



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES.**

**TEMA: ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP EN UN  
SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO BASADO EN OFDM  
CON INTERFERENCIA CO-CANAL SOBRE UN CANAL AWGN CON  
DESVANECIMIENTO RAYLEIGH.**

**AUTOR: SÁNCHEZ JÁCOME, ANDRÉS RICARDO**

**DIRECTOR: Ing. OLMEDO CIFUENTES, GONZALO FERNANDO PhD.**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP EN UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO BASADO EN OFDM CON INTERFERENCIA CO-CANAL SOBRE UN CANAL AWGN CON DESVANECIMIENTO RAYLEIGH”** realizado por el señor **ANDRÉS RICARDO SÁNCHEZ JÁCOME**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **ANDRÉS RICARDO SÁNCHEZ JÁCOME** para que lo sustenten públicamente.

**Sangolquí, 01 de marzo de 2018**

Atentamente,

  
-----  
Ing. Gonzalo Fernando Olmedo Cifuentes PhD.  
**DIRECTOR**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y**  
**TELECOMUNICACIONES**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **ANDRÉS RICARDO SÁNCHEZ JÁCOME**, con cédula de identidad N° 1717733875, declaro que este trabajo de titulación **“ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP EN UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO BASADO EN OFDM CON INTERFERENCIA CO-CANAL SOBRE UN CANAL AWGN CON DESVANECIMIENTO RAYLEIGH”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 01 de Marzo de 2018**

Andrés Ricardo Sánchez Jácome

CC: 1717733875



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y**  
**TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **ANDRÉS RICARDO SÁNCHEZ JÁCOME**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP EN UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO BASADO EN OFDM CON INTERFERENCIA CO-CANAL SOBRE UN CANAL AWGN CON DESVANECIMIENTO RAYLEIGH**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

**Sangolquí, 01 de marzo de 2018**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'S. Sánchez Jácome', is written over a horizontal dashed line.

Andrés Ricardo Sánchez Jácome

CC: 1717733875

## DEDICATORIA

A mis padres Yolanda y Telmo por creer siempre en mí y brindarme una educación sustentada en honestidad, lealtad y responsabilidad.

A mis hermanos, Rodrigo y Orlando por sus atenciones cuando más los necesitaba y estar siempre pendientes de mí.

A mi hermana, Gaby por sus consejos y darme aliento para continuar siempre adelante.

A mi amada Karina por que vi en ti que todo es posible con disciplina, amor y perseverancia.

A mi tía, Hilda gracias por todo su apoyo que a través de la distancia siempre fue una motivación más para continuar.

Este trabajo está dedicado a ustedes con todo el amor del mundo y gratitud.

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por cobijarme con su manto divino y darme el don de la sabiduría para concluir esta profesión que amo sin ningún inconveniente.

A mi madre por su ternura, a mi padre y su sacrificio que hicieron que hoy me encuentre en lugar que estoy.

A Karina, por ser el combustible de mi motor y el hombro donde descansar en tiempos difíciles, gracias por el apoyo incondicional.

A mi querida ESPE y todos mis maestros, por la paciencia y consejos que me supieron dar y me han servido para concluir con éxito la carrera universitaria.

Un agradecimiento especial al Dr. Gonzalo Olmedo Cifuentes, por su tiempo y asesoramiento para realizar el trabajo de investigación.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvi</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación e Importancia.....	15
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo general.....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19

1.4 Metodología.....	20
1.5 Resultados Esperados. ....	21
1.6 Visión general del trabajo de investigación.....	21
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>23</b>
<b>2. CONSEPTOS BASICOS.....</b>	<b>23</b>
2.1 Sistemas de Redes Celulares. ....	23
2.1.1 Reúso de Frecuencias.....	24
2.2 Modelos de Canal.....	26
2.2.1 Desvanecimiento.....	26
2.2.2 Perdidas por propagación.....	29
2.2.3 Interferencia. ....	31
2.2.4 Ruido.....	33
2.3 Esquemas de modulación. ....	36
2.3.1 Modulación PAM. ....	37
2.3.2 Modulación BPSK.....	39
2.3.3 Modulación QAM.....	39
2.4 Técnica OFDM.....	42
2.4.1 Ventajas de OFDM. ....	44
2.4.2 Codificación OFDM. ....	45
2.4.3 Generación y recepción de señales OFDM.....	45
2.5 Generalidades del protocolo TCP.....	47
2.5.1 Modelo de referencia OSI.....	48
2.5.2 Modelo de referencia TCP/IP.....	50
2.5.3 Protocolo TCP.....	51
2.5.4 Características del protocolo TCP. ....	52
2.6 Versiones de TCP.....	58
2.6.1 TCP Reno.....	58
2.6.2 TCP Westwood.....	59
2.6.3 TCP NACK.....	59



<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>61</b>
<b>3. DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP EN UN SISTEMA DE TRANSMISION DIGITAL 4-QAM, 16-QAM Y 64QAM CON INTERFERENCIA CO-CANAL SOBRE UN CANAL AWGN CON DESVANECIMIENTO RAYLEIGH. ....</b>	<b>61</b>
3.1 Probabilidad de error de símbolo en Modulaciones Digitales con Ruido AWGN.....	61
3.1.1 Probabilidad de error de símbolo de una modulación M-PAM.....	64
3.1.2 Probabilidad de error de símbolo de M-QAM.....	70
3.2 Probabilidad de error de símbolo en Modulaciones Digitales con Ruido AWGN en presencia de la interferencia Co-canal. ....	81
3.2.1 Probabilidad de error de símbolo de una modulación M-PAM en presencia de interferencia co-canal. ....	82
3.2.2 Probabilidad de error de símbolo de una modulación QAM en presencia de interferencia co-canal. ....	88
3.3 Probabilidad de error de símbolo en Modulaciones Digitales con Ruido AWGN en presencia de la interferencia Co-canal sobre un canal Rayleigh. ....	97
3.3.1 Probabilidad de error de símbolo de una modulación M-QAM en presencia de la interferencia co-canal y el desvanecimiento Rayleigh. ....	98
3.4 Modelamiento matemático del protocolo TCP para canales inalámbricos. ....	100
3.4.1 Análisis de la variación de la ventana de congestión.....	101
3.4.2 Cálculo de la ventana inicial.....	104
3.4.3 Probabilidad de error de un segmento TCP en un medio inalámbrico .....	107
3.4.4 Análisis de la ventana inicial de congestión.....	108
3.4.5 Throughput de datos con el protocolo TCP.....	109
3.4.6 Parametrización del nuevo protocolo TCP-NACK .....	110
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>116</b>
<b>4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS. ....</b>	<b>116</b>
4.1 Desempeño del protocolo TCP en distintos escenarios inalámbricos.....	116
4.1.1 Análisis de resultados obtenidos con un interferente fuerte, canal AWGN. ....	116

4.1.2 Análisis de resultados obtenidos con un interferente fuerte, canal AWGN y desvanecimiento Raleigh. ....	138
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>145</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>145</b>
5.1 Conclusiones.....	145
5.2 Recomendaciones. ....	146
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>147</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>TCP throughput sobre LAN y WAN, TCP throughput sobre IEEE 802.11 LAN.</i> .....	15
<b>Tabla 2.</b> <i>Modulación 4-PAM</i> .....	39
<b>Tabla 3.</b> <i>Modulación BPSK</i> .....	39
<b>Tabla 4.</b> <i>Modulación 4-QAM</i> .....	40
<b>Tabla 5.</b> <i>Eficiencia Espectral.</i> .....	41
<b>Tabla 6.</b> <i>Parámetros de sistema canal AWGN, 1 interferente co-canal.</i> .....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Estructura del simulador GPRS construido con la herramienta Bones.</i> .....	2
<b>Figura 2.</b> <i>Comparación de los valores de “throughput”</i> .....	3
<b>Figura 3.</b> <i>TCP vs. Block error rate.</i> .....	5
<b>Figura 4.</b> <i>Tasa de transferencia vs Probabilidad de error</i> .....	7
<b>Figura 5.</b> <i>Throughput Escenario 1</i> .....	8
<b>Figura 6.</b> <i>Throughput Escenario 2</i> .....	9

<b>Figura 7.</b> Comparación del BER para BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM para un SIR=20 con un interferente. ....	10
<b>Figura 8.</b> Dominio básico de Cellular IP.....	12
<b>Figura 9.</b> TCP RTT behavior over GSM y TCP performance against MTU size over GSM.....	14
<b>Figura 10.</b> Interferencia co-canal .....	18
<b>Figura 11.</b> Distribución de celdas y canales Downlink y Uplink.....	24
<b>Figura 12.</b> Distancia de reúso.....	25
<b>Figura 13.</b> Tipos de Desvanecimiento.....	27
<b>Figura 14.</b> (a) Esquema de distribución Rayleigh (b) PDF Rayleigh. ....	28
<b>Figura 15.</b> Efecto Doppler.....	29
<b>Figura 16.</b> Mecanismos de Propagación. ....	30
<b>Figura 17.</b> Interferencia.....	31
<b>Figura 18.</b> Interferencia Co-canal. ....	32
<b>Figura 19.</b> Ruido en Comunicaciones. ....	33
<b>Figura 20.</b> Inserción del ruido al canal inalámbrico.....	34
<b>Figura 21.</b> Efectos del Ruido en la señal transmitida.....	35
<b>Figura 22.</b> a) Modulación 2-PAM o BPSK y b) Modulación 4-PAM .....	38
<b>Figura 23.</b> a) Mod. 4-QAM, b) Mod. 16-QAM, c) Mod. 64-QAM.....	40
<b>Figura 24.</b> Espectro OFDM con 6 sub-portadoras. ....	44
<b>Figura 25.</b> Diagrama de bloque de un TX y RX OFDM.....	46
<b>Figura 26.</b> Prefijo cíclico OFDM. ....	47
<b>Figura 27.</b> Modelo de referencia OSI.....	49
<b>Figura 28.</b> Modelo de referencia TCP/IP.....	50
<b>Figura 29.</b> TCP ventana deslizante.....	55
<b>Figura 30.</b> Segmento TCP .....	57
<b>Figura 31.</b> Encabezado TCP-NACK.....	60
<b>Figura 32.</b> Modelo de un sistema de transmisión digital con ruido AWGN.....	62
<b>Figura 33.</b> Distribución Normal o Gauss. ....	63
<b>Figura 34.</b> Probabilidad de x mayor o igual que a. ....	63
<b>Figura 35.</b> Probabilidad de error de 2-PAM.....	65

<b>Figura 36.</b> Probabilidad de error 4-PAM .....	68
<b>Figura 37.</b> Diagrama de constelación de 4-QAM y energía media de símbolo. ....	71
<b>Figura 38.</b> Diagrama de constelación de 16-QAM y energía media de símbolo. ....	73
<b>Figura 39.</b> Diagrama de constelación de 64 QAM.....	76
<b>Figura 40.</b> Probabilidad M-QAM.....	79
<b>Figura 41.</b> Modelo de un sistema de transmisión digital con ruido AWGN e interferencia co-canal. ....	82
<b>Figura 42.</b> Interferencia co-canal. ....	83
<b>Figura 43.</b> Modulación 2-PAM con 1 interferente co-canal. ....	85
<b>Figura 44.</b> Modulación 2-PAM con 2 interferente co-canal. ....	87
<b>Figura 45.</b> Probabilidad de error de símbolo 4-QAM con 1 interferente.....	89
<b>Figura 46.</b> Modelo de un sistema de transmisión digital con ruido AWGN e interferencia co-canal con desvanecimiento Rayleigh. ....	97
<b>Figura 47.</b> Variación de la ventana de congestiónamiento Reno. ....	102
<b>Figura 48.</b> Ventanas de congestiónamiento con el uso de NACK's .....	111
<b>Figura 49.</b> Ventanas de congestiónamiento con el mecanismo normal. ....	111
<b>Figura 50.</b> Escenario a, con color verde y marcada con círculos ubica todas las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario interferente y de color rojo las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario de interés. ....	117
<b>Figura 51.</b> Escenario b, con color verde y marcada con círculos ubica todas las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario interferente y de color rojo las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario de interés. ....	118
<b>Figura 52.</b> Escenario c, con color verde y marcada con círculos ubica todas las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario interferente y de color rojo las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario de interés .....	119
<b>Figura 53.</b> Resultados correspondientes a los escenarios a, b y c en una modulación 4-QAM, Probabilidad de error de bit en función del $E_b/N_0$ en un canal AWGN, 1-interferente co-canal.....	121

- Figura 54.** Resultados correspondientes a los escenarios a, b y c en una modulación 16-QAM, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  en un canal AWGN, 1-interferente co-canal..... 122
- Figura 55.** Resultados correspondientes a los escenarios a, b y c en una modulación 16-QAM, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  en un canal AWGN, 1-interferente co-canal. .... 123
- Figura 56.** Resultados obtenidos en relación a los escenarios a, b y c, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  para una modulación 4QAM, 16QAM, 64QAM, en un canal inalámbrico, Canal AWGN, 1-interferente co-canal..... 124
- Figura 57.** Resultados obtenidos para los escenarios a, b y c, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  en relación a las modulaciones 4QAM, 16QAM, 64QAM, en un canal inalámbrico, Canal AWGN, 1-interferente co-canal. .... 125
- Figura 58.** Resultados de Eficiencia Obtenidos para los Escenarios a, b y c en relación a modulaciones 4, 16 y 64 QAM, Múltiples Protocolos Reno, Westwood y Nack, Throughput en función de la Probabilidad de error de paquete TCP, Canal AWGN, 1-Interferente co-canal. .... 127
- Figura 59.** Resultados de Eficiencia Obtenidos para los Escenarios a, b y c en relación a modulaciones 4, 16 y 64 QAM, Múltiples Protocolos Reno, Westwood y Nack, Throughput en función del  $E_b/N_0$ , Canal AWGN, 1-Interferente co-canal. .... 130
- Figura 60.** Resultados de Eficiencia Obtenidos en relación a los Escenarios a, b y c con modulaciones 4, 16 y 64 QAM, Múltiples Protocolos Reno, Westwood y Nack, Throughput en función del  $E_b/N_0$ , Canal AWGN, 1-Interferente co-canal. .... 133
- Figura 61.** Eficiencia del canal inalámbrico bajo los protocolos TCP-Reno Teórico y TCP-Reno emulado con una modulación 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM, Canal AWGN, 1-interferente Co-canal. .... 135
- Figura 62.** Eficiencia del canal inalámbrico bajo los protocolos TCP-Reno-NACK Teórico y TCP-Reno-NACK emulado con una modulación 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM, Canal AWGN, 1 Interferente co-canal. .... 137
- Figura 63.** Escenario escogido donde se introduce el desvanecimiento Rayleigh, con color verde y marcada con círculos ubica todas las posibles posiciones donde se

puede ubicar el usuario interferente y de color rojo las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario de interés.....	138
<b>Figura 64.</b> Probabilidad de error de bit en función del $E_b/N_0$ para el escenario de la Fig. 63 en una modulación 4-QAM, con interferencia co-canal y desvanecimiento Rayleigh.....	139
<b>Figura 65.</b> Probabilidad de error de bit en función del $E_b/N_0$ para el escenario de la Fig. 63 en una modulación 16-QAM, con interferencia co-canal y desvanecimiento Rayleigh.....	140
<b>Figura 66.</b> Probabilidad de error de bit para los escenarios de la Figura 63 en una modulación 64-QAM, con interferencia co-canal y desvanecimiento Rayleigh.....	140
<b>Figura 67.</b> Resultados de la Probabilidad de error de bit en un Canal Inalámbrico en relación a Modulaciones 4, 16 y 64QAM, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal, Con y Sin desvanecimiento Rayleigh. ....	141
<b>Figura 68.</b> Eficiencia del Canal Inalámbrico con Modulaciones 4QAM, TCP, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal, Con y Sin Desvanecimiento Rayleigh. ....	142
<b>Figura 69.</b> Eficiencia del Canal Inalámbrico con Modulaciones 16QAM, TCP, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal, Con y Sin Desvanecimiento Rayleigh. ....	143
<b>Figura 70.</b> Eficiencia del Canal Inalámbrico con Modulaciones 64QAM, TCP, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal, Con y Sin Desvanecimiento Rayleigh. ....	144

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó el análisis de desempeño de los Protocolos de Control de Transmisión (TCP, por sus siglas en inglés *Transmission Control Protocol*), Reno, Westwood y NACK a través de su *throughput* y retardo en un sistema de comunicaciones inalámbricas basadas en multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, por sus siglas en inglés *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) con múltiples modulaciones utilizando terminales portátiles. Se realizará la parametrización teórica de los protocolos TCP y la comunicación en canales con ruido blanco Gaussiano (AWGN, por sus siglas en inglés *Additive White Gaussian Noise*) con desvanecimiento *Rayleigh*, considerando un sistema celular con factor de reuso de frecuencias igual a 1 e interferencia co-canal en el enlace *Uplink*. El sistema será diseñado para parametrizar la interferencia fuerte de un usuario ubicado en las seis celdas adyacentes, donde los equipos portátiles transmitirán a la misma potencia en distintas celdas del *cluster*, se empleará la técnica OFDM es decir se transmitirá con múltiples modulaciones como (4QAM, por sus siglas en inglés *Quadrature Amplitude Modulation*) 16QAM y 64QAM por lo tanto se manejarán tasas variables en función de la posición del terminal portátil en la celda en dirección *Uplink*. Se analizarán los resultados sobre el *throughput* y el retardo del sistema en función de la probabilidad de error de bit, probabilidad de error de paquete TCP y la relación señal a interferencia que manejan los algoritmos modelados con las combinaciones de las distintas tasas de modulación y mecanismos TCP sobre un canal AWGN con desvanecimiento *Rayleigh* considerando la interferencia co-canal. Finalmente se realizará conclusiones y recomendaciones de todo el trabajo descrito.

### Palabras clave

- **RAYLEIGH**
- **TCP**
- **THROUGHPUT**
- **UPLINK**
- **CO-CANAL**

## **ABSTRACT**

In this research the performance analysis of Transmission Control Protocols Reno, Westwood and NACK were analyzed by using a throughput and delay in a wireless communication system based on orthogonal frequency division multiplexing with multiple modulations using portable terminals. Theoric parametering of TCP protocols and channel communication through Additive White Gaussian Noise (AWGN) with Rayleigh vanishing considering cellular system as a factor that refuses equal frequencies to 1 and co-channel interference inside link Uplink. The system will be designed to parameterize the strong interference of a user located in the six adjacent cells, where portable terminals will transmit the same intensity inside different cells of cluster, OFDM technique will be used with multiple modulations 4QAM, 16QAM, 64QAM so variable rates will be used according to portable terminal position in the cell with Uplink direction. The throughput results will be analyzed as well as the system delay with the bit error probability, TCP package error probability and the signal – function relation interference that modeled algorithms used with different combinations of modulation rates and TCP mechanism over an AWGN channel with Rayleigh vanish by considering co-channel interference. The results from this research will get wireless channel efficiency by its throughput and system delay, considering wireless channel parameters, the variables mentioned before, and under different TCP protocols. The result analysis will show us how practical TCP protocol is in order to work inside wireless environments. Conclusions and recommendations will be presented at the end of the paperwork.

### **Keywords.**

- **RAYLEIGH**
- **TCP**
- **THROUGHPUT**
- **UPLINK**
- **CO-CANAL**



# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

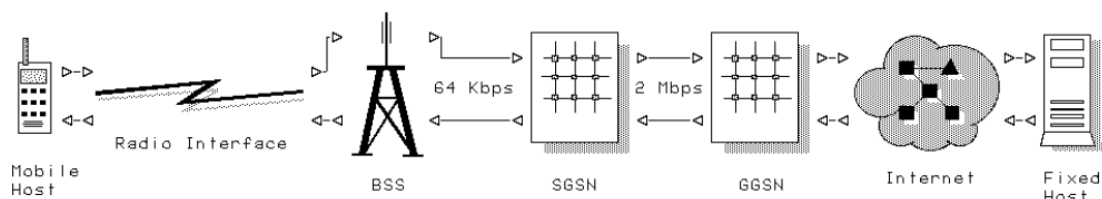
En la actualidad las comunicaciones móviles tienen un alto impacto en la sociedad y la tendencia cada vez es más fuerte de pasar de la comunicación de voz a la comunicación de datos, esto conlleva que las nuevas tecnologías móviles como la cuarta generación (4G) y quinta generación (5G) migren hacia un sistema de interconexión donde la mayor parte de su tráfico sean los datos y que nos permitan conectarnos a la internet para realizar las descargas necesarias, al manejar una conexión de datos es necesario analizar el Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet (TCP/ IP, por sus siglas en inglés *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) y como éste interactúa con los sistemas celulares para encontrar una alternativa que aumente la tasa de transmisión, para ello necesitamos realizar una investigación previa de trabajos donde ya se analizan estos parámetros y los resultados obtenidos.

En la búsqueda de antecedentes se puede citar el trabajo presentado por (Juan, Ferran, & Josep Lluís Faner) en su artículo “Análisis del Comportamiento de las Opciones del Protocolo TCP en un Sistema GPRS “ el sistema de servicio general de paquetes vía radio (GPRS, por sus siglas en inglés *General Packet Radio Service*) creado en la década de los 80’s tiene una gran adaptación con las aplicaciones de internet desarrolladas por (Kalden, Meirick, & Meyer, 2000) como FTP, www y e-mail, el protocolo TCP es presentado en varias versiones y modificaciones para un mejor funcionamiento.

En esta investigación se estudia el rendimiento de TCP SACK desarrollado por (Mathis, Mahdavi, Floyd, & Romanow, 1996) y *Timestamps* (TS) estudiado por (Jacobson, Braden, & Borman, 1992) en una red GPRS. Por los retardos presentes en la interfaz de radio de la red, SACK resulta más eficiente y TS es más deficiente. El análisis de TCP ya fue analizado en un sistema

GPRS, pero con un solo terminal móvil (TM), el antecedente analizado presenta un estudio con diversos usuarios 15 TM's en el canal, y estos inyectan distintos tráfico a la red para tener un canal cargado.

El escenario GPRS ha sido simulado con la herramienta *Cadence Bones Designer* con una transmisión con el protocolo de transferencia de archivos (FTP, por sus siglas en inglés *File Transfer Protocol*) tal como se muestra en la Figura 1, de un archivo 512 kB desde un servidor FTP con capas IP y TCP en un terminal fijo (TF). En la simulación se considera la versión TCP Reno, el retardo se encuentra modelado estadísticamente bajo una variable aleatoria gaussiana. Un nodo llamado *Gateway GPRS support node* (GGSN) que es un *router* y en el nodo *Serving GPRS support node* (SGSN) es insertado un retardo fijo simulando el retardo del procesamiento del paquete IP. Los enlaces tanto GGSN-SGSN y SGSN-*base station subsystem* (BSS), son modelados con retardos fijos dependientes de las capacidades de los enlaces, los cuales son de 2 Mbps y de 64 kbps respectivamente.

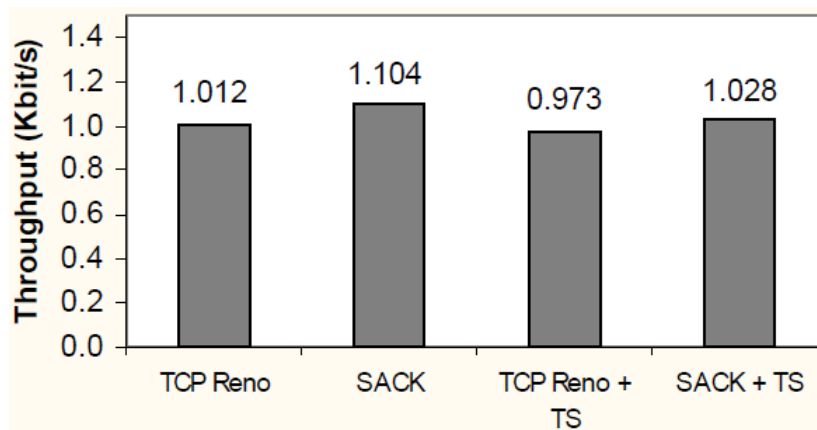


**Figura 1.** Estructura del simulador GPRS construido con la herramienta Bones.

Fuente: (Juan, Ferran, & Josep Lluís Faner)

El enlace de radio fue modelado con una probabilidad de pérdida de paquete y con un histograma de retardo de trama de control de enlace lógico (LLC, por sus siglas en inglés *Logical Link Control*). Hay tres tipos de tráfico en la red GPRS: e-mail, WWW y FTP distribuidos en la siguiente forma: 50% e-mail, 30% WWW y 20% FTP. Después de varias simulaciones se obtuvo el *throughput* de las versiones TCP reno: 1,015 kbps, TCP reno con la opción SACK: 1,104 kbps, TCP Reno con la opción TS: 0,973 kbps y TCP Reno con las opciones SACK y TS: 1,028 kbps tal

como se muestra en la Figura 2. Con la opción TS el *throughput* empeora. Usando la versión TCP con la opción TS el valor de *throughput* empeora un 3,85%, y trabajando conjuntamente con las opciones TS y SACK el valor de *throughput* empeora un 6,88%. El *throughput* mejora cuando se utiliza la opción SACK.



**Figura 2.** Comparación de los valores de “throughput”.

Fuente: (Juan, Ferran, & Josep Lluís Faner)

Sin la opción TS el valor de *throughput* mejora un 9,09% en comparación con la versión TCP Reno, y cuando se utiliza la opción TS el *throughput* mejora sólo un 1,58% debido al mecanismo de control de congestión de TCP que depende de *round-trip time* (RTT) y este al estar ligado fuertemente a las pérdidas y retardos en el canal, hacen que se degrade el rendimiento del canal, el mecanismo TCP con SACK evita las retransmisiones de segmentos aumentado el rendimiento del canal.

Un entorno donde se realizan pruebas de rendimiento y alternativas de mejora del protocolo TCP es presentado en “Capacity Estimation and TCP Performance Enhancement over Mobile WiMAX Networks” presentado por (Yun, y otros, 2009), para evaluar la capacidad y el rendimiento del sistema WiMAX móvil que utiliza un acceso múltiple ortogonal de división de frecuencia escalable (OFDMA, por sus siglas en inglés *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) para transportar ancho de banda (AB) de canal de soporte de datos de entre 3,5 MHz y 20

MHz, con hasta 2048 subportadoras se requieren todos los aspectos de la evaluación del rendimiento, desde el enlace aéreo hasta la aplicación. Se estudió un perfil de uso de la aplicación con el fin de obtener una información coherente para una evaluación del sistema, como el dimensionamiento de la red WiMAX.

