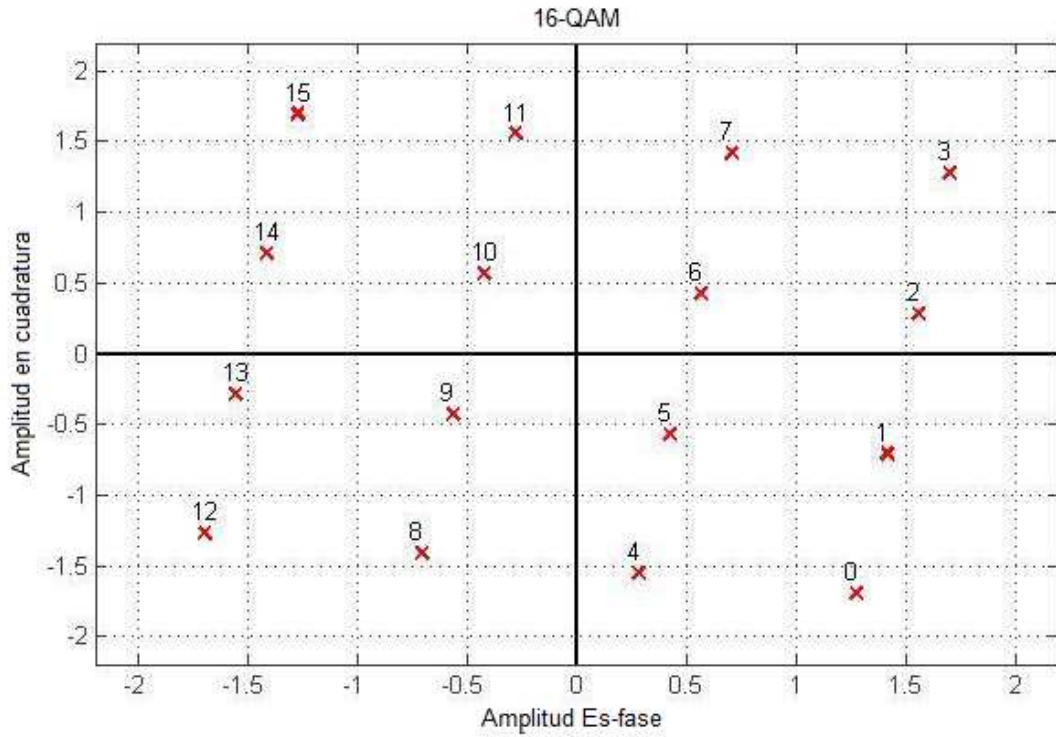
Figura 3. 15: Comparación BER-SNR para  $d = 1, 2, 3$  y  $4$ .  
Elaborado por: Autor.



