



*INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL*

---

***ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y ELÉCTRICA***

*"ESQUEMAS DE MODULACIÓN DIGITAL EMPLEADOS  
EN LA TECNOLOGÍA LTE, TOMANDO EN CUENTA LAS  
CONDICIONES DEL CANAL DE COMUNICACIONES"*

***TESIS***

***QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA***

***P R E S E N T A N:***

***RODRÍGUEZ MORALES DANIEL***

***ROSALES GALLEGOS CÉSAR***

***ROSALES VARELA ALEXA***

***ASESOR TÉCNICO Y METODOLÓGICO:***

***ING. JULIO CÉSAR NIEVES GODÍNEZ***



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

**T E M A D E T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA  
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL  
DEBERA (N) DESARROLLAR C. DANIEL RODRÍGUEZ MORALES  
C. CÉSAR ROSALES GALLEGOS  
C. ALEXA ROSALES VARELA

**“ESQUEMAS DE MODULACIÓN DIGITAL EMPLEADOS EN LA TECNOLOGÍA LTE, TOMANDO EN CUENTA LAS CONDICIONES DEL CANAL DE COMUNICACIONES”**

ANALIZAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL ESQUEMA DE MODULACIÓN ADAPTIVA QUE SE EMPLEA EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES BASADOS EN LTE.

- ❖ ESTUDIAR LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES.
- ❖ ESTUDIAR LA EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES.
- ❖ ESTUDIAR LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA ARQUITECTURA LTE.
- ❖ ESTUDIAR LAS CARACTERÍSTICAS DE UN CANAL DE COMUNICACIONES INALÁMBRICO.
- ❖ ESTUDIAR LOS PRINCIPALES ESQUEMAS DE MODULACIÓN DIGITAL.
- ❖ ESTUDIAR EL CONCEPTO DE ADAPTACIÓN DEL ENLACE (LINK ADAPTATION).
- ❖ REALIZAR UNA SERIE DE SIMULACIONES PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN ADAPTIVA.

CIUDAD DE MÉXICO., A 09 DE AGOSTO DEL 2016.

A S E S O R

ING. JULIO CÉSAR NIEVES GODINEZ

ING. PATRICIA LORENA RAMÍREZ RÁNGEL  
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA



---

## **Agradecimientos**

En primer lugar quiero dar gracias a dios por todas las metas alcanzadas, los sueños logrados, por las personas que puso en mi camino a lo largo de estos años y sobre todo por haberme dado a unos padres y hermanos ejemplares los cuales son los principales impulsores de mis sueños, gracias a mi familia por depositar toda su confianza en mi y por todo el apoyo que me han brindado siempre. Los quiero mucho. Gracias a mis amigos por hacerme la vida mas sencilla y divertida, y por echarme una mano cuando lo necesité.

**Alexa Rosales Varela.**

Para mi familia y amigos, quienes siempre han estado conmigo en los buenos y los malos momentos, estaré eternamente agradecido por apoyarme cuando siempre lo necesité. Este logro no hubiera sido posible de no ser gracias a ustedes, por esa misma razón les dedico este proyecto de investigación.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo.

¡Muchas gracias!

**César Rosales Gallegos.**

Gracias a ti Señor porque siempre has estado en todo momento me has ayudado, me has escuchado e incluso dado esa fortaleza para seguir y jamás rendirme, porque me escuchaste en todo momento alentaste mi crecimiento.

A mis padres:

Este logro no solo es mío, este logro también es de ustedes, a quienes agradezco por haberme brindado su apoyo incondicional en mis estudios y en mi vida. En cada prueba que pase en este camino, ustedes fueron quienes me animaron, me alentaron, soportaron mis enojos, mi carácter, me dieron aliento, fuerza y palabras para poder continuar con este camino. Hoy soy quien soy por sus enseñanzas, por el gran ejemplo a seguir que son ustedes para mí, por los valores que me inculcaron, porque ustedes me han dado la mejor herencia que puedo tener, finalmente podemos decir primer prueba superada, porque parecía no tener fin, pero este momento de victoria, triunfo, en verdad encuentro palabras de como agradecerles pero les digo ¡gracias!.

A mis hermanos:

Ustedes fueron mi fuente para seguir, ya que les quiero decir que las cosas con esfuerzo, y dedicación se pueden realizar las cosas, gracias por aguantar mis actitudes porque también me alentaron a seguir de manera indirecta pero me dieron ese ánimo de poder continuar y terminar mis estudios.

A mis amigos, maestros, compañeros por compartir momentos, experiencias y conocimientos los cuales pude aplicar en la carrera y lograr esta meta.

**Daniel Rodriguez Morales.**

---

## Índice

Lista de acrónimos .....	1
Objetivo general .....	3
Objetivos Particulares .....	4
Justificación.....	5
Introducción.....	6
<b>Capítulo I Generalidades de los sistemas de comunicaciones móviles basados en LTE .....</b>	<b>7</b>
1.1 Estación base.....	7
1.2 Estación móvil .....	7
1.3 Área de cobertura.....	8
1.4 Reúso de frecuencias.....	11
1.5 Ruido e interferencia. ....	12
1.5.1 Tipos de ruido e interferencias.....	12
1.6 Evolución de los sistemas móviles. ....	15
1.6.1 Primera generación de los sistemas celulares (1G).....	15
1.6.2 Segunda generación de los sistemas celulares (2G).....	16
1.6.3 Tercera generación de los sistemas celulares (3G).....	17
1.6.4 Cuarta generación de los sistemas celulares (4G).....	19
1.7 Arquitectura básica de una red LTE. ....	21
1.8 Tecnologías importantes en una red LTE. ....	24
1.8.1 Esquemas de múltiples antenas (MIMO) .....	24
1.8.2 Técnicas de acceso al medio. ....	25
1.8.3 Adaptabilidad del enlace. ....	25
<b>Capítulo II Estudio de los esquemas de modulación digital. ....</b>	<b>26</b>
2.1 Forma general de un sistema de comunicaciones digitales.....	26
2.2 Características de la propagación en el espacio libre.....	28
2.2.1 Fenómenos De Reflexión, Refracción, Difracción, Dispersión y Distorsión.....	28
2.2.2 Desvanecimientos de la señal .....	30
2.3 Métricas de calidad de la señal de comunicaciones .....	32
2.4 Modulación Digital .....	33
2.4.1 Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK).....	34
2.4.2 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK) .....	35

---

2.4.3 Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK) .....	35
2.5 Esquemas de modulación en cuadratura .....	36
2.5.1 Modulación 4QAM.....	39
2.5.2 Modulación 16QAM.....	40
2.5.3 Modulación 64QAM.....	41
2.6 Probabilidad de error.....	42
<b>Capítulo III Análisis del comportamiento de los esquemas de modulación adaptivos en LTE.....</b>	<b>44</b>
3.1 Adaptabilidad en el enlace empleada en LTE.....	44
3.1.1 Modulación y codificación adaptiva. ....	45
3.2 Características de los escenarios de simulación.....	48
3.2.1 Modelo de canal con desvanecimientos lentos y rápidos (Canal tipo Suzuki).....	49
3.3 Estudio del desempeño de los esquemas de modulación empleados en LTE.....	50
3.3.1 Interpretación de los diagramas de constelación. ....	50
<b>Capítulo IV Conclusiones y resultados. ....</b>	<b>57</b>
4.1 Rendimiento del ancho de banda. ....	57
4.1.1 Capacidad de canal.....	59
4.2 Interpretación probabilidad de bit erróneo y la SNR.....	61
4.3 Resultados de la adaptabilidad del enlace en los esquemas de modulación 4QAM,16QAM,64QAM. ....	62
<b>Conclusiones.....</b>	<b>73</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>75</b>

---

## Índice de figuras

### Capítulo I

Figura 1.1 Estación base. ....	7
Figura 1.2 Elementos de una estación móvil. ....	8
Figura 1.3 Formas geométricas del área de cobertura. ....	8
Figura 1.4 Interferencia entre celdas circulares. ....	9
Figura 1.5 Área de cobertura. ....	9
Figura 1.6 Comparación geométrica de celdas. ....	10
Figura 1.7 Ejemplos de cluster. ....	11
Figura 1.8 Despliegue de macrocelda usando clústers de 7 celdas. ....	11
Figura 1.9 Interferencia constructiva entre dos señales. ....	13
Figura 1.10 Destrucción de señales de misma amplitud con fase de 180. ....	13
Figura 1.11 Interferencia co-canal. ....	14
Figura 1.12 Comparación de velocidades en conexiones móviles. ....	19
Figura 1.13 Arquitectura básica de una red LTE. ....	22
Figura 1.14 Esquema de un sistema MIMO. ....	24

### Capítulo II

Figura 2.1 Diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones digitales. ....	27
Figura 2.2 Reflexión. ....	28
Figura 2. 3 Refracción. ....	29
Figura 2.4 Difracción en la cima de una montaña. ....	29
Figura 2.5 Desvanecimiento lento. ....	31
Figura 2.6 Desvanecimiento rápido. ....	31
Figura 2.7 Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK). ....	34
Figura 2.8 Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK). ....	35
Figura 2.9 Modulación por desplazamiento de fase (PSK). ....	35
Figura 2.10 Modulación QAM; portadora en fase (I). ....	36
Figura 2.11 Modulación QAM; portadora en cuadratura (Q). ....	36
Figura 2.12 Constelación cuadrada QAM. ....	37
Figura 2.13 Modulador 4QAM. ....	39
Figura 2.14 Modulación 4QAM. ....	39

---

Figura 2.15 Modulador 16QAM.....	40
Figura 2.16 Modulación 16QAM. ....	41
Figura 2.17 Modulación 64QAM. ....	41
Figura 2.18 Probabilidad de error vs la energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido.....	43

### Capítulo III

Figura 3.1 Estructura del escenario de simulación.....	48
Figura 3.2 Relación Señal a Ruido más Interferencia en un caso ideal. ....	49
Figura 3.3 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 4QAM considerando una SNR=2 dB. ....	51
Figura 3.4 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 4QAM considerando una SNR=10 dB. ....	51
Figura 3.5 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 4QAM considerando una SNR=20 dB. ....	52
Figura 3.6 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 16QAM considerando una SNR=2 dB. ....	52
Figura 3.7 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 16QAM considerando una SNR=10 dB. ....	53
Figura 3.8 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 16QAM considerando una SNR=20 dB. ....	53
Figura 3.9 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 64QAM considerando una SNR=2 dB. ....	54
Figura 3.10 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 64QAM considerando una SNR=10 dB. ....	54
Figura 3.11 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 64QAM considerando una SNR=20 dB. ....	55
Figura 3.12 Comparación gráfica de los esquemas de modulación 4QAM, 16QAM y 64QAM.....	56

---

## Capítulo IV

Figura 4.1 Capacidad de los esquemas de modulación QAM.....	58
Figura 4.2 Límite de Shannon.....	60
Figura 4.3 Adaptación del enlace. ....	60
Figura 4.4 BER vs SNR. ....	61
Figura 4.5 Bits correctos del esquema de modulación 4QAM.....	63
Figura 4.6 Tasa de bit erróneo del esquema de modulación 4QAM. ....	63
Figura 4.7 Bits correctos de esquema de modulación 16QAM.....	64
Figura 4.8 Tasa de bit erróneo del esquema de modulación 16QAM.....	64
Figura 4.9 Bits correctos de esquema de modulación 64QAM.....	65
Figura 4.10 Tasa de bit erróneo del esquema de modulación 64QAM.....	65
Figura 4.11 Bits correctos para los esquemas de modulación QAM a la distancia de 0.1. ....	66
Figura 4.12 Tasa de bits erróneos de los esquemas de modulación QAM a una distancia de 0.1. ....	67
Figura 4.13 Bits correctos para los esquemas de modulación QAM a distancia de 0.5. ....	68
Figura 4.14 Tasa de bits erróneos de los esquemas de modulación QAM a una distancia de 0.5. ....	69
Figura 4.15 Bits correctos para los esquemas de modulación QAM a distancia de 1.....	70
Figura 4.16 Tasa de bits erróneos de los esquemas de modulación QAM a una distancia de 1.....	71
Figura 4.17 Promedios modulación adaptativa.....	72
Figura 4.18 Promedios BER modulación adaptativa.....	72

---

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Primer generación de los sistemas celulares (1G). .....	16
Tabla 1.2 Características de los sistemas celulares (2G). .....	17
Tabla 1.3 Tercer generación de sistemas celulares (3G).....	18
Tabla 1.4 Cuarta generación de los sistemas de teléfono celular (4G).....	20
Tabla 2.1 Comparación Del Rendimiento De Varios Esquemas Para Modulación Digital (BER = $10^{-6}$ ).....	43
Tabla 3.1 Valores de CQI [5] .....	47

---

## Lista de acrónimos

<b>AMC- Amplitud Modulation and Coding</b>	<b>HSPA: High-Speed Packet Access</b>
<b>AN: Access Network</b>	<b>HSDPA: High-Speed Downlink Packet Access</b>
<b>AWGN: Aditive White Gaussian Noise</b>	<b>HSUPA: High-Speed Uplink Packet Access</b>
<b>ASK: Amplitud Shift Keying</b>	<b>IP: Internet Protocol</b>
<b>BLER: Block Error Rate</b>	<b>LTE: Long-Term Evolution</b>
<b>BS: Base Station</b>	<b>MS: Movil Station</b>
<b>CDMA: Coding Division Multiple Acces</b>	<b>MCS: Modulation and Coding Scheme</b>
<b>CN: Core Network</b>	<b>MIMO: Multiple-Input Multiple-Output</b>
<b>CQI: Channel Quality Indicator</b>	<b>MT: Terminal Mobile</b>
<b>DL: Downlink</b>	<b>MME: Mobility Management Entity</b>
<b>eNodeB: envolved Node B</b>	<b>NMS: System mobile Nordic</b>
<b>eNB: Envolved Node B</b>	<b>NTT: Nippon Telegraph &amp; Telephone Corp</b>
<b>EDGE: Enhanced Data rates for GSM Evolution</b>	<b>OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiplexing</b>
<b>EPC: Envolved Packet Core</b>	<b>PCS: Personal Communications Services</b>
<b>EPS: Envolved Packet System</b>	<b>PSK: Phase Shift Keying</b>
<b>E-UTRAN: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</b>	<b>PDSCH: Physical Downlink Shared Channel</b>
<b>EVDO: Evolution-Data Optimized</b>	<b>RF: Radio Frecuencia</b>
<b>FDD: Frequency Division Duplex</b>	<b>RBS: Radio Base Station</b>
<b>FDMA: Frecuncy Division Multiple Access</b>	<b>S-GW: Serving Gateway</b>
<b>FSK: Frequency Shift Keying</b>	<b>SIM: Subscriber Identity Module</b>
<b>FM: Frequency Modulation</b>	<b>SMS: Short Message Service</b>
<b>GSM: Global system for mobile communication</b>	<b>SNR: Signal to Noise Ratio</b>
<b>GPRS: General Packet Radio Services</b>	

---

**SDR: Software-Defined Radio**  
**SIR: Signal to Interference Ratio**  
**SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio**  
**SC-FDMA: Single Carrier Frequency Division Multiple Access**  
**TDD: Time Division Duplex**  
**TDMA: Time Division Multiple Access**  
**TDM: Time Division Multiplexing**  
**QPSK: Quadrature Phase Shift Key**  
**QAM: Quadrature Amplitud Modulation**

**WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access**  
**UE: User Equipment**  
**UMTS/HSPA: Universal Mobile Telecommunications System/High Speed Packet Access**  
**UMTS: Universal MobileTelecommunications System**  
**UL: Up link**  
**WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access**  
**3GPP :3rd Generation Partnership Project**

---

**Objetivo general:**

Analizar las características del esquema de modulación adaptiva que se emplea en los sistemas de comunicaciones móviles basada en LTE.

---

### **Objetivos Particulares:**

- Estudiar las características generales de los sistemas de comunicaciones móviles.
- Estudiar la evolución de las tecnologías empleadas en los sistemas de comunicaciones móviles.
- Estudiar las características principales de la arquitectura LTE.
- Estudiar las características de un canal de comunicaciones inalámbrico.
- Estudiar los principales esquemas de modulación digital.
- Estudiar el concepto de Adaptación del Enlace (Link Adaptation).
- Realizar una serie de simulaciones para evaluar el desempeño de los esquemas de modulación adaptiva.

---

## **Justificación**

Debido a la necesidad que se ha generado en el hombre de siempre estar comunicado, los sistemas de comunicaciones móviles han tenido grandes evoluciones referentes a las tasas de transmisión, técnicas de acceso al medio, técnicas de duplexaje, esquemas de modulación digital y esquemas de codificación de canal, entre otras cosas. Estas características marcan la diferencia entre cada una de las generaciones de sistemas móviles que han sido desarrolladas. A partir de los sistemas 3G es posible transmitir voz, datos, imágenes y videos, lo que ha hecho necesario que la información se transmita a grandes tasas de datos con la menor cantidad de errores posible.

Con este fin, en los sistemas de comunicaciones móviles de Cuarta Generación se han implementado técnicas de multiplexaje espacial, diversidad espacial, así como la modulación y codificación adaptativa. En este trabajo, se hará un estudio del esquema de modulación adaptativa para evaluar su desempeño en cuanto a tasa de bits y probabilidad de bit erróneo.

---

## Introducción

Debido a la evolución de las tecnologías y las comunicaciones se creó un modo más eficiente y más óptimo para poder llevar información y cobertura a lugares remotos donde, debido a que el aspecto geográfico representa una dificultad y es muy costoso el instalar las líneas de cables para una conexión a una red, las comunicaciones cambiaron a una tecnología inalámbrica, la telefonía móvil, la cual evita la conexión a través de cables y utiliza como medio para transmitir información el espacio libre a través de ondas electromagnéticas. Un ejemplo claro de esto son los teléfonos móviles de casa, los celulares y dispositivos móviles como laptops. La telefonía celular es la base de los sistemas de comunicaciones inalámbricos. A lo largo de los capítulos de este trabajo se analizarán los conceptos básicos de la telefonía celular, funciones y elementos que la comprenden, así como el desempeño de los esquemas de modulación utilizados en 4G LTE (Long-Term Evolution, por sus siglas en inglés).

---

# Cápítulo I

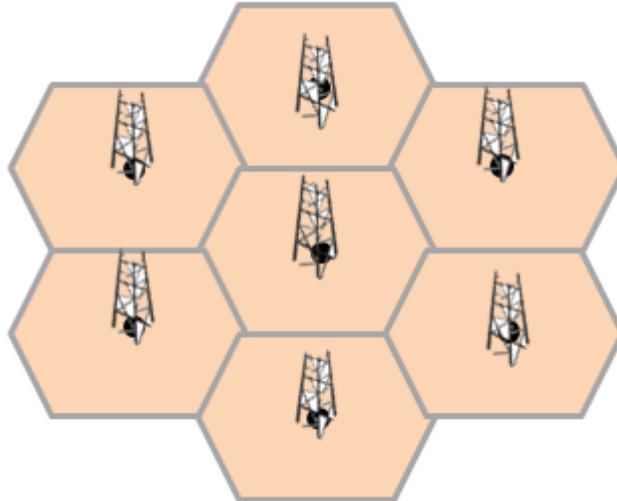
## Generalidades de los sistemas de comunicaciones móviles basados en LTE.

A continuación se mencionan algunos conceptos que son fundamentales en el estudio de los sistemas de comunicaciones móviles; además, se muestra una breve introducción sobre la evolución de dichos sistemas.

Al final de este capítulo se analizará la arquitectura básica de LTE, así como las principales tecnologías que utiliza.

### 1.1 Estación base

Una estación base (BS, Base Station, por sus siglas en inglés) es una estación de radio y torre de comunicación. Su función principal es permitir la comunicación de varios dispositivos de baja potencia como los celulares. La BS se compone de un transceptor de FM (por sus siglas en inglés, Frequency Modulation) de baja potencia, amplificadores de potencia y de una unidad de control para mantener un control de la red que está operando.



**Figura 1.1 Estación base.**

### 1.2 Estación móvil

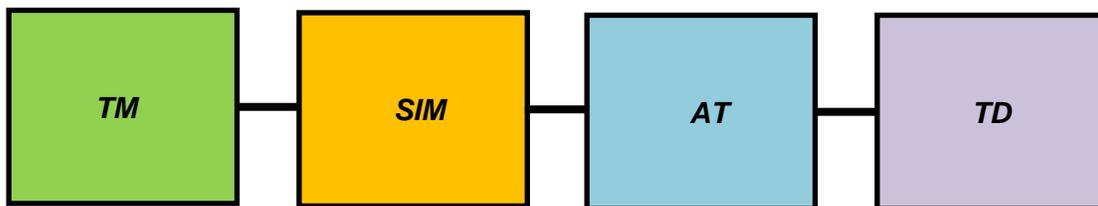
Una terminal móvil o estación móvil (MS, Mobile Station por sus siglas en inglés), es el dispositivo que emplea un usuario para generar una conexión a una red. La diferencia fundamental entre una BS y un MS es que la BS es fija y la MS puede cambiar su

---

ubicación. Algunos ejemplos de MS son las PDA, laptops, teléfonos fijos móviles y celulares.

El MS está compuesto en general de 4 elementos:

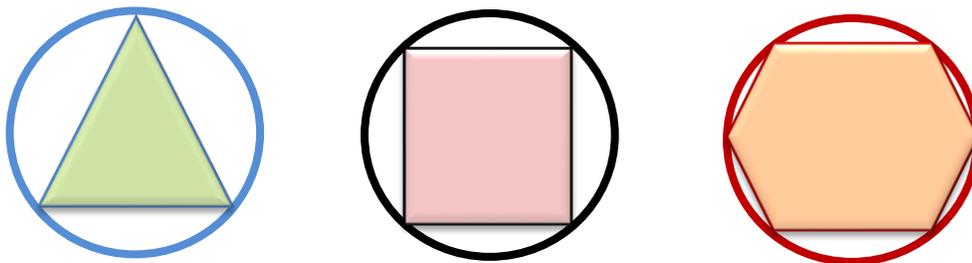
1. El TM es el teléfono móvil.
2. SIM (Subscriber Identity Module, por sus siglas en inglés), permite que el usuario y la TM sean identificados de forma única por medio del número telefónico del abonado y por el número internacional del teléfono.
3. El adaptador terminal (AT), es el elemento de adaptación para la interconexión del teléfono móvil con un equipo.
4. La terminal de datos (TD) permite la transmisión de datos vía GSM.



**Figura 1.2 Elementos de una estación móvil.**

### 1.3 Área de cobertura.

Los sistemas de telefonía celular contienen una área de cobertura la cual es producida debido al alcance del espectro de ondas electromagnéticas generado por las BS debido a la polarización de la antena. La forma ideal del área de cobertura de un sistema de telefonía celular es una circunferencia. Debido a que es una figura geométrica que tiene el mismo alcance de cobertura hacia cualquier dirección. Existen varias formas consideradas para el área de cobertura, las cuales se denominan celdas, mostrándose algunas de estas formas de celdas en la figura 1.3.