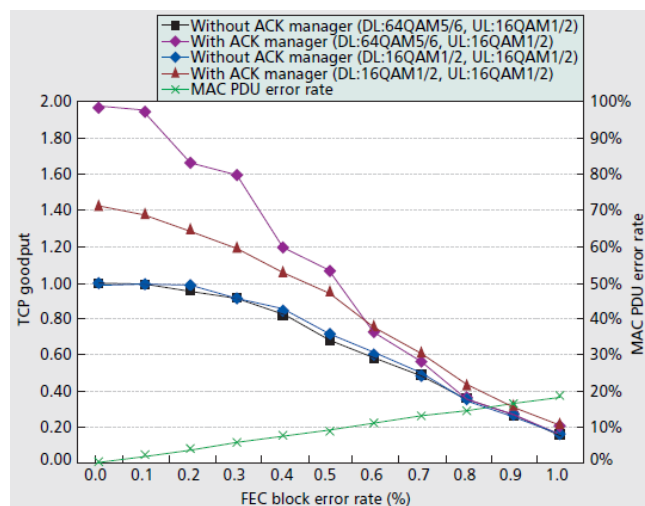
El perfil de uso incluye lo siguiente: Número de suscriptores por celda, tipo de aplicaciones utilizadas por los suscriptores, tipo de suscriptores, relación de mezcla de uso de aplicación, número de sesiones utilizadas por día por aplicación, distribución diurna del tráfico por aplicación. El rendimiento del sistema para voz sobre IP (VoIP por sus siglas en inglés *voice over IP*) se realizó el análisis para estimar el límite superior del número total de usuarios VoIP simultáneos, que está limitado por AB del sistema y la simulación de rendimiento para identificar el número de usuarios VoIP simultáneos que satisfacen las pautas de retardo de paquetes VoIP.

Tanto para el enlace de descarga (DL, por sus siglas en inglés *Down Link*) y el enlace de subida (UL por sus siglas en inglés *Up Link*) con modulaciones (QPSK 1/2, QPSK 1/2), (QPSK 1/2, 16QAM 3/4) (16QAM 3/4, 16QAM 3/4), el rango del número de usuarios es de 70 a 250 usuarios, El retardo medio del paquete de VoIP de la estación móvil (MS por sus siglas en inglés *Mobile Station*) a la estación base (BS, por sus siglas en inglés *Base Station*) cuando tanto el DL como el UL *Modulation Coding Scheme* (MCS) en QPSK 1/2 ya excede los 150 mseg que es el retraso de paquete extremo a extremo preferido para el servicio VoIP cuando el número de usuarios de VoIP es de 60. Cuando los MCS de DL y UL son 64QAM 5/6 y 16QAM 3/4, el retardo medio del paquete comienza a exceder los 150 ms con 100 usuarios de VoIP.

En cuanto al TCP en IEEE 802.16E *Wimax mobile* se centran en las características de TCP sobre WiMAX móvil. Un inconveniente común, la pérdida de TCP ACK, es investigado y validan los resultados con un simulador de red *network simulator* (NS2). La degradación del rendimiento debido al tráfico se puede reducir al 66,67%. Para esto presentan el gestor ACK, que consiste en el

unificador ACK y el extractor ACK en el WiMAX MAC, para reducir la probabilidad de perder información de paquetes ACK en el enlace aéreo y el efecto de compresión ACK.

Para los resultados de la evaluación propuesta se utilizó una aplicación FTP bidireccional que intercambia archivos de 5 MB, utilizamos la modulación 16QAM 1/2 y 64QAM 5/6 para la modulación DL y 16QAM 1/2 para la UL; Y por razones de simplicidad, sólo se introdujo la distorsión de aire comprimido DL, el rendimiento cayó a cerca de 20% cuando el *Block Error Rate* (FEC BLER) alcanzó el 1%. Cuando el FEC BLER es cero, el administrador ACK aumenta el rendimiento hasta un 40% con 16QAM 1/2 DL y más del 90% en un escenario 64QAM 5/6 DL. Los resultados muestran una relación de mejora de transferencia de TCP de descarga frente al FEC, con y sin el gestor de ACK; La tasa de error de la unidad de datos de protocolo (PDU, por sus siglas en inglés *Protocol Data Unit*) de MAC corresponde al FEC BLER. Mientras que el FEC BLER está aumentando, la relación de degradación de rendimiento TCP para los escenarios DL 64QAM y DL 16QAM es muy similar sin el gestor ACK tal como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** TCP vs. Block error rate.

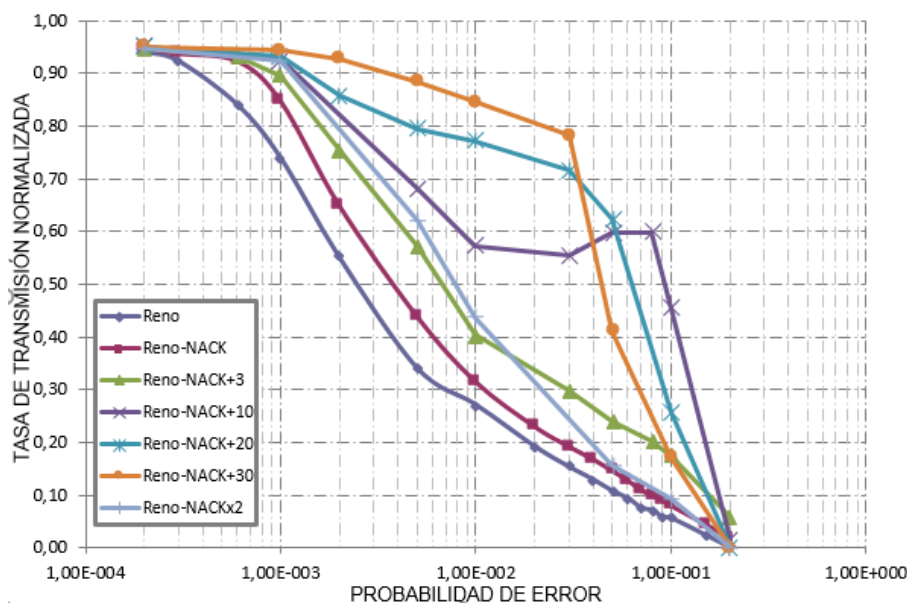
Fuente: (Yun, y otros, 2009).

Un trabajo de investigación muy profundo e incluso ya implementado físicamente es presentado en “Verificación del Desempeño de un Nuevo Algoritmo de Control de Congestionamiento en Entornos Inalámbricos Reales Mediante la Modificación del Protocolo TCP en el *Kernel* de Linux” desarrollado por (Pilo-Pais & Olmedo , 2011) , el protocolo TCP publicado en la (IETF:RFC 793, 1981) se desarrolló pensando en entornos alámbricos donde se presenta una tasa de error muy baja y las pérdidas de paquetes son por la presencia de la congestión en la red, debido a los factores inalámbricos estos enlaces son muy propensos a errores lo que conlleva a pérdida de paquetes, el protocolo TCP no distingue el motivo por que se presentó la pérdida de un segmento y por su naturaleza reduce su tasa de transmisión y baja su rendimiento.

Olmedo y Pilo-Pais en su tesis proponen el envío de confirmaciones negativas (NACK, por sus siglas en inglés *negative acknowledge*) desarrollado por (Olmedo, 2008) para mejorar el rendimiento de TCP, lo que se hace es informar al emisor la presencia de un segmento con error para que inmediatamente realice la retransmisión y evitar la reducción de la ventana de congestión que es el mecanismo típico de TCP, el algoritmo TCP es implementado en el *kernel* del sistema Linux, el algoritmo fue evaluado en escenarios reales y con diferentes tasas de error por (Delgado, 2014). Los resultados presentados muestran una mejora notable en el desempeño del protocolo TCP sobre medios inalámbricos. La idea de la confirmación negativa se mantiene como el concepto de recepción mediante ACKs, la diferencia radica en que en lugar de informar la llegada de un segmento informa que el segmento tiene error y se retransmita inmediatamente, para esto se configuro una bandera NACK.

Al hacer esto se espera que el emisor retransmita los segmentos con error antes de bajar su ventana de congestión manteniendo su throughput. La topología de pruebas consta de una computadora personal (CP) cliente y un CP servidor, enlazados por un emulador de enlace inalámbrico con diferentes tasas de error de 0,02%-20%, retardo de 70 ms, un AB de 5000kb con la ayuda de netem. TCP NACK presenta un mejor desempeño, pero no superior del 2% o 10% del AB en el mejor caso. Para TCP NACK+3 se obtiene un incremento mínimo del 13% y máximo del 23% de la capacidad del canal. TCP NACK con ventana de congestión duplicada ofrece una mejora

máxima del 28%. En el rango de probabilidad de error  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$  TCP NACK+10, TCP NACK+20 y TCP NACK+30 presentan incrementos máximos en el *throughput* de 40%, 57% y 63% respectivamente tal como se muestra en la Figura 4.



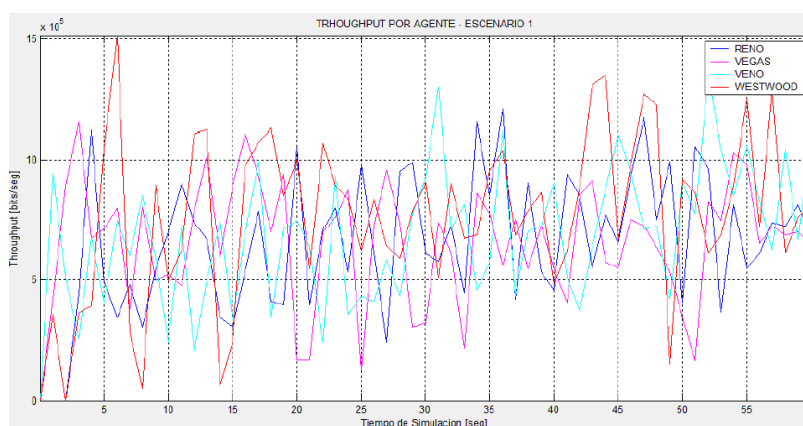
**Figura 4.** Tasa de transferencia vs Probabilidad de error.

Fuente: (Pilo-Pais & Olmedo , 2011)

Otra investigación practica es propuesta en “Análisis comparativo del desempeño de agentes TCP en redes de radio cognitiva” investigado por (Leal & López, 2013), donde se evalúa los algoritmos TCP Reno, Vegas (Brakmo, O’Malley, & Peterson, 1994), Veno (Cheng Peng & Soung C., 2003) y Westwood, sobre un entorno de red de radio cognitiva desarrollado por (J Joseph. & Maguire, 2002), (Zhong), la característica de este tipo de red es que detectan su entorno y se adaptan a la transmisión. El análisis se realiza evaluando el rendimiento, retardo, latencia, y throughput con la ayuda de NS2, llegando a la conclusión que el protocolo Westwood presenta un mejor desempeño.

Emplearon dos escenarios uno con nodos fijos y otro con nodos móviles, inundando el canal con diferentes flujos usando cada protocolo TCP Reno, Vegas, Veno y Westwood, 25 nodos fueron implementados, dos son Usuarios Primarios (PU’s, por sus siglas en inglés *Primary Users*) y 23

son usuarios secundarios (SU's, por sus siglas en inglés *Secondary Users*), en el primer escenario con nodos fijos TCP Reno y TCP Vegas obtuvieron igual *throughput*, TCP Veno obtuvo una mejora de 3,33% respecto a los anteriores dos, el mejor *throughput* lo obtuvo Westwood con 15,5% sobre Reno y Vegas, y 11,8% sobre Veno. En cuanto al *Jitter* y retardo el mejor comportamiento fue Westwood, seguido por Reno con retardo y *Jitter* superiores en 6,46% y 0,05% respectivamente, con Vegas el retardo fue 38,3% superior que Westwood, mientras que el *Jitter* fue 179% mayor. En el caso de Veno se obtuvo el mayor retardo 93,4% más que con Westwood y el mayor *Jitter* promedio 470% más que con Westwood tal como se muestra en la Figura 5.

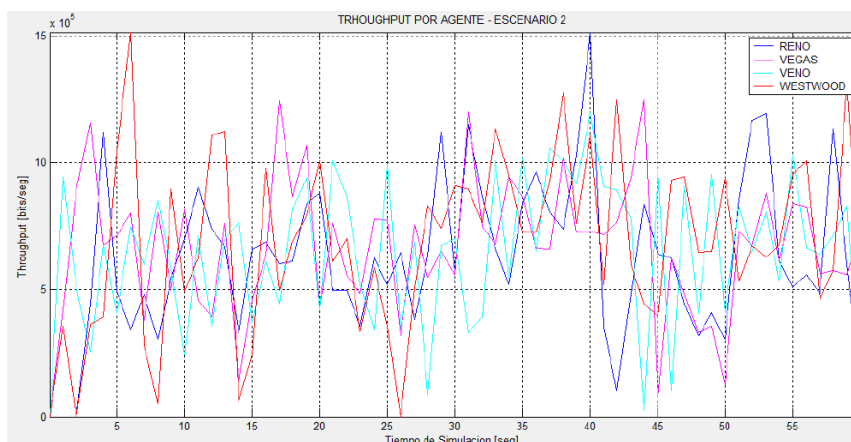


**Figura 5.** Throughput Escenario 1

Fuente: (Leal & López, 2013)

En la Fig. 6 para el escenario dos, los nodos son móviles y se tomaron los datos resultando, el mayor *throughput* tiene TCP Westwood con 4,2%, 11,3% y 13,95% superior que Vegas, Veno y Reno, en cuanto a *Jitter* promedio respecto al *throughput* se observó que fueron mayores cuando se usó el agente Reno 14,6%, seguidas por Veno 12,6%, Vegas 12,1% y con el menor porcentaje de retransmisiones en el caso del agente Westwood 11,9%. En conclusión, en los dos escenarios evaluados el algoritmo TCP Westwood es el que mejor se desempeña basándose en los datos obtenidos de *throughput*, retardo, *Jitter* y tasa de retransmisiones.





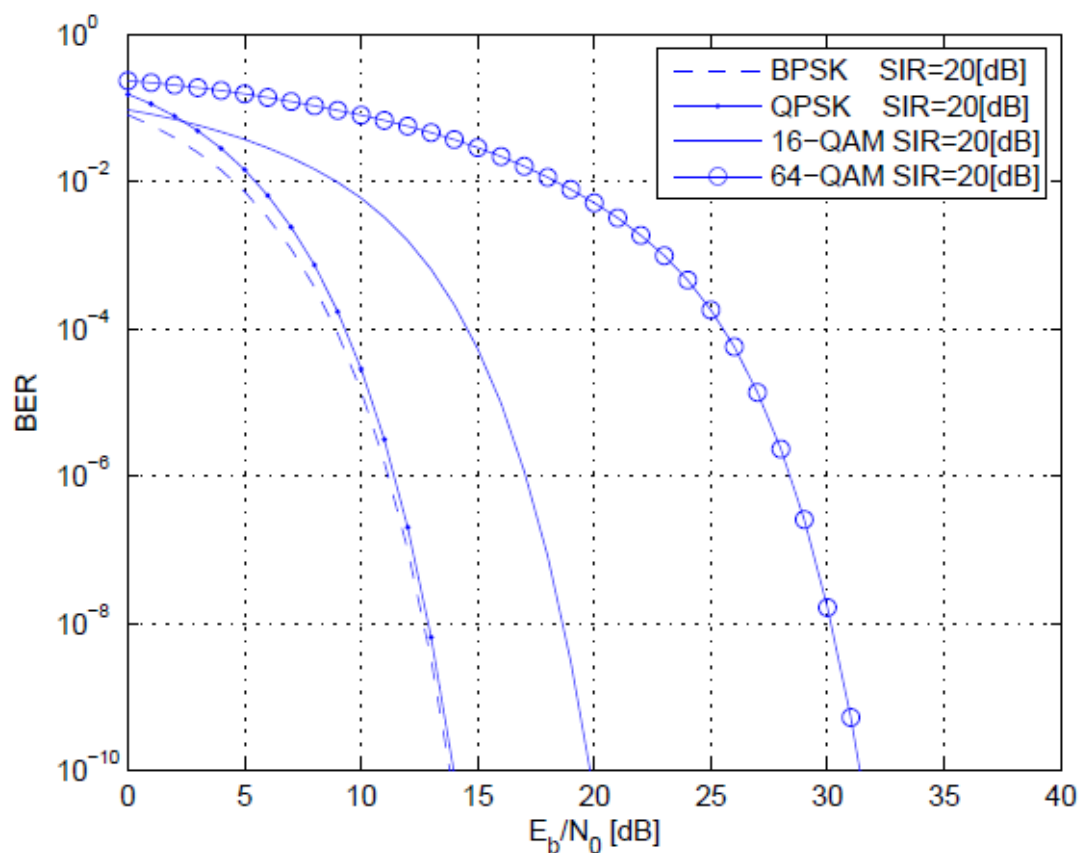
**Figura 6.** Throughput Escenario 2.

Fuente: (Leal & López, 2013)

En un reciente estudio elaborado por (Moya, Altamirano, De Almeida, & Benítez, 2010) titulado “Evaluation of the Effects of Co-Channel Interference on the Bit Error Rate for QPSK and M-QAM Modulations” se estima los efectos de la presencia de la interferencia co-canal con modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM. En este trabajo se realiza la parametrización que nos permite calcular la tasa de error de bits (BER, por sus siglas en inglés *Bit Error Rate*) para una técnica de modulación por amplitud de pulsos (M-PAM, por sus siglas en inglés pulse-amplitude modulation) en función de la relación señal/ruido en presencia de N interferentes. Con la ayuda de la ecuación obtenida en M-PAM el trabajo presenta una ecuación para el cálculo del BER para una modulación M-QAM. Con la presencia de interferentes los autores muestran que existe la inclusión de una variable llamada relación señal/ Interferencia mínima (SIR, por sus siglas en inglés *Signal to Interference Ratio*).

Las simulaciones se realizaron para un  $SIR = -3, 0, 3, 6, 9 [dB]$  con un solo interferente tanto para BPSK como para QPSK obteniendo resultados similares, es decir; para un  $SIR = -3$  y  $0 [dB]$  se observa que mantienen un BER constante de  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{4}$  respectivamente, mientras que para un  $SIR = 3, 6, 9 [dB]$  a medida que aumenta la relación/señal ruido, el sistema se vuelve más robusto como era de esperarse en esta técnica de modulación. Para 16-QAM y 64-QAM los resultados son similares, esta técnica muestra más inmunidad a la interferencia, con un  $SIR = 9, 21 [dB]$  y un interferente presentan un BER constante, al introducir más interferentes en las técnicas de

modulación estos presentan un aumento de su BER. En conclusión, para modulaciones de orden superior se necesita un mayor SIR para que su BER se mantenga en los niveles normales tal como se muestra en la Fig. 7.



**Figura 7.** Comparación del BER para BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM para un SIR=20 con un interferente.

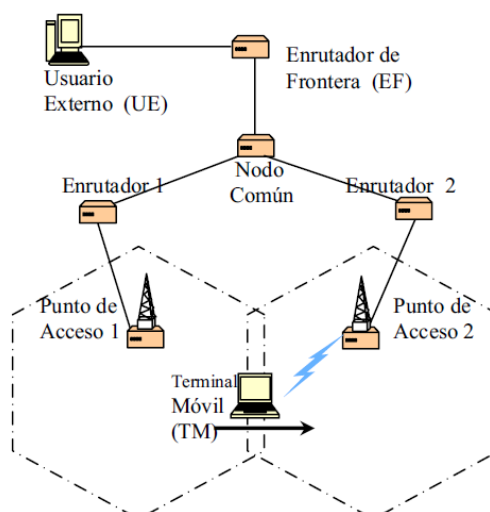
Fuente: (Moya, Altamirano, De Almeida, & Benítez, 2010)

En el trabajo “Análisis de Desempeño del Protocolo de Movilidad Celular IP” (Isidro Vicente & Ernesto, 2007) realizan un estudio para encontrar un protocolo adecuado para sistemas móviles de tercera generación que trabajen de la mejor manera con *Mobile IP* estudiado por (Reinbold & Bonaventure, 2003), éste un protocolo estándar diseñado por el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF, por sus siglas en inglés *Engineering Task Force*) para que los dispositivos móviles al moverse de una red a otra mantengan permanentemente su dirección IP, este protocolo se

describe en el *Request for Comments 3344* (RFC 3344) desarrollado por (Nokia Research Center, 2002).

El protocolo Cellular IP analizado por (Andrew T., Javier , Sanghyo, & Chieh-Yih , 2002) y (Andrés G, 1999) planteado por el programa Columbia IP Micromobility Software es una muy buena opción por su desempeño en distintos escenarios para operar junto con Mobile IP, en este trabajo se han considerado tr ficos tanto en protocolo de datagrama de usuario (UDP, por sus siglas en inglés *User Datagram Protocol*) como TCP genéricos bajo un modelo de red de tercera generación, donde el desempeño del protocolo Cellular IP se analiza a través de servicios de voz y web.

En la Fig. 8 la topología del escenario fue modelada utilizando el simulador OPNET la transferencia de paquetes se establece mediante la agrupación de protocolos IP y dependiendo del tipo de servicio se utiliza UDP o TCP. El TM se comunica con el usuario externo fijo (UEF) a través de la red, el TM está enlazado con la radio base de la celda donde se encuentra ubicado, al alejarse de su radio base y acercarse a la radio base vecina la señal empieza a caer por debajo del umbral, y empieza el traspaso de conexión con la nueva radio base. En este trabajo no se tomaron en cuenta efectos de propagación como Doppler, multitrayectorias, etc., más que los relacionados con las pérdidas en el espacio libre. Las aplicaciones de voz son un tipo de tráfico real que deben tener retardos de  $\leq 150\text{ms}$  y es la razón de ser de los teléfonos celulares, las aplicaciones web se caracterizan por ser no tolerante a errores, y representa el 70% del tráfico TCP de Internet.



**Figura 8.** Dominio básico de Cellular IP

Fuente: (Isidro Vicente & Ernesto , 2007)

Para lograr un mejor análisis del protocolo Cellular IP se establece un tráfico bidireccional entre el TM y el UEF. En la situación de contenido de páginas web se realiza bajo condiciones de carga ligera y alta. Se plasman los resultados realizando la manipulación del protocolo TCP que afecta el retardo de transmisión. En el caso Alta intensidad-Concurrente y con el efecto de traspaso de celda, la página tiene un tamaño de 60 kB, conformada de 6 objetos por página y el TM descarga 4 páginas, la segunda página coincide con el cambio de celda y solo llegan 2/6 objetos a su destino en la primera retransmisión, al concluir el tiempo de retransmisión de TCP, los otros 4 objetos son reenviados, el tiempo de descarga es de 4,13s este tiempo fue superado al límite especificado para este servicio. Al realiza ajustes a los mecanismos de TCP como los valores de Tiempo Máximo de Envío de Mensajes de Reconocimiento y Tiempo para Retransmitir el protocolo Cellular IP es una muy buena opción para ser implementado en redes móviles de tercera generación.

También se ha realizado un análisis y mejora del desempeño TCP sobre una comunicación inalámbrica específicamente en el estándar IEEE 802.11 y es presentado en “Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis and Enhancement” estudio realizado por (Haitao, Yong , Keping , Shiduan, & Jian , 2002), la propuesta es un esquema denominado *Distributed Coordination Function Plus* (DCF+), compatible con el DCF básico, con

una técnica de acceso al medio evitando colisiones (CSMA/CA, por sus siglas en inglés *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), mejorando el rendimiento del protocolo TCP en un medio inalámbrico (WLAN, por sus siglas en inglés *wireless local area network*), el modelo es capaz de predecir el comportamiento 802.11 a diferencia de otros modelos estudiados.

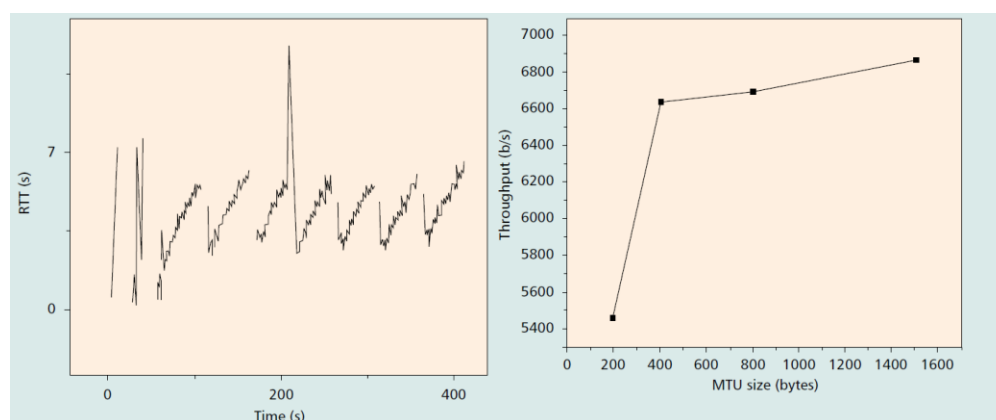
DCF + funciona de la siguiente manera: supongamos que la estación fuente comienza con el método de acceso básico para competir en el canal, cuando el paquete de datos *DATA1* llega a la estación de destino y actualmente el destino tiene un paquete *DATA2* a la fuente que envía *DATA1*, necesita enviar una trama ACK a la estación de origen. En DCF+, el campo de duración en el encabezado de control de acceso al medio (MAC, por sus siglas en inglés *Media Access*) también se utiliza para establecer el valor de *network allocation vector* (NAV) como en DCF, por lo que la estación de destino necesita establecer el NAV de otras estaciones al establecer el campo de duración en el campo ACK.

Cuando un ACK llega a la fuente, la fuente responderá con un *Clear to Send* (CTS), que se utiliza para establecer el NAV en el rango de recepción del siguiente dato *DATA2* receptor y la estación fuente de origen. Entonces el destino podría transferir el paquete de datos *DATA2* a la estación de origen, y la fuente responderá con un ACK normal. El desempeño TCP es clasificado en tres categorías: *goodput*, *fairness* y *delay*, el tamaño del segmento TCP es de 1460 bytes y 1500 bytes en la capa MAC y un AB de 2 Mbps.

En *goodput* los resultados muestran que DCF+ mejora el rendimiento TCP y el modelo de análisis es preciso para predecir los resultados DFC+, cuando se aumenta el número de estaciones TCP de degrada por el aumento de la probabilidad de colisión especialmente usando el *Request to Send* (RTS/CTS), para *fairness* cuando el número de estaciones aumenta, el rendimiento del índice de equidad se degrada severamente, tanto para DCF como para DCF +, el *delay* y el retardo de la interface de cola (IFQ) primero aumenta y luego disminuye con el número de estaciones aumenta. Esto se debe a que el TCP se ve afectado por las colisiones en la capa MAC y el *goodput* disminuye

con el número de estación aumentado. Por lo tanto, con mayor retraso y degradado bueno, TCP envía menos número de paquetes a IFQ, y finalmente el retardo IFQ disminuye correspondientemente. Por lo tanto, mediante simulaciones elaboradas, concluimos que DCF + puede mejorar el rendimiento de TCP sobre WLAN en las tres métricas que examinamos en este documento: *goodput*, índice de equidad y retraso.