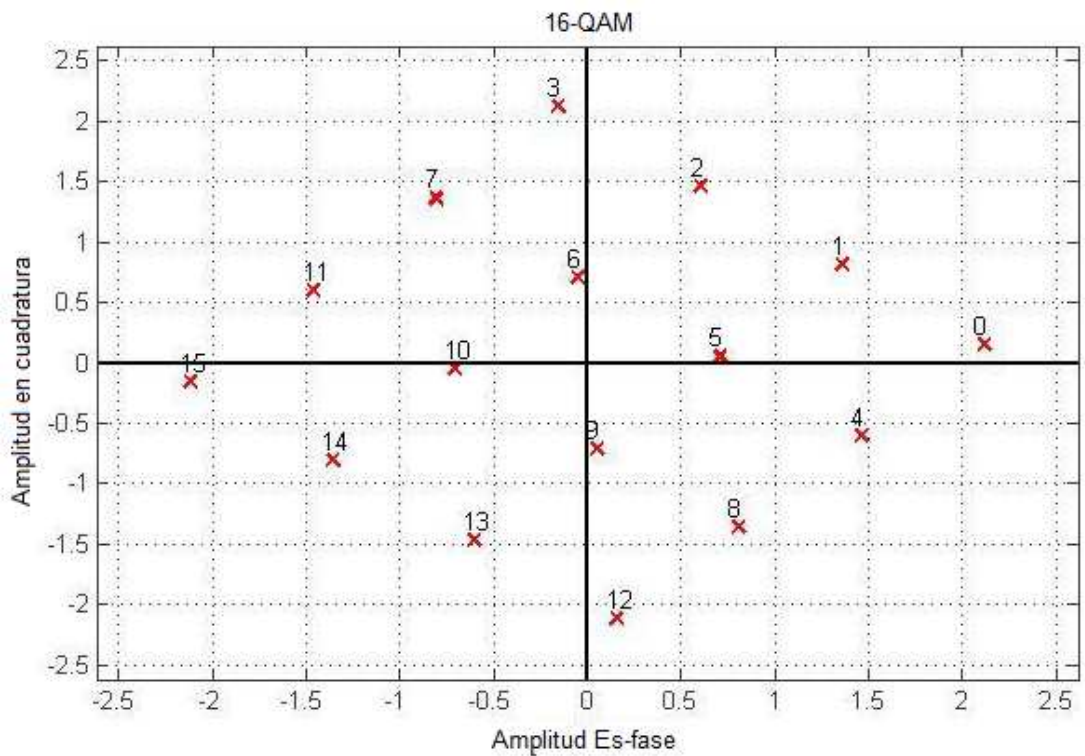
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3. 16: Representación de símbolos en el plano complejo para valores de  $d=1$  y (a) la fase off-set = 1 rad, (b) la fase off-set = 2 rad, (c) la fase off-set = 3 rad, (d) la fase off-set = 4 rad.

Elaborado por: Autor.

Además, el sistema 16QAM para diferentes valores de fase con el mismo valor de amplitud se define como en la Figura 3.16. Se observa que no hay cambios en los valores de BER con este gráfico y esta situación se muestra en la Figura 3.17.. Este es un resultado natural.