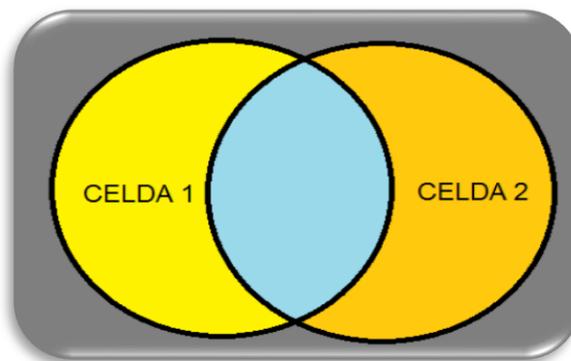


**Figura 1.3 Formas geométricas del área de cobertura.**

---

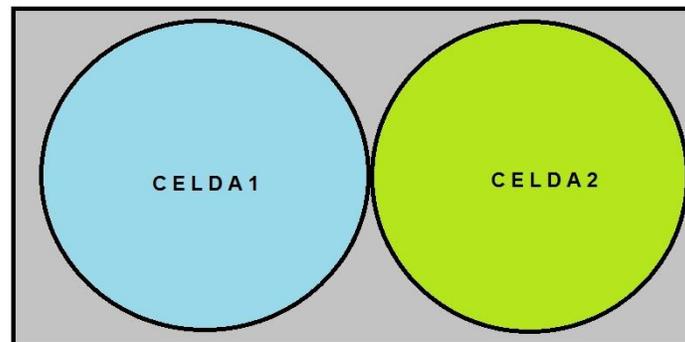
En el caso de las celdas con área circular se tienen algunas desventajas, como la existencia de traslapes entre los espectros de ondas electromagnéticas transmitidos desde las BS, lo cual puede producir una interferencia de canal compartido en el caso en el que ambas celdas tengan en esa área de traslape la misma frecuencia, pudiéndose incluso destruir las señales.

En la figura 1.4 se puede observar que dos celdas circulares, al no mantener control de sus potencias, se llegan a traslapar, generando interferencia en ambas celdas, por lo tanto en el área de color azul se puede ver dicha interferencia, la cual puede producir una destrucción de las señales transmitidas por cada BS.



**Figura 1.4 Interferencia entre celdas circulares.**

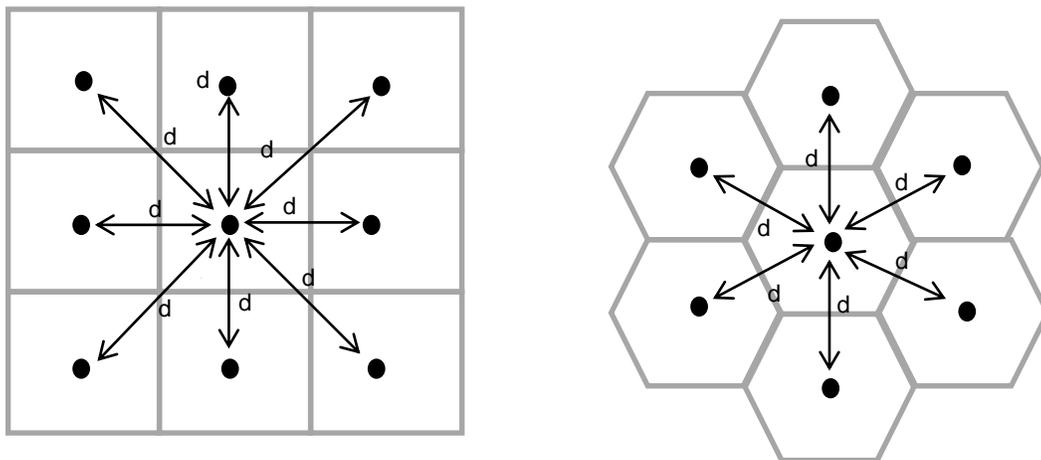
En la figura 1.5, el área de color gris implica que al estar fuera del área de cobertura de una celda, esta no puede proporcionar servicios debido a que no existe señal.



**Figura 1.5 Área de cobertura.**

---

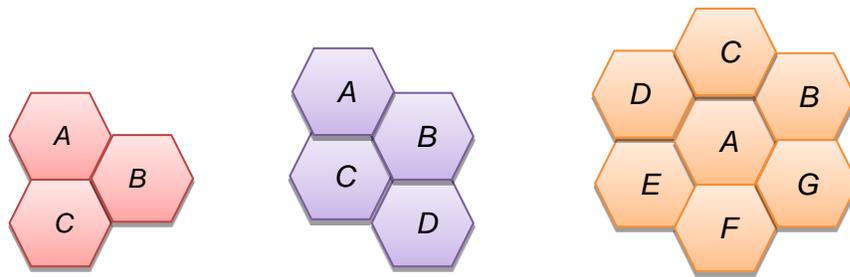
En el caso de usar la figura de un hexágono como celda se pueden tener algunas ventajas, ya que al tener un conjunto de estas mismas celdas se cubre una gran área y se forma un patrón como un panal de abejas, evitándose interferencias entre estaciones base. Otra ventaja es que la distancia que hay entre una BS hacia otra BS siempre será la misma sin importar la dirección que se tome a diferencia de lo que se tiene con celdas de tipo cuadradas, como se muestra en la figura 1.6, lo cual complica el mantener un control en el nivel de potencia de la señal. Al conjunto de celdas se le conoce como clúster.



**Figura 1.6 Comparación geométrica de celdas.**

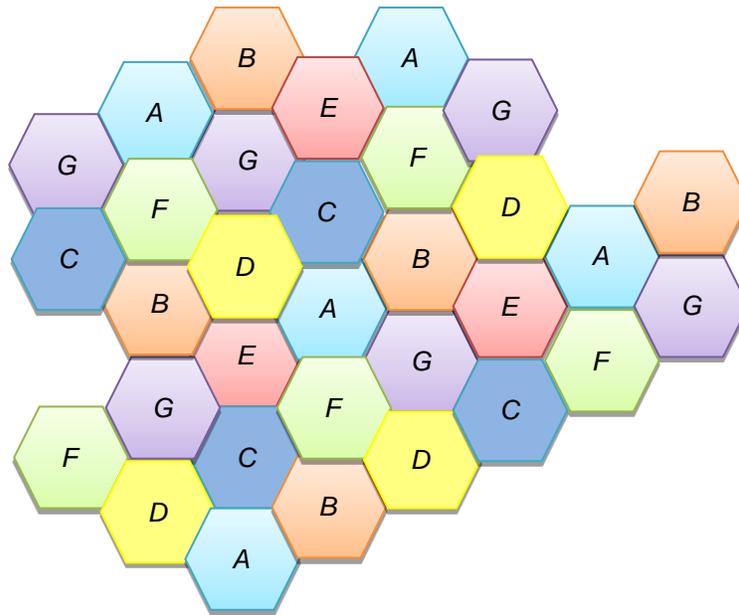
Cada celda contiene una BS en la parte central, y este debe de transmitir a ciertos niveles de potencia para evitar interferencia hacia otras celdas. En la figura 1.6 el punto negro que se observa en el centro de cada figura es una BS.

En la figura 1.7 podemos observar algunos ejemplos de tamaños de clúster de 3, 4 y 7 celdas. La principal característica y función de un clúster es realizar un plan de reuso de frecuencias, por lo que cada celda tiene un conjunto de frecuencias diferentes, se puede observar que cada hexágono tiene una letra diferente, la cual involucra un rango de frecuencias para cada área.



**Figura 1.7 Ejemplos de clúster.**

Las celdas que contienen letras iguales indican que se utiliza la misma banda de frecuencias; para cubrir una mayor área es necesario agrupar un conjunto de clústers para así formar una macrocelda, como se puede ver en la figura 1.8.



**Figura 1.8 Despliegue de macrocelda usando clústers de 7 celdas.**

#### 1.4 Reúso de frecuencias.

El reuso de frecuencias consiste en dar servicio a grupos de usuarios a través de asignar las mismas frecuencias a varias celdas, de tal forma que entre cada celda de un clúster formado se tenga diferente rango de frecuencias para asignar servicios, es decir, las celdas que pertenecen a un clúster tienen las mismas frecuencias que son utilizadas por

---

otras celdas en otro cluster. Cada celda esta diseñada para que dentro de sus límites pueda transmitir cierto grupo de frecuencias y estas frecuencias pueden ser utilizadas en otras celdas, (en otros clústers), las cuales son llamadas co-canal. A las celdas que usan el mismo conjunto de frecuencias disponibles en forma colectiva, se les llama grupo.

El problema que se llega a generar si no se mantiene un control en el reuso de frecuencias son las interferencias que pueden llegar a generar los grupos de celdas vecinas.

## **1.5 Ruido e interferencia.**

Podemos distinguir al ruido de la interferencia ya que el ruido es una señal que no transporta información alguna, el cual corrompe a una señal de información; la interferencia también puede llegar a corromper una señal de información, pero a diferencia del ruido las interferencias transportan información de otros sistemas de comunicaciones.

### **1.5.1 Tipos de ruido e interferencias.**

#### **Ruido interno.**

El ruido Interno se genera principalmente en los dispositivos como consecuencia de su naturaleza física. Un ejemplo de este tipo de ruido es el ruido térmico, que es generado por la vibración de los electrones, el cual es modelado matematicamente como un ruido AWGN (Aditive White Gaussian Noise, por sus siglas en inglés). El ruido AWGN es el predominante en los sistemas de comunicaciones que usan medios guiados.

#### **Ruido externo.**

Se produce por fuentes electromagnéticas naturales aleatoriamente distribuidas por el universo.

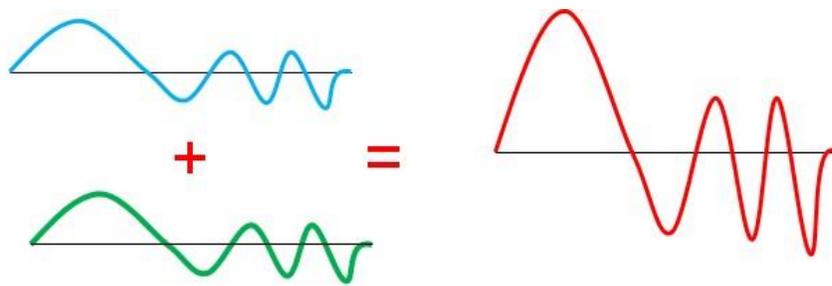
Los principales son:

- Ruido cosmico: es producido por las reacciones solares y de otras galaxias.
- Ruido atmosferico: generado por las condiciones ambientales, ya sean rayos, lluvia, temperatura, humedad, presión atmosférica.

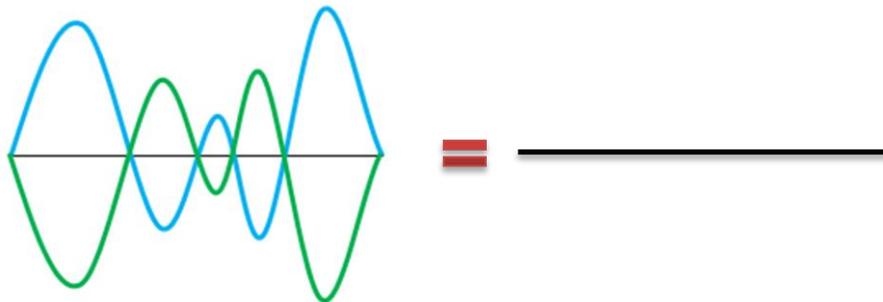
---

### Interferencia constructiva y destructiva.

Para que exista una interferencia constructiva se deben tener dos o más señales con la misma fase, con lo que se sumarán las señales para formar una señal resultante como se muestra en la figura 1.9. En el caso de que las ondas tengan un desfase de 180 grados se producirá una diferencia entre las señales y de esta forma se atenúa o incluso elimina por completo la señal de información; a esto se le llama interferencia destructiva, como se ilustra en la figura 1.10 donde las señales azul y verde tienen la misma amplitud pero están desfasadas 180 grados, lo que produce que se eliminen entre ellas.



**Figura 1.9 Interferencia constructiva entre dos señales.**



**Figura 1.10 Destrucción de señales de la misma amplitud con desfase de 180.**

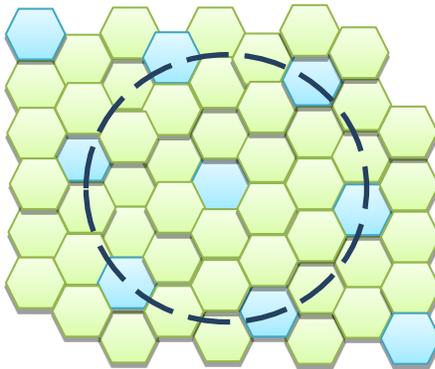
### Interferencia co-canal e interferencia de canal adyacente.

Para las interferencias celulares tenemos una clasificación de dos tipos de interferencia: co-canal y la interferencia de canal adyacente.

---

### **Interferencia co-canal**

Esta interferencia es producida debido a que en una cierta área geográfica se le asigna a un grupo de celdas un mismo rango de frecuencias lo cual permite la reutilización de frecuencia. Dos celdas que usan el mismo conjunto de frecuencias se llaman celdas por canal compartido y a la interferencia entre ellas se le llama interferencia co-canal. Para reducir la interferencia por canal compartido se deben separar estos canales compartidos una determinada distancia mínima,(ver figura 1.11).



**Figura 1.11 Interferencia co-canal.**

### ***Interferencia de canal adyacente.***

Esta interferencia se presenta cuando las transmisiones de canales adyacentes interfieren entre sí. Es el resultado de filtros imperfectos en los receptores, que permiten la entrada de frecuencias cercanas a la frecuencia a la que esta sintonizada el receptor. Esta interferencia se presenta más cuando el canal adyacente transmite muy cerca del receptor en una unidad móvil, al mismo tiempo que la unidad móvil está tratando de recibir transmisiones de la estación base que se encuentra alejada. A esto se le llama efecto cercano-lejano y se presenta más cuando una unidad móvil está recibiendo una señal débil de la estación base.

### **1.6 Evolución de los sistemas móviles.**

A lo largo de la historia el hombre ha tenido la necesidad de estar comunicado, por lo cual se dio el nacimiento del mercado de las telecomunicaciones en 1854, cuando se inventó el teléfono; las empresas y fabricantes se han mantenido en una continua búsqueda de

---

evolución en sus tecnologías para ofrecer un mejor servicio a los usuarios y poder transmitir información en tiempo real.

Pero en un inicio se presentaban problemas en la comunicación, ya que es necesario estar comunicado en diferentes lugares y que el servicio este disponible cuando exista una movilidad. Por este motivo se presenta la telefonía celular que llega gracias a Martin Cooper en 1973 al realizar el primer radio teléfono, el cual representó una revolución en el mundo de las comunicaciones. Los primeros celulares podían transmitir voz en forma analógica y eran de gran tamaño. El servicio de telefonía móvil proporcionaba servicios mediante potencias altas a una distancia de 80 km y el sistema soportaba 25 canales. Posteriormente se fueron haciendo celdas más pequeñas para optimizar los sistemas de comunicaciones empleando más transceptores.

### **1.6.1 Primera generación de los sistemas celulares (1G).**

La primera generación de teléfonos celulares surge en 1979 con NTT (Nippon Telegraph & Telephone Corp, por sus siglas en inglés) en Japón. Ericsson Radio System al principio de la década de los 80's emite NMT, Teléfono Móvil Nórdico, y en 1983 surge por medio de AT&T el sistema servicio Teléfono Móvil Avanzado (AMPS por sus siglas en inglés, Advanced Mobile Phone System), con una distancia de cobertura de celdas de 10 a 20 km de diámetro. Para los sistemas AMPS los receptores para cada canal operan 45 MHz por arriba del transmisor, por lo cual tenemos la banda de frecuencias de 869 a 894 MHz. La primer generación de teléfonos celulares se caracteriza por contar con una banda de frecuencias que va desde los 800 a los 900 MHz, y se basaba en el acceso múltiple por división de frecuencias (FDMA por sus siglas en inglés, Frequency Division Multiple Access) y la tecnología FM analógica; la calidad de los enlaces de voz era muy baja.

**Tabla 1.1 Primer generación de los sistemas celulares (1G).**

<b>Característica</b>	<b>NMT 900</b>	<b>NMT-450</b>	<b>AMPS</b>
<b>Banda de frecuencia</b>	<b>890-970MHz</b>	<b>450-470MHz</b>	<b>824-849 MHz /869-894 MHz</b>
<b>Ancho de banda</b>	<b>12.5 KHz</b>	<b>25 KHz</b>	<b>30 KHz</b>
<b>Número de canales</b>	<b>1999</b>	<b>200</b>	<b>666 antes 832 después</b>
<b>Modulación</b>	<b>Modulación de Frecuencia (FM)</b>	<b>Modulación de Frecuencia (FM)</b>	<b>Modulación de Frecuencia (FM)</b>
<b>Duplexeado</b>	<b>FDD</b>	<b>FDD</b>	<b>FDD</b>
<b>Técnica de acceso</b>	<b>FDMA</b>	<b>FDMA</b>	<b>FDMA</b>

### 1.6.2 Segunda generación de los sistemas celulares (2G).

Debido a que los sistemas de comunicaciones 1G no eran muy óptimos y solo transmitían voz teniendo una velocidad de transferencia en cuanto a la voz muy lenta surgieron nuevos sistemas telefónicos donde se aumenta la velocidad de transferencia del servicio de voz y se implementa el envío de datos por medio de SMS (por sus siglas en inglés, Short Message Service), así mismo los sistemas de telefonía celular empezaron a ser digitales. A estos sistemas de segunda generación se les conoce como 2G ó como PCS (por sus siglas en inglés, Personal Communications Services).

Uno de los principales estándares que se desplegó en la segunda generación de celulares fue GSM (por sus siglas en inglés, Global System for Mobile communications) en Europa, en el año de 1992, mientras que en Estados Unidos se implementaron las normas IS-54 y IS-95.

GSM usa TDM (por sus siglas en inglés, Time Division Multiplexing), con 200 KHz.

Los sistemas IS-54 y IS-95 se basan en TDMA (por sus siglas en inglés, Time Division Multiple Access) y CDMA (por sus siglas en inglés, Coding Division Multiple Access); IS-54 fue creado en 1990 y su esquema esta basado en FDMA/TDMA con 30 KHz espacio por canal, con una tasa de bits de 48.6 kb/s, y usa un control de canal analógico. En Marzo de 1992, la tecnología CDMA fue adoptada como IS-95 y la velocidad de datos es de 1.2288 Mchips/s. En la tabla 1.2 podemos ver las características de los sistemas de telefonía móvil 2G.

**Tabla 1.2 Características de los sistemas celulares 2G.**

<b>Sistema</b>	<b>GSM</b>	<b>IS-54</b>	<b>IS-95</b>
<b>Banda base ascendente</b>	800-915 MHz	824-849 MHz	824-849 MHz
<b>Banda descendente</b>	935-969 MHz	869-894 MHz	869-894 MHz
<b>Duplexado</b>	FDD	FDD	FDD
<b>Técnica de acceso al medio</b>	FDMA/TDMA	FDMA/TDMA	FDMA/CDMA
<b>Capacidad del canal</b>	200 KHz	30 KHz	1250 KHz
<b>Tasa de transmisión</b>	270.8 Kbps	49.6 Kbps	1228 Kbps
<b>Canales por portadora</b>	8	3	-

GPRS (por sus siglas en inglés, General Packet Radio Services). A menudo se describe como "2.5 G", es decir, una tecnología entre 2G y 3G. Envía datos a una velocidad de hasta 114 Kbps. El usuario puede utilizar el teléfono móvil y el ordenador de bolsillo para navegar por Internet, enviar y recibir correo, y descargar datos y soportes. Permite realizar videoconferencias y utilizar mensajes. Además, puede emplearse como conexión para el ordenador portátil u otros dispositivos móviles.

### **1.6.3 Tercera generación de los sistemas celulares (3G).**

En el proceso de tener un mejor sistema de telefonía móvil llega la tercer generación de sistemas móviles con un mejor desempeño en la transferencia de información, con una máxima tasa de 2 Mbps para interiores, y con 384 Kbps para exteriores. La 3G tenía compatibilidad entre los sistemas 2G, así como servicios de voz, datos y el acceso de forma inalámbrica a internet y aplicaciones multimedia; la tercer generación se basó en el uso de grupos de trabajo.

El estándar IS-95 tuvo su evolución y fue llamado CDMA2000 por la comunidad CDMA, el cual forma parte del proyecto 3GPP2 en 1999. CDMA2000-1X fue la primer evolución de IS-95 como la interfaz MT-2000, donde el término 1X implica que utiliza el mismo ancho de banda de 1.25MHz que IS-95.

EV-DO fue diseñado para ser un sistema asimétrico para proporcionar tasas del enlace de bajada de hasta 2.4 Mbps y tasas de subida de hasta 153 Kbps. La diferencia de los valores de las tasas se debe a que es mayor la descarga de datos multimedia, mientras que los datos que se suben a internet no son muchos. Este sistema utiliza los esquemas

de modulación QPSK y 16 QAM, y dependiendo de que esquema de modulación esté utilizando la tasa de los usuarios varia desde 38.4 Kbps hasta 2457.6 Kbps.

W-CDMA es una tecnología perteneciente al estándar 3GPP release 99, la cual hace uso de una técnica de espectro expandido, por lo tanto utiliza canales cuyo ancho de banda es mucho mayor que la de los datos a transferir. En lugar de cada conexión se concedió una banda de frecuencia lo suficientemente ancha como para acomodar la velocidad de datos máxima prevista.

Acceso de Paquetes de Alta Velocidad o HSPA (por sus siglas en inglés, High-Speed Packet Access) es el término usado para referirse a la combinación de dos mejoras por 3GPP para UMTS-WCDMA: la primer mejora se tiene para una alta velocidad en el enlace de bajada HSDPA (por sus siglas en inglés, High-Speed Downlink Packet Access) introducido en 2002, la segunda mejora HSUPA, (por sus siglas en inglés, High-Speed Uplink Packet Access), fue introducida en 2004.