Al realizar un análisis de los problemas de rendimiento de TCP en “TCP Performance Issues over Wireless Links” investigado por (Xylomenos, Polyzos, Mahonen, & Saaranen, 2001), nos servirá como mejor referencia para describir los problemas que surgen con TCP/IP al proporcionar la conexión de Internet en enlaces inalámbricos, como LAN y GSM, los problemas de rendimiento de la suite de protocolos TCP / IP cuando se emplea sobre estas topologías, como degradado el rendimiento de TCP debido a la confusión errores inalámbricos para la congestión tal como se muestra en la véase Fig. 9.



**Figura 9.** TCP RTT behavior over GSM y TCP performance against MTU size over GSM.  
Fuente: (Xylomenos, Polyzos, Mahonen, & Saaranen, 2001)

El trabajo presenta características y limitaciones de TCP en los diferentes sistemas inalámbricos y examina enfoques para mejorar el rendimiento del internet tal como se muestra en la Tabla 1. Se presenta propuestas para resolver estos problemas y examinar sus beneficios y limitaciones como el esquema de *Eifel* desarrollado por (Ludwig & Katz, 2000) que modifica TCP

para evitar los falsos tiempos de espera y retransmisiones rápidas debido a *handoffs* o retransmisiones retardadas de capa de enlace. Otra solución es realizar la recuperación de error local, que es una tarea de capa de enlace en el nivel de IP, como en *Snoop* TCP desarrollado por (Balakrishnan, 1996).

**Tabla 1.**

*TCP throughput sobre LAN y WAN, TCP throughput sobre IEEE 802.11 LAN.*

	Sin errores inalámbricos	Con errores inalámbricos	% éxito
LAN	1.5 Mbps	0.70 Mbps	46.66
WAN	1.35 Mbps	0.31 Mbps	22.96
	Velocidad de bits física	TCP throughput	% éxito
IEEE 802.11	2 Mbps	0.98 Mbps	49
IEEE 802.11b	11 Mbps	4.3 Mbps	39.1

Fuente: (Xylomenos, Polyzos, Mahonen, & Saaranen, 2001)

Se puede concluir que al introducir el administrador ACK reduce la probabilidad de perder información de paquetes ACK en el enlace aéreo sin modificar el protocolo TCP ampliamente utilizado en la capa de transporte y, por lo tanto, mejora considerablemente el rendimiento TCP. El administrador de ACK no tiene los inconvenientes significativos que se observaron a menudo en los otros mecanismos que están destinados a resolver los problemas de TCP a través de una red inalámbrica, los trabajos revisados anteriormente presentan propuestas para mejorar el desempeño del protocolo TCP en distintos escenarios inalámbricos, todos consideran distintos factores pero no se ha considerado fenómenos con la interferencia co-canal, el desvanecimiento *Rayleigh*, el cual nosotros proponemos como tema de investigación de grado.

## 1.2 Justificación e Importancia.

A medida que las comunicaciones inalámbricas evolucionan segunda generación (2G), 3G, 4G conocido como *Long Term Evolution* (LTE) y caminando hacia 5G investigado por (Pankaj, 2013) y (Naranjo, Buenaño, & Mejía, 2016), la necesidad de encontrar protocolos de comunicación más

eficientes se ha convertido en un tema de investigación muy profundo y extenso desarrollado por (Heng, Weimin, Yongmei, & Dongxue, 2009), (Cheng, Cheng, & Leu, 2000) y (Cheng Peng & Soung C., 2003), el objetivo es encontrar técnicas que permitan maximizar las tasas de transmisión con un espectro radioeléctrico limitado pensando en redes de nueva generación. Uno de los temas que se han realizado muchos estudios y publicaciones es el protocolo TCP donde se plantean distintos mecanismos para mejorar la eficiencia del canal y la inclusión del protocolo en sistemas inalámbricos.

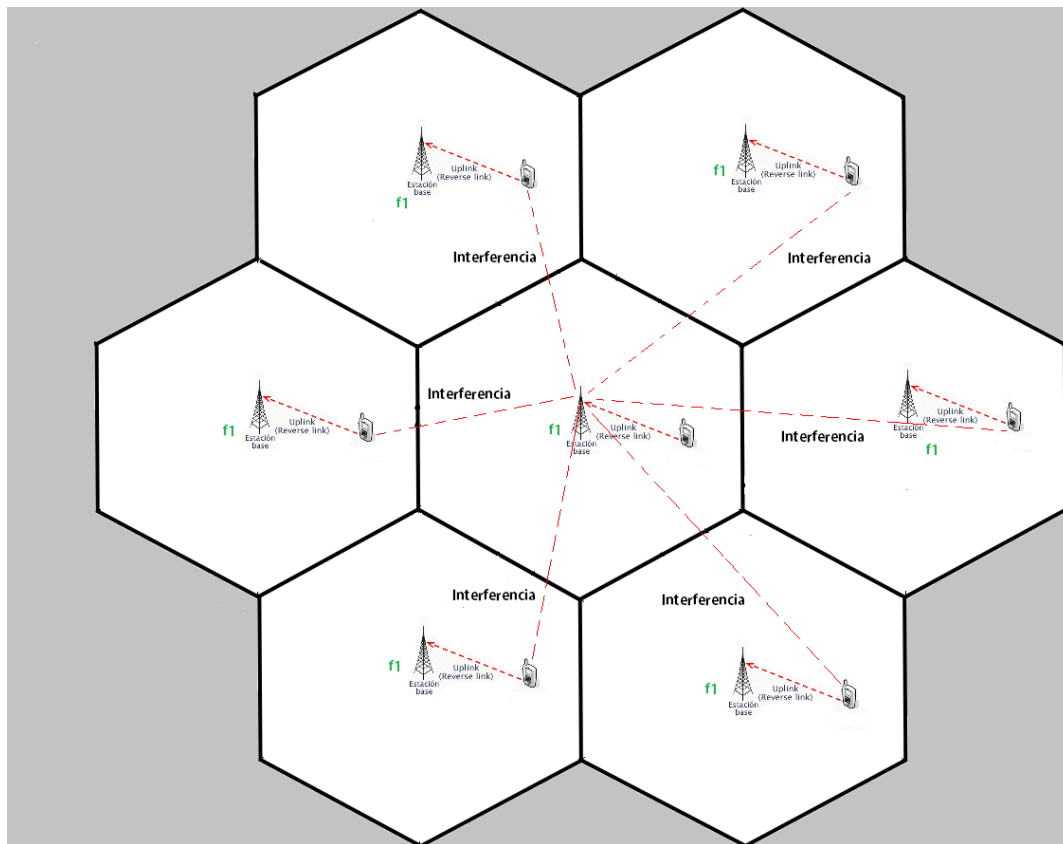
Esto se debe a que TCP es el protocolo más usado en aplicaciones de internet debido a que garantiza la entrega de los datos, mientras el consumo de voz y de mensajes cortos (SMS, por sus siglas en inglés *Short Message Service*) cae irremediablemente, el de datos no para de subir. En el primer semestre de año 2015 se ha disparado un 21%, en enero de 2016 fue de 4,4 exabytes mientras que en diciembre fue de 7,2 exabytes, un alza de 63% en el año, los datos móviles representarán el 20% del tráfico mundial total en 2021, la conexión móvil global promedio superará los 20 Mbps en 2021. Con la nueva era de las telecomunicaciones y la inmersión al internet de las cosas, la sociedad cada vez conecta a la red más dispositivos móviles siendo su prioridad las descargas de datos y desplazando a las llamadas de voz, y a su vez exigiendo más calidad de servicio y velocidad en la conectividad.

Una vez revisado trabajos previos queda claro los análisis realizados donde se presentan propuestas para mejorar la eficiencia del canal inalámbrico, ya vimos que el mantener fija su IP dentro de la red GSM propuesta por (Isidro Vicente & Ernesto , 2007) ayuda notablemente con la eficiencia del canal al momento del traslado de celda y se demuestra que el protocolo Cellular IP es una muy buena propuesta para trabajar en este tipo de redes, de una red GSM pasamos al análisis de una red WLAN 802.11 donde se realiza el análisis de desempeño TCP en sus distintas versiones y se propone mejoras en el protocolo como los propuestos en (Kalden, Meirick, & Meyer, 2000), (Pilo-Pais & Olmedo , 2011), (Xylomenos, Polyzos, Mahonen, & Saaranen, 2001), (Yun, y otros, 2009) y esto ayuda mucho en la eficiencia del canal , incluso se propone mejoras a nivel de acceso a la red inalámbrica 802.11 como presenta (Haitao, Yong , Keping , Shiduan, & Jian , 2002).



Avanzando en la tecnología observamos el análisis de Wimax Mobile propuesto por (Yun, y otros, 2009) donde se propone el tratamiento de los ACK para optimizar el mecanismo del protocolo TCP y mejorar la eficiencia del canal inalámbrico, de esto Wimax, 4G LTE y probablemente 5G están fundamentados en multiportadoras OFDM debido a su eficiencia, gracias a esta técnica nos permite manejar diferentes tasas de transmisión considerando la calidad de servicio (QoS por sus siglas en inglés *Quality of Service*) esto quiere decir; que dependiendo el estado del canal inalámbrico este puede acoplar a una modulación más robusta para garantizar la QoS.

En esta tecnología se presenta un inconveniente por el factor de reusó de frecuencias que es igual a 1, para esto pensemos en el siguiente escenario tal como se muestra en la Fig. 10. En una celda de nuestra red celular el equipo portátil establece su comunicación con la radio base asignándole una frecuencia determinada, en la celda vecina el sistema asigna la misma frecuencia a otro equipo portátil, aquí existe un inconveniente porque de esto nace el fenómeno llamado interferencia co-canal debido a que los equipos portátiles van hacer interferencia al radio base por el motivo de hacer el reusó de la misma frecuencia en celdas vecinas.



**Figura 10.** Interferencia co-canal

También hay que considerar que el canal es inalámbrico y tener en cuenta el ruido en este caso AWGN y dependiendo del ambiente y posición del portátil en la celda hay que manejar el desvanecimiento *Rayleigh*, estos fenómenos deben ser analizados para acercarnos lo más posible a la realidad de la comunicación inalámbrica por la razón que estas variables influyen en los protocolos de comunicación y por lo tanto en el throughput del sistema, con esto buscar soluciones para hacer más eficiente al sistema para la entrega de canales y mejorar el protocolo TCP/IP.

Comprendido la presencia de este inconveniente y con la ayuda de trabajos previos donde se estudia tanto los algoritmos TCP presentado por (Olmedo, "Control de congestionamiento do protocolo TCP em sistemas de comunicacao sem fio cdma usando estrategias de deteccion multiusuario, arranjo de antenas e correcao de erro fec", 2008), el desvanecimiento *Rayleigh*, el ruido AWGN y la interferencia co-canal en sistemas inalámbricos desarrollado por (Altamirano,

2011) (Moya, Altamirano, De Almeida, & Benítez, 2010), nace la idea de nuestra propuesta de investigación que pretende aportar al área de telecomunicaciones en el avance hacia las redes de nueva generación, realizando la parametrización y plasmándolo en simuladores y obtener los estudios del comportamiento del protocolo TCP en este tipo de topología celular considerando los fenómenos mencionados.

Con este análisis se podrá validar los resultados: teórico-simulación y conocer el desempeño y la relación que existe entre la probabilidad de error de bit, la probabilidad de error de paquete TCP con el *throughput* y retardo del sistema en una topología de una red inalámbrica OFDM con múltiples modulaciones, observar si los mecanismos de los protocolos TCP mejoran o empeoran las tasas de transmisión del canal y así dar nacimiento hacia nuevas teorías que optimicen y mejoren la eficiencia del canal inalámbrico esperando que este trabajo sirva como base y referencia para el éxito del mismo.

### **1.3 Objetivos.**

#### **1.3.1 Objetivo general.**

- Analizar el desempeño del protocolo TCP en un sistema celular, con interferencia co-canal basado en OFDM con múltiples tasas de transmisión en un canal AWGN con desvanecimiento *Rayleigh*.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Modelar y evaluar los algoritmos matemáticos de congestionamiento TCP Reno, Westwood y NACK.

- Evaluar los modelos matemáticos de una transmisión OFDM sobre un canal AWGN con desvanecimiento *Rayleigh* utilizando modulaciones digitales 4-QAM, 16QAM, 64QAM en una celda celular para definir múltiples tasas de transmisión.
- Evaluar los modelos matemáticos de una transmisión OFDM con presencia de la interferencia co-canal considerando ruido AWGN y desvanecimiento *Rayleigh*.
- Evaluar el desempeño del protocolo TCP en base del *throughput* con presencia de la interferencia co-canal considerando ruido AWGN y desvanecimiento *Rayleigh*.

#### 1.4 Metodología.

Una vez analizado los antecedentes, la idea y el aporte del proyecto a continuación se explicara la metodología que se usará, para esto se debe realizar un fuerte estudio de los protocolos de comunicación TCP Reno, Westwood , NACK y también los fenómenos inalámbricos presentes en el canal de comunicación como el desvanecimiento *Rayleigh*, el ruido AWGN y la interferencia co-canal, para comprender su funcionamiento y poder parametrizarlos, una vez obtenido los parámetros de funcionamiento se realizara la programación en algoritmos en lenguaje de Matlab para poder realizar las simulaciones correspondientes en distintos escenarios, el código será dinámico es decir; poder escoger entre potencias de Transmisión, múltiples modulación 4-QAM, 16QAM, 64QAM, y protocolos TCP, para generar los distintos escenarios y obtener múltiples datos.

Los datos que se van utilizar para el análisis serian datos simulados, las variables a evaluar van hacer la probabilidad de error de bit, la probabilidad de error de paquete TCP, el *throughput*, la relación señal a ruido y la relación señal a interferencia, con los datos obtenidos se analizará la eficiencia del canal inalámbrico mediante su *throughput* y retardo en los múltiples escenarios generados con distintas modulaciones, distintos protocolos y distintos fenómenos inalámbricos ya descritos anteriormente, los resultados serán representados en gráficas para su mejor entendimiento.

## **1.5 Resultados Esperados.**

Los resultados que se espera en el trabajo de investigación es obtener la eficiencia del canal inalámbrico mediante su *throughput* del sistema, considerando los parámetros del canal inalámbrico, las variables evaluadas descritas, y bajo diferentes protocolos TCP. El análisis de los resultados nos mostrará que tan práctico es el protocolo TCP para trabajar en estos entornos inalámbricos.

## **1.6 Visión general del trabajo de investigación.**

Los capítulos que componen este trabajo serán resumidos a continuación:

En el capítulo I se describe el estado del arte con trabajos elaborados por otros autores que inspiraron este trabajo de investigación, así como la justificación del mismo, se presenta también nuestros objetivos planteados, la metodología que vamos usar y los resultados que esperamos con la investigación.

En el capítulo II se presenta los conceptos básicos que se debe manejar para involucrarnos en el tema de investigación, tales como los sistemas de redes celulares, los modelos de canal y los efectos como el desvanecimiento, la interferencia y el ruido, describimos también las diferentes técnicas de modulaciones y los conceptos básicos del protocolo TCP como sus diferentes versiones tales como Reno, Westwood y NACK.

En el capítulo III se centra en la elaboración de los modelos matemáticos que obedecen a la probabilidades de error símbolo, probabilidad de error de bit, que manejan las distintas técnicas de modulación involucrando los fenómenos con el ruido AWGN, la interferencia co-canal y el

desvanecimiento *Rayleigh* bajo los diferentes niveles de  $E_b/N_0$  y parámetros de transmisión, también se plantea los modelos matemáticos que corresponde a los protocolos TCP en sus distintas versiones para trabajar en ambientes inalámbricos, obteniendo ecuaciones para determinar la eficiencia del protocolo TCP en condiciones inalámbricas.

En el capítulo IV se realiza las simulación y obtención de los datos que nos serán útiles para el análisis de los mismos y entender el funcionamiento de los protocolos trabajando bajo ambientes inalámbrico con distintas modulaciones, presentamos graficas que nos ayudan con el análisis para cumplir con los objetivos y resultados planteados.

En el capítulo V se generan las conclusiones y recomendación que nos dejó como experiencia la elaboración del trabajo de investigación y datos claves para trabajos futuros o lectores que usen el trabajo como fuente de investigación.

## CAPÍTULO II

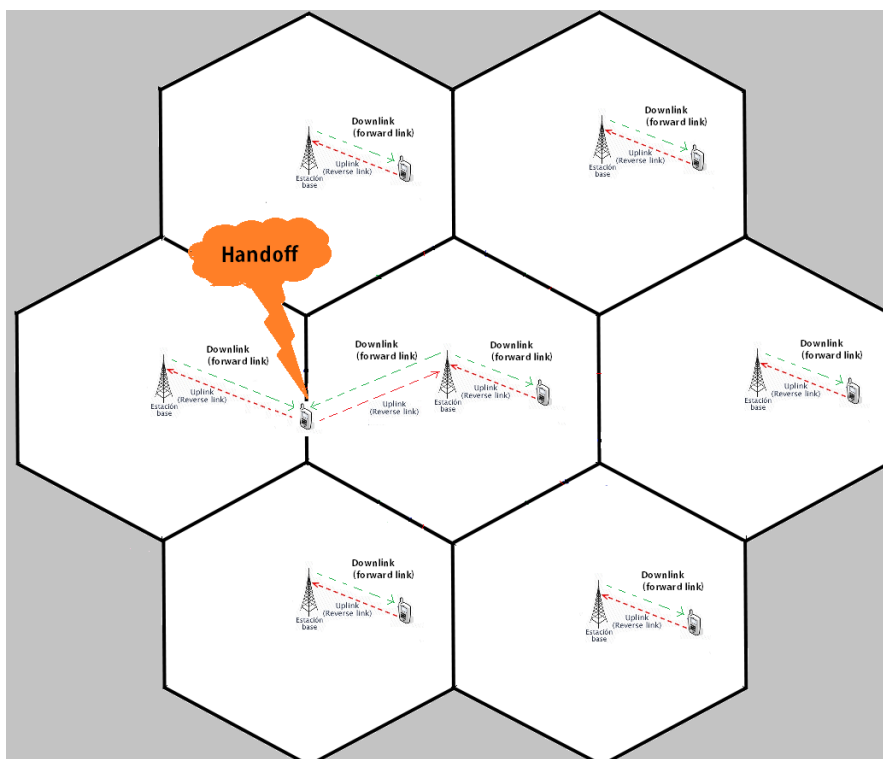
### 2. CONCEPTOS BASICOS.

#### 2.1 Sistemas de Redes Celulares.

En Estados Unidos por los años de 1983 en los laboratorios Bell se empezó a escuchar el termino celular para describir a un sistema de comunicación inalámbrica de voz analógica bautizada como un Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS), es el nacimiento de la primera generación (1G) de la telefonía móvil, en Europa y Asia también se implementaron técnicas iguales llamadas TACS y MCS-L1 respectivamente. El termino celular nace de dividir una determinada área en zonas circulares e idénticas y llamarlas células o celdas, la idea principal fue dar cobertura a un espacio geográfico a través de sus celdas, pero las celdas adyacentes nunca usen la misma frecuencia para evitar interferencias. Cada celda estará constituida por una estación radio base (ERB) que está conformada por múltiples equipos de transmisión, recepción y antenas. Las antenas utilizadas por la radio base comúnmente son omnidireccionales y directivas en el caso de que se haga sectorización.

Las ERB establece la comunicación inalámbrica con dispositivos electrónicos denominados estaciones de radio móviles (ERMs) que pueden estar distribuidos en cual lugar de la celda de cobertura. Los ERMs también poseen antenas omnidireccionales y establecen la comunican con su respectiva radio base para recibir o transmitir información mediante un canal asignado. La comunicación de la ERB con sus ERMs lo hacen a través de un canal inalámbrico llamado *forward link* o *Downlink*, y la comunicación de las ERMs con su ERB lo hace a través de un canal llamado *reverse link* o *Uplink*. Cuando las ERMs salen o entran de una celda a otra estas experimenta un proceso llamado *handoff*, en el proceso de traspaso el ERM está conectado a su ERB y esta se desconecta durante un tiempo para volverse a conectar con la otra ERB esto se conoce con *hard handoff*, en sistemas como *Code Division Multiple Access (CDMA)* o *Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)* una ERM puede mantener la conexión con múltiples ERBs para evitar

la desconexión esto es conocido como *soft handoff* tal como se muestra en la Fig. 11 (Olmedo, 2008).



**Figura 11.** Distribución de celdas y canales Downlink y Uplink

### 2.1.1 Reúso de Frecuencias.

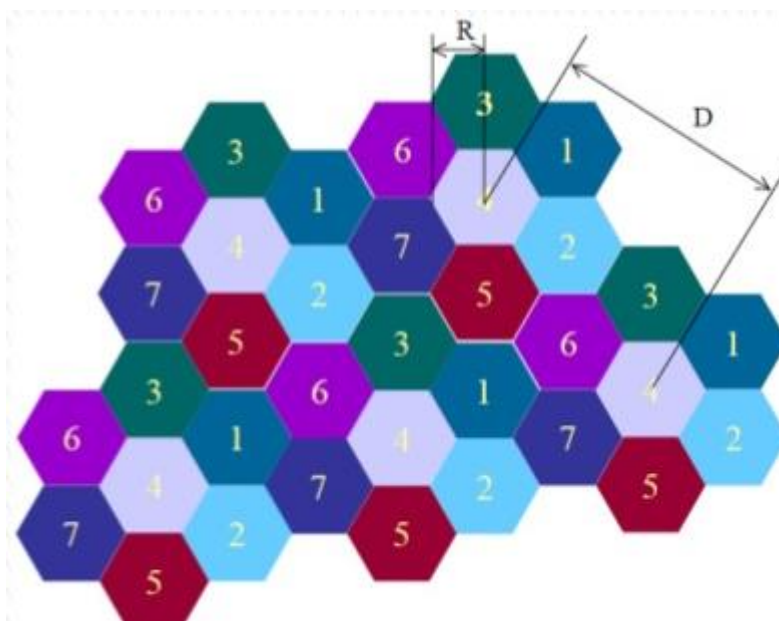
La asignación de frecuencias para los canales de voz y de datos en una red celular está fuertemente ligado al espectro disponible y asignado a la operadora de la red. Para garantizar que no exista interferencia entre usuarios conectados con la misma frecuencia asignada pero ubicados en distintas celdas, las operadoras de la red celular deben garantizar la distancia suficiente entre transmisores con la misma frecuencia para que no se interfieran entre sí. El reúso de frecuencias se determina asignándole a cada celda un determinado número de frecuencias disponibles para su uso, al conjunto de celdas vecinas a una celda utilizando las frecuencias disponibles es llamado *cluster*, ninguna celda del *cluster* debe ser asignada la misma frecuencia para evitar la interferencia entre celdas.



El nivel de interferencia es más fuerte o débil dependiendo de la distancia del interferente, de esta manera se consiguió aumentar la cobertura y capacidad de una red celular que utilizan el mismo grupo de frecuencias, los parámetros que intervienen en el reuso de frecuencias son la distancia y factor de reuso, la distancia de reuso se define como la distancia mínima entre centros de las celdas de distintos *cluster* que usan el mismo grupo de frecuencias, determinada por (Rappaport, 2002) tal como se muestra en la Fig. 12.

$$D = R \sqrt{3N} \quad (1)$$

donde  $R$  es el radio de la celda y  $N$  es en factor de reuso, que es el número de celdas que constituyen el *cluster* (Benítez, 2011).



**Figura 12.** Distancia de reuso  
Fuente: (Mendioroz, MSc., 2015).

## 2.2 Modelos de Canal

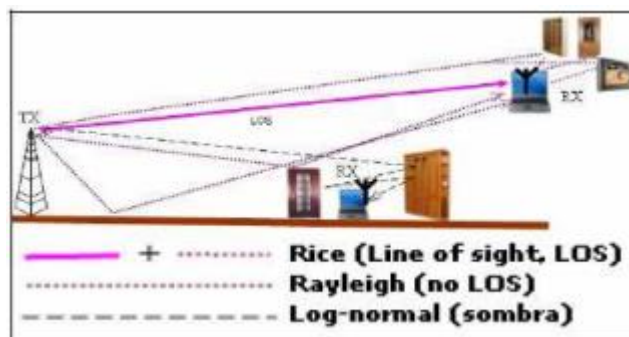
Cuando se realiza una comunicación inalámbrica la señal se ve afectada por múltiples fenómenos logrando contaminar los datos transmitidos entre los que se puede nombrar está el ruido, desvanecimiento e interferencias. El grande desafío de la ingeniería está en lograr la transmisión de señales a través de un canal inalámbricos con las perdidas mínimas posibles en ambientes adversos, y aún más el desafío es más grande cuando no existe línea de vista (NLOS, por sus siglas en inglés *non-line-of-sight*) entre el transmisor y receptor.

Muchos obstáculos de diversos tamaños, ondulaciones del terreno, movimiento relativo entre transmisor y receptor, desvanecimiento, interferencia de otras señales, ruido y varios otros factores se debilitan, provocan retraso y distorsionan la señal transmitida, de una manera bastante imprevisible. La planificación de una red de comunicaciones inalámbricas que funcione adecuadamente bajo estas condiciones, representa un desafío, especialmente cuando se requieren servicios que demandan tasas de datos elevadas. El canal de comunicación inalámbrica impone limitaciones severas para el rendimiento del sistema. Entre los fenómenos más importantes que afectan la propagación de una señal en un canal de comunicación inalámbrica son la pérdida de propagación, el desvanecimiento, interferencia y el ruido. (Benítez, 2011).

### 2.2.1 Desvanecimiento.

Hay situaciones en las que la ERM no tiene una línea de vista con su ERB. En estos casos, la señal recibida se compone de varias versiones de la señal transmitida, y ninguno de estos signos llega a considerarse dominante en relación con los demás. En ambientes como éste, con frecuencia los componentes de los múltiples recorridos llegan con grandes retrasos y variaciones de amplitud. Este tipo de fenómeno es muy común en regiones urbanas y suburbanas. La señal recibida y por lo tanto compuesto por un sumatorio de un gran número de Fasores gaussianos complejos, que a veces contribuyen de manera constructiva y a veces contribuyen de manera destructiva en la forma de la

señal recibida. La señal recibida resultante puede a veces pasar por atenuaciones muy fuertes, mientras que la duración de estas atenuaciones depende de la velocidad del móvil y de la frecuencia de la portadora de la señal, este fenómeno es llamado de desvanecimiento tal como se muestra en la Fig. 13. (Olmedo, 2008)



**Figura 13.** Tipos de Desvanecimiento.  
Fuente: (Yáñez Arias, 2010)

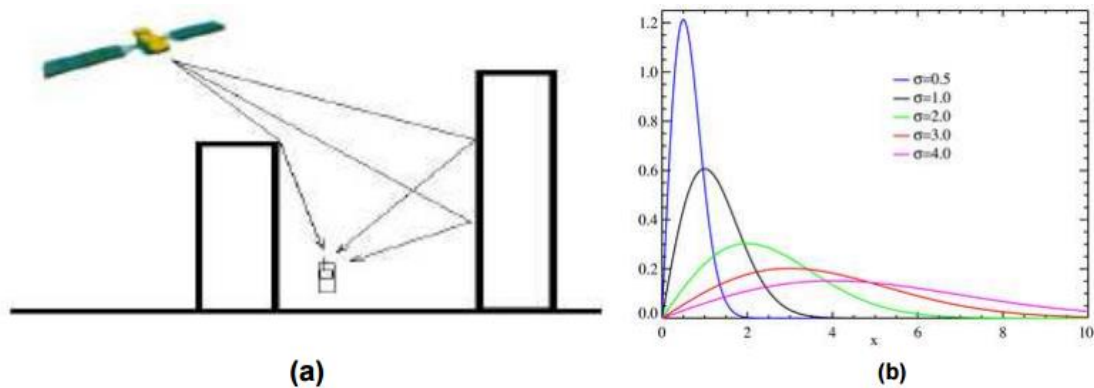
### 2.2.1.1 Desvanecimiento Rayleigh.