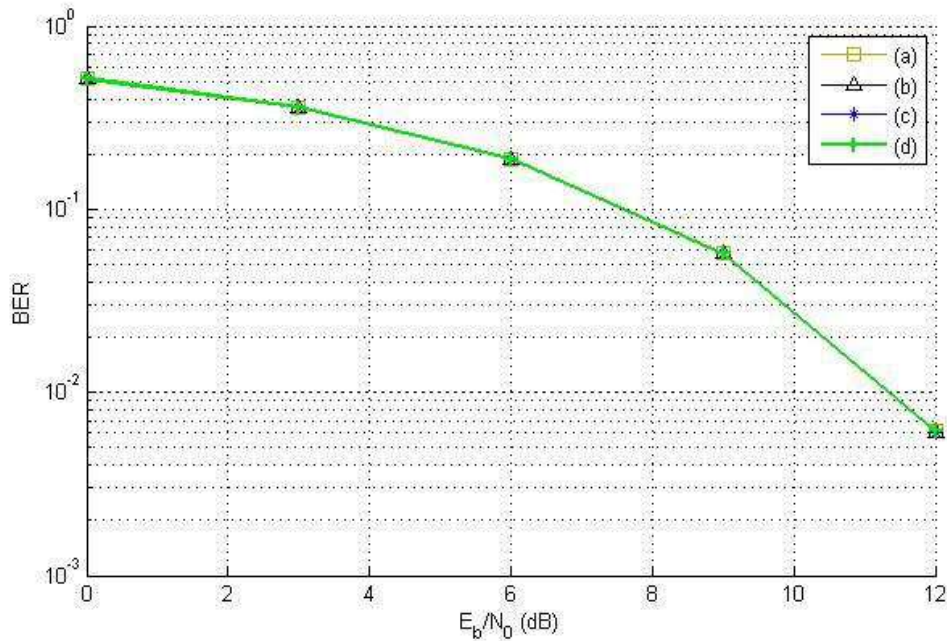
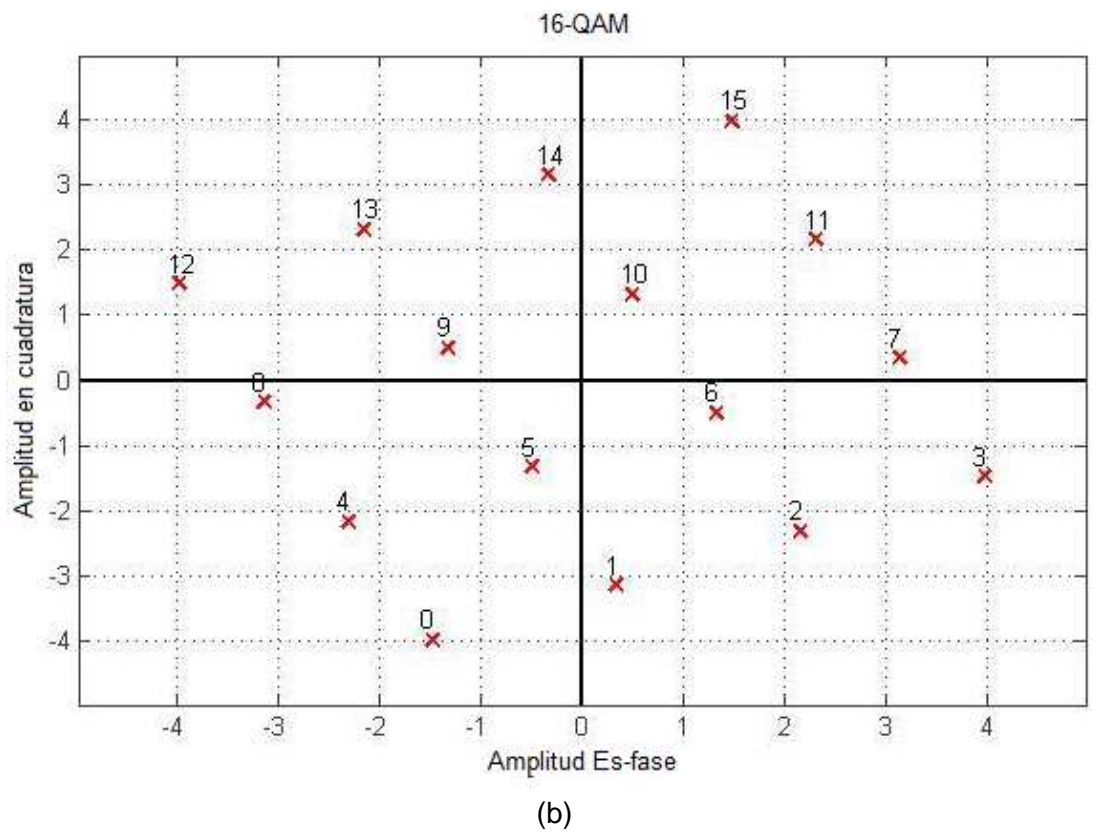
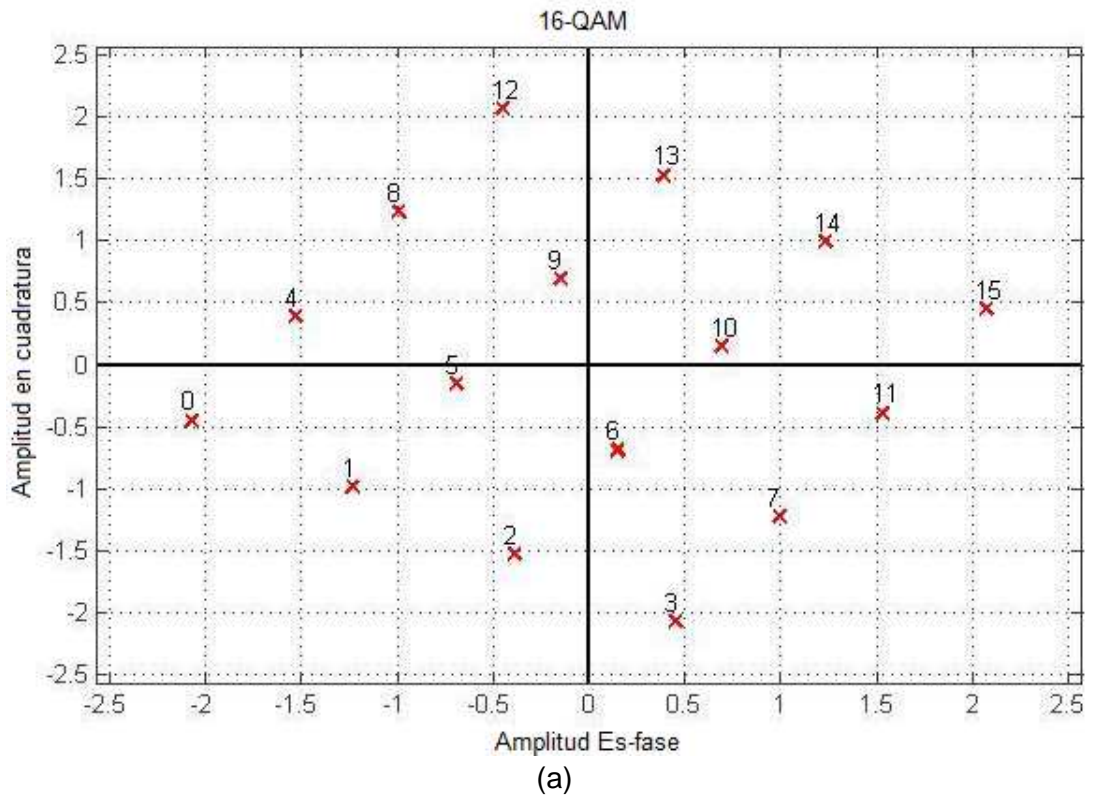