**Tabla 1.3 Tercer generación de sistemas celulares (3G).**

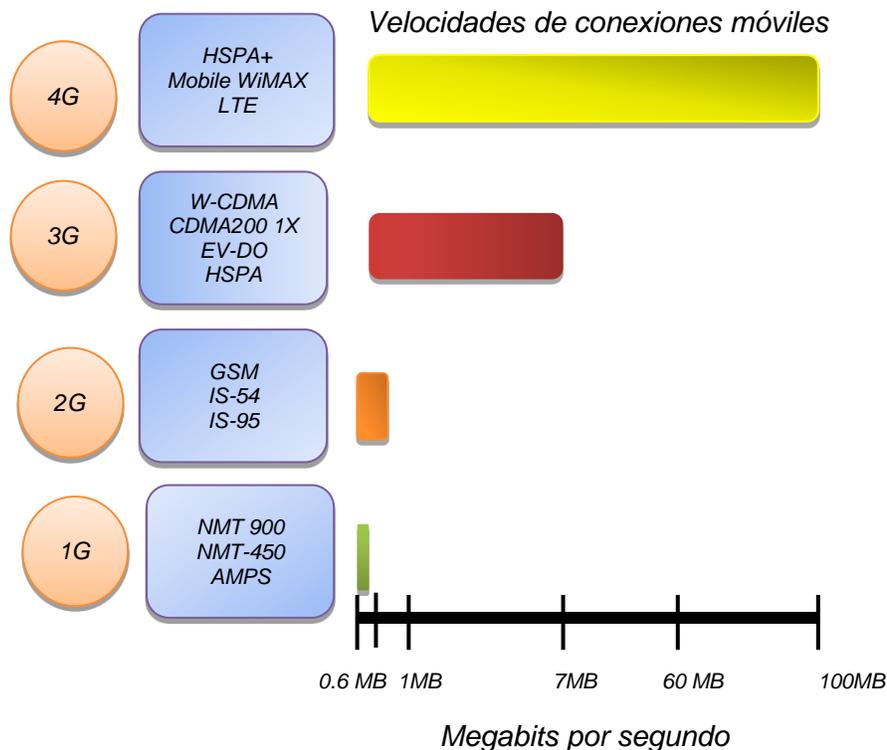
	<b>W-CDMA</b>	<b>CDMA200 1X</b>	<b>EV-DO</b>	<b>HSPA</b>
<b>Estándar</b>	3GPP release 99	3GPP2	3GPP2	3GPP release 5/6
<b>Banda de frecuencia</b>	850/900 MHz 1.8/1.9/2.1GHz	450/850 MHz 1.7/1.9/2.1 GHz	450/850 MHz 1.7/1.9/2.1 GHz	850/900 MHz 1.8/1.9/2.1 GHz
<b>Ancho de Banda del canal</b>	5 MHz	1.25 MHz	1.25 MHz	5MHz
<b>Tasa de datos pico</b>	384-2048 Kbps	307 kbps	DL:2.4-4.9 Mbps UL:800-1800 kbps	DL:3.6-14.4Mbps UL:2.3-5 Mbps
<b>Tasa de usuario</b>	150-300 Kbps	120-200 Kbps	400-600Kbps	500-700 Kbps
<b>Retardo en el Plano de Usuario</b>	100-200 ms	500-600 ms	50-200 ms	70-90 ms
<b>Acceso Múltiple</b>	CDMA	CDMA	CDMA/TDMA	CDMA/TDMA
<b>Duplexaje</b>	FDD	FDD	FDD	FDD
<b>Modulación de datos</b>	DS-SS:QPSK	DS-SS: BPSK,QPSK	DS-SS: QPSK,8PSK y 16QAM	DS-SS:QPSK, 16QAM y 64QAM

#### 1.6.4 Cuarta generación de los sistemas celulares (4G).

La tecnología 4G o de cuarta generación es hasta ahora el último avance que se puede encontrar en telefonía móvil. Esta tecnología incluye técnicas de avanzado rendimiento, como MIMO y SDR. SDR (por sus siglas en inglés, Software-Defined Radio). SDR se trata de una interfaz de radio definida por software, donde los componentes electrónicos que usualmente utiliza el radioenlace son establecidos mediante software y controlados mediante una PC.

La tecnología 4G optimiza la tasa de transmisión hasta 100 Mbps en movimiento, a diferencia de 3G que manejaba 384 kbps, y hasta 1 Gbps en interiores, donde 3G manejaba 2Mbps. De esta forma se puede ver una gran diferencia entre las velocidades de transferencia entre las generaciones 3G y 4G. Algunas de las tecnologías que maneja 4G es Wimax, LTE y LTE Advance.

LTE Advance es la décima versión de LTE, la cual si cumple con la velocidad del enlace de bajada a 1 Gbps, a diferencia de LTE que alcanza velocidades de 128 Mbps.



**Figura 1. 12 Comparación de velocidades en conexiones móviles.**

La tecnología que es el emblema de la cuarta generación es LTE (por sus siglas en inglés, Long Term Evolution). LTE permite que todos los servicios, incluida la voz, sean soportados por el protocolo IP y utiliza el protocolo IPv6. Esta tecnología sirve para mejorar el estándar UMTS, aumentando la eficiencia, reduciendo costos, ampliando y mejorando los servicios ya prestados, permitiendo una mayor integración con los protocolos ya existentes. LTE contempla también el acceso a sus servicios a través de UMTS y GSM.

**Tabla 1.4 Cuarta generación de los sistemas de telefonía celular (4G).**

	<b>HSPA+</b>	<b>Mobile WiMAX</b>	<b>LTE</b>
<b>Estandar</b>	<b>3GPP</b>	<b>IEEE 802.16e-2005</b>	<b>3GPP</b>
<b>Banda de Frecuencias</b>	<b>859/900 MHz, 1.8/1.9 GHz</b>	<b>2.3 GHz, 2.6 GHz y 3.5 GHz</b>	<b>700 MHz, 1.7/2.1 GHz, 2.6 GHz, a.5 GHz</b>
<b>Ancho de banda del canal</b>	<b>5 MHz</b>	<b>5, 7, 8.75 y 10 MHz</b>	<b>1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz</b>
<b>Tasa de datos pico para el enlace de subida</b>	<b>11.5 Mbps</b>	<b>7 Mbps (10MHz, 3:1 DL para UL, radio TDD) 4 Mbps con 1:1</b>	<b>75 Mbps (2 x2 MIMO, 20MHz)</b>
<b>Tasa de datos pico para el enlace de bajada</b>	<b>28-42 Mbps</b>	<b>46 Mbps (10MHz, 2 x 2 MIMO, 3:1 DL para UL radio TDD); 32Mbps con 1:1</b>	<b>150 Mbps (2x2 MIMO)</b>
<b>Retardo en el plano de usuario</b>	<b>10-40 ms</b>	<b>15-40 ms</b>	<b>5-15 ms</b>
<b>Tamaño de trama</b>	<b>2 ms trama</b>	<b>5 ms trama</b>	<b>1ms sub-trama</b>
<b>Acceso múltiple para el enlace de bajada</b>	<b>CDMA/TDMA</b>	<b>OFDMA</b>	<b>OFDMA</b>
<b>Acceso múltiple para el enlace de subida</b>	<b>CDMA/TDMA</b>	<b>OFDMA</b>	<b>SC-FDMA</b>
<b>Duplexaje</b>	<b>FDD</b>	<b>TDD y FDD</b>	<b>FDD y TDD</b>
<b>Modulación de datos</b>	<b>DS-SS: QPSK, 16QAM y 64QAM</b>	<b>OFDM: QPSK, 16QAM y 64QAM</b>	<b>OFDM: QPSK, 16QAM y 64QAM</b>
<b>Codificación de canal</b>	<b>Turbo códigos, tasa 3/4, 1/2, 1/4</b>	<b>Convolucionales, turbo códigos, RS, tasa 1/2, 2/3, 3/4, 5/6</b>	<b>Convolucionales y turbo código, tasa 78/1024 hasta 948/1024</b>
<b>MIMO</b>	<b>Diversidad de Tx, multiplexaje espacial, Beamforming</b>	<b>Beamforming, Diversidad de Tx multiplexaje espacial</b>	<b>Diversidad de Tx, Multiplexaje espacial 4 X 4 MIMO enlace de subida multi usuarios</b>

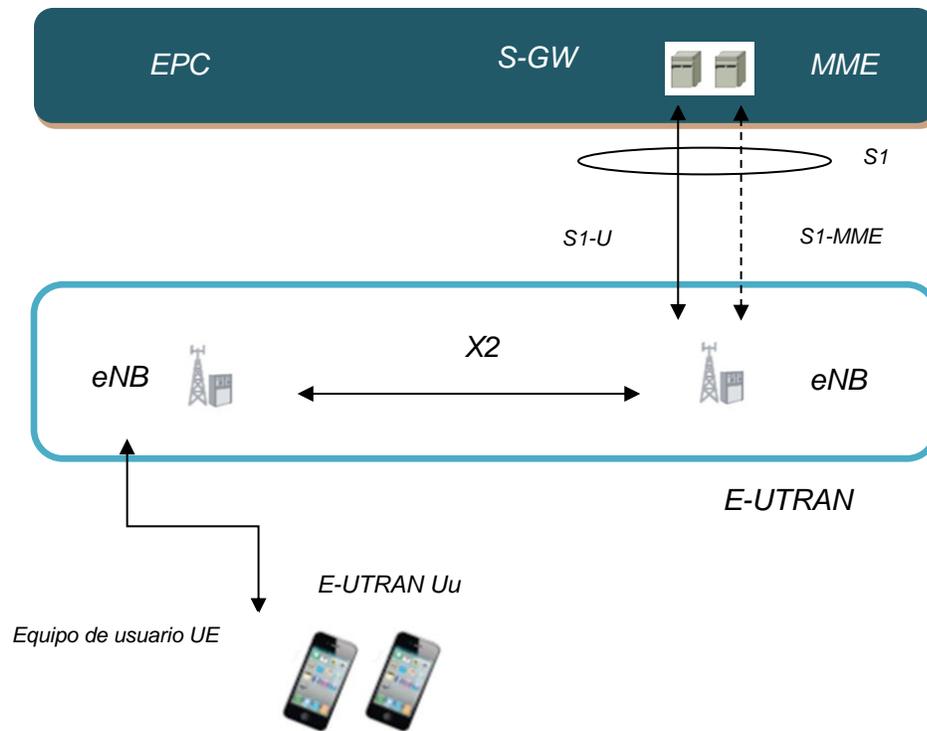
---

## 1.7 Arquitectura básica de una red LTE.

LTE es una tecnología que posee características superiores a las generaciones anteriores, que le permiten tener un desempeño insuperable en el acceso inalámbrico de banda ancha móvil. Su arquitectura está conformada básicamente por un núcleo de Red (CN), y la red de acceso evolucionada (E-UTRAN). LTE evolucionó tanto la red de acceso de radio como el núcleo de red que es el encargado de las funciones no relacionadas con la interfaz radio, pero necesarias para proveer una red móvil de banda ancha completa. Esta red núcleo presenta una nueva arquitectura de red conocida como EPC (por sus siglas en inglés, Evolved Packet Core). En la figura 1.13, se muestra de forma simplificada la arquitectura completa del sistema LTE. Los componentes fundamentales del sistema LTE son, por un lado, la nueva red de acceso EUTRAN, por el otro el nuevo dominio de paquetes EPC de la red.

La arquitectura de la red de acceso se compone de una única entidad de red denominada eNB (por sus siglas en inglés, evolved NodeB), que constituye la estación base de E-UTRAN. Por tanto, la estación base E-UTRAN integra toda la funcionalidad de la red de acceso.

Como se muestra en la figura 1.13, una red de acceso E-UTRAN está formada por eNBs que proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario y la red troncal EPC. Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu , S1 y X2.



**Figura 1.13 Arquitectura básica de una red LTE.**

La interfaz E-UTRAN Uu, también denominada LTE Uu o simplemente interfaz de radio LTE, permite la transferencia de información por el canal de radio entre el eNB y los equipos de usuario. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operación de la interfaz E-UTRAN Uu se implementan en el eNB.

El eNB se conecta a la red troncal EPC a través de la interfaz S1. Dicha interfaz está desdoblada en realidad en dos interfaces diferentes: S1-MME para sustentar el plano de control y S1-U como soporte del plano de usuario.

El plano de usuario se refiere a la torre de protocolos empleada para el envío de tráfico de usuario a través de dicha interfaz (paquetes IP del usuario que se envían entre E-UTRAN y EPC a través de S1-U). Por otro lado, el plano de control se refiere a la torre de protocolos necesaria para sustentar las funciones y procedimientos necesarios para gestionar la operación de dicha interfaz o de la entidad correspondiente.

Esta separación entre plano de control y plano de usuario en la interfaz S1 permite realizar la conexión del eNB con dos nodos diferentes de la red troncal.

---

Así, mediante la interfaz S1-MME, el eNB se comunica con una entidad de red de la EPC encargada únicamente de sustentar las funciones relacionadas con el plano de control; dicha entidad de red de la red troncal EPC se denomina MME (por sus siglas en inglés, Mobility Management Entity). Otra característica fundamental de la interfaz S1 es que contempla también el acceso a sus servicios a través de UTRAN y GERAN, así como mediante la utilización de otras redes de acceso que no pertenecen a la familia 3GPP (CDMA2000, Mobile WiMAX, redes 802.11, etc.).

Por otra parte, mediante la interfaz S1-U, el eNB se comunica con otra entidad de red encargada de procesar el plano de usuario, la cual se denomina S-GW (por sus siglas en inglés, Serving Gateway).

Opcionalmente, los eNBs pueden conectarse entre sí mediante la interfaz X2. A través de esta interfaz, los eNB se intercambian tanto mensajes de señalización destinados a permitir una gestión más eficiente del uso de los recursos radio (información para reducir interferencias entre eNBs), así como tráfico de los usuarios del sistema cuando estos se desplazan de un eNB a otro durante un proceso de handover.

Como se ha comentado anteriormente, en la descripción general de la arquitectura de E-UTRAN, el eNB integra todas las funciones de la red de acceso. Por ello, en el eNB terminan todos los protocolos específicos de la interfaz de radio. Mediante dichos protocolos, el eNB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia y desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz de radio. Sin duda, la funcionalidad clave de un eNB consiste en la gestión de los recursos de radio. Un eNB puede gestionar una o varias celdas [1].

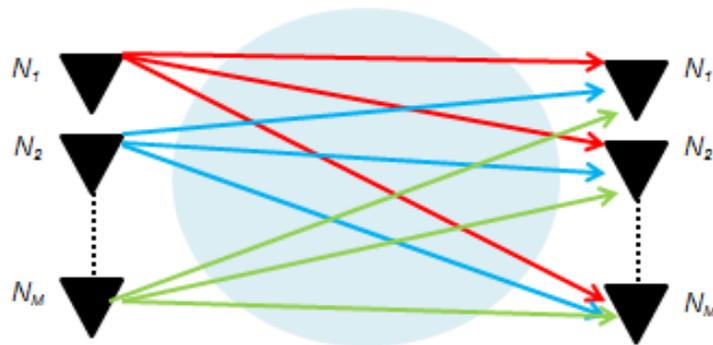
---

## 1.8 Tecnologías importantes en una red LTE.

### 1.8.1 Esquemas de múltiples antenas (MIMO).

Una técnica avanzada para el control del desvanecimiento de señales de radio, los cuales son problemas asociados por efectos de la propagación multitrayectoria, y la mitigación de la interferencia co-canal en sistemas móviles, son los sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO- Múltiple Inputs Múltiple Outputs), los cuales buscan mejorar el desempeño de los sistemas inalámbricos, mediante la utilización de técnicas de diversidad espacial, multiplexaje espacial y de formación de haz.

El esquema básico de un sistema MIMO consiste en la utilización de  $N$  antenas transmisoras y  $M$  antenas receptoras, para un mismo ancho de banda y potencia de transmisión, las cuales trabajan de forma coordinada con el fin de optimizar el rendimiento del canal de transmisión en términos de tasa de bit y propagación multicamino.



**Figura 1.142 Esquema de un sistema MIMO.**

---

### **1.8.2 Técnicas de acceso al medio.**

OFDMA (por sus siglas en inglés, Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), consiste en dividir el canal en un conjunto de subportadoras las cuales se repartirán en grupos dependiendo de los servicios que requiera cada usuario. Esta técnica de acceso es utilizada para el enlace descendente y para el enlace ascendente LTE utiliza SC-FDMA (por sus siglas en inglés, Single Carrier Frequency Division Multiple Access).

### **1.8.3 Adaptabilidad del enlace**

La adaptabilidad del enlace consiste en ajustar la modulación, codificación y otros parámetros y protocolos de la señal en base a las condiciones en las que se encuentre el enlace de radio.

---

## Capítulo II Estudio de los esquemas de modulación digital.

La modulación representa un conjunto de técnicas las cuales se utilizan para transportar información por medio de una onda portadora. En este capítulo se mencionan algunas técnicas que son de suma importancia para llevar a cabo el proceso de modulación digital, asimismo, se presentan conceptos que son fundamentales para entender como es que la propagación de señales en el espacio libre se ve afectada.

### 2.1 Forma general de un sistema de comunicaciones digitales.

La Figura 2.1 es un diagrama de bloques que contiene los elementos fundamentales de un sistema de comunicaciones digitales. La fuente de información puede ser analógica o digital.

La misión del bloque denominado codificación de fuente es la de representar la información de fuente con la menor cantidad de bits posible; es por ello que en ocasiones se habla de compresión de la información. Para lograr este propósito el codificador de fuente elimina la redundancia presente en la señal a su entrada. Cuanta más redundancia, mayor compresión se puede alcanzar.

El bloque denominado codificación de canal protege los bits resultantes de la compresión, contra errores producidos en el canal. Es fácil entender que cuanto más redundancia se haya eliminado más importante será cada bit, en el sentido de que si se recibe erróneamente, sus efectos se propagarán cuando se descomprima la señal recibida. Los bits se protegen en el codificador de canal añadiendo redundancia, la cual esta destinada a evitar que se produzcan errores en el canal.

La secuencia de bits que sale del codificador de canal debe ser ahora transformada en formas de onda que se adapten a las características del canal.

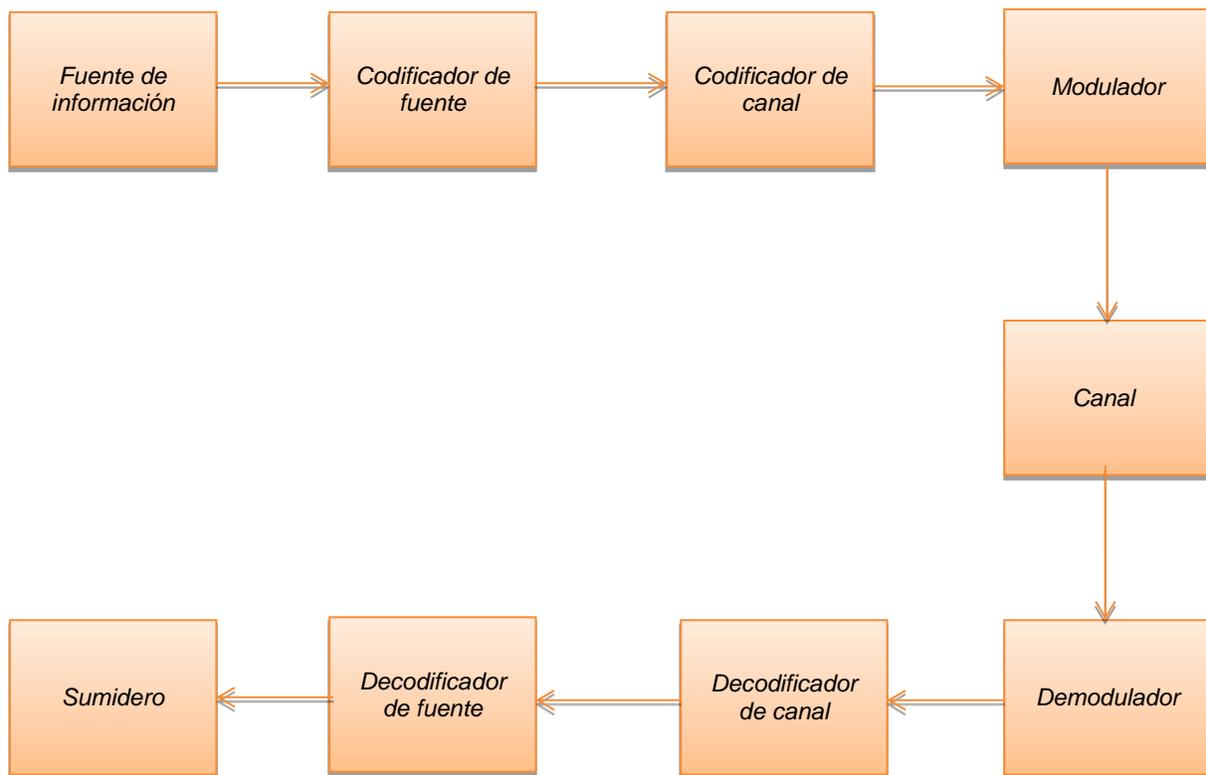
El cometido del modulador digital es hacer corresponder las formas de onda de un conjunto finito y discreto con los bits que se tienen a su entrada.

El canal corresponde con al medio físico sobre el que transmitimos la señal que sale del modulador. Por ejemplo, el canal puede ser el cable de pares de la línea telefónica, o el espacio libre en el caso de señales de radio.

Los bloques de la figura denominados demodulador digital, decodificador de canal y decodificador de fuente simplemente realizan las funciones inversas al modulador digital, codificador de canal y codificador de fuente, respectivamente. Por ejemplo, el

---

demodulador digital debe convertir la forma de onda recibida en un grupo de bits, para lo que suele buscar aquella forma de onda transmitida que más se parece a la recibida. Por lo que respecta al bloque denominado sumidero, éste implica la vuelta al dominio analógico en aquellos casos en que la señal a transmitir es de esta naturaleza, y la presentación o almacenamiento en aquellos casos en que la fuente es digital. Los bloques codificador de fuente, codificador de canal y modulador componen el transmisor, mientras que el demodulador, el decodificador de canal y el decodificador de fuente componen el receptor [2].



**Figura 2.1 Diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones digitales.**

---

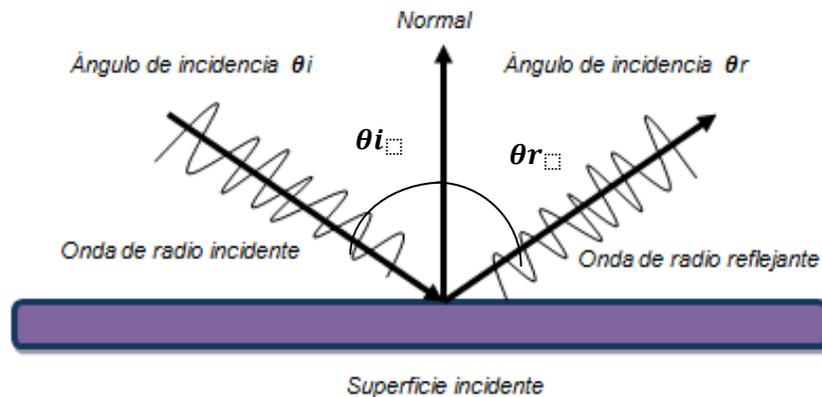
## 2.2 Características de la propagación en el espacio libre.