Una distribución *Rayleigh* se produce cuando la línea de vista (LOS, por sus siglas en inglés *line-of-sight*) entre el emisor y el receptor se ve interrumpida por obstáculos o su nivel es inferior al nivel del ruido. En estas circunstancias la suma de las contribuciones multitrayecto permiten la existencia del enlace. La mayoría de conexiones con telefonía móvil se realizan mediante enlaces con distribución Rayleigh, lo que permite la cobertura en el interior de los edificios sin línea directa con la antena. Esto ocurre típicamente en comunicaciones móviles (Yáñez Arias, 2010).

En la Fig. 14 la resultante de los múltiples recorridos también conocida como desvanecimiento, es un proceso aleatorio multiplicativo a la señal enviada. Si hay muchos caminos reflejados y no existe línea de vista, la envoltura de la señal recibida puede ser modelada por una función de distribución de probabilidad *Rayleigh* dada por (Proakis, 2001):

$$p(\rho) = \frac{\rho}{\sigma_\rho^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma_\rho^2}\right] \quad (2)$$

donde  $\sigma_\rho$  representa la desviación estándar de las gaussianas que generaron la variable Rayleigh (Altamirano, 2011).



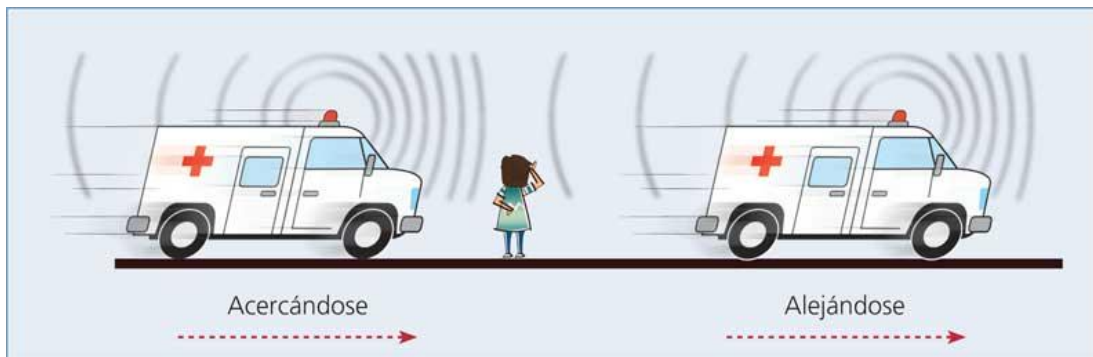
**Figura 14.** (a) Esquema de distribución Rayleigh (b) PDF Rayleigh.

Fuente: (Yáñez Arias, 2010)

### 2.2.1.2 Efecto Doppler.

El efecto *Doppler* ocurre cuando hay un movimiento relativo entre transmisor y receptor, resultando en la recepción una frecuencia diferente a la que se transmitió tal como se muestra en Fig. 15. Cuanto mayor sea la velocidad de desplazamiento de la ERM en relación con la dirección de propagación de la onda de radio, mayor es la desviación de frecuencia. El valor de la desviación *Doppler* en función de la velocidad de la ERM está dada por la siguiente expresión (Proakis, 2001):

$$f_d = \frac{v f_c}{c} \cos(\theta) \quad (3)$$



**Figura 15.** Efecto Doppler  
Fuente: (Domínguez, 2017)

Donde  $v$  es la velocidad del móvil,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora,  $c$  es la velocidad de la luz, y  $\theta$  es el ángulo entre la dirección del movimiento y la dirección de la propagación de la onda electromagnética. Para una propagación con múltiples recorridos cada uno de los signos sufre a diferentes desviaciones *Doppler* y como resultado se tiene un espectro esparcido, formado a partir de la variación aleatoria de la frecuencia percibida en cada multitrayecto, dando origen a la dispersión espectral Doppler  $B_d$  (Olmedo, 2008), donde (Proakis, 2001):

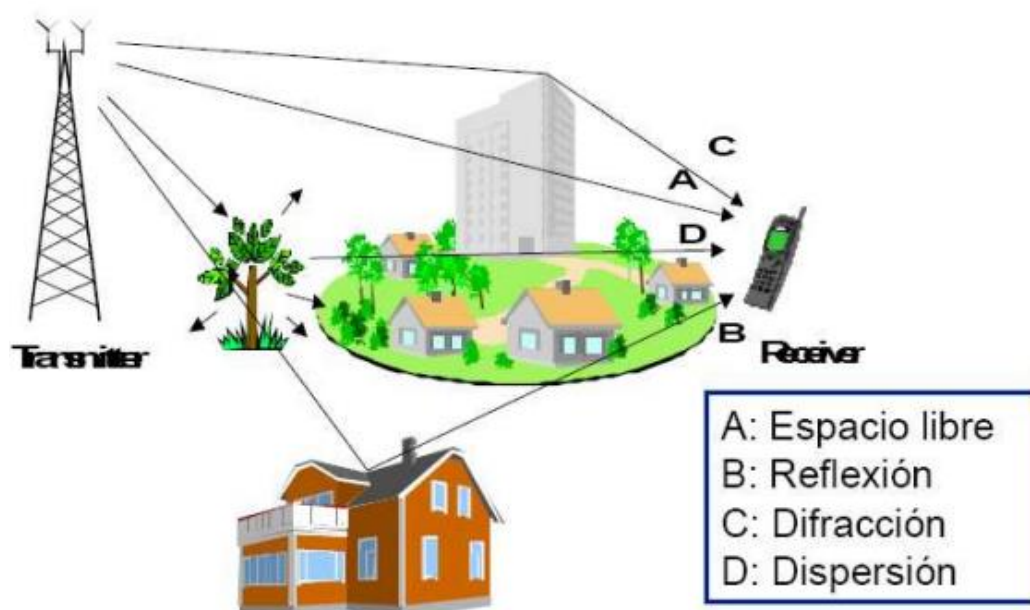
$$B_d = 2 f_{d_{max}}$$

$$B_d = 2 \frac{v f_c}{c} \quad (4)$$

### 2.2.2 Perdidas por propagación.

Al hablar de la propagación se puede hacer referencia al medio por el cual las ondas de radio viajen hacia su objetivo. Las ondas atraviesan por distintos ambientes y pueden encontrarse con obstáculos y experimentar cambios relativos de intensidad y dirección tal como se muestra en la

Fig. 16. La propagación de las ondas y su viaje efectivo depende del entorno en el cual viajan, pero depende también de la longitud de onda (Yáñez Arias, 2010).



**Figura 16.** Mecanismos de Propagación.

Fuente: (Yáñez Arias, 2010)

En términos más técnicos se puede decir que la pérdida de recorrido hace referencia al decaimiento de la potencia de la señal recibida en función de la distancia entre la posición donde se encuentre el transmisor y el receptor. De acuerdo con el modelo exponencial, la potencia de la señal recibida se determina mediante:

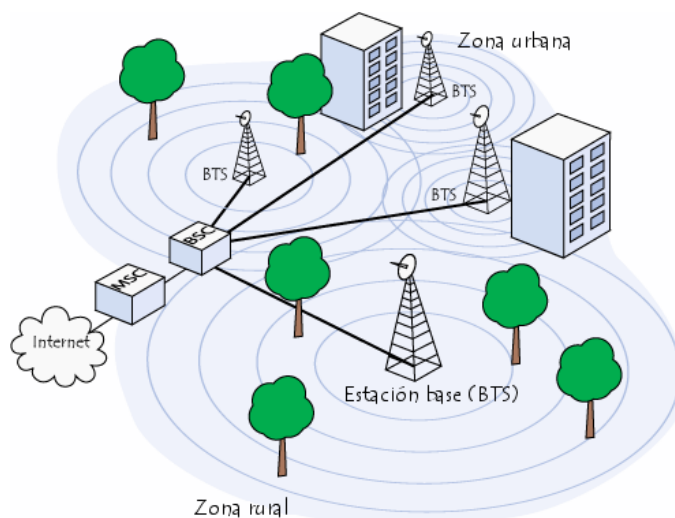
$$P_r = P_t d^{-\beta} \quad (5)$$

Donde la potencia  $P_t$  es la potencia transmitida,  $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor y  $\beta$  es la constante de pérdida por propagación. El exponente depende de las características del entorno de propagación y puede asumir valores que varían aproximadamente de 1,6 en el

interior de edificios con línea de vista (LOS) a 6 en ambientes urbanos densos, siendo que  $\beta = 2$  Corresponde a la propagación en el espacio libre  $\beta = 4$  a la propagación típica en ambientes urbanos (Benítez, 2011).

### 2.2.3 Interferencia.

Se puede describir a la interferencia como cualquier señal indeseable con las mismas características que interfiere con el receptor tal como se muestra en la Fig. 17. La señal indeseable tiene una potencia determinada y esta provenga de un dispositivo que es ubicado en la misma celda se la puede determinar cómo interferencia interna, el mismo criterio se puede aplicar cuando la señal indeseable proviene de un dispositivo de celdas vecinas o adyacentes se la conoce como interferencia externa.



**Figura 17.** Interferencia.

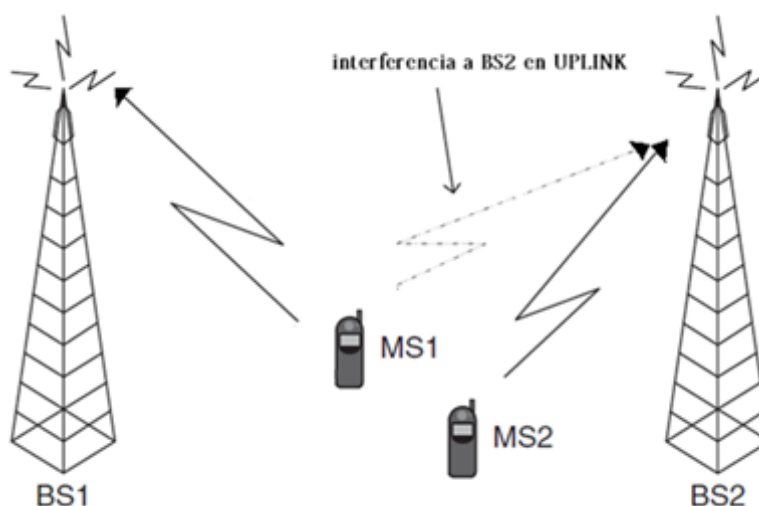
Fuente: (Carrasco, 2014)

La interferencia externa está presente en todos los sistemas de comunicación inalámbrica independientemente de la técnica de acceso que se utilice este puede ser, *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*, *Time Division Multiple Acces (TDMA)*, CDMA causada por el reúso de

frecuencia, intervalo de tiempo o de código, respectivamente. Esta interferencia se la puede determinar cómo interferencia co-canal (Olmedo, 2008).

### 2.2.3.1 Interferencia Co-canal.

La interferencia de co-canal es debido al uso de la misma frecuencia de portadora. Esto ocurre ya que, en un área de servicio, hay algunas celdas que utilizan los mismos recursos causando interferencia co-canal tal como se muestra en la Fig. 18. Una técnica denominada factor de reuso permite disminuir este tipo de interferencia, pues las celdas que usan los mismos recursos son espaciadas a una distancia calculada permitiendo un aislamiento adecuado entre ellas y consiguiendo una disminución de la interferencia de co-canal, el inconveniente se da cuando el factor de reuso es igual a 1 es decir; las celdas adyacentes usan la misma frecuencia de portadora como es el caso del presente trabajo de investigación. Una forma de medir la interferencia de co-canal es a través de la relación señal interferencia ( $S/I$ ), definida como la razón entre la potencia de la señal deseada  $S$  y la suma de las potencias de los interferentes  $I$  (Altamirano, 2011).



**Figura 18.** Interferencia Co-canal.

Fuente: (Yáñez Arias, 2010).



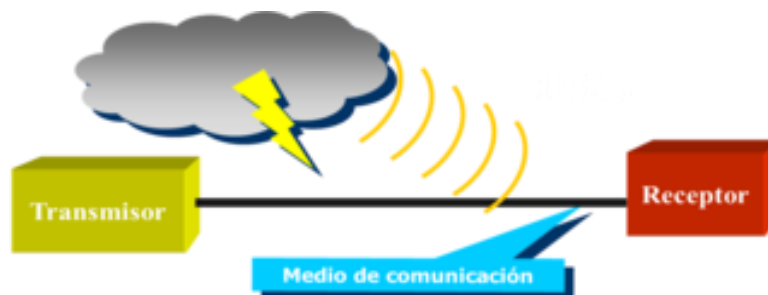
### 2.2.4 Ruido.

Se ha tratado de definir el ruido con muchas definiciones y cada autor lo define de distinta manera, pero la idea contextual del ruido es la misma en resumen se puede decir que el ruido son señales eléctricas intolerables e indeseables que se incrustan en la circuitería de los equipos provenientes de perturbaciones naturales del medio y hacen que se degrade el rendimiento de una comunicación inalámbrica tal como se muestra en la Fig. 19. En la transmisión de señales como por ejemplo los datos, el efecto del ruido provoca un error en la recepción ya que el ruido puede aumentar o disminuir bits que no forma parte de la información.

Para que algo perturbe a una señal debe tener:

- Una energía indeseada de la misma naturaleza que la señal perturbada.
- Se debe encontrarse presente en la misma banda que la señal.

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos han implementado mecanismos para mitigar la presencia del ruido como por ejemplo introducir redundancia en los datos para la codificación del mensaje. La redundancia es la parte del mensaje que podría omitirse sin que se produzca pérdida de información (Universidad Central de Bogotá, 2011).

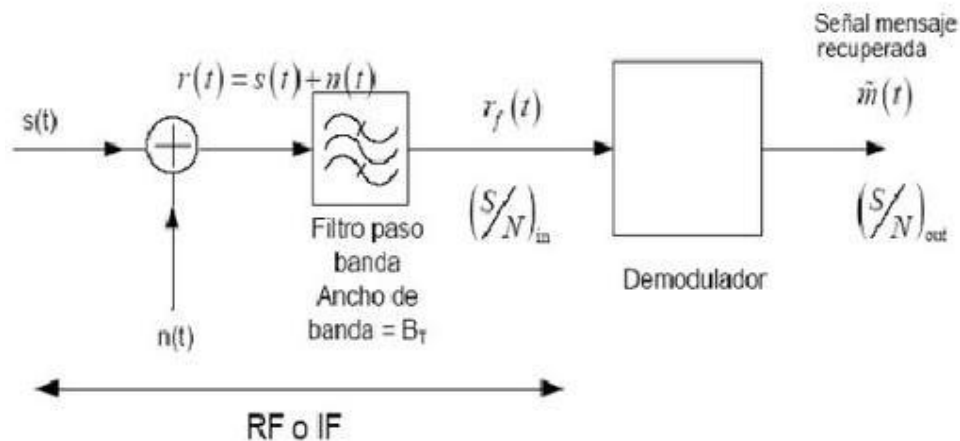


**Figura 19.** Ruido en Comunicaciones.  
Fuente: (Universidad Central de Bogotá, 2011)

### 2.2.4.1 Modelamiento del ruido

En los sistemas inalámbricos, cuando la información se envía por el canal, la señal presenta una deformación causada por la adición de una perturbación “Ruido”, para lograr la modulación sobre un canal se presentan modelamientos para comprender su efecto tal como se muestra en Fig. 20:

- Modelo de canal: el cual supone una banda base que no distorsiona, pero solo perturba una señal aleatoria denominada ruido blanco gaussiano aditivo.
- Modelo de receptor: supone un receptor que está compuesto por un filtro pasa banda el cual minimiza el efecto del ruido de canal, seguido a este un demodulador (Universidad Central de Bogotá, 2011).



**Figura 20.** Inserción del ruido al canal inalámbrico.

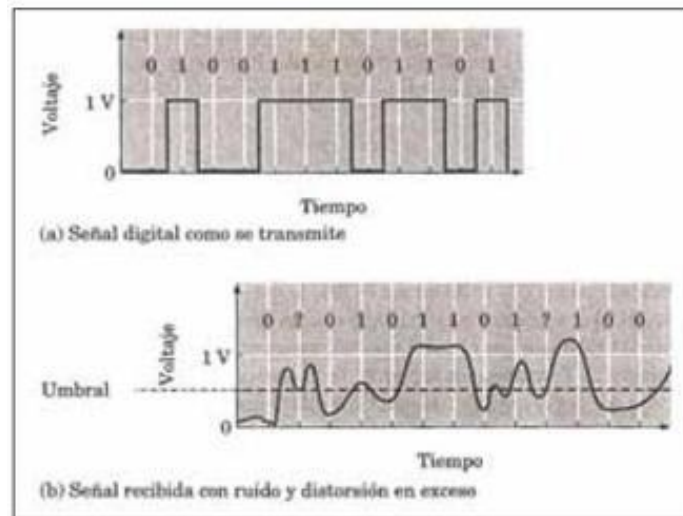
Fuente: (Universidad Central de Bogotá, 2011)

### 2.2.4.2 Relación señal / ruido (S/N)

Se denomina relación señal-ruido (S/N, por sus siglas en inglés *Signal/Noise*), al flujo del ruido por la señal esto se denota en decibelios (dB), existe algo llamado distorsión esto depende de su

potencia, de la distribución espectral respecto al ancho de banda y la naturaleza de la señal. La relación señal a ruido sirve para medir el desempeño de un sistema frente al ruido, midiendo a la salida del receptor cuando se capta una señal de entrada corrompida por el ruido. La potencia  $S$  de la señal desempeña un papel dual en la transmisión de información. Primero,  $S$  está relacionada con la calidad de la transmisión. Al incrementarse  $S$ , se reduce el efecto del ruido de canal, y la información se recibe con mayor exactitud, o con menos incertidumbre. Una mayor relación de señal a ruido  $S/N$  permite también la transmisión a través de una distancia mayor. En cualquier caso, una cierta  $S/N$  mínima es necesaria para la comunicación (Universidad Central de Bogotá, 2011).

Por otro lado, el ruido es aleatorio, un pulso de ruido puede tener cualquier amplitud, entre otras una que causa una transición al nivel equivocado tal como se muestra en la Fig. 21. De manera similar, la distorsión extrema de los pulsos puede causar errores. Estos problemas se demuestran en la Fig. 21 (Universidad Central de Bogotá, 2011):



**Figura 21.** Efectos del Ruido en la señal transmitida.

Fuente: (Universidad Central de Bogotá, 2011)

### 2.2.4.3 Ruido Gaussiano Blanco

El ruido gaussiano blanco AWGN se añade a la señal recibida. El ruido está presente en cualquier sistema de comunicaciones e impide que la información transmitida sea recibida libre de errores. El modelo de canal AWGN es el más usado y el más simple, donde el ruido está representado por un proceso aleatorio presente en todas las frecuencias con densidad espectral bilateral de potencia  $\frac{N_0}{2} W/Hz$ . Las muestras del ruido gaussiano tienen una función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés *Probability Density Function*) dada por:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x^2} \exp\left[-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (6)$$

donde  $\mu_x$  es la media y  $\sigma_x^2$  es la varianza de las muestras del ruido.

Una forma de medir el ruido introducido en un sistema es a través de la relación  $S/N$ , definida como la razón entre la potencia de la señal deseada  $S$  y la potencia del ruido  $N$ . La relación señalada también puede expresarse en Términos de la razón entre la energía por bit y la densidad espectral de potencia  $Eb/No$  (Altamirano, 2011).

## 2.3 Esquemas de modulación.

Al hablar de comunicaciones inalámbricas digitales es de suma importancia el modulador un bloque muy importante que forma parte del transmisor. La función principal del modulador es adaptar los datos a ser enviados por el transmisor, realizando una traslación del espectro de la información para las frecuencias, en las cuales ocurrirá la transmisión. En el fenómeno de modulación se involucran dos señales existentes, la señal original o más conocida y denominada

por muchos autores como la modulante y la señal más importante es la portadora que su responsabilidad es que la información sea transportada por el canal de comunicación, de la combinación de la modulante y la portadora nace una señal que se denomina señal modulada. En el receptor ocurre el proceso inverso conocido por demodulación, en el cual se extrae la información de la señal modulada.

Dado a los ambientes que se enfrentara la comunicación inalámbrica como el desvanecimiento, ruido, perdidas de propagación, interferencia que ya los revisamos anteriormente, el sistema de modulación debe ser capaz de ser lo más posible robusto y resistente ante estos efectos. Los sistemas celulares de primera generación utilizaban técnicas de modulación analógica. En la actualidad, los sistemas celulares son más eficientes y confiables y utilizan técnicas de modulación digital.

Existen diversos esquemas de modulación digital usados en las comunicaciones inalámbricas, pero en este trabajo de investigación sólo estudiar los esquemas de modulación M-PAM, BPSK y M-QAM.

### 2.3.1 Modulación PAM.

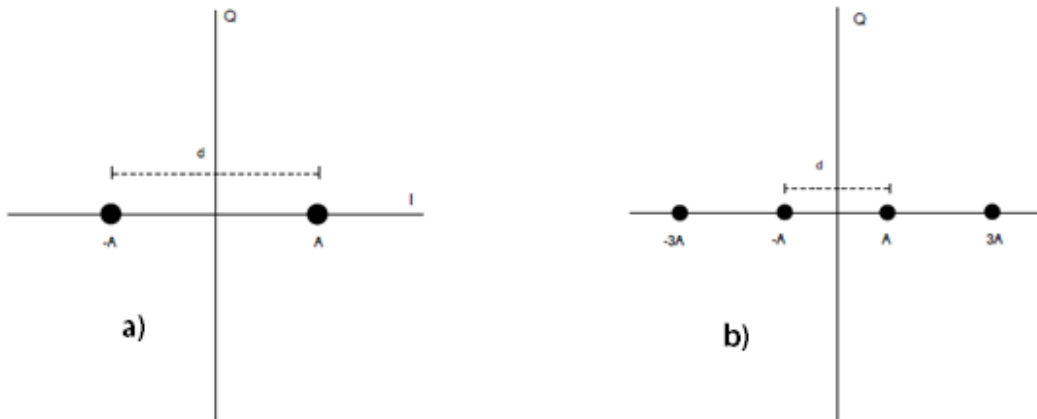
El esquema de modulación por amplitud de pulso PAM consiste en transmitir las informaciones de amplitud de un tren de pulsos. La señal PAM viene dada por:

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k p(t - kT_s) \quad (7)$$

donde  $x_k$  pertenece a un conjunto de  $M$  símbolos, que representan la amplitud del  $k$ -ésimo símbolo del mensaje y  $R_s = 1/T_s$  es la tasa de símbolo. El pulso consiste en una onda con cualquier otro formato, que debe cumplir las siguientes condiciones:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ 0 & t = \pm T_s, \pm 2T_s, \dots \end{cases} \quad (8)$$

Una señal M-PAM transmite bloques de bits en  $M=2^m$  formas de onda. En las Fig. 22 (a) y 22 (b) presentan las modulaciones 2-PAM y 4-PAM. En la Tabla. 2 muestra los símbolos de la modulación 4-PAM usando mapeo de Gray (Altamirano, 2011).



**Figura 22. a.** Modulación 2-PAM o BPSK y **b.** Modulación 4-PAM

Fuente: (Altamirano, 2011)

**Tabla 2.***Modulación 4-PAM*

Información Binaria	Símbolos
00	-3
01	-A
11	+A
10	+3A

Fuente: (Altamirano, 2011)

**2.3.2 Modulación BPSK**

En la Fig. 22 (a) el esquema binario BPSK es el más simple de los esquemas de modulación PSK. Este esquema de modulación consiste en cambiar la fase de la portadora en función de la señal digital a transmitir. Así se utilizan dos formas de onda bipolares de amplitud  $A$ , donde la fase de la portadora en  $0^\circ$  ocurre cuando se transmite un bit 1 y la fase de  $180^\circ$  ocurre cuando se transmite un bit 0. La modulación BPSK es idéntica a la modulación 2-PAM. En la Tabla. 3 presenta la señal pasante de la modulación BPSK (Altamirano, 2011).

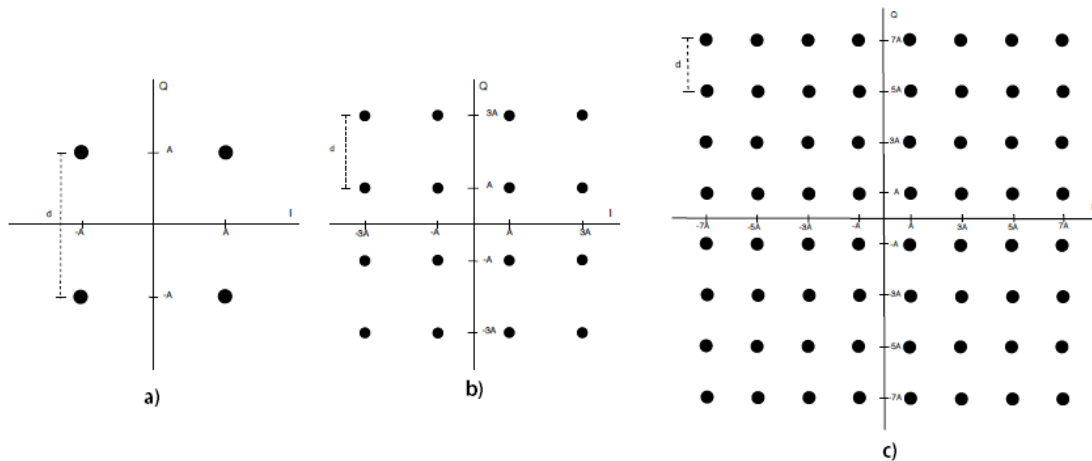
**Tabla 3.***Modulación BPSK*

Información Binaria	Símbolos	Señal
<b>1</b>	+A	$S_0(t) = +\sqrt{2}A \cos(2\pi f_c t)$
<b>0</b>	-A	$S_1(t) = -\sqrt{2}A \cos(2\pi f_c t)$

Fuente: (Altamirano, 2011)

**2.3.3 Modulación QAM**

El esquema de modulación QAM consiste en cambiar la amplitud de dos portadoras ortogonal. En las Fig. 23 (a), 23(b) y 23 (c), muestran las constelaciones de las modulaciones 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM, respectivamente.