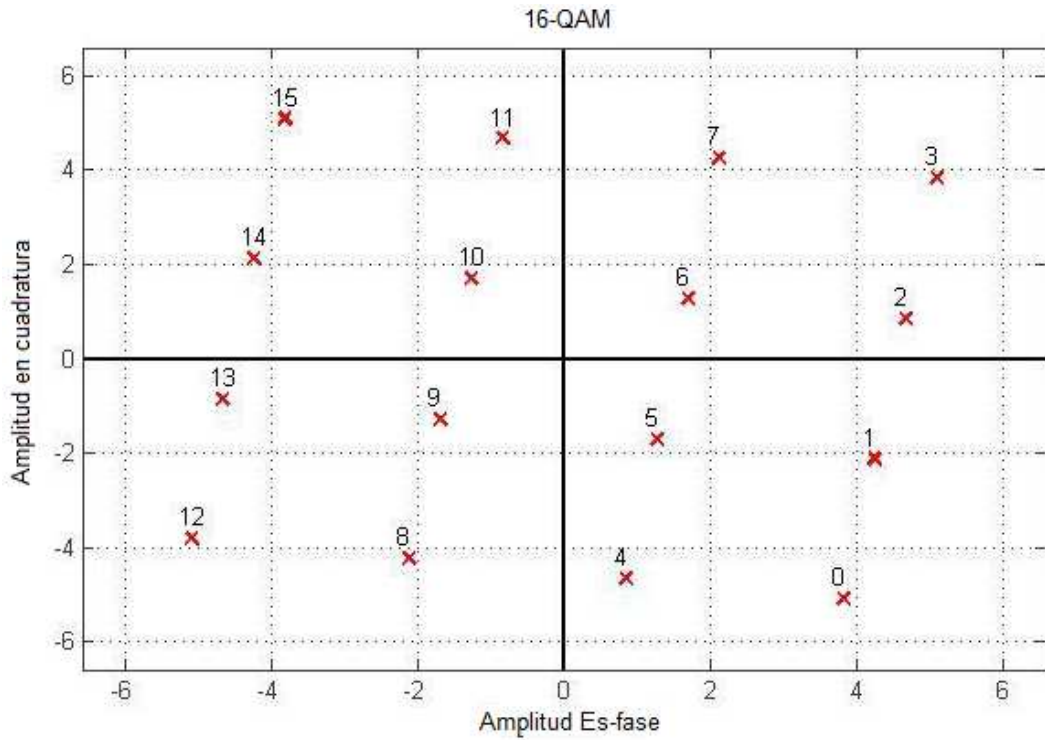
Figura 3. 17: Comparación de BER-SNR para diferentes valores de desfase de fase definidos en la figura 3.16.