Todo sistema de telecomunicación se debe diseñar para que en el receptor se obtenga una mínima SNR que garantice su funcionamiento. Los fenómenos de reflexión, refracción, difracción, dispersión y distorsión son de suma importancia para las comunicaciones inalámbricas.

### 2.2.1 Fenómenos De Reflexión, Refracción, Difracción, Dispersión y Distorsión.

#### Reflexión

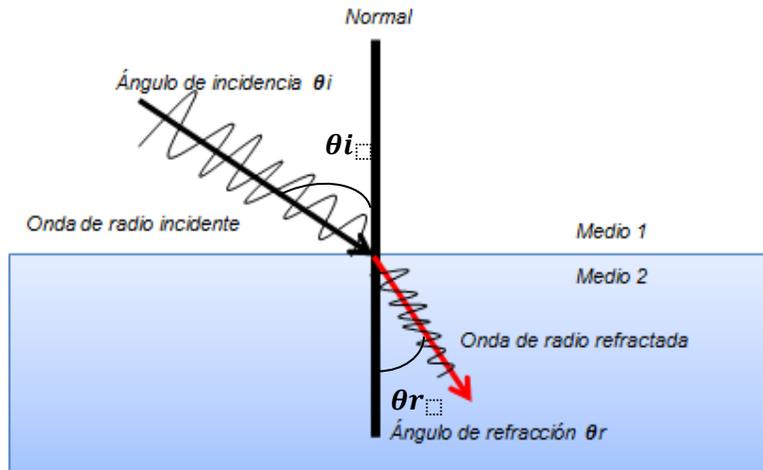
La reflexión es un fenómeno físico que se refiere al choque de la onda electromagnética contra un objeto, el cual no absorbe la onda incidente, de tal manera que al momento de que la onda de radio incidente golpea al objeto, esta se refleja y se transmite en el mismo medio. El ángulo que forma la onda reflejante con la superficie del objeto es exactamente el mismo que el de la onda incidente. (ver figura 2.2).



**Figura 2.2 Reflexión.**

#### Refracción.

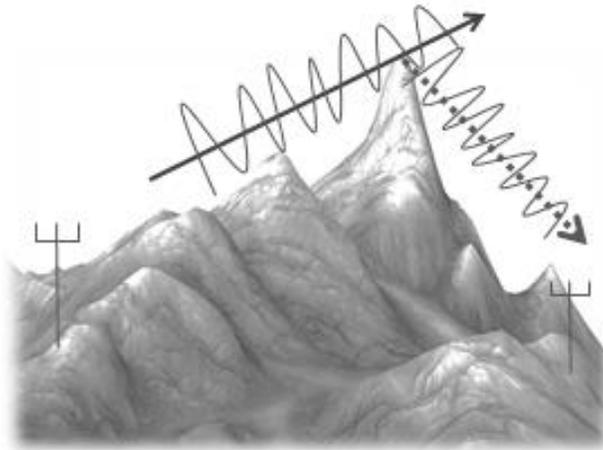
Se define como la desviación en la trayectoria de una onda de radio cuando atraviesa de un medio a otro con una densidad distinta. Un ejemplo claro en las comunicaciones inalámbricas sucede cuando las ondas atraviesan las distintas capas de la atmósfera variando su trayectoria en un cierto ángulo. (ver figura 2.3)



**Figura 2.3 Refracción.**

### **Difracción.**

Este fenómeno se presenta cuando la onda de radio viaja cerca de obstáculos o bordes afilados. La zona oculta a la antena transmisora se denomina la zona de difracción. En esta zona los campos no son nulos debido a la difracción causada por el obstáculo y, por tanto, es posible la recepción, si bien con atenuaciones superiores a las del espacio libre (ver figura 2.4). La tierra y sus irregularidades pueden impedir la detección de la señal entre antena transmisora y receptora en algunas ocasiones.



**Figura 2.4 Difracción en la cima de una montaña.**

---

## **Dispersión**

Ocurre cuando la onda de radio transmitida en el espacio impacta una superficie rugosa o áspera u objetos pequeños en comparación con la longitud de onda, ocasionando que la energía reflejada se disperse hacia varias direcciones.

## **Distorsión de la señal**

Se presenta cuando la señal originalmente transmitida es alterada en amplitud, frecuencia y/o fase.

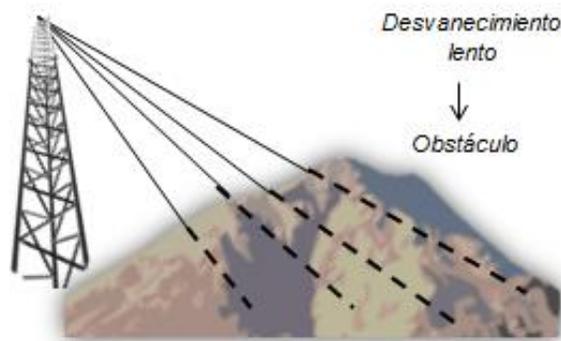
### **2.2.2 Desvanecimientos de la señal.**

El desvanecimiento es un término también denominado atenuación no constante, ya que en las transmisiones de ondas electromagnéticas, la señal desaparece de forma transitoria, recuperándose en el receptor por medio de un control automático de ganancia, el cual, consiste en aumentar la potencia de una señal recibida de manera que el receptor mida la fuerza de la señal entrante; si las señales son detectadas como débiles se nos brindará más ganancia, y por el contrario, si la fuerza de la señal es fuerte el receptor adapta la señal a modo que se reciba una ganancia adecuada. Este fenómeno se manifiesta cuando la intensidad de señal en la entrada del receptor se reduce debido a réplicas de las señales producidas por las diferentes fenómenos de propagación presentes en el espacio libre, ya sean reflexiones, dispersión y difracciones que ocurren durante el trayecto de la señal, debido a la presencia de varios obstáculos.

### **Desvanecimientos lentos.**

Las pérdidas por configuración del terreno (ondulación del terreno y la interposición de objetos entre las antenas), llamadas también desvanecimientos lentos, resultan del entorno que rodea a cada emisor y receptor; estas pérdidas tienen una variación temporal lenta.

El desvanecimiento lento se debe a la presencia de algún obstáculo de grandes dimensiones, es decir, son provocados por zonas de sombra que impiden la visión directa entre el emisor y receptor. Esto contribuye con una atenuación adicional que se suma a las pérdidas por distancia. La duración real del desvanecimiento lento está sujeta a la velocidad de desplazamiento del terminal móvil [3]. Ver figura 2.5.



**Figura 2. 5 Desvanecimiento lento.**

### **Desvanecimiento rápido.**

En un entorno de comunicaciones móviles, la señal recibida en un instante y lugar es la resultante de la suma de todas las trayectorias provocadas por las reflexiones, difracciones y dispersiones del frente de onda en los objetos cercanos en dirección a la antena receptora. Cada uno de los rebotes incide con una amplitud y fase distinta, presentando un retardo distinto. Sin embargo, si los objetos están muy próximos a la antena receptora la diferencia entre los distintos retardos es despreciable comparada con la duración del símbolo de la señal digital. No obstante, en general el efecto de retardos distintos implica que la señal incide en la antena receptora con fases totalmente distintas. Como se puede apreciar en la figura 2.6 cada una de las reflexiones que se producen introducen un retardo adicional diferente, debido a que recorren distintas distancias [3].



**Figura 2. 6 Desvanecimiento rápido.**

---

## 2.3 Métricas de calidad de la señal de comunicaciones.

### Relación Señal a Ruido.

La SNR (por sus siglas en inglés, Signal to Noise Ratio ), se define como la proporción que existe entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia promedio del ruido que la corrompe. Este margen es medido en decibeles. El canal distorsiona la señal y el ruido se acumula a lo largo de la trayectoria, y la intensidad de la señal se degrada mientras que el nivel de ruido aumenta con la distancia desde el transmisor.

La relación, en decibeles, de señal a ruido es:

$$(S/N)_{dB} = 10 \log \left( \frac{P_{señal}}{P_{ruido}} \right) = 10 \log \left( \frac{\langle S^2(t) \rangle}{\langle n^2(t) \rangle} \right) \dots \dots \dots \text{ecuación (2.1)}.$$

Donde:

$S^2(t)$ = Potencia instantánea de la señal.

$n^2(t)$ = Potencia de ruido.

### Relación Señal a Interferencia (SIR).

La relación por ruido e interferencia se define como:

$$SIR = 10 \log \left( \frac{S}{I} \right) \dots \dots \dots \text{ecuación (2.2)}.$$

Donde:

S= Potencia de la señal entrante de interés.

I= Potencia de interferencia de los otras señales en la red.

### Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR).

La SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio, por sus siglas en inglés), se define como la potencia de una cierta señal, entre la suma de las potencias de las interferencias y la potencia de ruido. La ecuación esta dada por:

$$SINR(X) = 10 \log \left( \frac{S}{I+N} \right) \dots \dots \dots \text{ecuación (2.3)}.$$

---

Donde:

S= Potencia de la señal de interés.

I= Potencia de las señales interferentes.

N= Potencia promedio del ruido.

Si la potencia de el ruido de fondo es cero, entonces la SINR se reduce a la relación señal a interferencia (SIR). Por el contrario, si la potencia de interferencia de las otras señales es cero, la SINR se reduce a la SNR.

### **Energía de bit por densidad espectral de ruido ( $E_b/N_0$ ).**

Es un cociente relacionado con la SNR que es más adecuado para determinar las tasas de error y la velocidad de transmisión. Además se usa habitualmente para medir la calidad de las prestaciones de los sistemas de comunicación digital. Este parámetro es el cociente de la energía de la señal por bit entre la densidad de potencia del ruido por hertz,  $E_b/N_0$ .

La calidad de la señal de radio recibida se suele evaluar por la relación:

$$10 \log \left( \frac{E_b}{N_0} \right) = (\text{Energía por bit, } W \cdot s) / (\text{densidad espectral de ruido, W/Hz}).$$

La ventaja del cociente  $E_b/N_0$  sobre la SNR es que esta última depende del ancho de banda [4].

## **2.4 Modulación Digital.**

Modulación digital es la operación mediante la cual las características de una onda denominada portadora, se modifican en función de otra denominada moduladora, que contiene información, para que esta última pueda ser transmitida. El concepto de modulación se basa en poder controlar la variación de alguno de los parámetros (amplitud, frecuencia ó fase) de la señal portadora.

---

La información de la fuente de transmisión original puede ser en forma digital o analógica. Si la información está en forma analógica, se tiene que convertir a pulsos digitales antes de la transmisión; posteriormente la señal digital transmitida se convierte de nuevo a la forma analógica, en el extremo de recepción.

A continuación se presentan las tres técnicas de modulación digital, en su formato binario, que se suelen utilizar para codificar la información en la señal portadora.

#### 2.4.1 Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK).

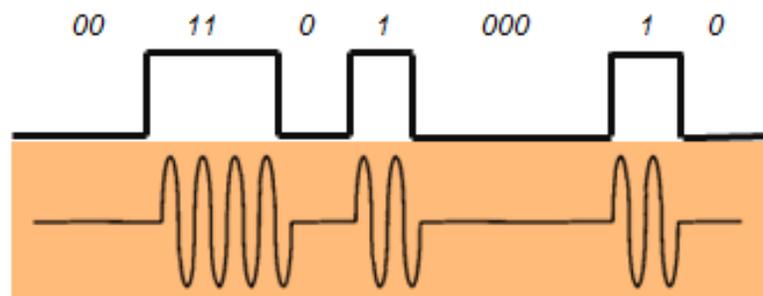
ASK (por sus siglas en Inglés, Amplitud Shift Keying), utiliza dos estados binarios de los datos de entrada, los cuales, son representados por dos diferentes amplitudes de la frecuencia portadora. Para un valor de '0', la señal portadora tiene una amplitud de cero, para un valor de '1', la señal portadora presenta una amplitud máxima constante:

- '0' = Amplitud cero de la portadora
- '1' =  $\text{Acos}(2\pi f t)$  –Amplitud máxima constante de la portadora

Donde:

A= Amplitud de la portadora.

F= Frecuencia de la portadora.

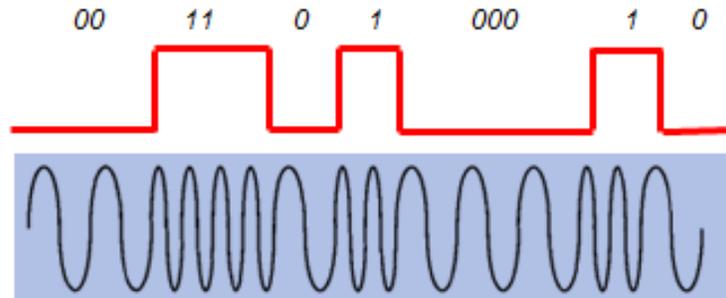


**Figura 2.7 Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK).**

---

### 2.4.2 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK).

Esta técnica de modulación digital, FSK (por sus siglas en inglés, Frequency Shift Keying), utiliza dos estados binarios, los cuales se encuentran representados por dos diferentes frecuencias. Para el estado '0' se tiene una  $f_1$  y para el estado '1' una  $f_2$ .

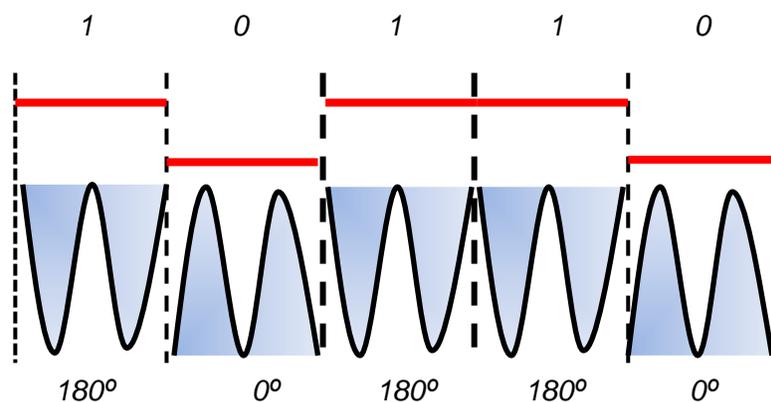


**Figura 2.8 Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).**

### 2.4.3 Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK).

La técnica de modulación PSK (por sus siglas en inglés, Phase Shift Keying) se utiliza en sistemas que requieren velocidades de datos más altas.

PSK mantiene una fase de la frecuencia de portadora para un estado binario '0', y otra fase para el otro estado binario '1'. Las dos fases están separadas idealmente  $180^\circ$  y son detectadas por un detector síncrono, utilizando una señal de referencia en el receptor, que es de la fase conocida con respecto a la señal entrante.



**Figura 2.9 Modulación por desplazamiento de fase (PSK).**

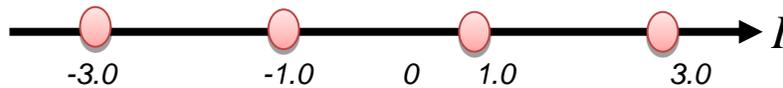
---

La figura 2.9 muestra la manera en que actúa la técnica de modulación PSK; si se quisiera representar un bit ya sea un '1' ó un '0', quien trasmite únicamente debe cambiar la fase de la señal. Para este caso, el estado '0' tiene un deslizamiento de fase de  $0^\circ$  y el estado '1' muestra un desfase de  $180^\circ$ .

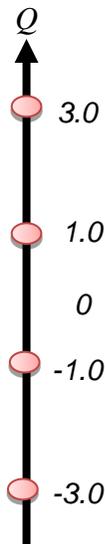
## 2.5 Esquemas de modulación en cuadratura.

La modulación QAM (por sus siglas en inglés, Quadrature Amplitude Modulation) es una técnica de modulación digital.

Este tipo de modulación es una combinación de ASK y PSK. En QAM se aprovecha el hecho de que es posible enviar simultáneamente dos señales diferentes sobre la misma frecuencia portadora, desplazadas entre sí  $90^\circ$ . En el receptor, las dos señales se demodulan, para reproducir la señal binaria de entrada. Estas señales son llamadas componente en fase (I), y componente en cuadratura (Q). En las figuras 2.10 y 2.11 se pueden ver dichas componentes.



**Figura 2.10 Modulación QAM; portadora en fase (I).**

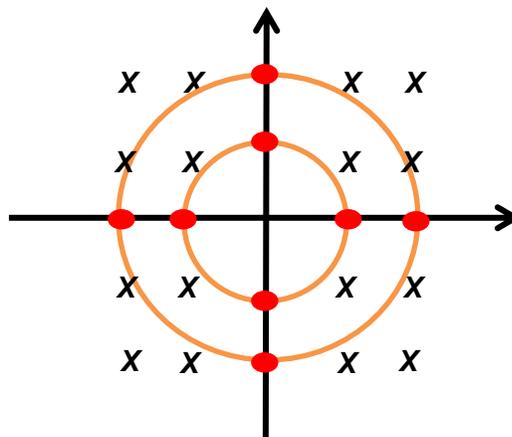


**Figura 2.11 Modulación QAM; portadora en cuadratura (Q).**

La entrada al sistema es una cadena de bits con velocidad igual a R bps. Esta cadena se separa en dos secuencias a R/2 bps cada una, tomando los bits de forma alternante. En el diagrama, (ver figura 2.13), la secuencia de arriba se modula mediante ASK sobre una portadora de frecuencia  $f_c$ ; este procedimiento se lleva a cabo sin más que multiplicar la secuencia por la portadora. Por tanto, un cero binario será representado mediante la ausencia de portadora, mientras que un uno binario se representará mediante la presencia de una señal portadora de amplitud constante. Esta misma portadora se desplaza  $90^\circ$  y, a su vez, se usa para la modulación ASK de la secuencia binaria de abajo. Las dos señales moduladas se suman y, posteriormente, se transmiten. La señal transmitida, por tanto, se puede expresar como:

$$s(t) = d_1(t) \cos 2\pi f_c t + d_2(t) \sin 2\pi f_c t \dots \dots \dots \text{ecuación (2.4).}$$

Si se utiliza un esquema ASK con dos niveles, entonces, cada una de las dos secuencias binarias se podrá representar mediante dos estados, que combinadas dan lugar a una señal con  $(2 \times 2)$  posibles estados de señalización. Esto es, esencialmente, 4QAM. Si se usa ASK con cuatro niveles (esto es, cuatro niveles diferentes de amplitud), entonces la secuencia combinada podrá tomar uno de entre  $(4 \times 4)$  estados. En la práctica, se implementan sistemas con 64, e incluso, 256 estados. Para un ancho de banda dado, cuanto mayor sea el número de estados, mayor será la velocidad de transmisión posible. Desde luego, cuanto mayor sea el número de estados, mayor será la tasa potencial de errores por bit debida al ruido y a la atenuación. La figura 2.12 muestra la combinación de estas dos señales. Esta figura es conocida como el diagrama de constelación.



**Figura 2.12 Constelación cuadrada QAM.**

---

En el diseño de una constelación, se debe prestar atención a:

1. La mínima distancia Euclídiana entre los puntos de señal. Debe ser lo más grande posible en virtud de otras limitaciones, ya que determina la probabilidad de símbolo erróneo de el esquema de modulación.
2. Las diferencias entre fases, debe ser tan grande como sea posible en virtud de otras limitaciones, ya que determina la inmunidad a la fluctuación de fase, por lo que el esquema representa la resistencia contra las imperfecciones de recuperación de reloj y las imperfecciones rotacionales de fase del canal.
3. La potencia promedio de los fasores, debe ser lo más pequeña posible bajo otras limitaciones.
4. La relación de la potencia de pico a promedio de fasores, que es una medida de la robustez contra la distorsión no lineal causada por el amplificador de potencia. Debe ser lo más cercano a la unidad como sea posible en virtud de otras restricciones.
5. La complejidad de la implementación.

La señal QAM puede también escribirse como:

$$S_i = A_i \cos(2\pi f_c t + \theta_i) \dots\dots\dots \text{ecuación (2.5).}$$

La distancia entre elementos de fase es:

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{E_0}{2} [(I_i^2 - I_j^2)^2 + (Q_i^2 - Q_j^2)^2]}, i, j = 1, 2, \dots M \dots\dots\dots \text{ecuación (2.6).}$$

La energía media es:

$$E_{avg} = E \left\{ \frac{E_0}{2} (I_i^2 + Q_i^2) \right\} = \frac{E_0}{2} [E\{I_i^2\} + E\{Q_i^2\}] = E_0 E\{I_i^2\} \dots\dots\dots \text{ecuación (2.7).}$$

La potencia media es:

$$P_{avg} = \frac{E_0}{2} E\{I_i^2\} \dots\dots\dots \text{ecuación (2.8).}$$

### 2.5.1 Modulación 4QAM.

La modulación 4QAM contiene estados, los cuales distinguen cuatro palabras digitales: 00, 01, 10, 11. Los 4 estados corresponden a una determinada fase; el cambio de fase entre uno y otro es de  $90^\circ$ . La figura 2.13 muestra un modulador 4QAM. En la figura 2.14 se observa el diagrama de constelación para 4QAM.

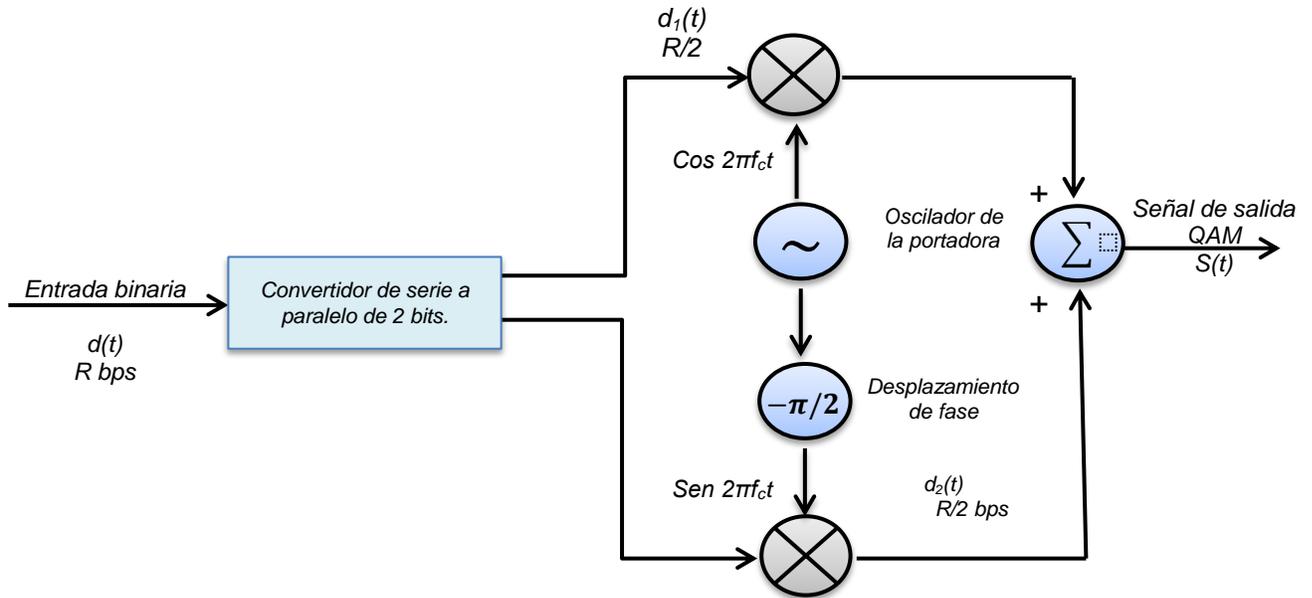


Figura 2.13 Modulador 4QAM.