**Figura 23.** a) Mod. 4-QAM, b) Mod. 16-QAM, c) Mod. 64-QAM  
Fuente: (Altamirano, 2011)

En el esquema M-QAM existen  $M=2^m$  formas de onda, donde  $m \geq 2$  representa el número de bits transmitidos por símbolo. En la Tabla 4 muestra la señal pasante de la modulación 4-QAM. Las modulaciones de orden superior se construyen usando el mismo proceso, es decir, sólo cambiando las amplitudes de las dos portadoras ortogonal (Altamirano, 2011).

**Tabla 4.**  
*Modulación 4-QAM*

Información Binaria	Símbolos	Señal
00	$+A + jA$	$S_0(t) = +\sqrt{2}A \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{2}A \sin(2\pi f_c t)$
01	$-A + jA$	$S_1(t) = -\sqrt{2}A \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{2}A \sin(2\pi f_c t)$
11	$-A - jA$	$S_2(t) = -\sqrt{2}A \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{2}A \sin(2\pi f_c t)$
10	$+A - jA$	$S_3(t) = +\sqrt{2}A \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{2}A \sin(2\pi f_c t)$

**Fuente:** (Altamirano, 2011)

La modulación M-QAM permite un uso eficiente de la banda, debido a la capacidad de los esquemas de modulación de acomodar más bits por segundo en una banda limitada. La eficiencia



de uso de la banda o eficiencia espectral  $\varepsilon$ , se define como la razón entre la tasa de bits y la banda del canal, que tiene como unidades  $b/s/Hz$ , es decir:

$$\varepsilon = \frac{R_b}{B} \text{ bist/seg/Hz} \quad (9)$$

donde  $R_b$  es la tasa de bits y  $B$  la banda ocupada por la señal modulada de RF. En la Tabla 5 muestra la eficiencia espectral de los esquemas de modulación tal como se muestra en la Fig. 22, 23 (Altamirano, 2011).

**Tabla 5.**  
*Eficiencia Espectral.*

Modulación	Eficiencia Espectral	$\bar{\varepsilon}_b$	[dB]
BPSK	1	$A^2$	0.0
4-PAM	2	$\frac{5}{2}A^2$	3.9
4-QAM	2	$A^2$	0.0
16-QAM	4	$\frac{5}{2}A^2$	3.9
64-QAM	6	$\frac{21}{4}A^2$	7.2

**Fuente:** (Altamirano, 2011)

Es importante definir el concepto de energía media de la constelación, pues está relacionada con la eficiencia espectral del esquema de modulación. La energía de un símbolo es igual a la norma cuadrática del vector que lo representa, por lo que la energía media de la constelación es dada por:

$$\bar{E}_s = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_{s,m} \quad (10)$$

donde  $E_{s,m} = \int_0^{T_x} s_m^2(t) dt$ . La energía por bit se calcula a través de la relación:

$$E_b = \frac{E_s}{\log_2 M} \quad (11)$$

En la Fig. 23 los diagramas de constelación para mantener la distancia mínima euclidiana constante e igual a  $2A$ , los esquemas de modulación con mayor eficiencia espectral deben tener su energía media aumentada. En la Tabla 5 muestra la energía media por bit de estas constelaciones. Por otro lado, para normalizar la energía media de las constelaciones, tal que  $E_b = A^2$ , sería necesario disminuir la distancia mínima euclidiana en las constelaciones con mayor eficiencia espectral, disminuyendo así su inmunidad al ruido insertado por el canal. Por lo tanto, existe una relación entre banda, energía y tasa de error de bits, que debe considerarse a la hora de elegir un esquema de modulación (Altamirano, 2011).

## 2.4 Técnica OFDM.

OFDM tiene su inicio como una aplicación militar. OFDM es denominado una técnica de modulación digital su principal funcionamiento radica en dividir el espectro disponible en múltiples subcanales con anchos de banda reducidos. Cada subcanal tiene su portadora muy cercana y como su nombre lo dice ortogonales entre sí, consiguiendo la eliminación de la diafonía entre subcanales.

La tecnología OFDM empieza copar espacio en el mundo de las telecomunicaciones debido a que en la actualidad existen procesadores de señales digitales que permiten este proceso, el algoritmo que corre para conseguir el objetivo de la modulación OFDM es la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés *Fast Fourier Transform*). En la modulación OFDM tiene que existir una perfecta sincronización entre el transmisor y el receptor. Un problema en la modulación OFDM se presenta cuando una de las portadoras sufre una alteración de desviación

que afecta directamente en la ortogonalidad del sistema provocando el efecto denominado interferencia entre portadoras (ICI, por sus siglas en inglés *Inter Carrier Interference*).

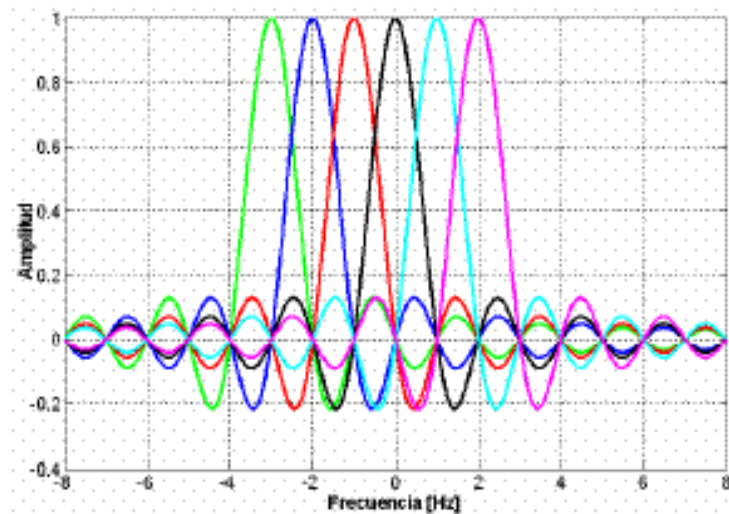
La gran diferencia y lo que lo hace distinto de otros sistemas a OFDM es la ortogonalidad, como ya se mencionó OFDM posee  $N$  portadoras, esto conlleva a que se debe tener  $N$  muestras complejas en tiempo discreto y representar un símbolo OFDM tal como se muestra en la Fig. 24, en el dominio del tiempo las muestras  $(0, 1, \dots, N)$  proviene de una subportadora  $k$  modulada con un símbolo  $C_k$ , un símbolo OFDM se puede expresar como:

$$S_{k-ofdm}[n] = \frac{C_k}{N} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (12)$$

donde  $N$  es el número de subportadoras,  $n$  índice de la muestra en el dominio del tiempo,  $k$  es el índice de la subportadora y  $C_k$  es la amplitud y fase de la información a transmitir (Yáñez Arias, 2010).

Un símbolo completo, se representa en el dominio del tiempo y se representa a partir de la  $N$  subportadoras superponiendo sus ondas:

$$S_{n-ofdm}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} S_{k-ofdm}[n] \quad (13)$$



**Figura 24.** Espectro OFDM con 6 sub-portadoras.  
Fuente: (Vidal & Enriquez, 2007)

### 2.4.1 Ventajas de OFDM.

- Aprovecha de manera eficiente el espectro.
- Al poseer múltiples portadoras con ancho de banda reducidos el sistema se vuelve más robusto ante ambientes hostiles.
- Por la inserción del prefijo cíclico (CP, por sus siglas en inglés *Cyclic prefix*) se elimina el efecto ICI.
- Aplicando técnicas mejoradas de codificación de canal, el sistema puede reaccionar muy bien ante pérdidas de información en la transmisión.
- Gracias a la FFT se hace más fácil la implementación computacional.
- OFDM tiene una respuesta muy robusta y eficiente en la presencia del multitrayecto muy común en canales inalámbricos.
- Supera en tasas de transmisión comparándole con CMDA.

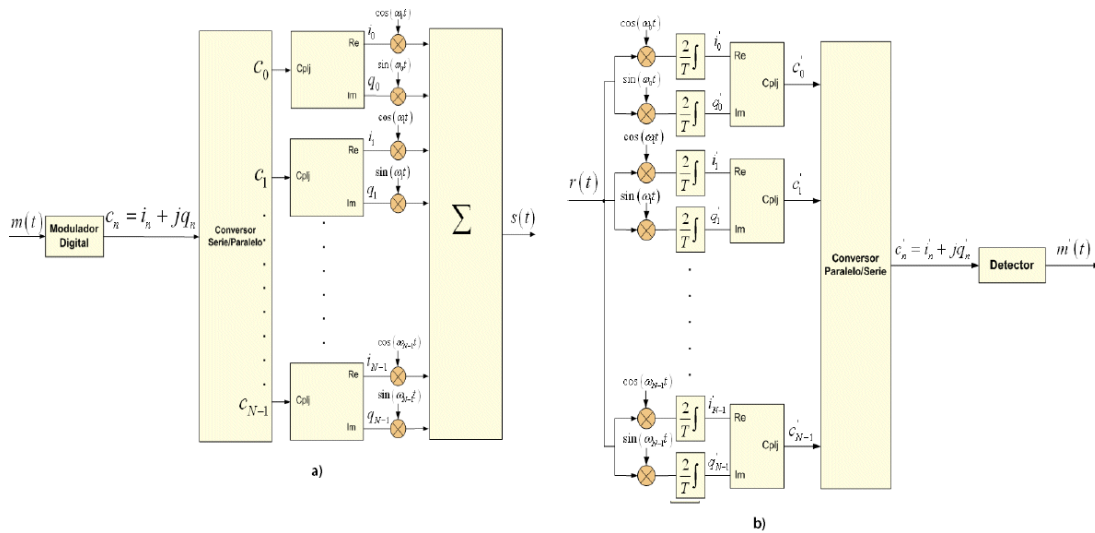
### 2.4.2 Codificación OFDM.

La codificación de un sistema OFDM se puede simplificar en tres bloques muy importantes:

- Aleatorización de datos, lo realiza en el enlace ascendente y descendente en cada secuencia de datos.
- *Forward Error Correction* (FEC) es una técnica utilizada para el control de errores en la transmisión de datos sobre canales de comunicación no fiables o ruidosos, FEC da al receptor la capacidad de corregir errores sin necesidad de un canal de retorno para solicitar la retransmisión de datos.
- Entrelazado o *Interleaving* realiza el proceso de aleatorización de las muestras para que los datos de un mismo símbolo no se encuentren en portadoras adyacentes, y evitar las ráfagas de errores.

### 2.4.3 Generación y recepción de señales OFDM

Para la generación de símbolos OFDM el primer proceso es la conversión serial-paralelo para realizar la separación de entrada en  $N$  sub-canales de datos. En cada subcanal se debe modular con una subportadora compleja, constituida por cosenos y senos que poseen la misma frecuencia. La suma de todas estas señales da como resultado la señal OFDM. En la Fig. 25 a y b se muestra el diagrama de bloque de un transmisor y un receptor OFDM respectivamente (Vidal & Enriquez, 2007).



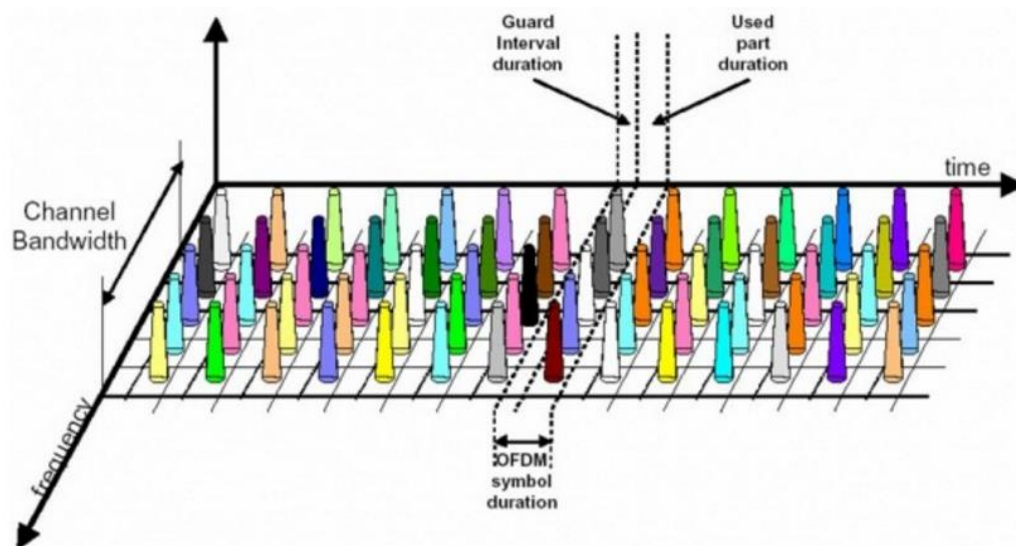
**Figura 25.** Diagrama de bloque de un TX y RX OFDM  
**Fuente:** (Vidal & Enriquez, 2007)

### 2.4.3.1 Prefijo Cíclico

En las comunicaciones inalámbricas la presencia del multirrayecto debido al reflejo de la señal por obstáculos en el momento de la transmisión trae consigo que se generen varias versiones de la señal transmitida que llegan con retardo, OFDM se creó para minimizar este efecto y la solución que utiliza OFDM para mitigar este efecto es el uso del prefijo cíclico.

Debido a que la duración de un símbolo OFDM es larga se debe hacer la inserción del prefijo cíclico entre cada símbolo tal como se muestra en la Fig. 25, este intervalo de tiempo debe ser mayor a el tiempo de propagación esperado, en otras palabras el prefijo cíclico debe ser suficiente para que el símbolo recibido no interfiera con el siguiente, con la inserción de este prefijo cíclico se da solución al problema de interferencia inter-simbólica (ISI, de sus siglas en inglés *Inter-symbol interference*), impidiendo que un símbolo se solape con el otro. El prefijo cíclico puede interpretarse por el receptor como ausencia de señal y generar un error ICI que es la interferencia entre portadoras, dando como resultado que OFDM pierda su esencia de ortogonalidad, para eliminar este error el símbolo OFDM se ve extendido cíclicamente en el periodo de prefijo cíclico

garantizando que las réplicas que llegan al receptor siempre poseen un número entero de ciclos en el intervalo de la FFT (Yáñez Arias, 2010).



**Figura 26.** Prefijo cíclico OFDM.

Fuente: (Yáñez Arias, 2010)

## 2.5 Generalidades del protocolo TCP.

Las comunicaciones militares usaban la red pública de telefonía por la década de los 50's, en los Estados Unidos se crea una institución militar de investigación para el desarrollo de la tecnología conocida como Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada (ARPA), aquí nace la idea de una red más segura que sea difícil de vulnerar, con este principio ARPA presenta un modelo de red basándose en la conmutación de paquetes que consiste en subredes conformadas por hosts que tenían la habilidad de enrutar los paquetes informáticos, en el año de 1969 ARPA implementa una red de computadores en los campus de las universidades Utah, UCLA, UCSB y SRI llamándola ARPANET, se considera la primera red no centralizada.

Después de varios experimentos ARPA concluye que los protocolos implementados en la red no actúan de manera eficiente en topologías de red con interfaces de cable, radio o satélite. De esta

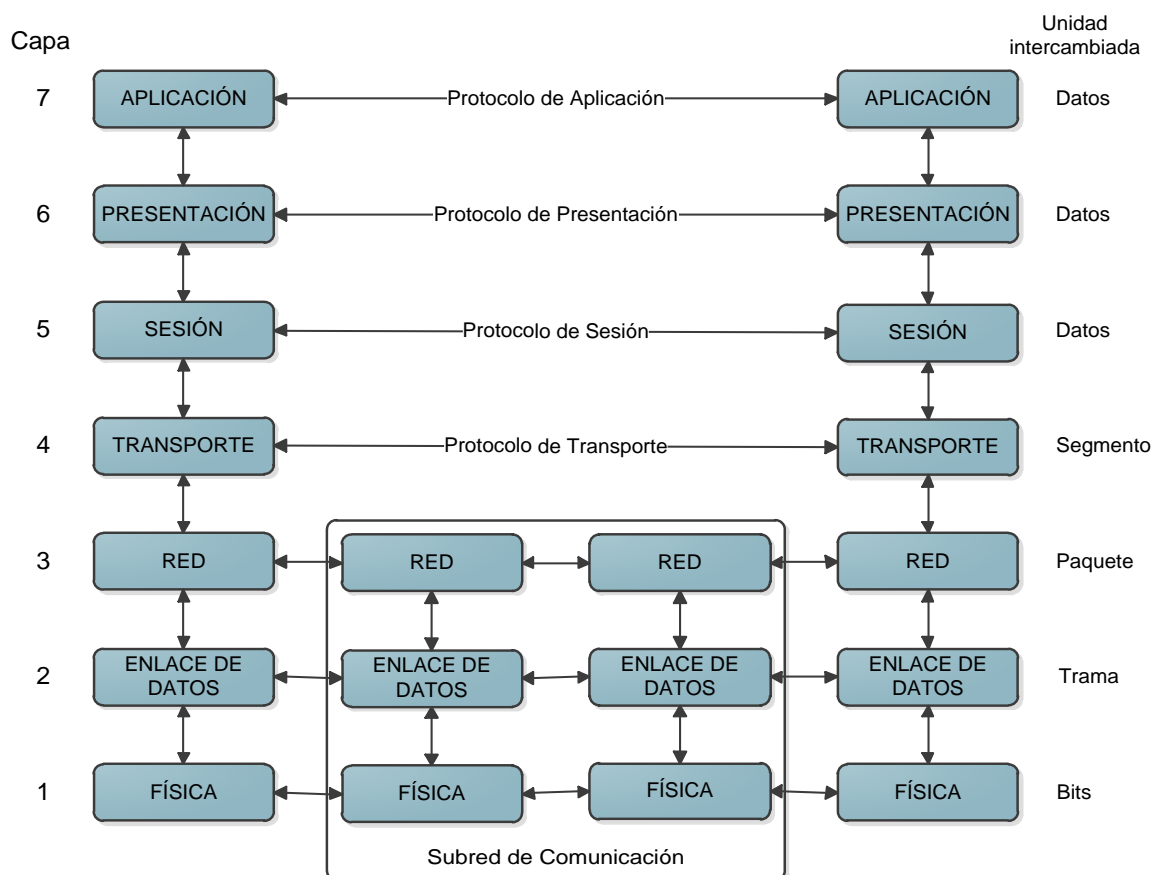
aseveración nace la idea de la investigación de un protocolo que más tarde se llamaría TCP/IP. Mediante el departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos determina que el protocolo TCP/IP oficialmente como el estándar de ARPANET.

Para que las redes converjan y los dispositivos se comprendan entre ellos, los diseños de los protocolos se basaron en capas o niveles. La idea es que cada capa o nivel brinde el soporte necesario a la capa superior para comprender la orden que se le está enviando. Para que el dispositivo de una red comprenda lo que el otro dispositivo le quiere decir deben dialogar en el mismo idioma a estas reglas y convenciones se las conoce como protocolos. En una arquitectura de red es de suma importancia los protocolos y las capas por esa razón la mayoría de redes del mundo en especial las de Internet usan un modelo de referencia llamado Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, por sus siglas en inglés *Open System Interconnection*) y TCP/IP.

### **2.5.1 Modelo de referencia OSI**

El modelo OSI fue propuesto por la Organización Internacional de Estándares (ISO, por sus siglas en inglés *International Organization for Standardization*) con el objetivo de que todos manejen los mismos protocolos en las distintas capas propuestas. En la Fig. 27 el modelo OSI propone siete capas cada una establece los protocolos de red a usarse para que exista la comunicación entre computadoras (Pilo-Pais & Olmedo , 2011).





**Figura 27.** Modelo de referencia OSI

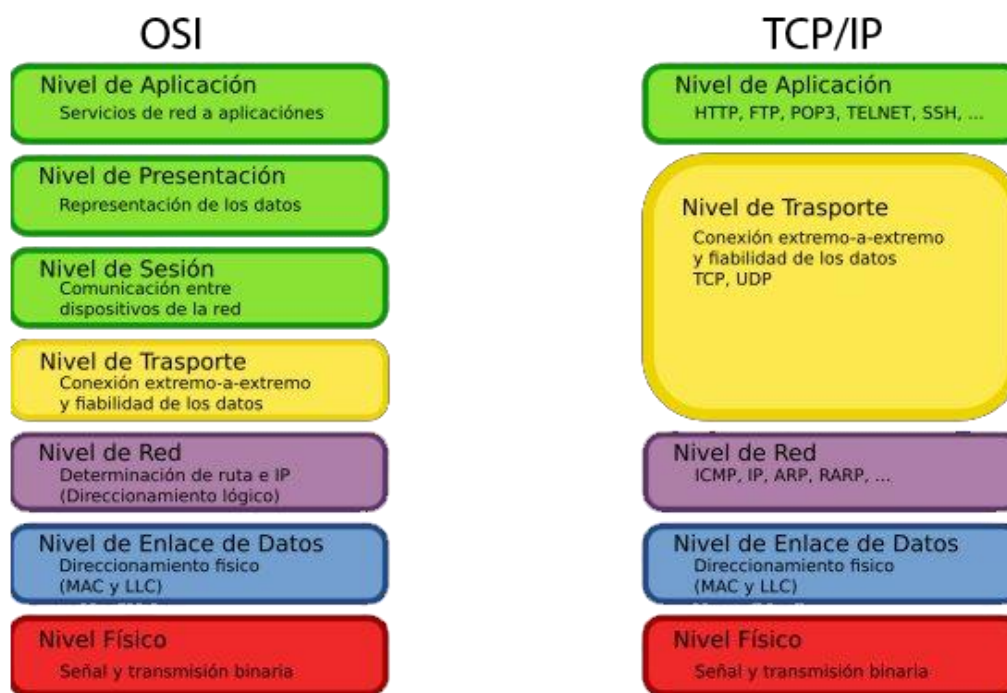
Fuente: (Pilo-Pais & Olmedo , 2011)

- Capa física, la principal tarea consiste en la transmisión de bits de información a través de una interface ya sea por cable o radio.
- Enlace de datos, transforma el medio de comunicación puro en una abstracción libre de errores para la capa superior. Se encarga del direccionamiento físico, distribución de tramas y el control de acceso en medios compartidos.
- La capa de red: Controla las operaciones de la subred, determina las direcciones lógicas de los nodos y el enrutamiento de los paquetes a través de la red.
- La capa de transporte: Recibe datos de las capas superiores, los fragmenta y se asegura que lleguen correctamente hasta el destino. Establece una verdadera conexión de extremo a extremo desde el origen hasta el destino.

- La capa de sesión: Permite el establecimiento de sesiones, control de diálogo y sincronización.
- La capa de presentación: Se encarga de la sintaxis y semántica de la información transmitida. Representa a la información de manera abstracta.
- La capa de aplicación: Se definen protocolos que utilizan las aplicaciones para el intercambio de datos.

## 2.5.2 Modelo de referencia TCP/IP

Como ya se mencionó el protocolo TCP/IP fue estandarizado e implementado por ARPANET y la mayoría redes de redes del mundo en especial la de internet, su nombre hace referencia a los protocolos más importantes como el TCP e IP. El modelo TCP/IP solo tiene cinco capas muy similares al modelo OSI tal como se muestra en la Fig. 28.



**Figura 28.** Modelo de referencia TCP/IP  
Fuente: (mikrotikxperts, 2017)

### 2.5.3 Protocolo TCP

Las aplicaciones de internet más usadas son las de FTP y HTTP están se encuentran trabajando comúnmente en los navegadores de internet y se debe garantizar la entrega de los datos a su destino sin ninguna pérdida. Como ya se mencionó en la capa de transporte existen dos protocolos muy importantes para que las aplicaciones funcionen de la mejor manera TCP fue programado para realizar la conexión de extremo a extremo y este es el responsable de garantizar la entrega de todos los datos informáticos transmitidos, TCP va monitoreando el estado de la red para administrar la transmisión y flujo de datos.

Finalmente, en el año de 1981 bajo el documento RFC 793 se encuentran publicadas las funcionalidades del protocolo. Desde su publicación ante el mundo varios expertos han venido trabajando en mejorar el desempeño del protocolo, varios factores se involucran el momento de una transmisión de datos como por ejemplo el ancho de banda, el tamaño del *buffer* y la velocidad de procesamiento de los dispositivos son muy importantes para una transmisión efectiva. TCP entre su algoritmo posee un control de congestión de tal forma que ayuda a que la transmisión de los datos se efectuó de manera efectiva aun así si los recursos se limitan por algún motivo de los ya mencionados.

En los inicios de TCP su algoritmo utilizaba el control de flujo y este se fundamentaba en ventanas en el receptor, pero carecía de un control dinámico en modificar el tamaño de la ventana en función del estado del enlace para realizar un control de congestión, años después se desarrolló modificaciones en el algoritmo para resolver el inconveniente presentado, des pues de años de investigación se implementó a TCP temporizadores y el control de congestión llamado "*Congestion avoidance and control*" propuesto por (Jacobson V. , 1988).

#### 2.5.4 Características del protocolo TCP.

La pila de protocolos de la arquitectura TCP/IP presentada en la Fig. 28, con dos protocolos en la capa de transporte: UDP y TCP. La principal diferencia entre los dos protocolos consiste en garantizar o no la fiabilidad en la entrega de los datos por parte del trasmisor. El protocolo UDP sigue el principio del mejor esfuerzo, donde los segmentos UDP sólo se descartarán si hay agotamiento de recursos. En compensación, en caso de pérdida de información no hay retransmisión. Por otro lado, el protocolo TCP a través del esquema de confirmación positiva de recepción ACK y de la retransmisión, garantiza que todos los segmentos TCP se entreguen al destino. La respuesta ACK genera tráfico adicional en la red, disminuyendo un poco la tasa de transferencia de datos en favor de la confiabilidad (Olmedo, 2008).

El protocolo TCP realiza una serie de tareas para garantizar la entrega de los datos transmitidos que a continuación se detallan:

- Una de sus tareas es la generación de segmentos, toma los datos de la capa de aplicación y los segmenta en tamaños convenientes para transmisión.
- Establece una negociación entre el emisor y receptor para llegar a un acuerdo en el tamaño del segmento a transmitir, a este tamaño se lo conoce como tamaño máximo de segmento (MSS, por sus siglas en inglés *Maximum Segment Size*).
- En el momento que se envía un segmento el algoritmo activa el temporizador con un valor calibrado que determina la vida útil del segmento.
- En el momento que el receptor recibe de manera óptima el segmento transmitido el receptor envía de manera automática la confirmación del segmento llamado ACK. En la práctica, los segmentos de confirmación no se envían inmediatamente, sino algunos retrasos debidamente escogidos. Este procedimiento es conocido como mecanismo de reconocimiento retrasado y tiene como objetivo aumentar la eficiencia de la conexión utilizando sólo un segmento para reconocer la necesidad de una cantidad mayor de datos.