Elaborado por: Autor.

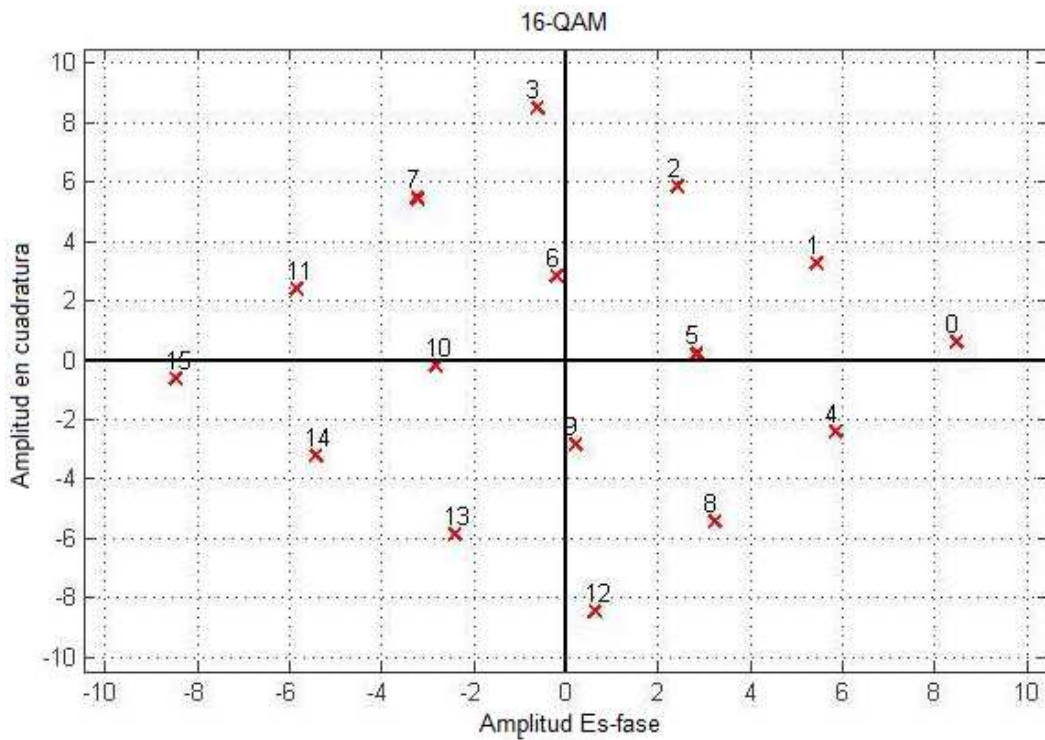
Finalmente, se realizó un estudio para el sistema 16-QAM al aumentar los valores de amplitud y fase de la misma manera. La figura 3.18 muestra los símbolos en el plano complejo para los valores de desfase de fase y  $d=1, 2, 3, 4$ , y las tasas de error se comparan en la figura 3.19. Se ha observado que cuando los valores de fase y los valores de amplitud cambian juntos, los valores de BER del sistema cambian solo para el mismo valor de  $M$  dependiendo de la amplitud.