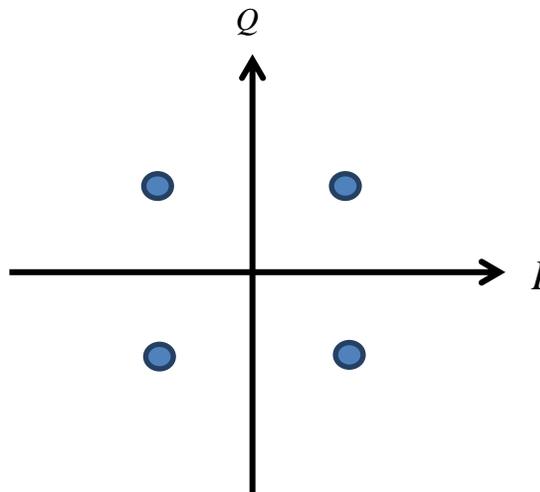


Figura 2.14 Modulación 4QAM.

## 2.5.2 Modulación 16QAM.

El 16QAM es un sistema M-ario, en donde  $M=16$ . Actúa sobre los datos de entrada en grupos cuatro bits. Para un transmisor de 16QAM los datos de entrada binaria se dividen en cuatro canales: El I, I', Q y Q'. La tasa de bits de cada canal es igual a un cuarto de la tasa de bits de entrada. Los cuatro bits se introducen en forma serial al derivador de bits, para luego introducirse simultáneamente y en paralelo a los canales I, I', Q y Q'. Los bits I y Q determinan la polaridad a la salida de los convertidores de niveles 2 a 4 (un 1 lógico = positivo, y un 0 lógico = negativo). Los bits I' y Q' determinan la magnitud (un 1 lógico = 0.821 V, y un 0 lógico = 0.22 V). En consecuencia, los convertidores de niveles 2 a 4 generan una señal PAM de nivel 4. Dos polaridades y dos magnitudes son posibles a la salida de cada convertidor, las cuales son  $\pm 0.22$  V y  $\pm 0.821$  V. Las señales PAM modulan las portadoras en cuadratura. Son posibles cuatro salidas para cada modulador de producto. Para el modulador de producto I son  $+0.821 \text{ sen}(\omega_c t)$ ,  $-0.821 \text{ sen}(\omega_c t)$ ,  $+0.22 \text{ sen}(\omega_c t)$ , y  $-0.22 \text{ sen}(\omega_c t)$ . Para el modulador de producto Q son  $+0.821 \text{ cos}(\omega_c t)$ ,  $+0.22 \text{ cos}(\omega_c t)$ ,  $-0.821 \text{ cos}(\omega_c t)$ , y  $-0.22 \text{ cos}(\omega_c t)$ . El sumador lineal combina las salidas de los moduladores de producto de canal I y Q y produce las 16 condiciones de salida necesarias para el 16QAM.

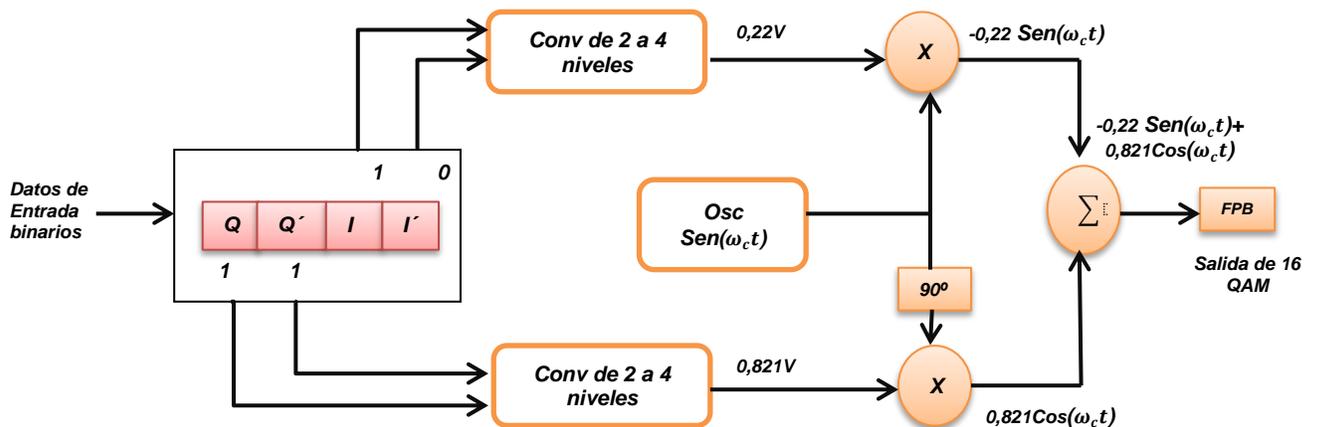
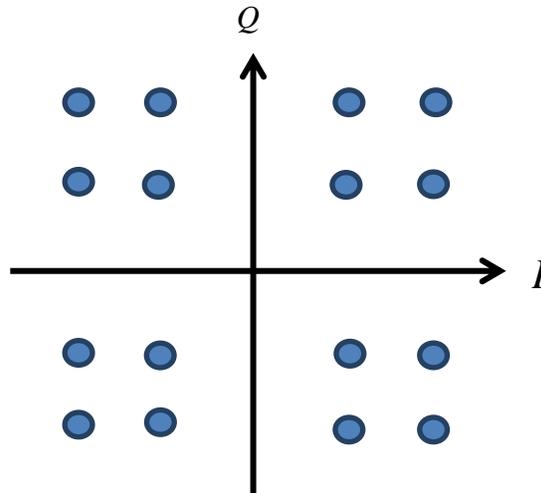


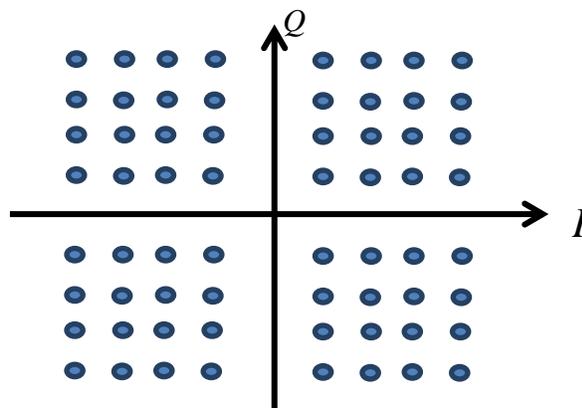
Figura 2.15 Modulador 16QAM.



**Figura 2.16 Modulación 16QAM.**

### 2.5.3 Modulación 64QAM.

Este tipo de modulación tiene una gran ventaja con respecto a las de orden inferior, ya que con este orden de 64QAM podemos transmitir a mayor velocidad debido a que por cada símbolo que envía, se logran transmitir 6 bits. A pesar de esta ventaja de transmitir más bits por símbolo, también se convierte en una desventaja, ya que se requieren sistemas de detección más sensibles que sean capaces de detectar y diferenciar los valores de amplitud y fase recibidos. Otro factor importante a considerar es que a mayor orden de modulación QAM, mayor será la susceptibilidad que tienen al ruido, por lo tanto si se quiere una transmisión con una tasa de errores pequeña se requiere una relación señal a ruido cada vez más grande.



**Figura 2.17 Modulación 64QAM.**

**2.6 Probabilidad de error.**

Para la constelación de cuadratura QAM con  $M = 2^k$ , donde M es el número de símbolos y k es el número de bits en cada símbolo, la constelación QAM es equivalente a dos señales portadoras en cuadratura. Un símbolo QAM se detecta correctamente con una probabilidad:

$$PC = (1 - P_{\sqrt{M}})^2 \dots \dots \dots \text{ecuación (2.9).}$$

Donde  $P_{\sqrt{M}}$  es la probabilidad de error de un símbolo  $\sqrt{M}$ -ario con la mitad de la potencia media de la señal QAM.

$$P_{\sqrt{M}} = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q \left( \sqrt{\frac{3E_{avg}}{(M-1)N_o}} \right) \dots \dots \dots \text{ecuación (2.10).}$$

Dónde:

- $E_{avg} / N_o =$  SNR media por símbolo.
- Q = Define el área bajo el estandar gaussiano.

Para un gran número de puntos de señal, el QAM funcionará mejor que el M-ario. Esto se debe a que la distancia entre dos puntos de señalización en un sistema de M-ario, es más pequeña que la distancia entre puntos en un sistema QAM comparable. La expresión general para la distancia entre puntos de señalización adyacentes para un sistema QAM con nivel L en cada eje es:

$$d = \frac{\sqrt{2}}{L-1} D \dots \dots \dots \text{ecuación (2.11).}$$

Dónde:

- d = distancia de error
- L = número de niveles en cada eje
- D = amplitud pico de la señal

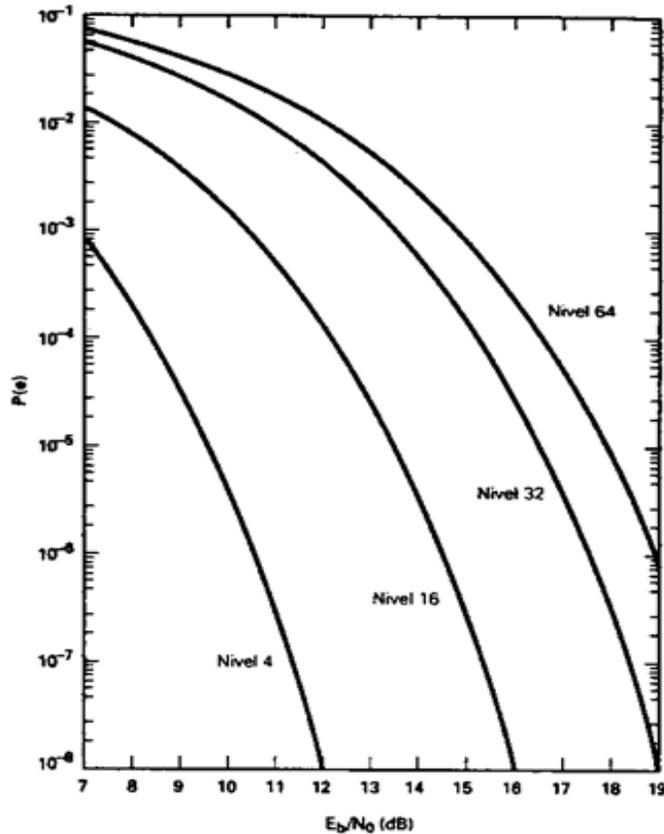
La expresión general para la probabilidad de error de bit de un sistema QAM de nivel L es

$$P(e) = \frac{1}{\log_2 L} \left( \frac{L-1}{L} \right) \text{erfc}(z) \dots \dots \dots \text{ecuación (2.12).}$$

Donde  $\text{erfc}(z)$  = función de error complementaria y z es:

$$z = \frac{\sqrt{\log_2 L}}{L-1} \sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \dots \dots \dots \text{ecuación (2.13).}$$

La figura 2.18 muestra el rendimiento de error para los sistemas QAM 4, 16, 32 y 64 como función de  $E_b/N_0$ . La tabla 2.1 indica las mismas relaciones de potencia de la portadora a ruido y las relaciones de la densidad de energía por bit a ruido, para una probabilidad de error de  $10^{-6}$ , para varios esquemas de modulación PSK y QAM.



**Figura 2.18 Probabilidad de error vs la energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido.**

**Tabla 2.1 Comparación del rendimiento de varios esquemas para modulación Digital (BER =  $10^{-6}$ )**

Modulación	Relación C/N (dB)	Relación $E_b/N_0$ (dB)
BPSK	10.6	10.6
QPSK	13.6	10.6
4QAM	13.6	10.6
8QAM	17.6	10.6
8PSK	18.5	14
16PSK	24.3	18.3
16QAM	20.5	14.5
32QAM	24.4	17.4
64QAM	26.6	18.8

---

## **Capítulo III Análisis del comportamiento de los esquemas de modulación adaptivos en LTE**

En el siguiente capítulo, se analizarán los parámetros que intervienen para que la interfaz radio que este siendo utilizada, se adapte a un esquema de modulación que sea óptimo para mantener la calidad de la señal tanto en la transmisión como en la recepción, asimismo, se presentará el escenario de simulación el cual es utilizado para demostrar el desempeño de los esquemas de modulación empleados en LTE.

### **3.1 Adaptabilidad en el enlace empleada en LTE.**

El principio de la adaptación del enlace es fundamental para el diseño de una única interfaz de radio que es eficiente para el tráfico de datos por conmutación de paquetes. La adaptación de enlace LTE ajusta la velocidad de datos de la información transmitida (esquema de modulación y tasa de codificación de canal) dinámicamente para que coincida la capacidad del canal de radio que prevalece para cada usuario. Por lo tanto, la adaptación del enlace esta muy estrechamente relacionada con el diseño del esquema de codificación de canal utilizado para la corrección de errores.

Para las transmisiones de datos de enlace descendente en LTE, el eNodeB normalmente selecciona el tipo de esquema de modulación y el código en función de una predicción de las condiciones del canal. Una aportación importante a este proceso de selección es el CQI (por sus siglas en inglés, Channel Quality Indicator) de retroalimentación, transmitido por el UE en el enlace ascendente. La retroalimentación CQI es una indicación de la velocidad de datos que puede ser soportada por el canal, teniendo en cuenta la relación de señal a interferencia más ruido (SINR) y las características del receptor del UE. En general, es debido a la retroalimentación CQI que el eNodeB puede seleccionar entre 4QAM, 16QAM y 64QAM y esquemas de codificación de canal de una amplia gama de velocidades de código.

Para las transmisiones de enlace ascendente de LTE, el proceso de adaptación de enlace es similar al enlace descendente en la selección de la modulación y los esquemas de codificación, ya que también están bajo el control del eNodeB. Una estructura de codificación de canal idéntica se usa para el enlace ascendente, mientras que el esquema de modulación puede ser seleccionado entre 4QAM, 16QAM y, para la categoría más alta

---

de UE, también 64QAM. La principal diferencia con el enlace descendente es que en lugar de basar la adaptación del enlace en la retroalimentación CQI, el eNodeB puede hacer directamente su propia estimación de la velocidad de datos en el enlace ascendente de velocidad de datos soportable por el canal.

Las especificaciones de LTE están diseñadas para proporcionar la señalización necesaria para la interoperabilidad entre el eNodeB y los UE, de modo que el eNodeB pueda optimizar la adaptación de enlace, pero los métodos exactos utilizados por el eNodeB para explotar la información que está disponible se dejan a elección del fabricante de la implementación.

Un último aspecto importante de la adaptación del enlace es su uso en conjunción con la programación multi-usuario en tiempo y frecuencia, lo que permite que los recursos de radio para transmisiones puedan ser compartidos de manera eficiente entre los usuarios variando la capacidad del canal a los usuarios individuales varía. Por consiguiente, el CQI puede ser utilizado no sólo para adaptar la modulación y tasa de codificación a las condiciones del canal, sino también para la optimización de la programación selectiva del tiempo / frecuencia para la gestión de interferencia entre células.

A continuación, se explican los principios de adaptación de enlace como se aplica en LTE. También muestra cómo el eNodeB puede seleccionar diferentes modos de retroalimentación CQI, buscando la mejora de la adaptación del enlace descendente habilitado por CQI, con respecto a la sobrecarga de enlace ascendente causada por el propio CQI.

### **3.1.1 Modulación y Codificación Adaptiva.**

En sistemas de comunicaciones celulares, la calidad de la señal recibida por un UE depende de la calidad del canal de servicio, el nivel de interferencia entre otras celdas, y el nivel del ruido. Para optimizar la capacidad del sistema y la cobertura para una potencia de transmisión dada, el transmisor deberá intentar obtener la información de relación de datos para cada usuario, con respecto a las variaciones en la calidad de la señal recibida. Esto es comúnmente referido como adaptación de enlace y está basado principalmente en la AMC (Adaptative Modulation and Coding).

---

Para una modulación dada, la relación de código puede ser elegida de acuerdo a las condiciones de enlace de radio: una baja relación de código puede ser utilizada en condiciones pobres de canal, y para una alta relación de código se puede usar con una en la situación de tener un SINR alta.

Una cuestión clave en el diseño del plan de AMC para LTE es si todos los bloques de recursos de la RBS (por sus siglas en inglés, Radio Base Station) asignados a un usuario, deben utilizar la misma MCS (por sus siglas en inglés, Modulation and Coding Scheme) o si el MCS debe ser dependiente de la frecuencia dentro de cada subtrama.

En LTE, el UE puede ser configurado para reportar CQI's para ayudar al eNodeB en la selección de un MCS apropiado a utilizar en la transmisión de enlace descendente. Los informes de CQI se derivan de la calidad de la señal de enlace descendente recibida, típicamente sobre la base de mediciones de señales de referencia en dicho enlace.

El UE informa de la más alta MCS que se puede decodificar con un cierto BLER (por sus siglas en inglés, Block Error Rate), de probabilidad no superior al 10%. Así, la información recibida por el eNodeB tiene en cuenta las características del receptor del UE, y no sólo la calidad del canal de radio que prevalece. Por lo tanto un UE que está diseñado con algoritmos de procesamiento de señal avanzado (por ejemplo, utilizando técnicas de cancelación de interferencia) puede informar de una calidad de canal superior y, dependiendo de las características del eNodeB, puede recibir una velocidad de datos más alta.

AMC puede explotar la opinión del UE suponiendo que el canal de desvanecimiento es suficientemente lento. Esto requiere que el tiempo de coherencia del canal sea al menos tan largo como el tiempo entre la medición del UE y las señales que contienen la transmisión de las subtramas en el enlace descendente, ubicado en PDSCH (por sus siglas en inglés, Physical Downlink Shared Channel), el cual, es un canal compartido que transporta los datos de todos los usuarios de la celda.

Sin embargo, existe un equilibrio entre la cantidad de información CQI dada por el UE y la exactitud con la que el AMC puede igualar las condiciones prevalecientes. La presentación de informes frecuentes de la CQI en el dominio del tiempo permite una mejor

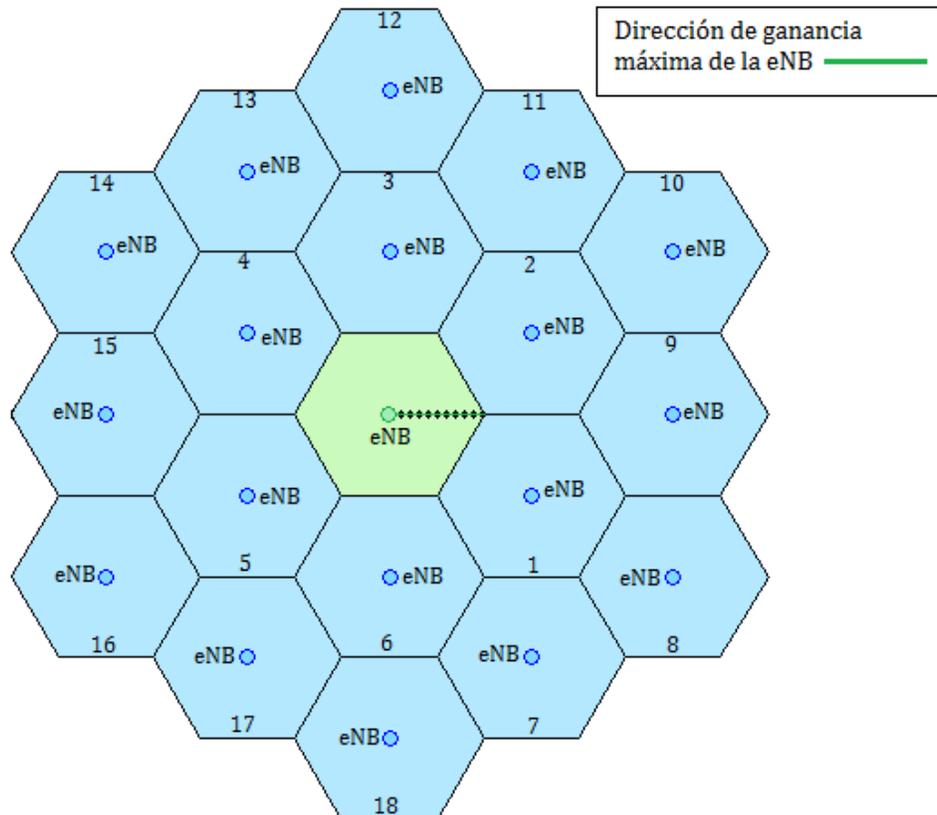
adaptación a las variaciones del canal y de interferencia, mientras que la resolución fina en el dominio de la frecuencia permite un mejor aprovechamiento de la programación en cuanto a ancho de banda. Sin embargo, ambos conducen a un aumento de los gastos generales de retroalimentación en el enlace ascendente. Por lo tanto, el eNodeB puede configurar tanto la velocidad de actualización en el dominio del tiempo y la resolución en el dominio de la frecuencia del CQI.

**Tabla 3.1 Valores de CQI [5].**

<b>Índice de CQI</b>	<b>Modulación</b>	<b>Tasa de código aproximada</b>	<b>Eficiencia (Bits de información por símbolo)</b>
<b>0</b>	<b>Fuera de rango</b>	-----	-----
<b>1</b>	<b>QPSK</b>	<b>0.076</b>	<b>0.1523</b>
<b>2</b>	<b>QPSK</b>	<b>0.12</b>	<b>0.2344</b>
<b>3</b>	<b>QPSK</b>	<b>0.19</b>	<b>0.3770</b>
<b>4</b>	<b>QPSK</b>	<b>0.3</b>	<b>0.6016</b>
<b>5</b>	<b>QPSK</b>	<b>0.44</b>	<b>0.8770</b>
<b>6</b>	<b>QPSK</b>	<b>0.59</b>	<b>1.1758</b>
<b>7</b>	<b>16QAM</b>	<b>0.37</b>	<b>1.4766</b>
<b>8</b>	<b>16QAM</b>	<b>0.48</b>	<b>1.9041</b>
<b>9</b>	<b>16QAM</b>	<b>0.6</b>	<b>2.4063</b>
<b>10</b>	<b>64QAM</b>	<b>0.45</b>	<b>2.7305</b>
<b>11</b>	<b>64QAM</b>	<b>0.55</b>	<b>3.3223</b>
<b>12</b>	<b>64QAM</b>	<b>0.65</b>	<b>3.9023</b>
<b>13</b>	<b>64QAM</b>	<b>0.75</b>	<b>4.5234</b>
<b>14</b>	<b>64QAM</b>	<b>0.85</b>	<b>5.1152</b>
<b>15</b>	<b>64QAM</b>	<b>0.93</b>	<b>5.5547</b>

### 3.2 Características de los escenarios de simulación.

Para llevar a cabo una serie de simulaciones con respecto al desempeño de los esquemas de modulación empleados en LTE, inicialmente se hará una descripción del escenario, el cual está constituido por un clúster de 19 celdas. Las simulaciones se harán enfocándonos en la celda central del cluster (ver figura 3.1), ya que al estar la celda en la parte central se tiene uniformidad y simetría en el sistema.