- En el receptor el algoritmo TCP está en la espera de recibir la conformación de parte del receptor que haya recibido de manera efectiva, si el tiempo del temporizador se termina y no ha llegado la confirmación el transmisor retransmite el segmento por que asume que el paquete se perdió.
- Cuando llega un segmento el algoritmo TCP lleva acabo la consistencia del encabezado *checksum* que su función es que los datos encapsulados no hayan sufrido ninguna modificación si existe algún error se descarta el segmento y se solicita la retransmisión del segmento.
- Debido a que la red funciona por conmutación de paquetes, puede ser que los segmentos TCP lleguen en desorden, el protocolo TCP debe realizar la reordenación de los paquetes.
- El control de flujo de TCP debe garantizar que no exceda la cantidad de almacenamiento del *buffer* en el receptor para que no exista la congestión.

#### 2.5.4.1 Ventana deslizante.

Para realizar el cálculo de la velocidad máxima de salida de los datos, sin considerar las retransmisiones y tiempos que se toma el sistema en el procesamiento de los datos se puede calcular mediante:

$$v = \frac{8N_{TCP}}{T_{RTT}} \text{ [bits/s]} \quad (14)$$

donde RTT es el tiempo medio de ida del segmento y de vuelta de su reconocimiento  $N_{TCP}$  es el tamaño máximo del segmento en *bytes*.

Con este principio y considerando una recepción exitosa del segmento, para él envío del ACK se ocupa el ancho de banda de la red conllevando al retraso en el envío de un nuevo segmento, para

hacer más eficiente este mecanismo se plantea la propuesta de ventana deslizante. La idea es prácticamente enviar una serie de segmentos contenidos en una ventana sin la espera de la confirmación. La ventana que contiene los segmentos tiene un tamaño máximo y puede variar dependiendo la recepción exitosa de los segmentos. El desempeño de protocolos con ventanas deslizantes depende del tamaño de la ventana y de la velocidad con que la red puede aceptar segmentos, siendo esta última determinada por tasa de transmisión, retraso de propagación, tiempo gastado en filas y procesamiento.

El protocolo TCP no sabe qué segmentos se encuentran dentro de la ventana y mantienen un temporizador para cada segmento por separado, retransmitiendo cada segmento, cuyo temporizador concluya. Al obtener la confirmación de recepción de un segmento inicial, el protocolo desplaza su ventana, incluyendo nuevos segmentos a transmitir. En el destino, de forma análoga, se creó una ventana de segmentos de reconocimiento. Se puede concluir entonces que el protocolo divide los segmentos en tres conjuntos distintos. Los segmentos que fueron transmitidos, recibidos y confirmados con éxito, los cuales no pertenecen más a la ventana y se sitúan temporalmente a la izquierda de ésta; los segmentos que aún no se han transmitido y que se sitúan temporalmente a la derecha de la ventana y, finalmente, los segmentos que pertenecen a la propia ventana y se transmiten o ya se han transmitido sin que en la fuente haya recibido el paquete de reconocimiento (Olmedo, 2008).

En la Fig. 29 el protocolo TCP el tamaño de la ventana puede variar con el tiempo, ya que el destino al enviar los reconocimientos indica la cantidad máxima de bytes que puede recibir en su buffer. Este valor se denomina *advertised window*. Por lo tanto, en la fuente puede aumentar o disminuir el tamaño de su ventana de transmisión, de acuerdo con el valor anunciado por el destino, el cual nunca sería mayor que el espacio disponible en el *buffer* de datos de recepción. La gran ventaja de este mecanismo y que demuestra un control de flujo de datos fin-a-fin en la medida en que en el que transmite queda impedido de enviar datos a una tasa mayor que la soportada por el receptor, la ventana puede alcanzar el valor cero, lo que significa que el *buffer* de recepción está completamente lleno. En este caso la transmisión se interrumpe y el receptor anunciará un valor de

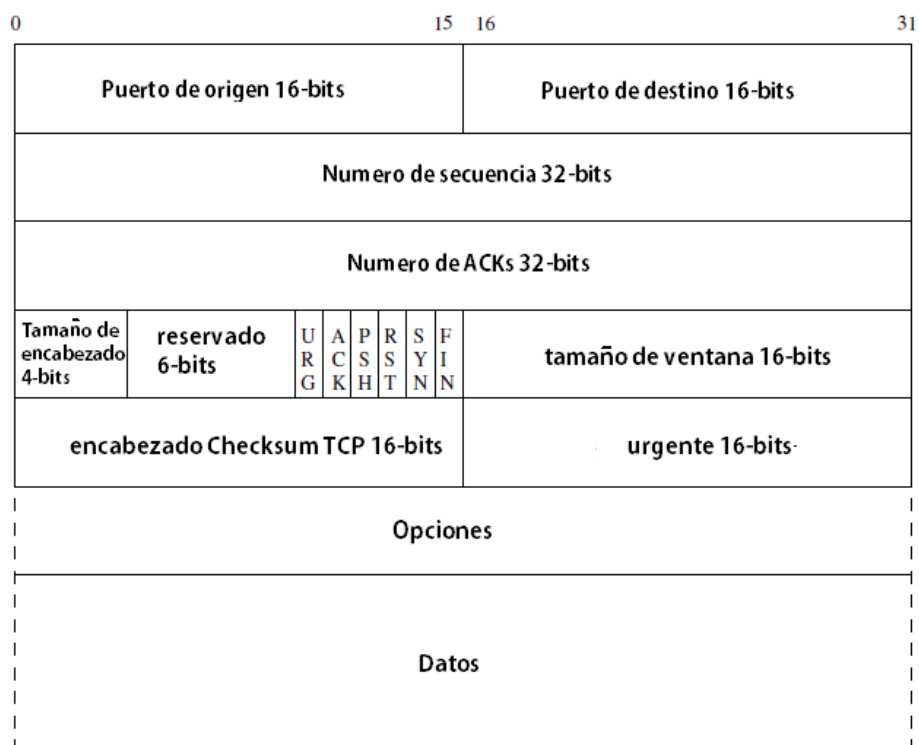


- **Puerto de origen**, indica el número de puerto de origen.
- **Puerto de destino**, indica el número de puerto de destino.
- **Numero de secuencia**, indica la posición del primer byte de datos que se transmite en relación con el total de los bytes ya transmitidos en esta conexión.
- **Numero de ACK**, indica el reconocimiento de los datos recibidos hasta entonces en el sentido inverso. Si el bit de control ACK está activado, este campo contiene el número de la siguiente secuencia que se espera recibir.
- **Tamaño de encabezado**, indica el número de palabras de 32 bits que componen el cabezal de TCP, para determinar dónde empiezan los bits de datos.
- **Reservado**, seis bits reservados para uso futuro, todos iguales cero.
- **URG**, bit de urgencia. Significa que el segmento que se carga contiene datos urgentes, que deben transmitirse con prioridad por la aplicación.
- **ACK**, bit de reconocimiento. Indica qué campo de reconocimiento está cargando un valor válido.
- **PSH**, bit de *PUSH*. Este mecanismo puede ser accionado por la aplicación e informa al protocolo TCP si una aplicación solicita la transmisión rápida de los datos enviados.
- **RST**, bit de *RESET*. Se informa al destinatario que la conexión ha sido abortada en por el transmisor.
- **SYN**, bit de sincronismo. Es el bit que indica que éste es uno de los dos primeros segmentos de establecimiento de conexión.
- **FIN**, identifica que no hay más datos en el transmisor.
- **Tamaño de la ventana**, este campo indica el tamaño disponible en bytes de la ventana de recepción. A través de este valor, el protocolo TCP puede realizar un control de flujo adecuado para evitar una sobrecarga del receptor. Cuando este valor es igual a cero, el transmisor no envía datos, esperando recibir un segmento con tamaño de ventana mayor que cero. El transmisor siempre transmitirá la cantidad de datos disponibles por la ventana de recepción, sin esperar un ACK. Mientras tanto no se recibe un reconocimiento de los datos transmitidos dentro de la ventana, el transmisor no enviar a más datos.
- **Comprobación de paridad "checksum"**, y un número en complemento de uno de 16 bits, obtenido por la suma de los complementos de unas de todas las palabras de 16 bits del cabezal



IP, del cabezal TCP y de los datos TCP. Este valor es importante para garantizar la integridad del cabezal y de los datos.

- **Señal de urgencia**, identifica el primer byte de datos después de los datos definidos como urgentes. Sólo es válido si el bit de control URG está activado.
- **Opcionales**, el campo de opciones es una única opción válida, que es la negociación del MSS. Si esta opción está presente, indica el tamaño máximo del segmento. En el caso contrario el MSS vale 536 bytes, constituidos por 516 bytes de datos y 20 bytes de cabezal.



*Figura 30.* Segmento TCP

### 2.5.4.3 Control de congestión.

#### 2.5.4.3.1 Snow Start.

Este mecanismo se utiliza para determinar la capacidad de la red, donde el tamaño de la ventana de control de congestión,  $W$ , e incrementada de un segmento cada vez que la confirmación de un

segmento TCP y recibida. Este incremento presenta un crecimiento exponencial, duplicando el tamaño de la ventana cada vez de ida y vuelta  $T_{RTT}$  hasta que la congestión ocurra, o que la ventana llegue al tamaño máximo definido por el destino, debido a la capacidad de los búferes. Cuando se detecta congestión, el tamaño de la ventana se reduce a uno y se inicia un nuevo crecimiento exponencial hasta la mitad del valor máximo que la ventana llegó a alcanzar cuando se detectó la congestión (Olmedo, 2008).

#### **2.5.4.3.2 Congestion avoidance**

El mecanismo, el tamaño de la ventana es incrementado de  $1/W$ , cada vez que un ACK es recibido. Así, cuando no hay congestión, la ventana se incrementa linealmente a cada  $T_{RTT}$ . Cuando un segmento TCP se recibió con éxito, se envió un ACK al nodo fuente con el número de secuencia del siguiente segmento esperado por el nodo destino. Si un segmento transmitido es perdido o recibido con errores, el receptor no envía ninguna información al transmisor. Por este motivo, el mecanismo de control de congestión define la pérdida de un segmento, cuando el transmisor recibe tres ACKs consecutivos con el número de secuencia de este segmento (duplicación de ACKs), o por el agotamiento del tiempo de trabajo (*Time-out*). Cuando el transmisor recibe la duplicación de ACKs, el segmento perdido y retransmitido inmediatamente y el tamaño de la ventana es disminuido a la mitad. A partir de este punto se continúa incrementando la ventana de forma lineal, eliminando la fase de la partida lenta (Olmedo, 2008).

## **2.6 Versiones de TCP**

### **2.6.1 TCP Reno**

La versión TCP Reno tuvo su aparición por el año de 1990 implementado en *Berkeley Software Distribution* (BSD) un sistema operativo derivado del sistema Unix, la diferencia a las otras versiones anteriores es la implementación de *fast recovery* que junto a *fast retransmit* permiten una

recuperación más rápida de la ventana luego de la retransmisión, si se ocurre perdidas el algoritmo so es posible la recuperación a la primera perdida de forma rápida.

### **2.6.2 TCP Westwood**

El algoritmo TCPW más conocido como TCP Westwood en relación al tradicional TCP Reno realiza una modificación en el lado de remitente especialmente en su ventada de congestión que ya lo explicamos anteriormente, esta modificación hace que TCP presente un mejor rendimiento especialmente cuando es implementado en redes inalámbricas donde están presentes las perdidas. La diferencia entre TCPW y TCP Reno es que TCPW no es muy sensible a errores aleatorios, mientras que TCP Reno es igualmente sensible a pérdida aleatoria y pérdida de congestión y no puede discriminar entre ellos. TCPW cumple totalmente con el principio de diseño TCP de extremo a extremo. La idea clave innovadora es medir continuamente en el lado del emisor TCP el ancho de banda utilizado por la conexión mediante el monitoreo de la tasa de retorno de ACKs. La estimación se utiliza para calcular la ventana de congestión y el umbral de inicio lento después de un episodio de congestión, es decir, después de tres reconocimientos duplicados o después de un tiempo de espera. La lógica de esta estrategia es simple: en contraste con TCP Reno que ciegamente reduce a la mitad la ventana de congestión después de tres ACK duplicados, TCP Westwood intenta seleccionar un umbral de inicio lento y una ventana de congestión que son consistentes con el ancho de banda efectivo utilizado en ese momento (Casetti, Gerla, Mascolo , Sanadidi , & Wang, 2002).

### **2.6.3 TCP NACK**

El algoritmo TCP no fue pensado para trabajar en ambientes inalámbricos pero debido a su eficiencia se ha realizado modificaciones para que trabaje en entornos de esta característica, donde las pérdidas son muy comunes por múltiples factores, una modificación de TCP con excelentes resultados es presentado por (Olmedo, 2008) la característica de este TCP que fue llamado TCP-NACK, está en él envió de notificaciones de error la transmisor para que se realice la retransmisión

inmediatamente de los segmentos perdidos evitando que TCP haga la reducción en su tasa de transmisión por congestiónamiento.

Para que él envío de la confirmación negativa se efectuó con éxito, fue necesario la creación de una nueva bandera llamada NACK usando bits del campo de “bits reservados” que tiene el encabezado TCP. Cada vez que hay él envío de un NACK la bandera pasa al nivel activo y el número del segmento que necesita que se retransmita será puesto en el campo de “numero de confirmación” (Pilo-Pais & Olmedo , 2011).

0	4	7	8							16	31
Puerto de Origen						Puerto de Destino					
Número de Secuencia											
Número de Confirmación de Recepción (ACK)/ Confirmación Negativa (NACK)											
Longitud del Encabezado	Reservado	N	C	E	U	A	P	R	S	F	Tamaño de la Ventana
		A	W	C	R	C	S	S	Y	I	
		C	R	E	G	K	H	T	N	N	
Suma de Verificación (CRC)						Apuntador Urgente					
Opciones (0 o más palabras de 32 bits)											
Datos (Opcional)											

**Figura 31.** Encabezado TCP-NACK  
Fuente: (Pilo-Pais & Olmedo , 2011)

**CAPÍTULO III**  
**3. DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP EN UN SISTEMA DE**  
**TRANSMISION DIGITAL 4-QAM, 16-QAM Y 64QAM CON**  
**INTERFERENCIA CO-CANAL SOBRE UN CANAL AWGN CON**  
**DESVANECIMIENTO RAYLEIGH.**

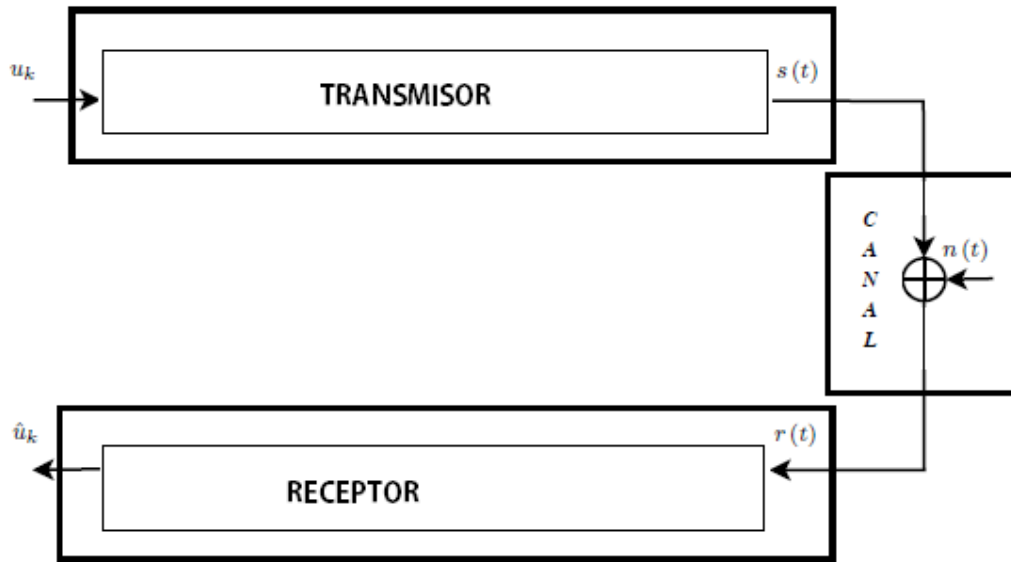
**3.1 Probabilidad de error de símbolo en Modulaciones Digitales con Ruido AWGN.**

En esta sección se realizará el análisis para determinar el desempeño de las modulaciones digitales en canales inalámbricos, se empezará considerando el ruido gaussiano blanco AWGN. El rendimiento se podrá estimar mediante las expresiones de probabilidad de error de símbolo y posteriormente la probabilidad de error de bit que responden a ecuaciones matemáticas obtenidas de un análisis muy profundo y llevadas a la simulación para comprobar lo que matemáticamente se predice. Los esquemas de modulación que se llevara al análisis son M-PAM y M-QAM.

En primer lugar, se considera un modelo de transmisión digital donde después del procesamiento digital como codificadores, mapeadores, entrelazadores, etc. tal como se muestra en la Fig. 32, se obtiene una señal  $s(t)$ , la señal digital es enviada por el canal de comunicación inalámbrica al cual se introduce ruido dando como resultado:

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (15)$$

donde  $n(t)$  es el ruido aditivo gaussiano blanco con varianza  $\sigma^2 = N_o/2$  , donde  $N_o$  es la potencia espectral del ruido.



**Figura 32.** Modelo de un sistema de transmisión digital con ruido AWGN.

En la Fig. 33 para el análisis se debe tener en cuenta la función de probabilidad PDF con una distribución normal o campana de Gauss de una variable aleatoria, que posee una media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  está definido por:

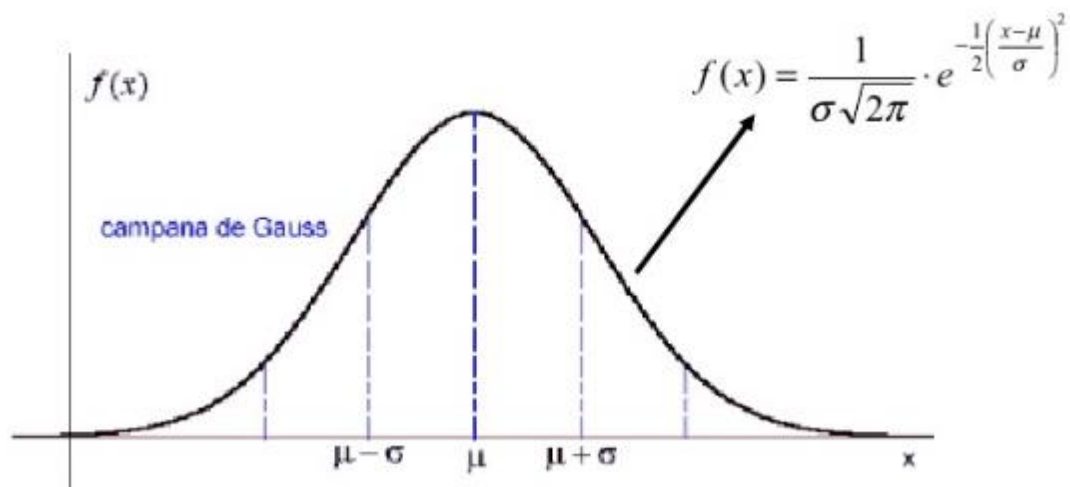
$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (16)$$

la probabilidad de que  $x \geq a$  se puede representar por la región pintada tal como se muestra en la Fig. 34 y responde a:

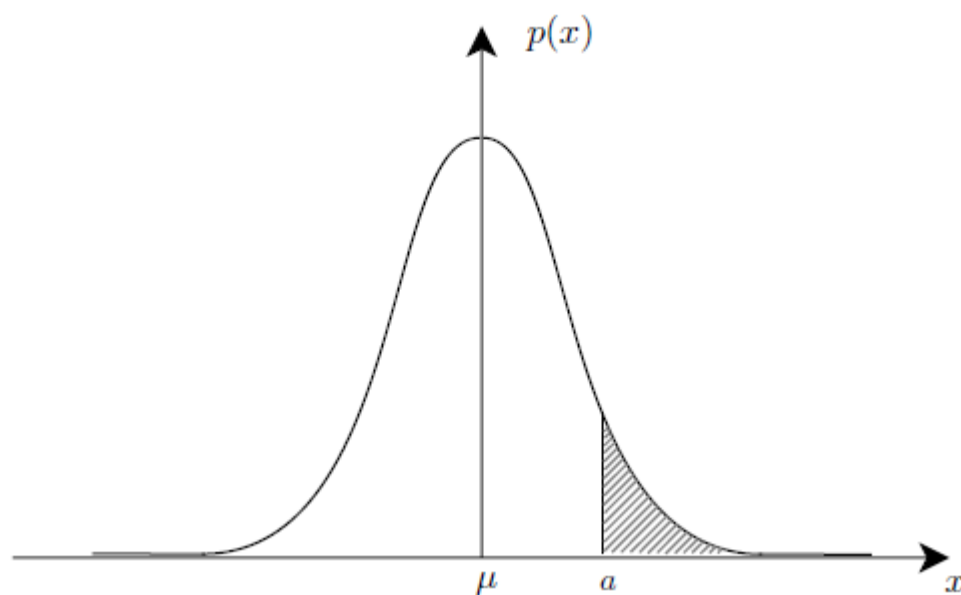
$$P\{x \geq a\} = Q\left(\frac{a-u}{\sigma}\right) \quad (17)$$

donde:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (18)$$



**Figura 33.** Distribución Normal o Gauss.  
Fuente: (SliderShare, 2010)



**Figura 34.** Probabilidad de  $x$  mayor o igual que  $a$ .  
Fuente: (Haro & Olmedo, 2017)

### 3.1.1 Probabilidad de error de símbolo de una modulación M-PAM.

Para una mejor comprensión de la probabilidad de error de las modulaciones estudiadas en este trabajo de investigación en primer lugar se debe realizar la parametrización de una modulación PAM y posteriormente expandirlo a QAM, por esa razón se obtendrá la probabilidad de error de un símbolo de 2-PAM, 4-PAM y se generalizará para M-PAM. La modulación por Amplitud de Pulsos PAM tiene la característica que el desfase y la frecuencia de la señal resultante se mantienen constante, la amplitud es la que varía dependiendo el símbolo a transmitir.

#### 3.1.1.1 Probabilidad de error de símbolo de 2-PAM.

Suponiendo que se transmite dos símbolos que serán representados por  $A$  y  $-A$  tal como se muestra en la Fig. 35, mediante la teoría de probabilidades se puede decir que:

$$P_{es}(\pm A) = \frac{1}{2}P(-A) + \frac{1}{2}P(A) \quad (19)$$

Se observa que para determinar la probabilidad de error de símbolo de ser  $\pm A$  se maneja dos posibilidades, es decir; o puede ser  $A$  o ser  $-A$ , por esa razón se debe considerar la mitad de acertar  $A$  o  $-A$ , la suma de esas probabilidades sería la probabilidad de error del símbolo  $\pm A$ . Reemplazando la ecuación (17) en (19) y sabiendo que tanto la probabilidad de que sea  $A$  o  $-A$  es simétrica o iguales se puede calcular la probabilidad de error de símbolo:

$$P_{es} = \frac{1}{2}Q\left(\frac{0 - (-A)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{0 - (A)}{\sigma}\right) \quad (20)$$

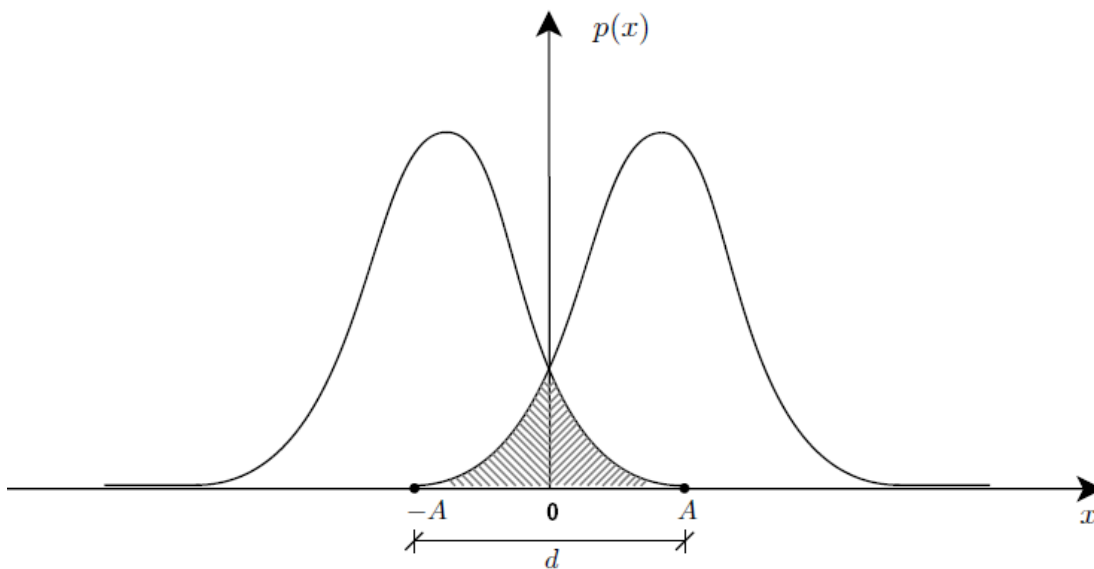


$$P_{es} = \frac{1}{2}Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{A}{\sigma}\right)$$

$$P_{es-2PAM} = Q\left(\frac{A}{\sigma}\right)$$

También se puede representar la probabilidad de error de símbolo mediante:

$$P_{es-2PAM} = Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right) \quad (21)$$



**Figura 35.** Probabilidad de error de 2-PAM

Fuente: (Haro & Olmedo , 2017).