(c)



(d)

Figura 3. 18: Representación de símbolos en el plano complejo para valores de (a) fase off-set = 1 rad y  $d=1$ , (b) fase off-set = 2 rad y  $d=2$ , (c) fase off-set = 3 rad y  $d=3$  (d) fase off-set = 4 rad y  $d=4$ .

Elaborado por: Autor.

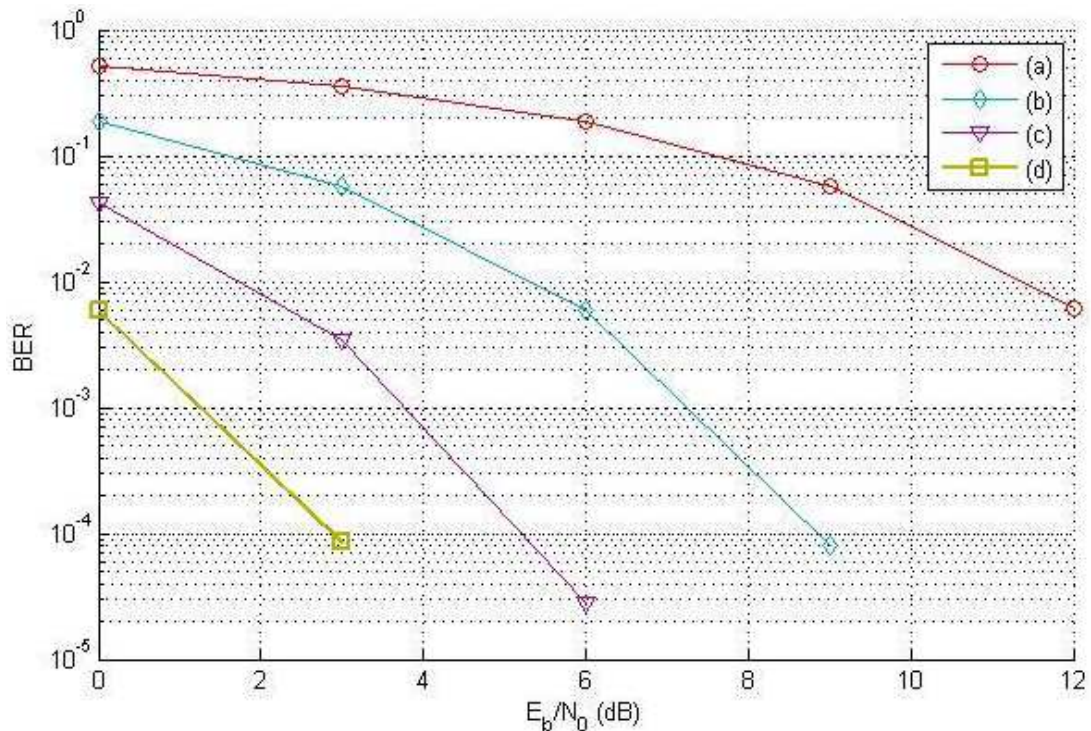


Figura 3. 19: Comparación de BER-SNR para diferentes desplazamientos de fase y valores d definidos en la figura 3.18.

Elaborado por: Autor.

Como resultado, se realizaron las siguientes observaciones, tanto en términos de simulación como de resultados teóricos.

1. Independientemente del tipo de modulación y el número M, la relación BER disminuye a medida que aumenta la relación SNR.
2. Para la modulación PSK y QAM, la BER también se incrementa con el número M aumentando a la misma tasa de SNR. Pero lo opuesto es cierto para la modulación FSK.
3. Aunque el número M de diferentes tipos de modulación es el mismo, la relación BER puede ser diferente.
4. El ancho de banda se incrementa de la misma manera que la velocidad de bits en PSK y QAM. Sin embargo, como se mencionó anteriormente en FSK, la eficiencia del ancho de banda disminuye al aumentar el número de bits.