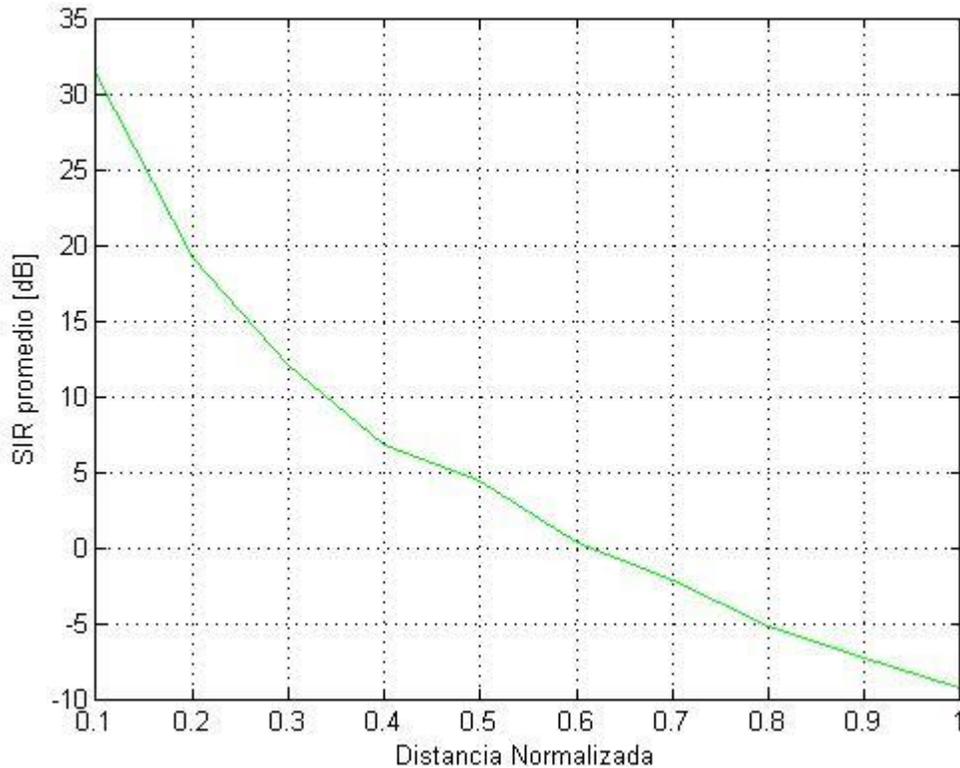
**Figura 3.1 Estructura del escenario de simulación. [6]**

El UE se encuentra en la celda central, el cual, se mueve en línea recta sobre la dirección de ganancia máxima de la eNB correspondiente. Considerando tres posiciones diferentes (0.1, 0.5 Y 1), se estudiará la adaptabilidad del enlace y la interferencia que proporcionan las 18 celdas restantes sobre nuestro UE.

Con el propósito de poder evaluar el efecto que tendrán las interferencias en el UE se utilizará la métrica dada por la SIR. Las causas principales que afectan la SIR son las distancias en las que se ubica el UE con respecto a las eNBs, así como las ganancias de cada una de las eNBs en dirección al UE, y los desvanecimientos rápidos y lentos.

---

En la figura 3.2 se observa la gráfica de la SIR en función de distancias normalizadas en la celda central.



**Figura 3.2 Relación Señal a Ruido más Interferencia en un caso ideal.**

### 3.2.1 Modelo de canal con desvanecimientos lentos y rápidos (Canal tipo Suzuki).

El modelo Suzuki es uno de los modelos más comunes en los sistemas clásicos de macro celdas, el cual utiliza un modelo de propagación con una función de densidad de probabilidad correspondiente al análisis de desvanecimientos rápidos y lentos generados por las ondas electromagnéticas que viajan a través de un medio no guiado. Fundamentalmente, el modelo parte de la suposición de que no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor, de manera que la señal recibida se debe a las señales que han seguido múltiples trayectos.

La PDF de la distribución susuki tiene como finalidad describir el comportamiento en peña y gran escala los desvanecimiento lentos y rapidos debido a que es una combinación de los modelados de distribución Lognormal y Rayleigh.

$$F_{SUSUKI}(r) = \int_0^{\infty} \frac{X}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \frac{\log l}{\sigma \alpha \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{-\log \frac{\sigma}{\sigma_0}}{2\sigma^2}\right)} d\sigma \dots \dots \dots \text{ecuación. 3.1}$$

Donde  
 $\sigma$  = Desviación estandar  
 $X$  = Amplitud.

**3.3 Estudio del desempeño de los esquemas de modulación empleados en LTE.**

El uso de sistemas de modulación tales como 4QAM, 16QAM y 64QAM son necesarios para conseguir aumentar la velocidad de transmisión de datos. Modulaciones de más alto nivel (16QAM Y 64QAM) proporcionan mayor número de bits eficaces por símbolo y por lo tanto mayor tasa binaria. Por el contrario, estas modulaciones presentan constelaciones más complejas y son más sensibles a interferencias.

La degradación de la señal en el medio, así como la velocidad de transmisión de datos o la frecuencia de portadora son factores a tener en cuenta a la hora de comparar las diferentes modulaciones.

**3.3.1 Interpretación de los diagramas de constelación.**

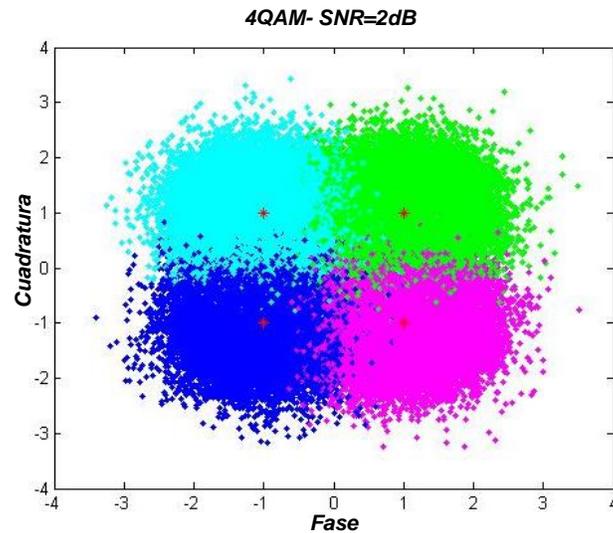
Una forma de representar los estados de modulación posibles en los distintos tipos de modulación digital tales como 4QAM, 16QAM y 64QAM, son los diagramas de constelación, en donde el eje horizontal hace referencia a los componentes de los símbolos que se encuentran en fase con la señal portadora y el eje vertical representa los componentes en cuadratura (90°).

Los diagramas de constelación se utilizan para reconocer el tipo de interferencia y distorsión de una señal.

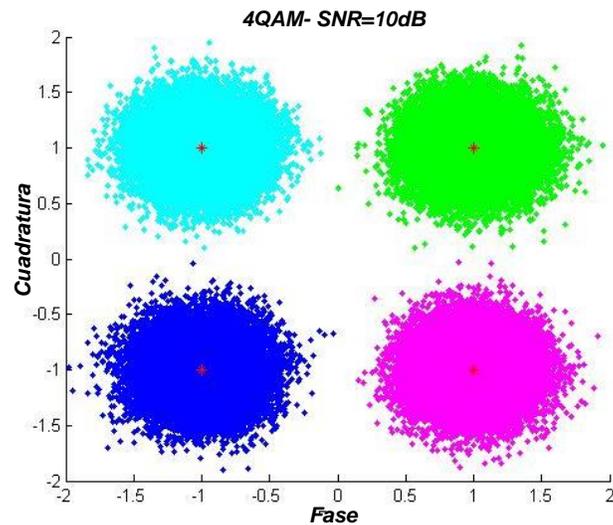
Al momento de recibir la señal, el demodulador examina cada uno de los símbolos recibidos, los cuales pudieron haber sido afectados por el canal debido al AWGN (por sus siglas en inglés, Additive White Gaussian Noise). El demodulador realiza una estimación

---

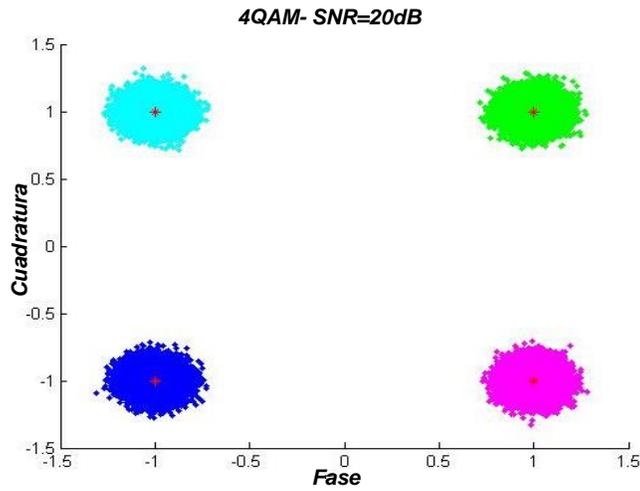
de los símbolos recibidos y los símbolos que se transmitieron inicialmente, y selecciona el punto en el diagrama de constelación que esté más cerca del símbolo recibido. Sin embargo, la demodulación puede llevarse a cabo de manera errónea si la corrupción de la señal ha hecho que el símbolo recibido se acerque a otro punto de la constelación diferente del símbolo transmitido.



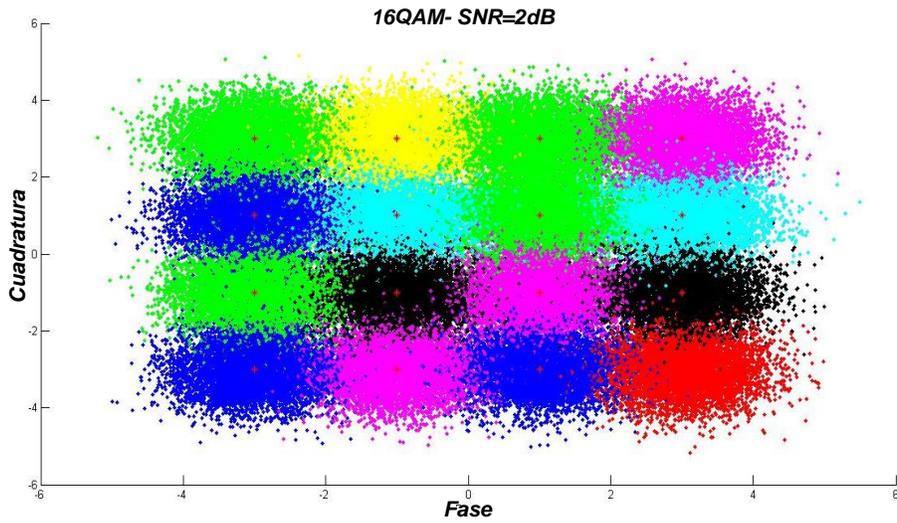
**Figura 3.3** Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 4QAM considerando una SNR=2 dB.



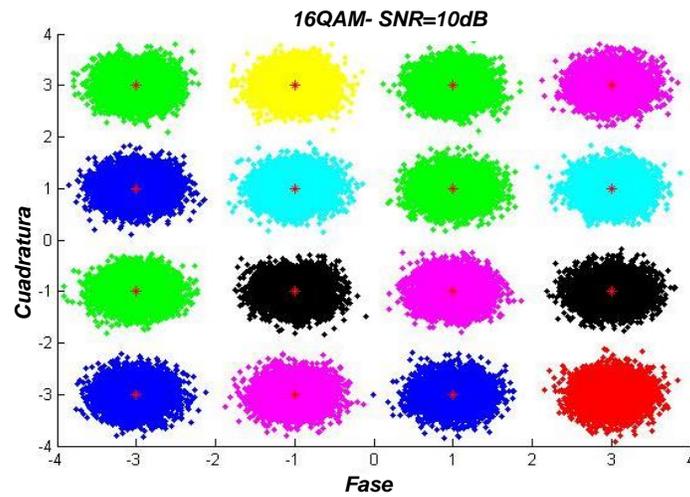
**Figura 3.4** Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 4QAM considerando una SNR=10 dB.



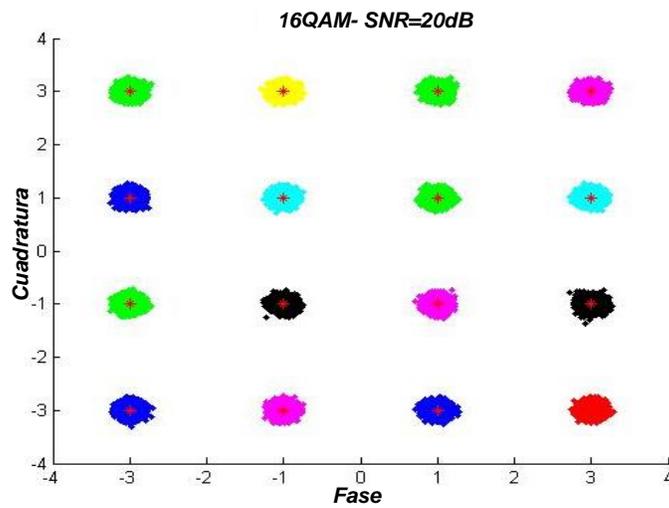
**Figura 3.5 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 4QAM considerando una SNR=20 dB.**



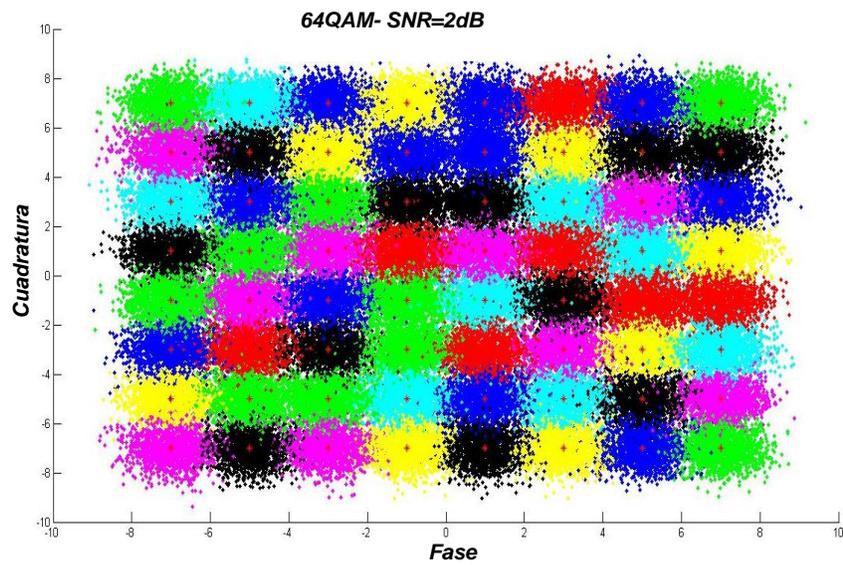
**Figura 3.6 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 16QAM considerando una SNR=2 dB.**



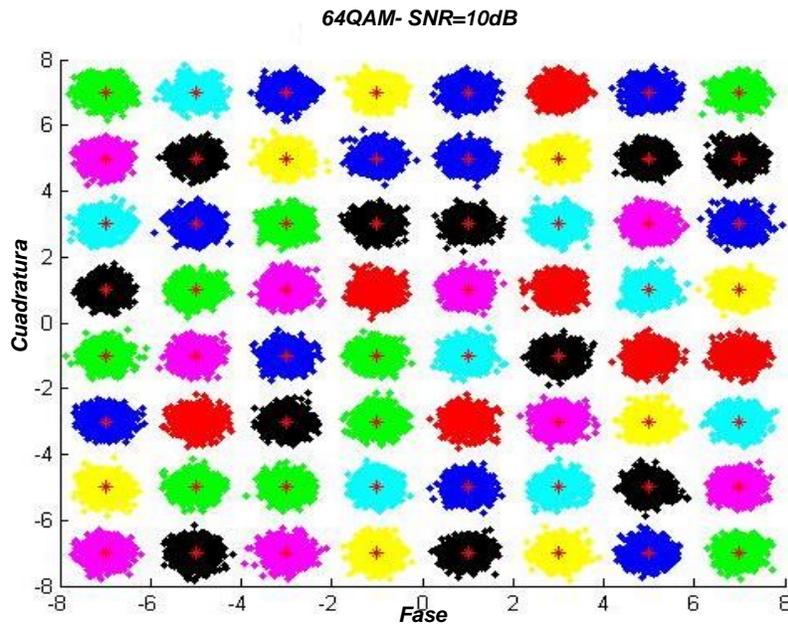
**Figura 3.7** Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 16QAM considerando una SNR=10 dB.



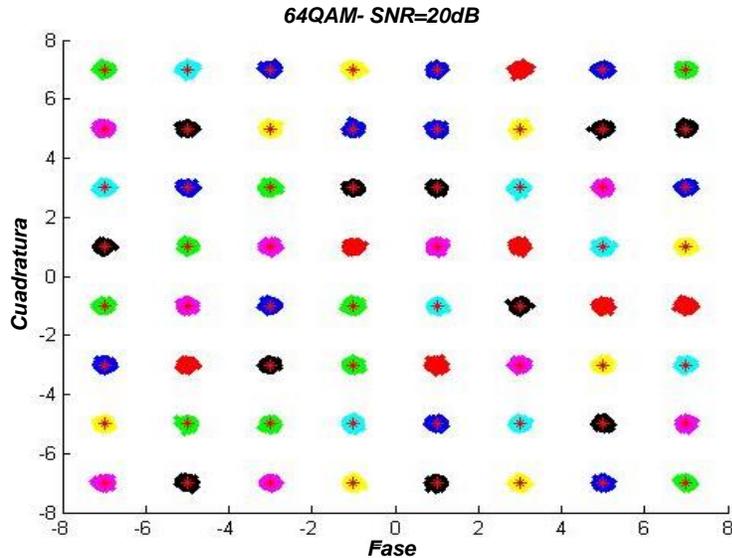
**Figura 3.8** Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 16QAM considerando una SNR=20 dB.



**Figura 3.9** Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 64QAM considerando una SNR=2 dB.



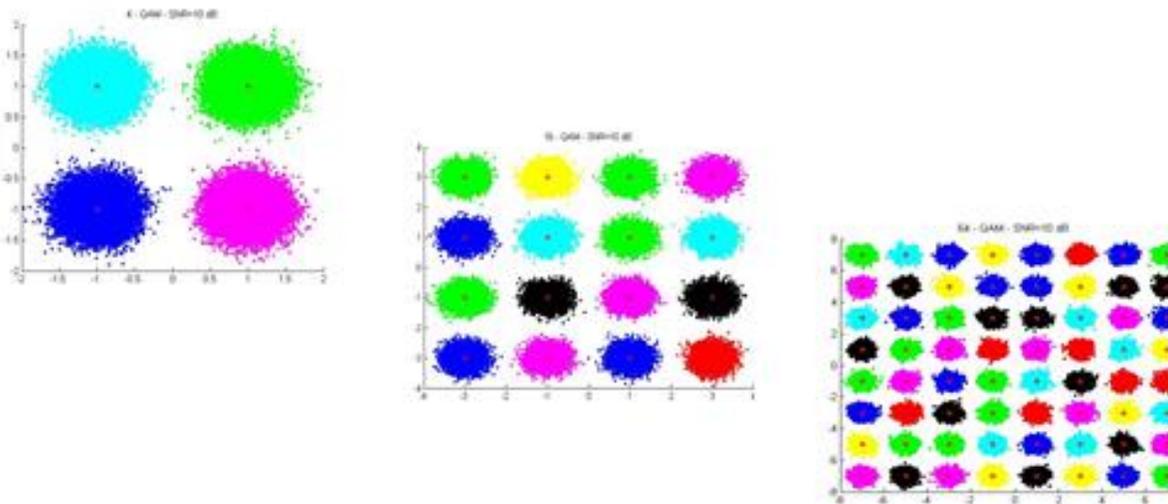
**Figura 3.10** Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 64QAM considerando una SNR=10 dB.



**Figura 3.11 Diagrama de constelación en fase y cuadratura para 64QAM considerando una SNR=20 dB.**

En las figuras 3.4 a 3.11, con el propósito de analizar la calidad de la señal recibida, se muestran diagramas de constelación de los esquemas de modulación 4QAM, 16QAM Y 64QAM, los cuales permiten una visualización más directa de este proceso, ya que pueden observarse los símbolos recibidos como puntos arbitrarios en el plano fase/cuadratura.

Los símbolos fueron enviados con tres diferentes SNR de 2dB, 10dB y 20dB, y con base a las gráficas obtenidas se corrobora que una señal enviada con una SNR de 2dB es más propensa a tener errores de identificación de símbolos en la demodulación debido a que la potencia del ruido es significativa con respecto a la potencia de la señal transmitida, a diferencia de una SNR de 20 dB que no representa problema alguno en el momento de la demodulación. Se concluye que a mayor SNR, es decir, entre mayor sea la potencia de la señal transmitida y menor sea la potencia de ruido, se podrán recuperar los símbolos transmitidos prácticamente sin ninguna complicación.



**Figura 3.12 Comparación gráfica de los esquemas de modulación 4QAM, 16QAM y 64QAM.**

Al comparar gráficamente las constelaciones de las figura 3.12 correspondientes a modulaciones 4QAM, 16QAM y 64QAM, se puede observar que 4QAM es más robusta en cuanto a área de decisión en comparación con 16QAM y 64QAM. En cuanto mayor sea el orden de modulación, el tamaño de la zona de decisión para cada punto de la constelación va disminuyendo y por ende es más susceptible al ruido.