De esto y sabiendo que A es la norma del vector símbolo se puede establecer la energía del símbolo  $E_s$ , y la potencia espectral del ruido representado por  $\sigma^2$  se puede definir como:

$$E_s = A^2 \quad (22)$$

$$\sigma^2 = \frac{N_o}{2} \quad (23)$$

sí reemplazamos la ecuación (22) y (23) en (20) se puede determinar la expresión de la probabilidad de error de símbolo de 2-PAM:

$$P_{es-2PAM} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_o}}\right) \quad (24)$$

### 3.1.1.2 Probabilidad de error de símbolo de 4-PAM.

Análogamente y partiendo con los mismos fundamentos se puede determinar la probabilidad de error de símbolo de 4-PAM tal como se muestra en la Fig. 36.

$$P_{es}(-3A) = Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{2A}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{3A}{\sigma}\right) \quad (25)$$

$$P_{es}(-A) = 2Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{2A}{\sigma}\right) \quad (26)$$

$$P_{es}(+A) = 2Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{2A}{\sigma}\right) \quad (27)$$

$$P_{es}(+3A) = Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{2A}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{3A}{\sigma}\right) \quad (28)$$

Al obtener la media de las probabilidades de cada símbolo se determinará la probabilidad de error de símbolo 4-PAM mediante:

$$P_{es} = 2 \frac{1}{4} \left[ Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) + Q \left( \frac{2A}{\sigma} \right) + Q \left( \frac{3A}{\sigma} \right) \right] + 2 \frac{1}{4} \left[ 2Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) + Q \left( \frac{2A}{\sigma} \right) \right]$$

$$P_{es} = \frac{3}{2} Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) + Q \left( \frac{2A}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} Q \left( \frac{3A}{\sigma} \right) \quad (29)$$

Para facilidad de cálculos y simulaciones se puede establecer que la peor condición es aproximadamente la probabilidad de error de símbolo de 4-PAM mediante:

$$P_{es-4PAM} \approx \frac{3}{2} Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (30)$$

En cuanto a la energía se debe determinar la energía media de cada símbolo teniendo:

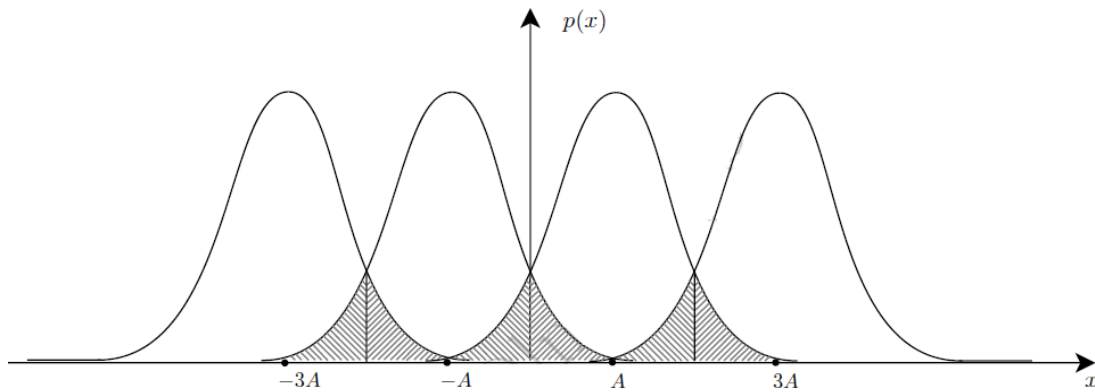
$$\bar{E}_s = \frac{E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} + E_{s4}}{4}$$

$$\bar{E}_s = \frac{9A^2 + A^2 + A^2 + 9A^2}{4} = \frac{20A^2}{4}$$

$$\bar{E}_s = 5A^2 \quad \rightarrow \quad A = \sqrt{\frac{\bar{E}_s}{5}} \quad (31)$$

De la misma manera reemplazando la ecuación (31) y (23) en (30) se tiene la probabilidad de error de símbolo de 4-PAM:

$$P_{es-4PAM} = \frac{3}{2} Q \left( \sqrt{\frac{2\bar{E}_s}{5N_o}} \right) \quad (32)$$



**Figura 36.** Probabilidad de error 4-PAM

Fuente: (Haro & Olmedo , 2017).

### 3.1.1.3 Probabilidad de error de símbolo de M-PAM.

De manera general se puede expresar la probabilidad de error de símbolo M-PAM, consideremos  $M$  símbolos espaciados entre ellos  $2A$ , el número medio de símbolos más cercanos con distancia  $2A$  se puede determinar por:

$$\bar{N} = \frac{2(M-2) + 2}{M}$$

$$\bar{N} = \frac{2(M-1)}{M} \quad (33)$$

De igual forma se puede determinar una expresión para determinar la energía media de la constelación de los símbolos mediante:

$$\bar{E}_s = \frac{2A^2}{M} \sum_{m=1}^{\frac{M}{2}} (2m-1)^2 \quad (34)$$

para la resolución de la sumatoria se puede considerar la propiedad matemática:

$$\sum_{i=1}^n (2i - 1)^2 = \frac{n(4n^2 - 1)}{3} \quad (35)$$

se puede determinar la energía media mediante:

$$\bar{E}_s = \frac{2A^2}{M} \frac{M}{2(3)} \left[ 4 \left( \frac{M}{2} \right)^2 - 1 \right]$$

$$\bar{E}_s = \frac{A^2}{3} (M^2 - 1) \quad \rightarrow \quad A = \sqrt{\frac{3\bar{E}_s}{(M^2 - 1)}} \quad (36)$$

De estas ecuaciones se puede determinar la probabilidad de error de símbolo en una modulación M-PAM mediante:

$$P_{es-MPAM} = \bar{N}Q \left( \sqrt{\frac{3\bar{E}_s}{(M^2 - 1) \sigma^2}} \right) \quad (37)$$

considerando  $\sigma^2 = N_o/2$  y reemplazando la ecuación (33) en (37) se tiene.

$$P_{es-MPAM} = \frac{2(M-1)}{M} Q \left( \sqrt{\frac{6 \frac{\bar{E}_s}{N_o}}{M^2 - 1}} \right) \quad (38)$$

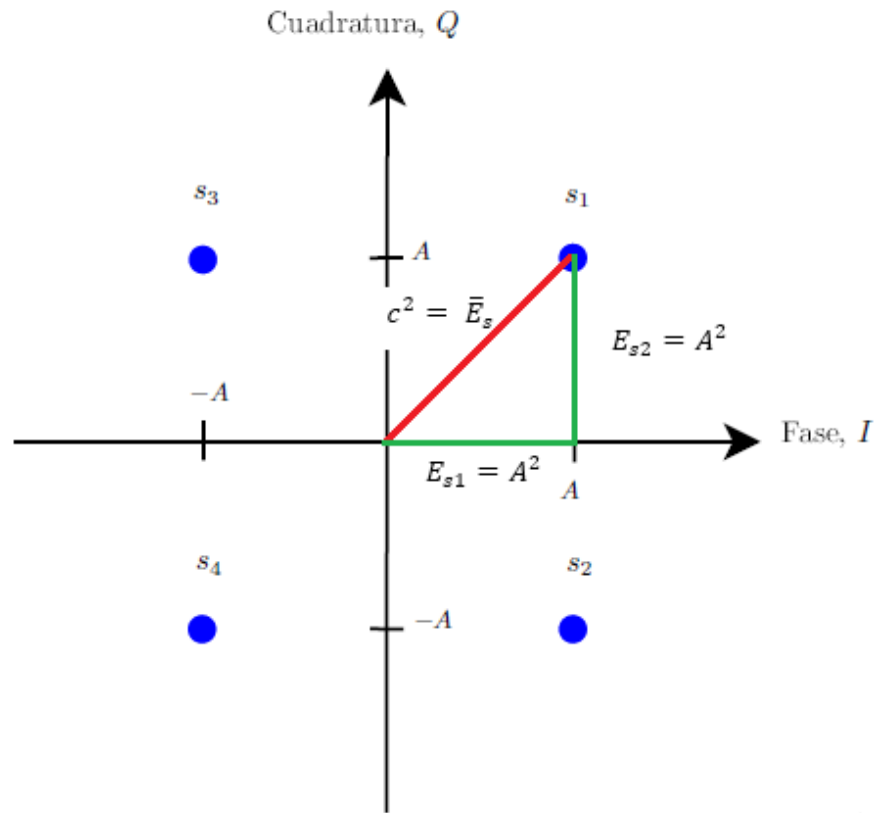
### 3.1.2 Probabilidad de error de símbolo de M-QAM.

A diferencia de la modulación PAM descrita anteriormente en una modulación digital QAM la información hace que se module tanto en amplitud como en fase, aquí se encontrará la expresión de la probabilidad de error de símbolos tanto para 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM y se generalizara para M-QAM.

#### 3.1.2.1 Probabilidad de error de símbolo de 4-QAM.

La modulación digital 4-QAM envía 4 símbolos con una norma  $A$  tal como se muestra en la Fig. 37, se observar y decir que la energía media de símbolo se puede determinar mediante:

$$\begin{aligned} \bar{E}_s &= E_{s1} + E_{s2} \\ E_{s1} &= A^2 \\ E_{s2} &= A^2 \\ c^2 = \bar{E}_s &= A^2 + A^2 \\ \bar{E}_s &= 2A^2 \\ A &= \sqrt{\frac{\bar{E}_s}{2}} \quad (39) \end{aligned}$$



**Figura 37.** Diagrama de constelación de 4-QAM y energía media de símbolo.  
Fuente: (Haro & Olmedo , 2017)

En la Fig. 37 se puede observar que la probabilidad de error de símbolo de  $S_1$  se puede obtener relacionándolo con  $S_3$  y  $S_2$  es decir; la probabilidad de error de  $S_1$  con respecto a  $S_3$  es la misma que si tuvieran un sistema 2-PAM y corresponde a la ecuación (20) pero a su vez también está relacionada con  $S_2$  y también es la misma que tener un sistema 2-PAM entonces la  $P_{es1}$  es  $\frac{1}{4}$  del doble de un sistema 2-PAM y se puede escribir como:

$$P_{es1} = \frac{1}{4} 2Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad (40)$$

$$P_{es2} = \frac{1}{4} 2Q\left(\frac{A}{\sigma}\right)$$

$$P_{es3} = \frac{1}{4} 2Q\left(\frac{A}{\sigma}\right)$$

$$P_{es4} = \frac{1}{4} 2Q\left(\frac{A}{\sigma}\right)$$

Entonces la probabilidad de error de símbolo de un sistema de modulación 4-QAM está dado por:

$$P_{es-4QAM} = 2Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad (41)$$

Se sabe que  $\sigma^2 = \frac{N_o}{2}$  y la ecuación (39) se puede reemplazar en la ecuación (41) y se tiene:

$$P_{es-4QAM} = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{2\sigma^2}}\right)$$

$$P_{es-4QAM} = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_o}}\right) \quad (42)$$

### 3.1.2.2 Probabilidad de error de símbolo de 16-QAM.

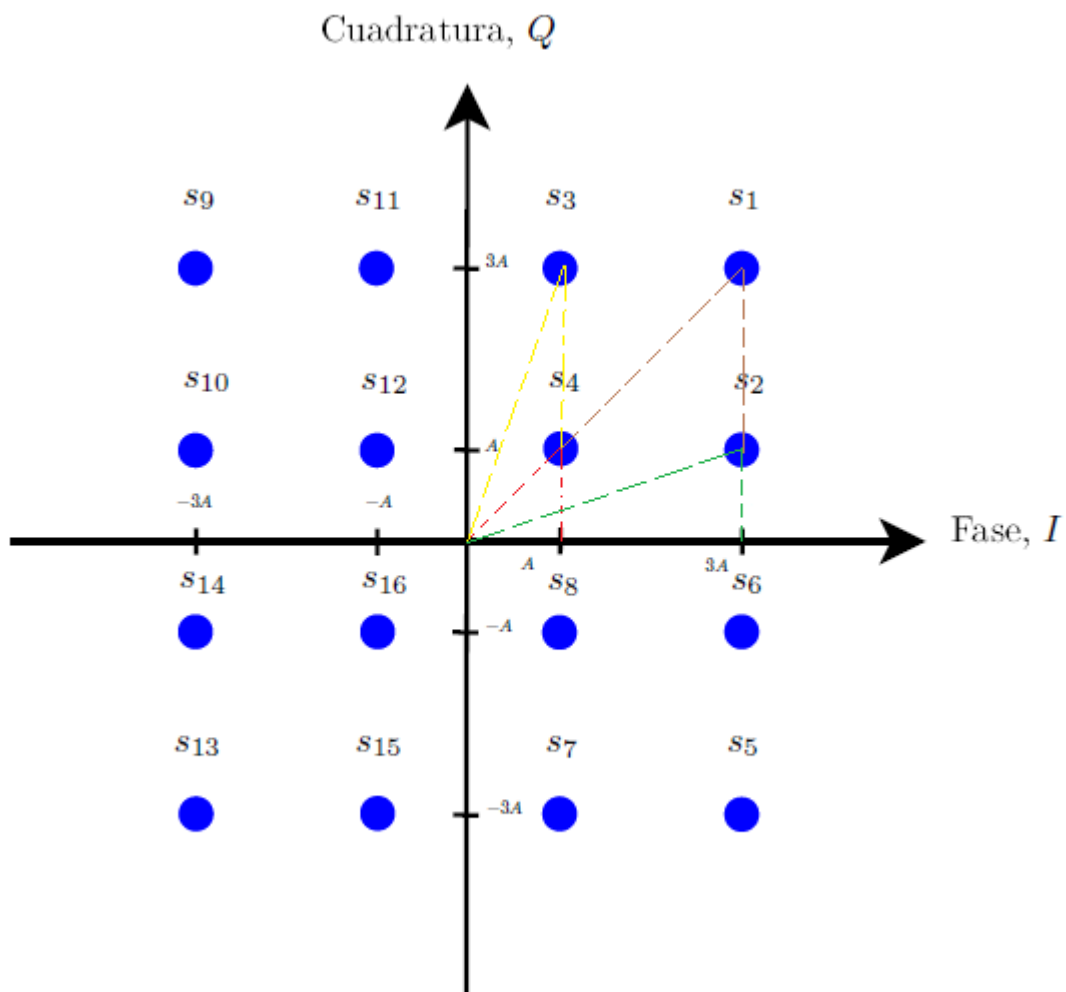
El mismo criterio se puede aplicar para determinar la probabilidad de error de símbolo de un sistema 16-QAM tal como se muestra en la Fig. 38 y se puede establecer la energía media apoyándonos en los triángulos rojo, amarillo, café y verde semejante a lo que se hizo en la constelación de 4-QAM:



$$\bar{E}_s = \frac{E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} + E_{s4}}{4}$$

$$\bar{E}_s = \frac{2A^2 + 10A^2 + 10A^2 + 18A^2}{4} = 10A^2$$

$$A = \sqrt{\frac{\bar{E}_s}{10}} \quad (43)$$



**Figura 38.** Diagrama de constelación de 16-QAM y energía media de símbolo.  
Fuente: (Haro & Olmedo , 2017).

Análogamente se puede determinar la probabilidad de error de símbolo como se lo hizo en 16-QAM hay que relacionar cada símbolo con los vecinos respectivos y sabiendo que cada relación es como si tuviésemos un sistema 2-PAM, por ejemplo, el símbolo  $S_4$  debe relacionarse con  $S_3$ ,  $S_8$ ,  $S_2$  y  $S_{12}$  es decir; la  $P_{es4}$  sería  $\frac{1}{16}$  de 4 veces la probabilidad de error de símbolo de un sistema 2-PAM y así sucesivamente obteniendo:

$$P_{es1} = P_{es5} = P_{es9} = P_{es13} = \frac{1}{16} 2Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad (41)$$

$$P_{es2} = P_{es6} = P_{es10} = P_{es14} = \frac{1}{16} 3Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad (42)$$

$$P_{es3} = P_{es7} = P_{es11} = P_{es15} = \frac{1}{16} 3Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad (43)$$

$$P_{es4} = P_{es8} = P_{es12} = P_{es16} = \frac{1}{16} 4Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad (44)$$

entonces se puede determinar que:

$$P_{es-16QAM} = 3Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) \quad (45)$$

Sabiendo que  $\sigma^2 = \frac{N_o}{2}$  y la ecuación (43) se puede reemplazar en la ecuación (45) se tiene:

$$P_{es-16QAM} = 3Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_o}}\right) \quad (45)$$

### 3.1.2.3 Probabilidad de error de símbolo de 64-QAM.

Con los mismos criterios se puede seguir avanzando en sistemas más complejos y eficiente como es el caso de 64-QAM, este sistema digital es al más usado por su eficiencia, pero presenta menos robustez en comparación a los demás, 64-QAM envía 64 símbolos que se codifican por cada 6 bits,

en la Fig. 39 se presenta el diagrama de constelación y análogamente a 4-QAM y 16-QAM se puede determinar la energía media y estaría representada por:

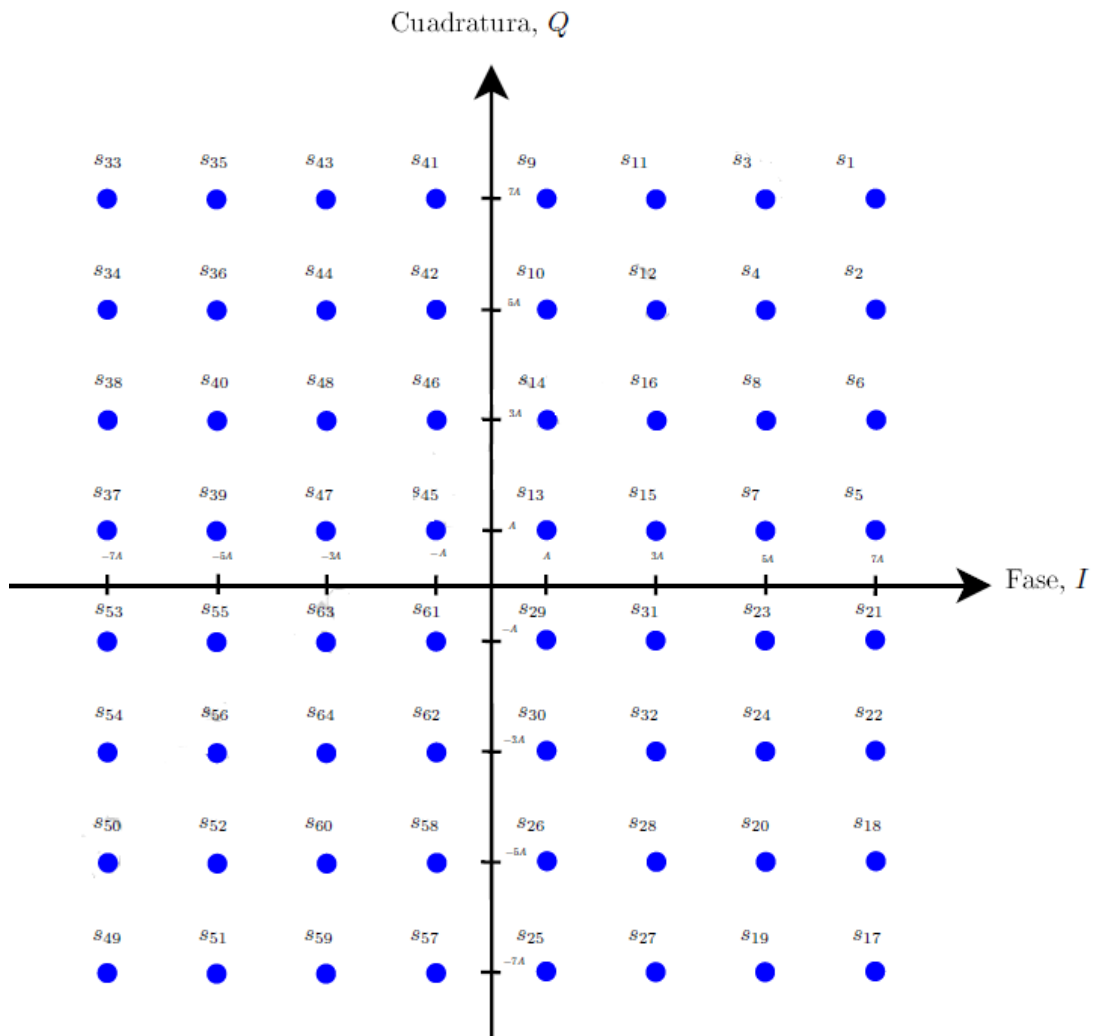
$$\bar{E}_s = \frac{\sum E_s}{16}$$

$$\bar{E}_s = \frac{2A^2 + 20A^2 + 52A^2 + 100A^2 + 18A^2 + 50A^2 + 98A^2 + 68A^2 + 116A^2 + 148A^2}{16}$$

$$\bar{E}_s = \frac{672A^2}{16} = 42A^2$$

$$\bar{E}_s = 42A^2 \quad (46)$$

$$A = \sqrt{\frac{\bar{E}_s}{42}} \quad (47)$$



**Figura 39.** Diagrama de constelación de 64 QAM.

Fuente: (Haro & Olmedo , 2017)

Y la probabilidad de error de cada símbolo se puede determinar mediante:

$$P_{es1} = P_{es17} = P_{es33} = P_{es49} = \frac{1}{64} 2Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (48)$$

$$P_{es2} = P_{es18} = P_{es34} = P_{es50} = \frac{1}{64} 3Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (49)$$

$$P_{es3} = P_{es19} = P_{es35} = P_{es51} = \frac{1}{64} 3Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (50)$$

$$P_{es4} = P_{es20} = P_{es36} = P_{es52} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (51)$$

$$P_{es5} = P_{es21} = P_{es37} = P_{es53} = \frac{1}{64} 3Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (52)$$

$$P_{es6} = P_{es22} = P_{es38} = P_{es54} = \frac{1}{64} 3Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (53)$$

$$P_{es7} = P_{es23} = P_{es39} = P_{es55} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (54)$$

$$P_{es8} = P_{es24} = P_{es40} = P_{es56} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (55)$$

$$P_{es9} = P_{es25} = P_{es41} = P_{es57} = \frac{1}{64} 3Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (56)$$

$$P_{es10} = P_{es26} = P_{es42} = P_{es58} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (57)$$

$$P_{es11} = P_{es27} = P_{es43} = P_{es59} = \frac{1}{64} 3Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (58)$$

$$P_{es12} = P_{es28} = P_{es44} = P_{es60} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (59)$$

$$P_{es13} = P_{es29} = P_{es45} = P_{es61} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (60)$$

$$P_{es14} = P_{es30} = P_{es46} = P_{es62} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (61)$$

$$P_{es15} = P_{es31} = P_{es47} = P_{es63} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (62)$$

$$P_{es16} = P_{es32} = P_{es48} = P_{es64} = \frac{1}{64} 4Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (63)$$

entonces se puede determinar que:

$$P_{es} = \frac{1}{64} 56Q \left( \frac{A}{\sigma} \right)$$

$$P_{es} = \frac{7}{2} Q \left( \frac{A}{\sigma} \right) \quad (64)$$

Se sabe que  $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$  y la ecuación (47) se puede reemplazar en la ecuación (64) se tiene:

$$P_{es} = \frac{7}{2} Q \left( \sqrt{\frac{\bar{E}_s}{21N_o}} \right) \quad (64)$$

### 3.1.2.4 Probabilidad de error de símbolo de M-QAM.

Como se hizo de manera general para una modulación 4-PAM se puede generalizar para una modulación M-QAM que ya se sabe que consta de modulaciones PAM tal como se muestra en la Fig. 40, pensemos que el cuadrado y el círculo son símbolos transmitidos y por teoría de probabilidades se tiene que:

$$P_{acierto \Delta} = P_{acierto \blacksquare} * P_{acierto \circ} \quad (65)$$

$$P_{acierto \blacksquare} = 1 - P_{error \blacksquare} \quad (66)$$

$$P_{acierto \circ} = 1 - P_{error \circ} \quad (67)$$

Al Reemplazar la ecuación (66) y (67) en (65) se tiene:

$$P_{acierto \Delta} = (1 - P_{error \blacksquare})(1 - P_{error \circ}) \quad (68)$$

Se Sabe que  $P_{error \circ} = P_{error \blacksquare}$  :

$$P_{acierto \Delta} = (1 - P_{error \blacksquare})^2 \quad (69)$$

Por probabilidades:

$$P_{error \Delta} = 1 - P_{acierto \Delta} \quad (70)$$

Reemplazamos ecuación (69) en (70):

$$P_{error \Delta} = 1 - (1 - P_{error \blacksquare})^2 \quad (71)$$

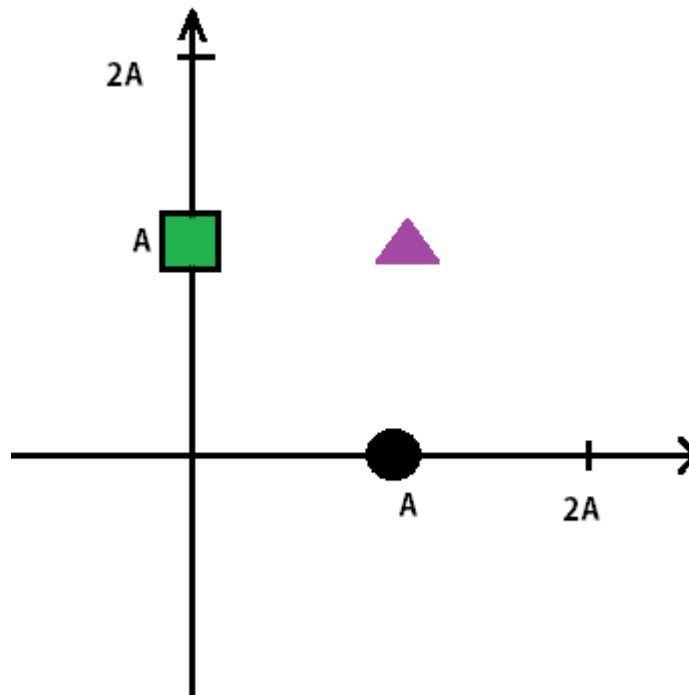
$$P_{error \Delta} = 1 - (1 - 2P_{error \blacksquare} + P_{error \blacksquare}^2) \quad (72)$$

Por la razón que la probabilidad está en el rango de 0 a 1 el término  $P_{error \blacksquare}^2$  tiende a 0 entonces:

$$P_{error \Delta} = 1 - (1 - 2P_{error \blacksquare}) \quad (73)$$

$$P_{error \Delta} = 1 - 1 + 2P_{error \blacksquare} \quad (74)$$

$$P_{error \Delta} = 2P_{error \blacksquare} \quad (75)$$



*Figura 40.* Probabilidad M-QAM.