### 3.6. Resultados.

Las señales se deben convertir de analógico a digital o digital a analógico antes de transmitirse. Esta conversión se realiza mediante

muestreo y conmutación. La transmisión de estas señales convertidas al receptor la realiza el canal. Si la señal se modula en el transmisor antes de ser transportada por el canal y el transporte finaliza, debe demodularse en el receptor y convertirse al estado anterior.

Las señales sinusoidales se usan como portadoras en el proceso de modulación. La transmisión de la banda de transmisión de estas señales sinusoidales utilizando variables de amplitud, fase y frecuencia se divide en tres grupos principales como ASK, FSK y PSK. Las modulaciones existentes se desarrollaron más tarde y se encontraron estructuras más complejas como MASK, MPSK, MFSK y MQAM según el número de portadores.

Las señales se pueden representar mediante símbolos para evitar la interferencia en las líneas de transmisión de señal y permitir que se envíen más datos al mismo tiempo que un símbolo. Para que las señales se representen mediante símbolos, estas señales deben ser perpendiculares entre sí.

Con la comunicación simbólica, está destinado a transmitir datos al receptor con la máxima eficacia (datos máximos que un símbolo puede transportar con un error mínimo). Cuando se examinan tanto los resultados de las simulaciones realizadas en este estudio como los resultados de los estudios previos, se concluye que la técnica QAM es la mejor de las técnicas existentes.

Otro tema que constituye la base de la comunicación simbólica son las técnicas de acceso múltiple. Es una tecnología desarrollada para evitar la confusión causada por múltiples usuarios que comparten el mismo canal de transmisión en la comunicación inalámbrica. Las técnicas de acceso múltiple generalmente se clasifican como FDMA, TDMA y CDMA. Actualmente, los sistemas 3G y 4G ampliamente utilizados emplean principalmente protocolos OFDM y W-CDMA de tecnologías de acceso múltiple.

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **4.1. Conclusiones.**

Se ha observado que, en todos los tipos de modulación a excepción de FSK, el número de bits transmitidos con un símbolo también aumenta la BER. En los sistemas FSK donde se envían más datos con menos errores, no se prefiere el uso de rango de frecuencia excesiva porque también aumentará el ancho de banda. Esto se debe a que el exceso de ancho de banda no es ventajoso teniendo en cuenta el costo. Por este motivo, QAM es el tipo de modulación de mejor rendimiento. Pero se observa que el requisito de mayor ancho de banda ya no se puede cumplir con la modulación QAM.

Por esta razón, los sistemas utilizados deben optimizarse o deben investigarse y desarrollarse diferentes técnicas de modulación. Además, en el proceso de simulación, se observaron símbolos en diferentes aperturas de fase y distancias en el plano complejo y se investigó el rendimiento del sistema. Como resultado de los gráficos obtenidos, se observó que aumentar la amplitud solo disminuía la relación BER, pero cambiar solo el ángulo de fase no afectaba la relación BER.

El reemplazo simultáneo tanto de la distancia como del ángulo de fase es el resultado del cambio en BER (con condición constante M) solo debido al cambio de amplitud. Como resultado, se ha observado que cambiar el número de M para reducir la proporción de BER no da muchos resultados positivos cuando todos los gráficos se examinan en términos generales. Por lo tanto, en lugar de cambiar la estructura de la modulación, otras estructuras, como el generador de señal o la estructura del canal, se pueden cambiar para obtener mejores sistemas de rendimiento.

### **4.2. Recomendaciones.**

A continuación, se expresan como recomendaciones dos propuestas de trabajos futuros:

- Análisis de rendimiento de métricas utilizando modulaciones 64-QAM en sistemas de banda ancha inalámbrica.

- Evaluar redes de comunicaciones inalámbricas a través de la plataforma de simulación OMNeT.