---

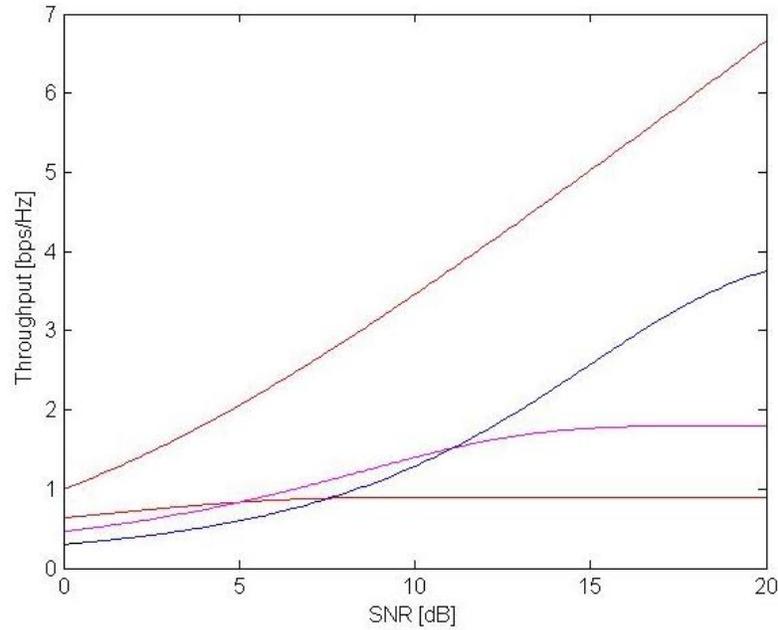
## Capítulo IV Resultados y conclusiones

Finalmente, en este capítulo se revelan los resultados obtenidos de realizar una serie de simulaciones para demostrar que esquema de modulación presenta un mejor desempeño.

### 4.1 Rendimiento del ancho de banda.

En los resultados anteriores se observa que conforme la SNR disminuye, la constelación se degrada. Una de las principales razones de las variaciones de la SNR es el nivel de potencia de la señal transmitida, así como la distancia que tenga el usuario con respecto a la BS, la interferencia y el ruido. Conforme la constelación se hace más compleja la degradación de los símbolos se hace más severa. Por este motivo para una correcta demodulación de los datos se tendrá una dependencia de la potencia de la señal obtenida por el usuario con respecto a la BS; a mayor SNR se usarán constelaciones de orden superior.

En la figura 4.1 se comparan cada uno de los esquemas de modulación con el límite de Shannon. La gráfica de color rojo es 4QAM, la de color magenta es 16QAM y la gráfica de color azul es 64QAM, y se observa que para niveles de SNR menores a 5 el esquema de modulación más cercano al límite de Shannon es 4QAM con un valor aproximado de throughput a 1 bps/Hz; conforme aumentan los niveles de SNR se puede decir que, en general el dispositivo móvil esta más cerca a la BS; en valores de una SNR igual a 5 dB 16QAM es el esquema de modulación más cercano al límite de Shannon con un throughput de 1.5 bps/Hz, y 64QAM toma su mejor desempeño con valores de SNR igual a 11 dB, con un throughput igual a 3.8 bps/Hz. También se observa que cada esquema de modulación hasta cierto límite se vuelve constante, lo que involucra que los niveles de potencia de la señal siempre deben de ser fijos para que el esquema de modulación pueda desempeñar su función adecuadamente. Cada esquema de modulación tiene un nivel de SNR al cual operar.



**Figura 4.1 Capacidad de los esquemas de modulación QAM.**

En la Figura 4.1 se observa el rendimiento de ancho de banda del sistema en bits/segundos/Hertz; cuanto mayor sea el orden de modulación, mayor será el rendimiento del ancho de banda. La elección del esquema de modulación y la tasa de código dependen del CQI enviado por el UE. Si la SNR es baja, se utiliza 4QAM. Por cada 6 dB de mejora (aproximadamente) en la SNR la modulación se mantiene. La finalidad de esto es adaptar la modulación para conseguir maximizar en cada momento la eficiencia espectral y mantener una tasa de error de bloque (BLER) menor al 10%. En la práctica ninguna implementación de un sistema de comunicaciones digitales puede sobrepasar el comportamiento que sugiere la ecuación del teorema de Shannon Hartley.

---

#### 4.1.1 Capacidad de canal.

Se denomina capacidad del canal a la velocidad máxima a la que se pueden transmitir los datos en un canal, o ruta de comunicación de datos, bajo unas condiciones dadas. Los servicios de comunicaciones son por lo general caros y, normalmente, cuanto mayor es el ancho de banda requerido por el servicio, mayor es el costo. Todos los canales de transmisión de interés práctico están limitados en banda. Las limitaciones surgen de las propiedades físicas de los medios de transmisión o por limitaciones que se imponen deliberadamente en el transmisor para prevenir interferencias con otras fuentes. Por consiguiente, es deseable hacer un uso tan eficiente como sea posible del ancho de banda limitado. En el caso de los datos digitales, esto significa que dado un ancho de banda sería deseable conseguir la mayor velocidad de datos posible no superando la tasa de errores permitida. El mayor inconveniente para conseguir este objetivo es la existencia de ruido. La relación señal-ruido es importante en la transmisión de datos digitales, ya que ésta determina la máxima velocidad de transmisión que se puede conseguir.

La capacidad de canal dada en bits por segundo se obtiene con la siguiente expresión:

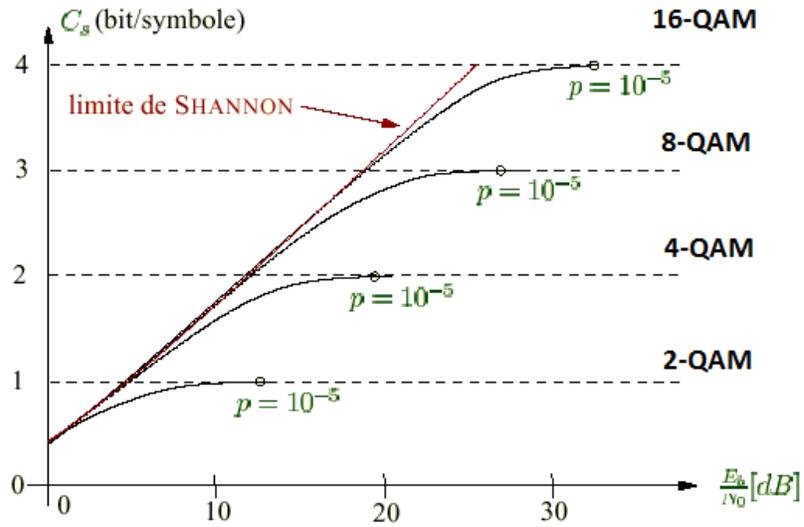
$$C = B * \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

Donde:

$C$  = Capacidad del canal en bits por segundo.

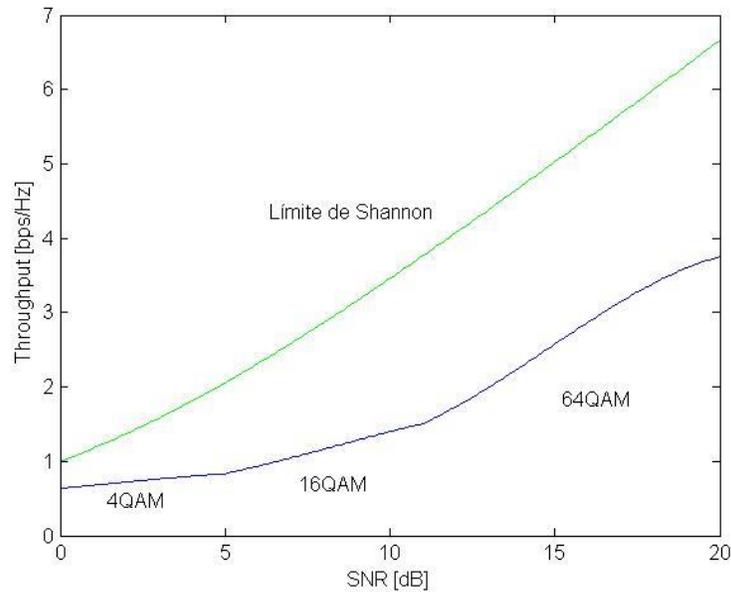
$B$  = Ancho de banda del canal en hercios.

La fórmula de Shannon representa el máximo límite teórico que se puede conseguir como se muestra en la figura 4.2. Sin embargo, en la práctica, se consiguen velocidades mucho menores. Una razón para esto reside en el hecho de que la fórmula anterior supone ruido blanco. No se han tenido en cuenta el ruido impulsivo, la distorsión de atenuación o la distorsión de retardo.



**Figura 4.2 Límite de Shannon.**

En la figura 4.3, se observa que los esquemas de modulación 4QAM, 16QAM y 64QAM utiliza la modulación adaptativa para adecuarse a los niveles de SNR existentes en el medio, y de esta forma mantener una tasa de error menor al 10 % al acercarse al límite de Shannon.

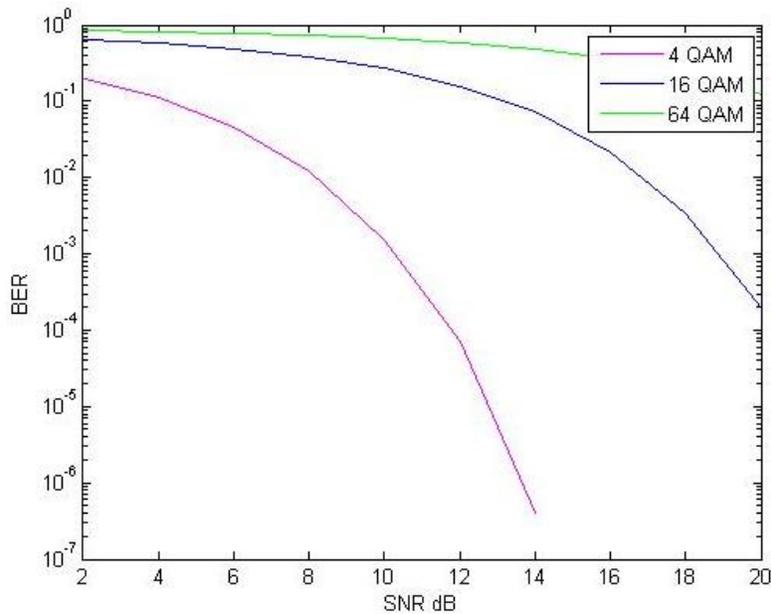


**Figura 4.3 Adaptación del enlace.**

---

## 4.2 Interpretación de la probabilidad de bit erróneo y la SNR.

Un parámetro importante para medir la calidad de un enlace digital es la BER (por sus siglas en inglés, Bit Error Rate) que es la probabilidad de que un solo bit esté alterado en un intervalo de tiempo definido. Se produce un bit erróneo debido a que se ha recibido un símbolo erróneo. Los factores que corrompen a los símbolos transmitidos son el ruido y la interferencia, de tal manera que en el lado receptor al aplicar la demodulación el símbolo no se ha podido identificar correctamente.



**Figura 4.4 BER vs SNR.**

En la Figura 4.4 se muestra la probabilidad de bit erróneo de los esquemas de modulación 4QAM, 16QAM, 64QAM. La gráfica se interpreta de la siguiente manera: una BER de  $10^{-1}$  significa que, en promedio, habrá un bit de error de  $10^1$  bits transmitidos, así mismo, para el caso de una BER de  $10^{-2}$  se tiene que, en promedio, habrá un bit de error de  $10^2$  bits transmitidos.

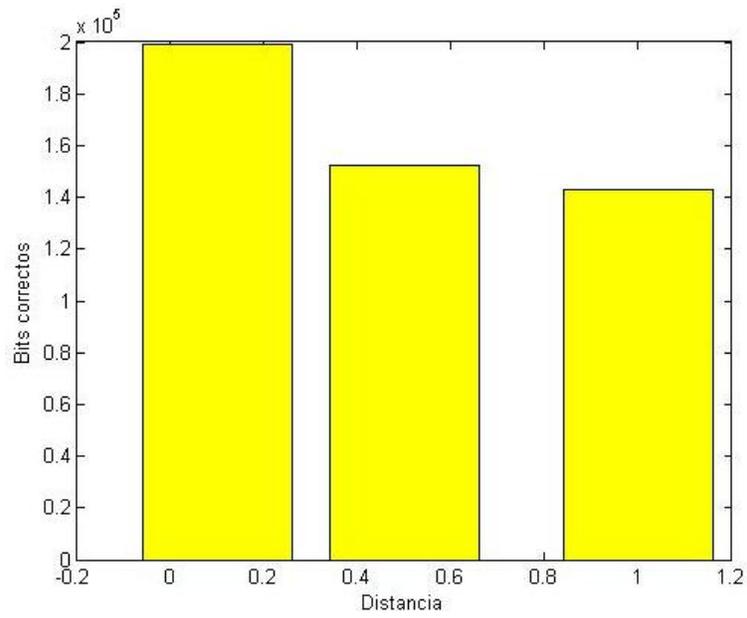
---

### **4.3 Resultados de la adaptabilidad del enlace en los esquemas de modulación 4QAM,16QAM,64QAM.**

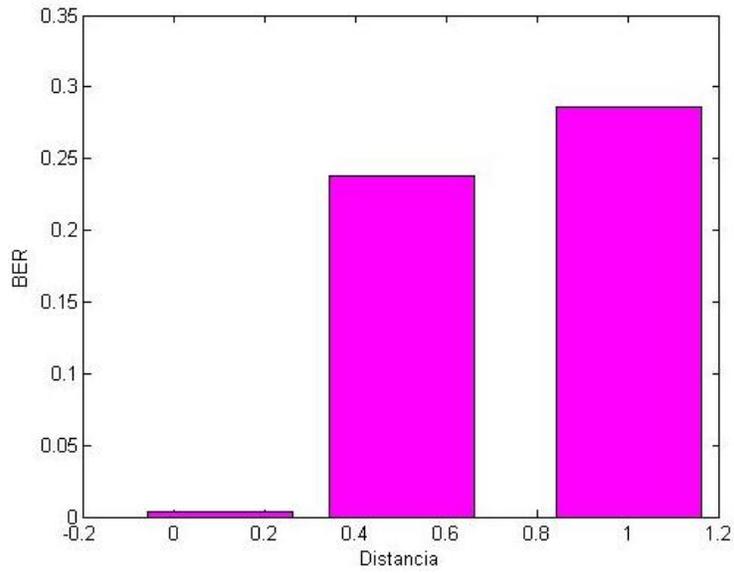
Para realizar una comparación de los esquemas de modulación con respecto a la modulación adaptativa, siendo esta afectada por la interferencia de celdas adyacentes, como se vió en el capítulo 3, utilizamos un canal de tipo Suzuki, transmitiendo 100,000 símbolos de información para 2000 valores diferentes de SNR obtenidas por las interferencias de las celdas.

Se observa que para 4QAM, para una distancia de 0.1 se tiene la mayor tasa de bits correctos, en cambio para las distancias de 0.5 y 1 se tiene menor cantidad de bits detectados correctamente, y estas permanecen casi similares, como se observa en la figura 4.5.

En la figura 4.6 se observa que la menor tasa de bits erróneos se obtiene a la distancia más cercana a la BS; en este caso, para la distancia de 0.1 se tiene 199,990 bits detectados correctamente de los 200,000 transmitidos, y conforme aumenta la distancia se observa que se va atenuando la señal y las interferencias afectan la detección de bits correctos, ya que cada símbolo es corrompido y alterado.



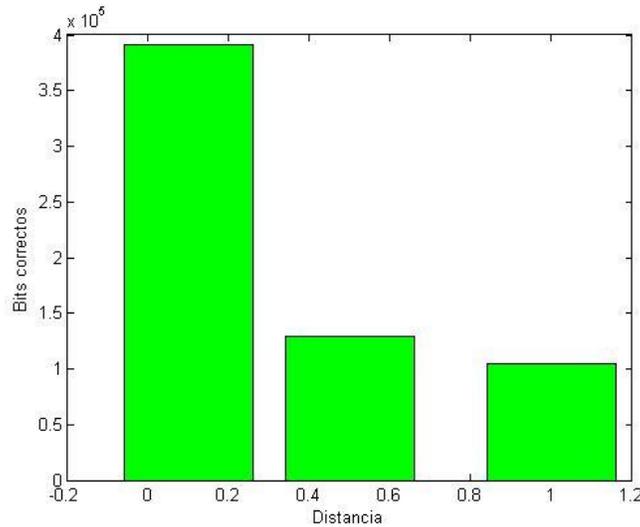
**Figura 4.5 Bits correctos del esquema de modulación 4QAM.**



**Figura 4.6 Tasa de bit erróneo del esquema de modulación 4QAM.**

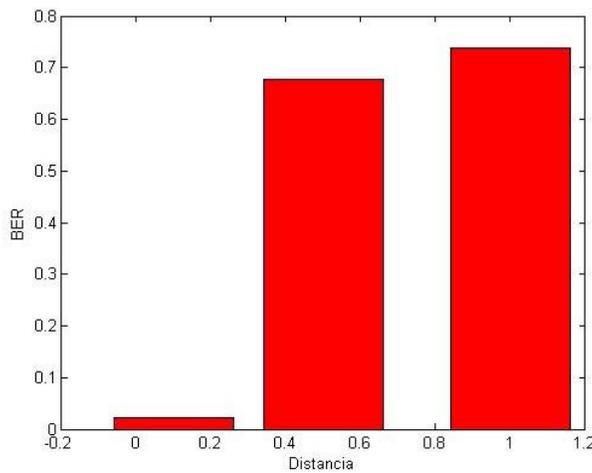
---

Para el caso del esquema de modulación 16 QAM, la figura 4.7 se observa que la cantidad más grande de bits correctos fue en la distancia de 0.1 y para los valores de distancia entre .5 y 1 no hay un cambio abrupto, son similares los bits detectados correctamente; de los 400,000 solo se están detectando en 0.5 150,000 bits, y en 1 se están detectando 100,000 bits.



**Figura 4. 7 Bits correctos de esquema de modulación 16QAM.**

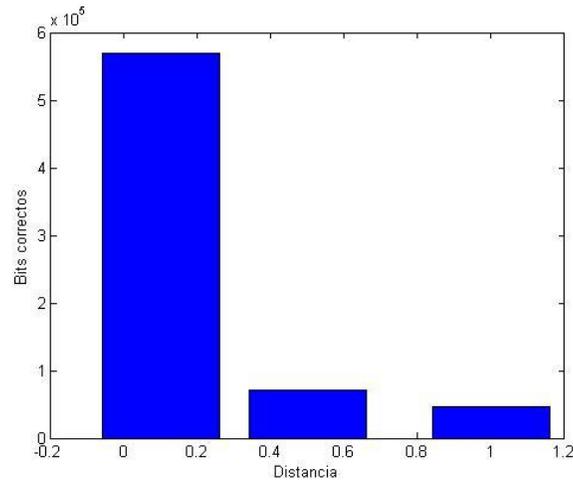
En la figura 4.8 se aprecia que la menor tasa de bits erróneos es para la distancia de 0.1, en las distancias de 0.5 y 1 tenemos que la tasa de bits erróneos es mayor y es un cambio enorme con respecto a la distancia 0.1.



**Figura 4.8 Tasa de bit erróneo del esquema de modulación 16QAM.**

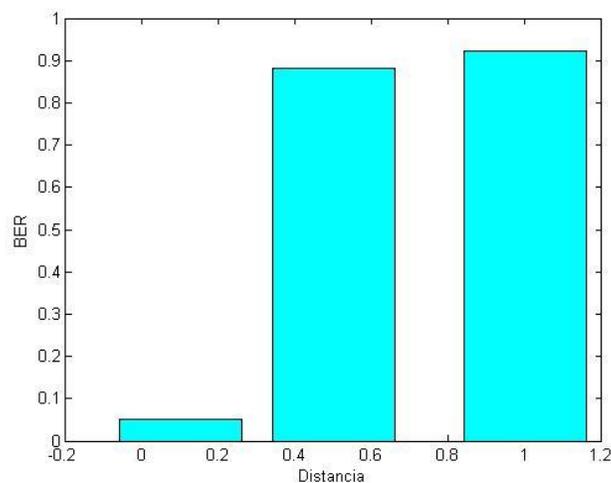
---

Cuando se emplea 64-QAM, se puede apreciar en la figura 4.9 que para la distancia de 0.1 se tiene la mayor detección de bits correctos, y en las distancias mas lejanas de 0.5 y 1 existe mucha pérdida de información; de los 600,000 bits solo estan llegando para 0.5 100,000 bits, y para 1 se reciben menos de 100,000 bits.



**Figura 4.9 Bits correctos de esquema de modulación 64QAM.**

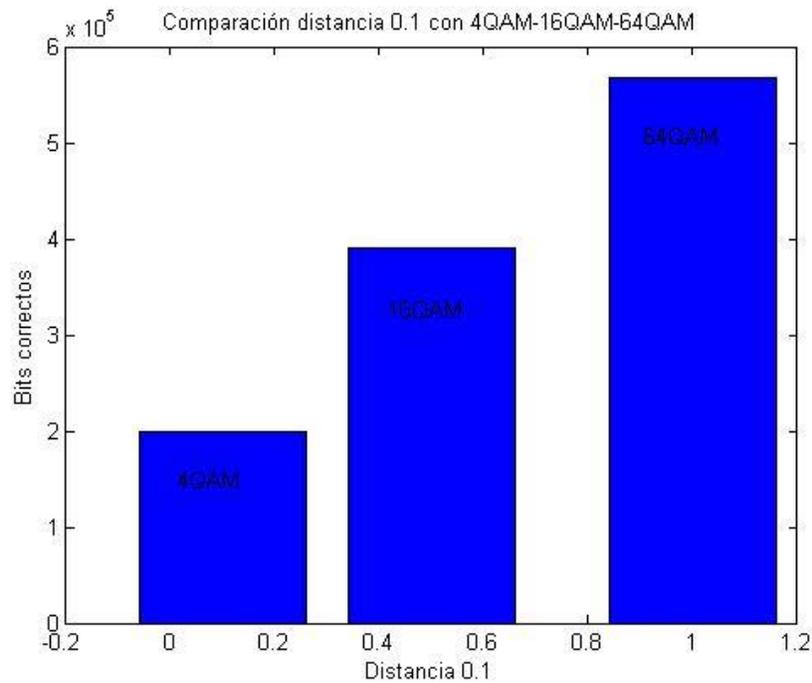
En la figura 4.10 se observa la tasa de bits erróneos donde en la distancia de 0.1, tenemos la menor tasa de errores debido a que es la distancia más cercana a la BS, y en la distancia de 0.5 se estan teniendo el 85% de los errores, cuando se presenta la máxima distancia se obtiene un 90% de errores.



**Figura 4.10 Tasa de bit erróneo del esquema de modulación 64QAM.**

---

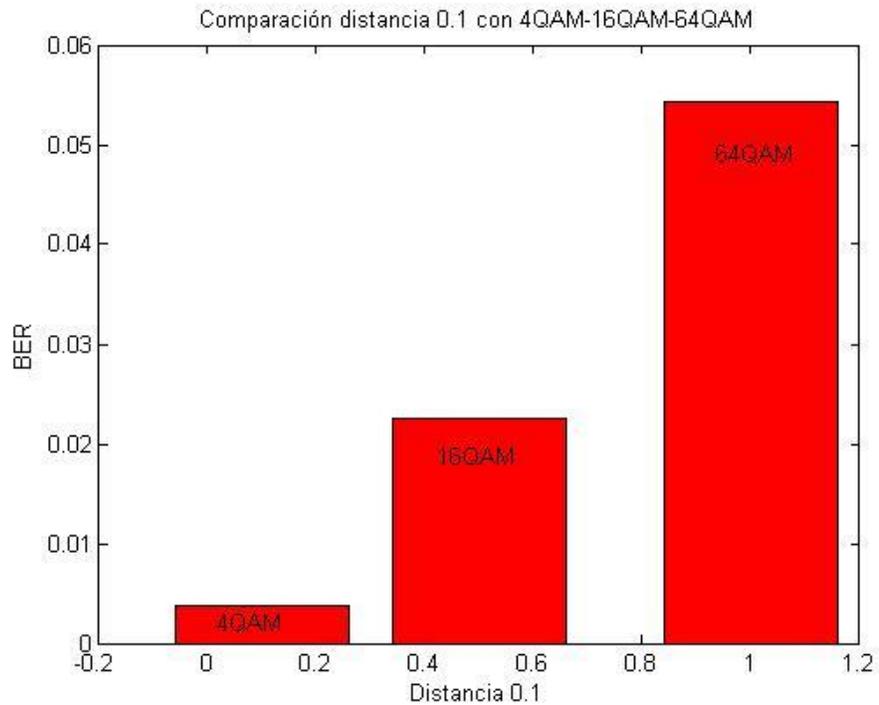
En la figura 4.11 se puede observar que al comparar la cantidad de los bits correctos a una distancia de 0.1, la modulación 4QAM, debido a que en las simulaciones se transmitieron símbolos, es el esquema con menos datos transferidos, ya que cada símbolo representa 2 bits, a comparación de 64 QAM, donde cada símbolo se representa con 6 bits por lo tanto existe mayor probabilidad de error, pero la ventaja de utilizar este esquema de modulación es el poder transmitir mayor información con el mismo ancho de banda.



**Figura 4.11 Bits correctos para los esquemas de modulación QAM a la distancia de 0.1.**

---

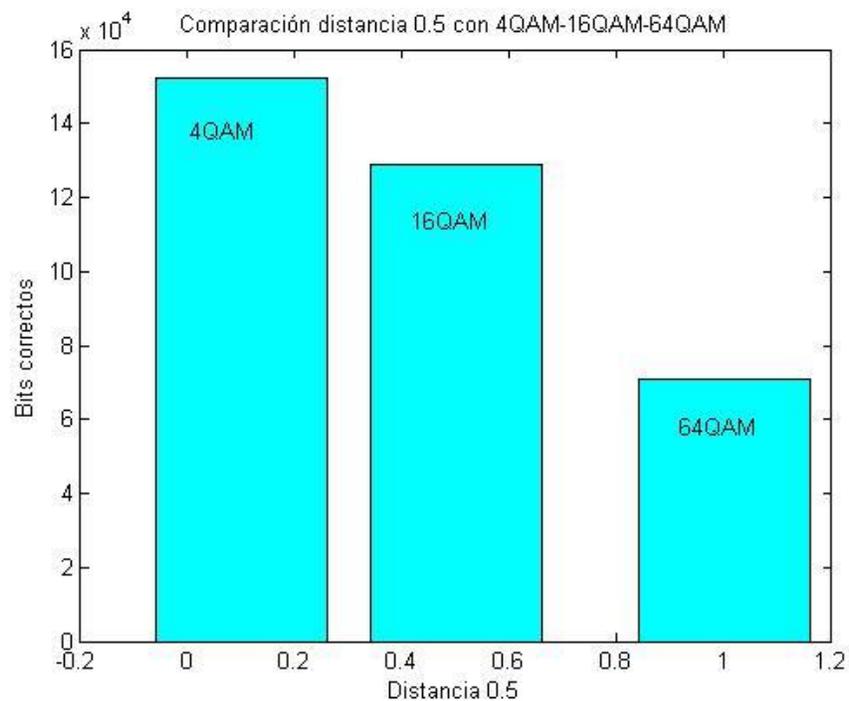
En la figura 4.12 se puede observar y determinar que, efectivamente, quien tiene menor probabilidad de error es 4QAM, ya que tiene menos del 1% erróneo. Los esquemas de 16 y 64QAM, con sus valores respectivos de bits, tienen un error de menos del 10% debido a la cercanía de la BS, pero 64QAM es quien tiene la ventaja debido a la tasa de información que puede transmitir bajo las mismas condiciones que se encuentran los otros esquemas de modulación.



**Figura 4.12 Tasa de bits erróneos de los esquemas de modulación QAM a una distancia de 0.1.**

---

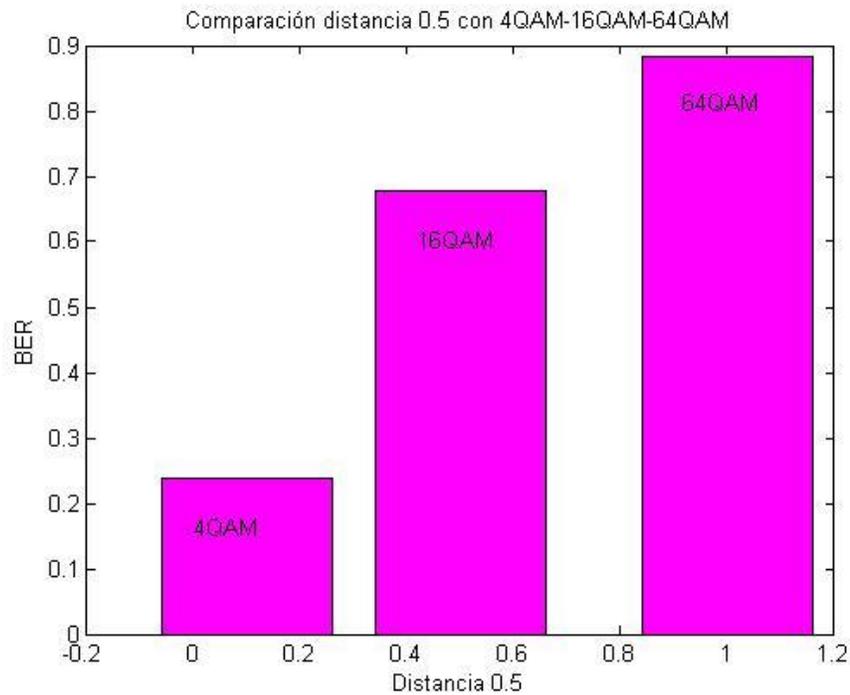
Ahora en la figura 4.13 con una distancia de 0.5 con respecto a la BS, el esquema de modulación más apto es 16QAM, debido a que las graficas muestran que al transmitir los 100,000 símbolos, el esquema de modulación con mayor detección de bits correctos es 4QAM, con aproximadamente 150,000 bits detectados, en seguida va con 130,000 bits 16QAM de los 400,000, y se finaliza con 64QAM el cual detectó 70,000 de los 600,000 bits transmitidos, con lo cual podemos concluir que debido a la tasa de información transmitida, 64QAM tiene una mayor pérdida que 4 y 16QAM, y entre estos dos esquemas de modulación, el mejor es 16QAM debido a que podemos transmitir más información y casi detectar la misma cantidad de bits correctos que 4QAM.



**Figura 4.13 Bits correctos para los esquemas de modulación QAM a distancia de 0.5.**

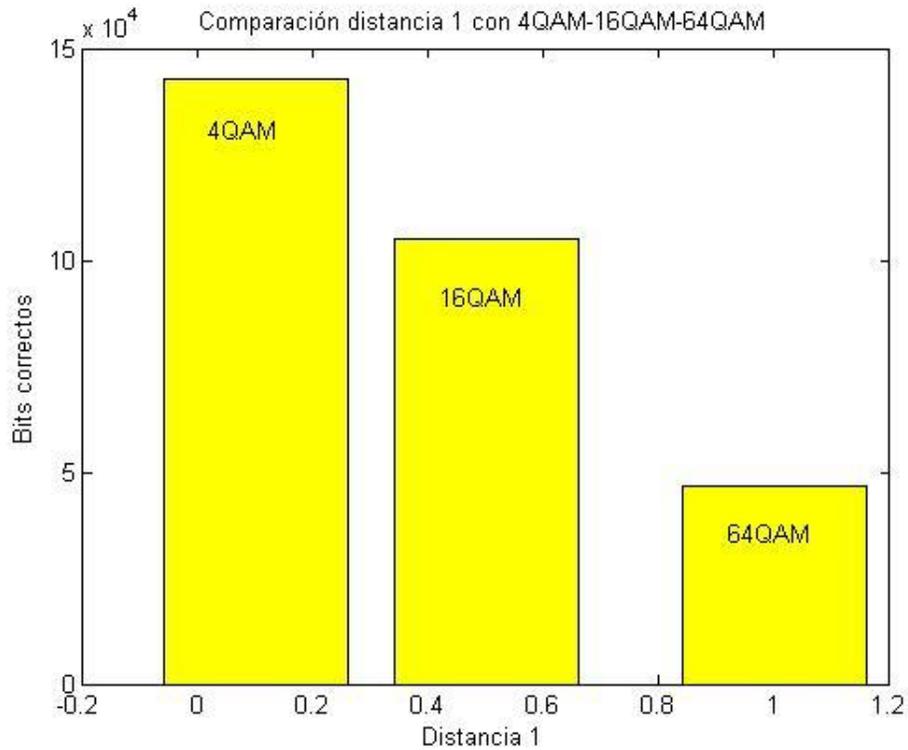
---

En la figura 4.14 se muestran las gráficas de la BER para los distintos esquemas de modulación, con una distancia de separación de 0.5 entre el dispositivo móvil y la BS se aprecia que 4QAM es el esquema de modulación con menor cantidad de errores debido a que tiene menos cantidad de bits transmitidos, el esquema de 16QAM tiene una pérdida del 67% de bits y 64QAM llega a tener a esta distancia un 88% de error. Por casi toda la información que se esta perdiendo en este punto, se aprecia que 4 QAM a esta distancia sigue siendo el mejor esquema de modulación, pero si se llega a disminuir un poco la distancia, 16QAM es un esquema que asegura transmitir más información.



**Figura 4.14 Tasa de bits erróneos de los esquemas de modulación QAM a una distancia de 0.5.**

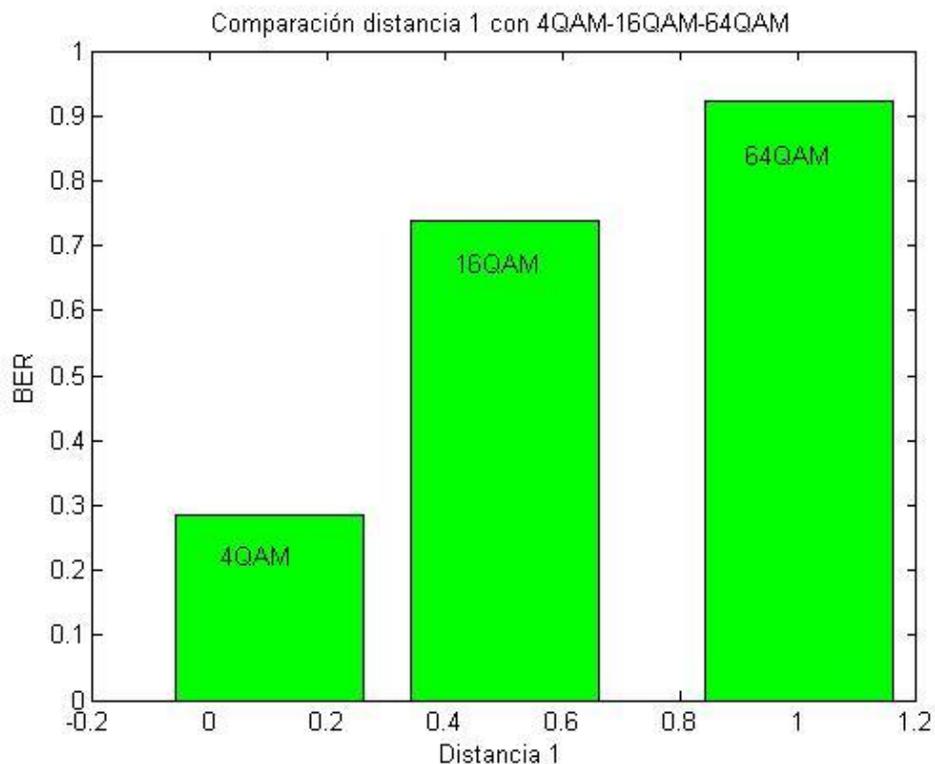
Se observa en la gráfica de la figura 4.15 que con una distancia máxima 4QAM esta detectando aproximadamente 148,000 bits correctos de los 200,000 transmitidos , 16QAM detecta aproximadamente 110,000 bits de los 400,000 transmitidos y 64QAM detecta 50,000 bits correctos de los 600,000, por lo que se puede concluir que el esquema de modulación que mayor detección tiene a gran distancia y nivel de SNR bajo es 4QAM, debido a la tasa de bits que maneja.



**Figura 4.15 Bits correctos para los esquemas de modulación QAM a distancia de 1.**

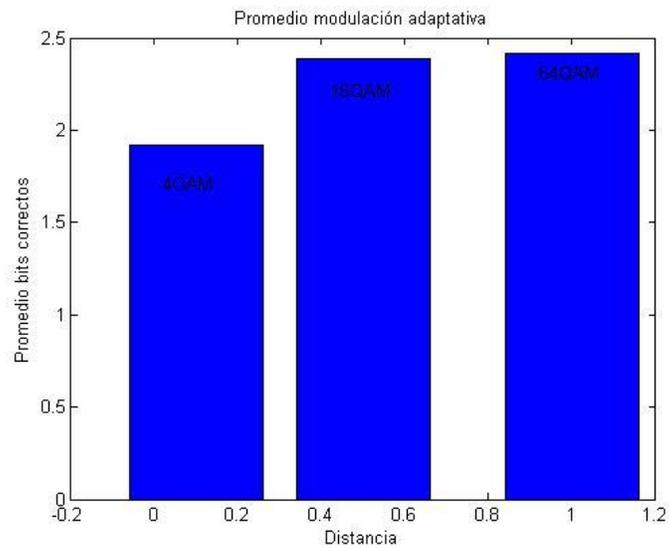
---

Al ubicar al usuario en la distancia máxima y exponerse a la interferencia de cada celda que afecta a la BS, la figura 4.16 muestra que el esquema de modulación con menor cantidad de bits erróneos es 4QAM, debido a que muestra tener un 28% de error en la detección de los bits transmitidos, los esquemas de modulación 16 y 64QAM al transmitir mayor cantidad de bits llegan a tener una pérdida de entre 75% para 16QAM, y 90% para 64QAM. Esto se debe a las condiciones de distancia e interferencia que tiene el canal y a la cantidad de bits transmitidos, por lo cual deducimos que 4QAM es un esquema que se puede utilizar para una demodulación a distancias máximas desde el receptor hacia el transmisor.

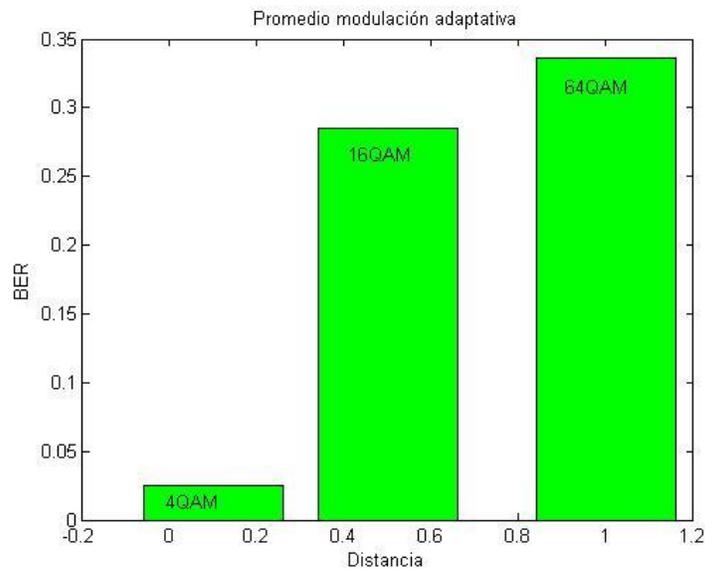


**Figura 4.16 Tasa de bits erróneos de los esquemas de modulación QAM a una distancia de 1.**

Finalmente en la figura 4.17 y 4.18 se muestran las gráficas de los promedios del enlace adaptativo para cada una de las modulaciones empleadas en LTE. Se observa que conforme la distancia aumenta, automáticamente los esquemas de modulación se van adaptando a las condiciones con respecto a dicha distancia, de tal manera que para la menor distancia se emplea 64QAM, la cual se adapta al siguiente esquema de modulación, el cual es 16QAM, y este a su vez, al detectar un aumento en la distancia, pasa al siguiente esquema final que es 4QAM.



**Figura 4.17 Promedios modulación adaptativa.**



**Figura 4.28 Promedios BER modulación adaptativa.**

---

## Conclusiones.

Se ha estudiado que la tecnología LTE, ofrece altas velocidades de transmisión de datos. Para estos sistemas de comunicaciones celulares se divide el área de cobertura de transmisión en secciones llamadas celdas. Estas celdas tienen una forma hexagonal que se asemejan a la forma ideal, ya que esta figura simétrica nos permite evitar interferencias con celdas adyacentes; otra ventaja de esta forma hexagonal de las celdas, es que estas pueden ser unidas sin dejar huecos, es decir, no quedan áreas sin servicio. Al grupo de estas celdas las conocemos como clúster, donde estas pueden ser utilizadas para cubrir mayores áreas de geográficas. Gracias a los clústers podemos reutilizar frecuencias que han sido usadas en otras celdas siempre y cuando estas celdas no sean adyacentes para evitar las interferencias entre las estaciones base que proporcionan el servicio.

Para la transmisión de las señales nos encontramos con ciertas dificultades para que lleguen de manera correcta, ya que existen diferentes fenómenos de propagación en el medio como los son la reflexión, difracción, refracción y dispersión de una señal. A consecuencia de estos fenómenos del medio se producen desvanecimientos en la transmisión y hacen que en nuestro sistema móvil no llegue de manera adecuada la señal. Estos desvanecimientos así mismo se producen por todos los obstáculos que hay en las ciudades como lo son los edificios, arboles, cerros, etc, es decir todo aquello que impida tener la línea de vista de nuestro receptor y nuestro transmisor.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones, se concluye que los sistemas de comunicación se ven afectados por los desvanecimientos rápidos y lentos, sin importar a que distancia se encuentre el dispositivo móvil de la BS, por lo que es necesario utilizar un sistema que se adapte a las condiciones del canal, si se usa 4, 16 o 64 QAM independientemente como un único esquema de modulación, dependerá de los niveles de SNR que se tenga en el medio o canal para detectar bien o no la información recibida, es por eso que al utilizar modulación adaptiva, tanto el nivel de bits correctos y BER se mantuvieron muy cercanos al desempeño de 4 QAM, y la gráfica de modulación adaptiva se acerca más al límite de Shannon, debido a que se están utilizando los tres esquemas de modulación, para propiciar que cuando las condiciones del medio cambien y se tenga una SNR diferente el sistema se adapte, y se pueda obtener mayor cantidad de bits correctos en la detección.

---

Esta es la razón por la cual LTE utiliza modulación adaptativa, ya que se adapta a la mejor condición de transmisión utilizando los esquemas de modulación digital en cuadratura 4 QAM, 16 QAM y 64 QAM.

La transmisión de la señal puede lograr un mayor desempeño si consideramos la codificación de canal. Este trabajo de tesis, esta basado únicamente en la modulación adaptativa de la señal.

---

## Referencias

- 1.- 3GPP 36.401, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description". Version 8.8.0 Release 8, 2010. Revista Telem@tica. Vol. 12. No. 2, mayo-agosto, 2013. ISSN 1729-3804.
- 2.- Comunicaciones digitales.  
Escrito por A. Artés Rodríguez, F. Pérez González, J. Cid Sueiro, R. López Valcarce, C. Mosquera. Nartallo, F. Pérez Cruz. DERECHOS RESERVADOS, c 2012 Los autores.
- 3.- Principios de comunicaciones móviles.  
Escrito por Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela, Ramon Agusti Comes.
- 4.- Los satélites de comunicaciones.  
Escrito por Juan José García Ruiz de Angulo.  
Marcombo Boixareu Editores Barcelona-México.
- 5.- LTE The UMTS Long Term Evolution. FROM THEORY TO PRACTICE.  
Escrito por Stefania Sesia. Issam Toufik. Matthew Backer  
Segunda edición.
- 6.- Estudio del control de potencia en el enlace de bajada de un sistema LTE  
Escrito por: Ana María García Cash, Jazmín Maás García, María Fernanda Bejero Cuevas. Año 2015.
- 7.- "LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles".  
Escrito por Comes, Ramon Agusti. Fundación Vodafone España, 2010.
- 8.- 3GPP 36.300, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2". Version 8.12.0 Release 8, 2010.
- 9.- "Principles of mobile communication".  
Escrito por Gordon L. stüber.  
Segunda edición.
- 10.- "Fundamentals of LTE"  
Escrito por Arunabha Ghosh jun Zhang, Editorial Pearson Education, Inc copia 2011.
- 11.- Principios de comunicaciones móviles.  
Escrito por Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela, Ramon Agusti Comes.

---

12.- The wireless propagation channel.

Escrito por F. Perez, P. Marino. Modeling. Editorial John Wiley & Sons Ltd, 2008.

13.- Análisis del comportamiento de esquemas de modulación adaptativos en LTE.

Escrito por Víctor Torres, Fermín Esparza, Francisco Falcone.

torres.47646@e.unavarra.es1, esparza.47305@e.unavarra.es1,

francisco.falcone@unavarra.es1 (1) Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Edificio Los Tejos, 1 Planta, Campus Arrosadia, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 31006, Navarra.

14.- Comunicaciones y Redes de Computadores.

Escrito por William Stalling.

7a Edición.

15.- LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice.

Escrito por Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker.

Segunda edición.

16.-Fundamentals of LTE.

Escrito por Arunabha Ghosh, Jun Zhang, Jeffrey G. Andrews, Rias Muhamed.

17.- Digital Comunnication.

Escrito por Bernard Sklar.

Segunda edición.

18.-Telecommunication System Engineering.

Escrito por Roger L. Freeman.

Tercera edición.

19.- Understanding LTE with matlab.

Escrito por Houman Zarrinkoub.