## Bibliografía

- Band, S. R., Dorle, M. S., & Dorle, S. S. (2016). BER performance of WIMAX system using wavelet packet modulation technique. En *2016 World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare (Startup Conclave)* (pp. 1–5). Coimbatore, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/STARTUP.2016.7583917>
- Bravo, M. D., Trujillo C., D., & Barrera C., A. (2014). Simulación y evaluación de arreglo de antenas MIMO para sistemas de comunicaciones inalámbricos mediante el uso del paradigma de tensores. *Revista Ingeniería y Región*, 12, 9–19.
- C. Chan, P., Lo, E., Wang, R., S. Au, E., N. Lau, V., Cheng, R., ... Letaief, K. (2006). The evolution path of 4G networks: FDD or TDD? *IEEE Communications Magazine*, 44(12), 42–50. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2006.273098>
- Castillo S., F. ., Sánchez G., J., Parra M., R., Flores T., J., & Fernández T., G. (2016). La modulación espacial, una comparación de las técnicas básicas de transmisión. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(2), 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.011>
- Flores Espinoza, A., & Guzmán Robles, M. (2009). *Sistema CDMA2000 1xEV-DO* (Thesis). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. Recuperado de <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/2613>
- ITU. (2018). All about the Technology. Recuperado el 3 de julio de 2018, de <https://www.itu.int/osg/spu/ni/3G/technology/index.html>
- Martínez Arlandis, M. (2017). *Caracterización experimental del desvanecimiento a corto plazo en canales vehiculares* (Trabajo Fin de Grado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/91701>

Rajesh, M. N., Shrisha, B. K., Rao, N., & Kumaraswamy, H. V. (2016). An analysis of BER comparison of various digital modulation schemes used for adaptive modulation. En *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)* (pp. 241–245). Bangalore, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7807820>

Sadinov, S. M. (2017). Simulation study of M-ARY QAM modulation techniques using Matlab/Simulink. En *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)* (pp. 547–554). Opatija, Croatia: IEEE. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2017.7973486>





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, **Herrera Rodríguez, Yadira Lilibeth** con C.C: # 094101860-8 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis de la tasa de error de bits (BER) utilizando diferentes modulaciones para sistemas de banda ancha inalámbrica** 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, 11 de septiembre de 2018

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

Nombre: Herrera Rodríguez, Yadira Lilibeth

C.C: 094101860-8



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



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

## **REPOSITARIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

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

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Análisis de la tasa de error de bits (BER) utilizando diferentes modulaciones para sistemas de banda ancha inalámbrica		
<b>AUTOR(ES)</b>	HERRERA RODRÍGUEZ, YADIRA LILIBETH		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. EDWIN F. PALACIOS MELÉNDEZ		
<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>	11 de Septiembre de 2018	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	71
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Fundamentos de comunicación, Comunicaciones inalámbricas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Modulaciones, Fase, Frecuencia, Amplitud, Señal-Ruido, Transmisión.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>Los sistemas de comunicación digital son sistemas que transmiten datos numéricos al lado opuesto con un error mínimo por medio de protocolos que permiten el acceso múltiple mediante la multiplexación por división de código. En estos sistemas, las modulaciones de fase, frecuencia y amplitud son el soporte de los datos que se conmutan a altas velocidades según una determinada regla (PSK, FSK y ASK). La comunicación simbólica se realiza convirtiendo nuevamente a datos numéricos en el lado del receptor. Se han llevado a cabo varios estudios sobre el rendimiento de los símbolos seleccionados en la transmisión al lado opuesto de estos sistemas, la modulación realizada por otra conmutación alternativa y el rendimiento en el canal de transmisión. Además, la tasa de ruido involucrada en la señal en el canal de transmisión y el error causado por esta relación también son relevantes. En este estudio, el sistema W-CDMA se explica en detalle y las modulaciones simbólicas como BPSK, PSK y QAM utilizadas en este sistema tienen una relación señal / ruido (SNR)</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593995838428	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:yadiherrera_26@hotmail.com">yadiherrera_26@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-68366762		
	<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>			