Si ya se determinó anteriormente la probabilidad de error de símbolo PAM y en la Fig. 40 el cuadrado o el círculo es la probabilidad de error de símbolo PAM y la ecuación (75) se puede traducir en:

$$P_{es-MQAM} = 2P_{es-PAM, \sqrt{M}} \quad (75)$$

Se sabe que M-QAM trasmite  $M$  símbolos y se puede determinar el número medio de símbolos más cercanos con una distancia  $2A$  para cualquier constelación mediante:

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \frac{2(\sqrt{M} - 2) + 2}{\sqrt{M}} \\ \bar{N} &= \frac{2\sqrt{M} - 4 + 2}{\sqrt{M}} \\ \bar{N} &= \frac{2\sqrt{M} - 2}{\sqrt{M}} \\ \bar{N} &= \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} \quad (76)\end{aligned}$$

De igual forma la energía media de símbolo se puede desarrollar con los mismos criterios aplicando la ecuación (34) y apoyándonos en ecuación (35) se puede escribir:

$$\bar{E}_s = \frac{A^2}{3} (M - 1) \quad (77)$$

$$A = \sqrt{\frac{3\bar{E}_s}{M - 1}} \quad (78)$$

Finalmente se concluye que la probabilidad de error de símbolo M-QAM sabiendo que  $\sigma^2 = N_o$  se tiene:

$$\begin{aligned}P_{es-MQAM} &= \bar{N} Q \left( \sqrt{\frac{3\bar{E}_s}{(M - 1)\sigma^2}} \right) \\ P_{es-MQAM} &= \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} Q \left( \sqrt{\frac{3\bar{E}_s/N_o}{(M - 1)}} \right) \quad (79)\end{aligned}$$



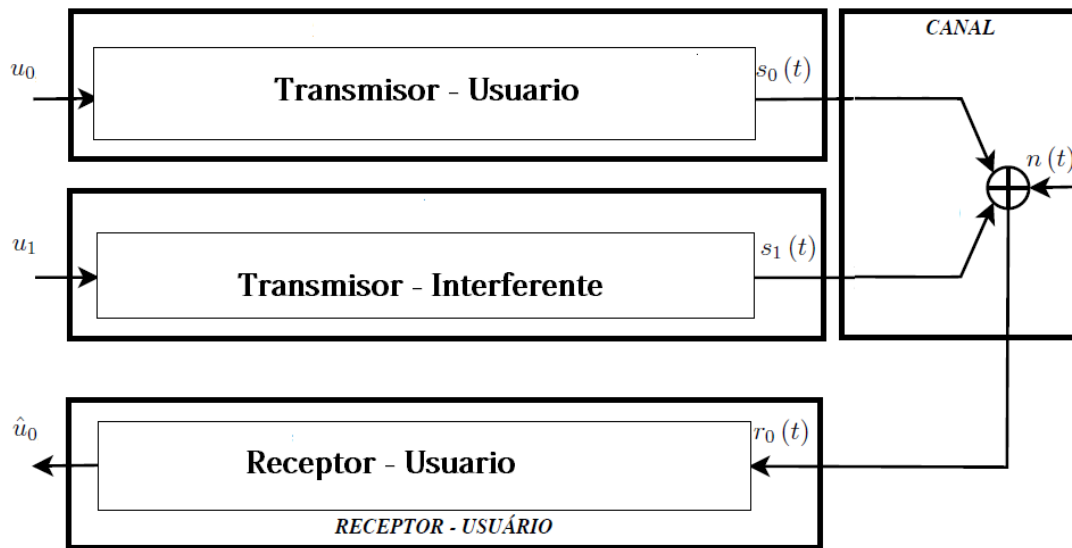
Se tiene que tener en cuenta que si se desea obtener la probabilidad de error de símbolo en bits se debe considerar:

$$\frac{E_s}{N_o} [\text{dB}] = 10 \log(\log_2(M)) + \frac{E_b}{N_o} [\text{dB}] \quad (80)$$

$$P_b = \frac{P_s}{\log_2 M} \quad (81)$$

### **3.2 Probabilidad de error de símbolo en Modulaciones Digitales con Ruido AWGN en presencia de la interferencia Co-canal.**

En el capítulo II se definió a la interferencia co-canal de una forma teórica, se definió conceptualmente y se trató los efectos que tiene sobre un sistema inalámbrico, en esta sección vamos hacer la representación matemática y determinar la ecuaciones que responden al comportamiento de este fenómeno que afectan el desempeño de la transmisión, de la misma manera como se definió mediante la Fig. 32 la inserción del ruido gaussiano el esquema será similar con la diferencia que ahora existe la presencia de un agente interferente tal como se muestra en la Fig. 41.



**Figura 41.** Modelo de un sistema de transmisión digital con ruido AWGN e interferencia co-canal.

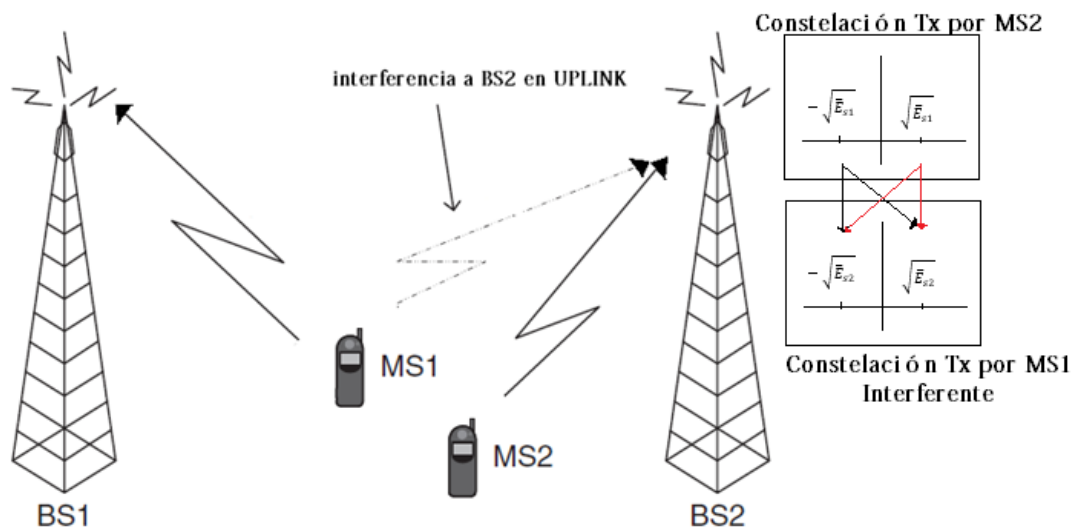
Los datos  $u_0$  después de pasar por varios bloques de procesamiento digital como codificadores, mapeadores, entrelazadores, etc., se obtiene una señal  $s_0(t)$  y una idéntica señal  $s_1(t)$  resultante de un transmisor interferente las dos señales son sumadas al ruido  $n(t)$  y enviados por el canal inalámbrico teniendo la resultante:

$$r_0(t) = s_0(t) + s_1(t) + n(t) \quad (82)$$

### 3.2.1 Probabilidad de error de símbolo de una modulación M-PAM en presencia de interferencia co-canal.

#### 3.2.1.1 Probabilidad de error de símbolo de una modulación 2-PAM en presencia de interferencia co-canal.

Cuando la presencia de la interferencia co-canal afecta al sistema y se puede apreciar el efecto observando tal como se muestra en la Fig. 42, a la radio base llegan la combinación de las constelaciones transmitidas tanto por el equipo portátil uno y dos, por la razón que los sistemas están trabajando a la misma frecuencia por el reusó de frecuencias igual a 1 como ya se explicó en la sección II.



**Figura 42.** Interferencia co-canal.

Al experimentar el fenómeno de la interferencia la constelación sufre alteraciones, en primer lugar, vamos desde una transmisión muy básica como la 2-PAM que sería una modulación BPSK y después se establecerá una ecuación general para M-PAM con  $K$  interferentes.

En la Fig. 43 se sabe que para la probabilidad de error de símbolo  $A$  o  $-A$  es la misma, es decir; la probabilidad de error  $A$  sería la mitad de la probabilidad de ser el círculo negro más la mitad de la probabilidad de ser el círculo gris y con la ayuda de la ecuación (17) se puede decir que:

$$P_{es-2PAM,1 int} = \frac{1}{2} Q \left( \frac{0 - (-\sqrt{E_{s1}} + \sqrt{E_{s2}})}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} Q \left( \frac{0 - (-\sqrt{E_{s1}} - \sqrt{E_{s2}})}{\sigma} \right) \quad (83)$$

$$P_{es-2PAM,1 int} = \frac{1}{2} Q \left( \frac{(\sqrt{E_{s1}} - \sqrt{E_{s2}})}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} Q \left( \frac{(\sqrt{E_{s1}} + \sqrt{E_{s2}})}{\sigma} \right) \quad (84)$$

Se sabe que la *RSI* es una relación de potencias de la señal deseada con las señales interferentes teniendo:

$$RSI = \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sqrt{E_{s2}}} \quad (85)$$

Se puede definir el factor de amplitud de interferencia  $\alpha$  mediante:

$$\alpha = \frac{1}{RSI} \quad (86)$$

Realizando operaciones matemáticas en la ecuación (84) se puede decir:

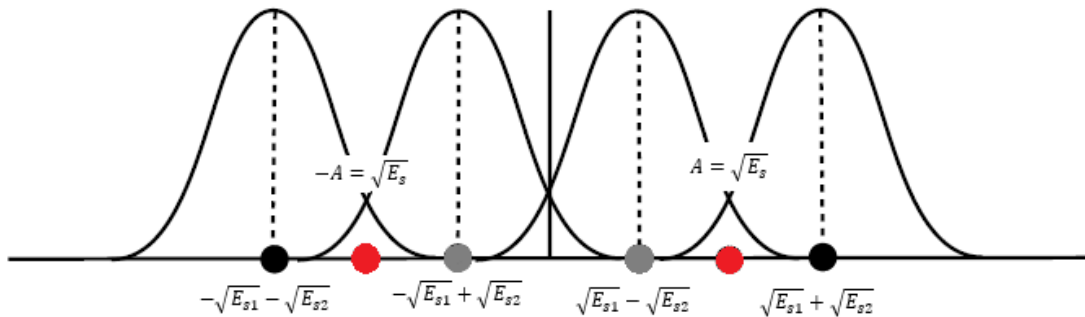
$$P_{es-2PAM,1 int} = \frac{1}{2} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} \left( 1 - \frac{\sqrt{E_{s2}}}{\sqrt{E_{s1}}} \right) \right] + \frac{1}{2} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} \left( 1 + \frac{\sqrt{E_{s2}}}{\sqrt{E_{s1}}} \right) \right] \quad (87)$$

El termino subrayado corresponde a  $\alpha$  y se tendría:

$$P_{es-2PAM,1 int} = \frac{1}{2} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} (1 - \alpha) \right] + \frac{1}{2} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} (1 + \alpha) \right] \quad (88)$$

Reemplazamos  $\sigma = \sqrt{\frac{N_0}{2}}$  obtendremos la probabilidad de error de símbolo de una modulación 2-PAM con 1 interferente.:

$$P_{es-2PAM,1 int} = \frac{1}{2} Q \left[ \sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} (1 - \alpha) \right] + \frac{1}{2} Q \left[ \sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} (1 + \alpha) \right] \quad (89)$$



**Figura 43.** Modulación 2-PAM con 1 interferente co-canal.

Al experimentar 2 interferentes en un sistema 2-PAM se puede observar tal como se muestra en la Fig. 44, y decir que la probabilidad de error de símbolo es un cuarto de la probabilidad de ser el círculo negro, gris, amarillo y verde, apoyándonos en la ecuación (17) e puede decir que:

$$P_{es-2PAM,2 int} = \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - (-\sqrt{E_{s1}} + \sqrt{E_{s3}})}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - (-\sqrt{E_{s1}} + \sqrt{E_{s2}})}{\sigma} \right) \\ + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - (-\sqrt{E_{s1}} - \sqrt{E_{s3}})}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - (-\sqrt{E_{s1}} - \sqrt{E_{s2}})}{\sigma} \right) \quad (90)$$

$$P_{es-2PAM,2 int} = \frac{1}{4} Q \left( \frac{(\sqrt{E_{s1}} - \sqrt{E_{s3}})}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{(\sqrt{E_{s1}} - \sqrt{E_{s2}})}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{(\sqrt{E_{s1}} + \sqrt{E_{s3}})}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{(\sqrt{E_{s1}} + \sqrt{E_{s2}})}{\sigma} \right) \quad (91)$$

Se puede definir el factor de amplitud de interferencia “ $\alpha$ ” para el interferente 1 y 2 mediante:

$$RSI_1 = \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sqrt{E_{s2}}} \quad (92)$$

$$RSI_2 = \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sqrt{E_{s3}}} \quad (93)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{RSI_1} \quad (94)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{RSI_2} \quad (95)$$

Aplicando el mismo criterio matemático en la ecuación (91) se tiene:

$$P_{es-2PAM,2 int} = \frac{1}{4} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} \left( 1 - \frac{\sqrt{E_{s3}}}{\sqrt{E_{s1}}} \right) \right] + \frac{1}{4} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} \left( 1 - \frac{\sqrt{E_{s2}}}{\sqrt{E_{s1}}} \right) \right] + \frac{1}{4} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} \left( 1 + \frac{\sqrt{E_{s3}}}{\sqrt{E_{s1}}} \right) \right] \\ + \frac{1}{4} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} \left( 1 + \frac{\sqrt{E_{s2}}}{\sqrt{E_{s1}}} \right) \right] \quad (96)$$

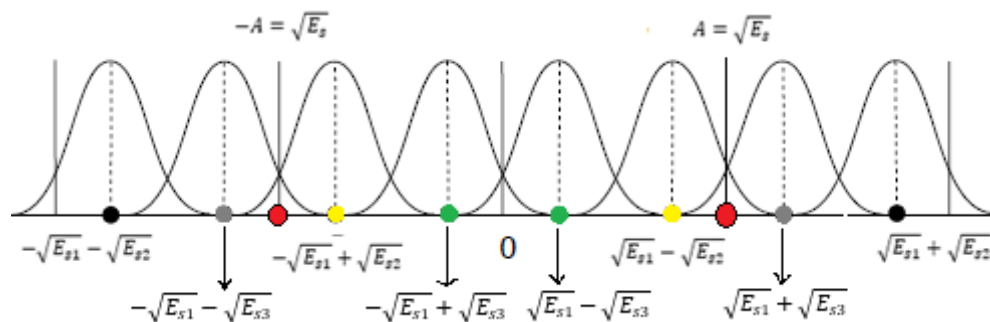
Los términos subrayados corresponden a  $\alpha_1, \alpha_2$  y se obtiene:

$$P_{es-2PAM,2 int} = \frac{1}{4} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} (1 - \alpha_2) \right] + \frac{1}{4} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} (1 - \alpha_1) \right] + \frac{1}{4} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} (1 + \alpha_2) \right] \\ + \frac{1}{4} Q \left[ \frac{\sqrt{E_{s1}}}{\sigma} (1 + \alpha_1) \right] \quad (97)$$

Reemplazamos  $\sigma = \sqrt{\frac{N_0}{2}}$  obtendremos la probabilidad de error de símbolo de una modulación

2-PAM con 2 interferentes:

$$P_{es-2PAM,2\ int} = \frac{1}{4} Q \left[ \sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} (1 - \alpha_2) \right] + \frac{1}{4} Q \left[ \sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} (1 - \alpha_1) \right] + \frac{1}{4} Q \left[ \sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} (1 + \alpha_2) \right] \\ + \frac{1}{4} Q \left[ \sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} (1 + \alpha_1) \right] \quad (98)$$



**Figura 44.** Modulación 2-PAM con 2 interferente co-canal.

Aplicando los mismos criterios que se usaron para establecer la probabilidad de error de símbolo para 2-PAM con uno y dos interferentes, y apoyándonos en argumentos matemáticos se puede establecer la ecuación para la probabilidad de error para  $k$  interferentes:

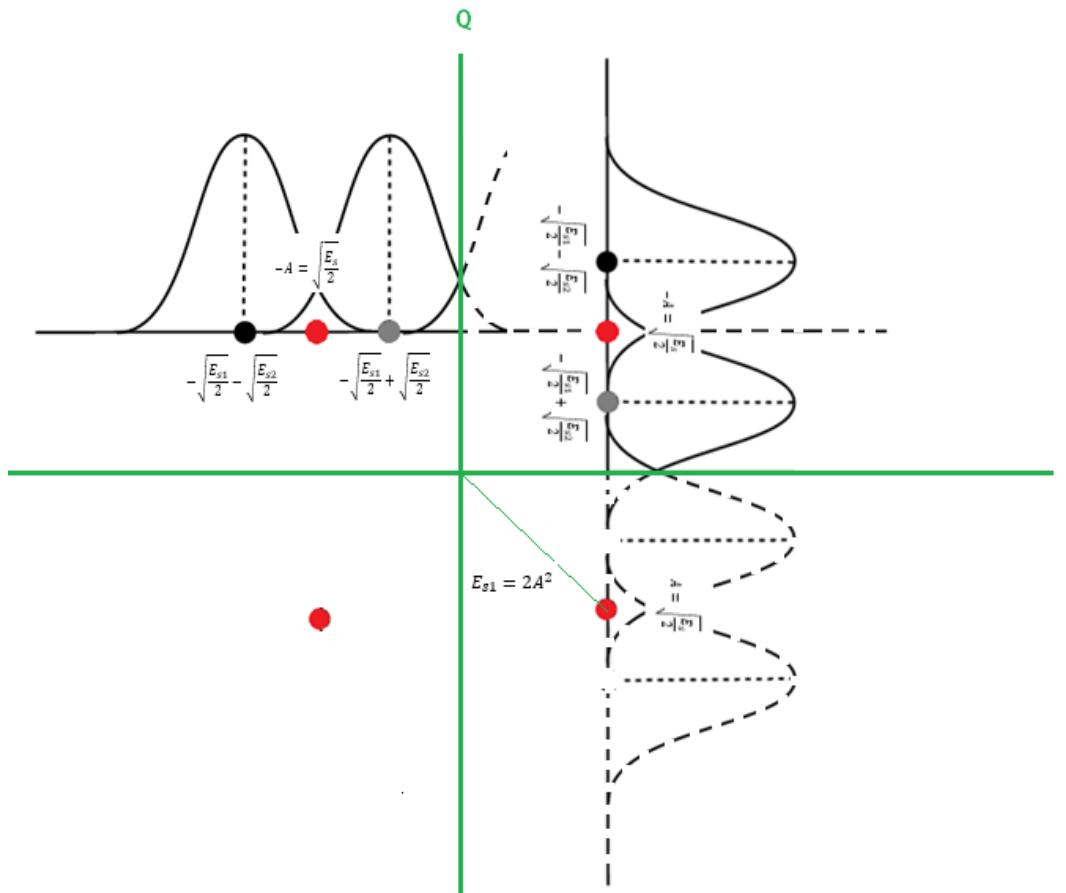
$$P_{es-2PAM,k\ int} = \frac{1}{2k} \sum_{i=1}^k Q \left( \left[ \sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} (1 + \alpha_i) \right] \right) + Q \left( \left[ \sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} (1 - \alpha_i) \right] \right) \quad (99)$$

### **3.2.2 Probabilidad de error de símbolo de una modulación QAM en presencia de interferencia co-canal.**

#### **3.2.2.1 Probabilidad de error de símbolo de una modulación 4-QAM en presencia de interferencia co-canal.**

Como ya se ha dicho la modulación 4-QAM envía cuatro símbolos que contiene una codificación de 2 bits, para determinar la probabilidad de error de símbolo del sistema tal como se muestra en la Fig. 45, se observa que una modulación 4-QAM puede ser vista como dos modulaciones 2-PAM desplazadas en los ejes de las  $X$ , en primer lugar el sistema experimentara el fenómeno de un interferente para eso se lo verá como un sistema 2-PAM en el eje  $X$  y un sistema 2-PAM en el eje  $Y$ , y se lo tratara como si cada uno experimentara un interferente respectivamente, es decir; la suma del resultado de los dos sistemas seria la probabilidad de error de símbolo del sistema tal como se muestra en la Fig. 45.





**Figura 45.** Probabilidad de error de símbolo 4-QAM con 1 interferente.

Apoyándose en el análisis que se determinó la probabilidad de error de 2-PAM y en la ecuación (17) se puede decir:

$$P_{es-4QAM-1\ int.} = P_{es-2PAM-eje\ x} + P_{es-2PAM-eje\ y} \quad (100)$$

$$P_{es-4QAM-1\ int.} = \left[ \frac{1}{2} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \\ + \left[ \frac{1}{2} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \quad (101)$$

$$P_{es-4QAM-1 int.} = \left[ \frac{1}{2} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \\ + \left[ \frac{1}{2} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \quad (102)$$

Reduciendo términos semejantes se tiene:

$$P_{es-4QAM-1 int.} = \left[ Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \quad (103)$$

$$P_{es-4QAM-1 int.} = Q \left( \frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} \left( 1 - \frac{\sqrt{\frac{E_{s2}}{2}}}{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}} \right)}{\sigma} \right) + Q \left( \frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} \left( 1 + \frac{\sqrt{\frac{E_{s2}}{2}}}{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}} \right)}{\sigma} \right) \quad (104)$$

$$P_{es-4QAM-1 int.} = Q \left( \frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} \left( 1 - \frac{\sqrt{\frac{E_{s2}}{2}}}{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}} \right)}{\sigma} \right) + Q \left( \frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} \left( 1 + \frac{\sqrt{\frac{E_{s2}}{2}}}{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}} \right)}{\sigma} \right) \quad (105)$$

Reemplazamos  $\sigma = \sqrt{\frac{N_0}{2}}$  y apoyándonos en las ecuaciones (84) y (85) se tiene la ecuación de probabilidad de error de símbolo de un sistema 4-QAM con 1 interferente:

$$P_{es-4QAM-1 int.} = Q \left[ \sqrt{\frac{E_{s1}}{N_o}} (1 - \alpha) \right] + Q \left[ \sqrt{\frac{E_{s1}}{N_o}} (1 + \alpha) \right] \quad (106)$$

Análogamente como se hizo en 2-PAM para 2 interferentes y con el mismo criterio que se usó para determinar la ecuación (106) se puede determinar para un sistema 4-QAM con 2 interferentes y se puede escribir:

$$P_{es-4QAM-2 int.} = P_{es-2PAM-eje x} + P_{es-2PAM-eje y} \quad (107)$$

$$\begin{aligned} P_{es-4QAM,2 int} = & \left[ \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right. \\ & \left. + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \\ & + \left[ \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right. \\ & \left. + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{0 - \left( -\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \quad (108) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{es-4QAM,2 int} = & \left[ \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right. \\
& \left. + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \\
& + \left[ \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( 0 - \left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right) \right)}{\sigma} \right) \right. \\
& \left. + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \quad (109)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{es-4QAM,2 int} = & \left[ \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right. \\
& \left. + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \\
& + \left[ \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( 0 - \left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}} \right) \right)}{\sigma} \right) \right. \\
& \left. + \frac{1}{4} Q \left( \frac{\left( \sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}} \right)}{\sigma} \right) \right] \quad (110)
\end{aligned}$$

Reduciendo términos semejantes se tiene:

$$P_{es-4QAM,2\ int} = \frac{1}{2}Q\left(\frac{\left(\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\left(\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\left(\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\left(\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}} + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}}\right)}{\sigma}\right) \quad (111)$$

$$P_{es-4QAM-2\ int} = \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}\left(1 - \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}\left(1 - \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}\left(1 + \sqrt{\frac{E_{s3}}{2}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}\left(1 + \sqrt{\frac{E_{s2}}{2}}\right)}{\sigma}\right) \quad (112)$$

$$P_{es-4QAM-2\ int} = \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}\left(1 - \frac{\sqrt{E_{s3}}}{\sqrt{E_{s1}}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}\left(1 - \frac{\sqrt{E_{s2}}}{\sqrt{E_{s1}}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}\left(1 + \frac{\sqrt{E_{s3}}}{\sqrt{E_{s1}}}\right)}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{\frac{E_{s1}}{2}}\left(1 + \frac{\sqrt{E_{s2}}}{\sqrt{E_{s1}}}\right)}{\sigma}\right) \quad (113)$$

Reemplazando  $\sigma = \sqrt{\frac{N_0}{2}}$  y apoyándose en las ecuaciones (92), (93), (94) y (95) se tiene la ecuación de probabilidad de error de símbolo de un sistema 4-QAM con 2 interferentes:

$$\begin{aligned}
P_{es-4QAM-2\ int.} = & \frac{1}{2}Q \left[ \sqrt{\frac{E_{s1}}{N_o}} (1 - \alpha_2) \right] + \frac{1}{2}Q \left[ \sqrt{\frac{E_{s1}}{N_o}} (1 - \alpha_1) \right] + \frac{1}{2}Q \left[ \sqrt{\frac{E_{s1}}{N_o}} (1 + \alpha_2) \right] \\
& + \frac{1}{2}Q \left[ \sqrt{\frac{E_{s1}}{N_o}} (1 + \alpha_1) \right] \quad (114)
\end{aligned}$$

Aplicando los mismos criterios que se usaron para establecer la probabilidad de error de símbolo para 4-QAM con uno y dos interferentes, y apoyándose en argumentos matemáticos se puede establecer la ecuación para la probabilidad de error para  $k$  interferentes:

$$P_{es-4QAM-k\ int.} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Q \left[ \sqrt{\frac{E_{s1}}{N_o}} (1 + \alpha_i) \right] + Q \left[ \sqrt{\frac{E_{s1}}{N_o}} (1 - \alpha_i) \right] \quad (115)$$

### 3.2.2.2 Probabilidad de error de símbolo de una modulación M-QAM en presencia de interferencia co-canal.

Para establecer la probabilidad de error de símbolo de un sistema M-QAM la complejidad aumenta y análisis debe ser enfocado de otra manera, pero se mantiene el mismo criterio, se sabe que dicha modulación se compone de valores del conjunto:

$$C = \{2m - 1 - \sqrt{M} / m \in \mathbb{Z}; 1 \leq m \leq \sqrt{M}\}$$

Además, la ecuación que relaciona la energía media de una constelación de modulación M-QAM está dada por:

$$A_k = \sqrt{\frac{3E_{sk}}{2(M-1)}} \quad (116)$$

Como ya se analizó anteriormente en 3.1.2.4 una modulación M-QAM es la combinación de dos  $\sqrt{M}$  - PAM en cada eje sin considerar la interferencia y está definida por:

$$P_s = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q\left(\frac{A_0}{\sigma}\right) \quad (117)$$

Pensemos en que existe una interferente y como vimos en 4-QAM en cada eje existe  $\sqrt{M}$  tal como se muestra en la Fig. 45, los niveles de interferencia que deben ser relacionados con los valores que comprende el conjunto definido en  $C$  y la energía media de la constelación  $A_1$ , así se puede definir la expresión de la probabilidad de error de símbolo M-QAM con un interferente:

$$P_{es-MQAM-1\ int} = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^{\sqrt{M}} \frac{1}{\sqrt{M}} Q\left(\frac{A_0 + (2m-1-\sqrt{M})A_1}{\sigma}\right) \quad (118)$$

De la ecuación (85) y (86) también se puede definir como:

$$RSI = \frac{E_{s1}}{E_{sk}} = \frac{1}{\alpha_k^2} \quad (119)$$

$$E_{sk} = \alpha_k^2 E_{s1} \quad (120)$$

Sustituyendo en la ecuación (118) con (116) y (120), considerando  $\sigma = N_o/2$  se puede definir la ecuación (122) (Olmedo & Paredes, 2017):

$$P_{es-MQAM-1 int} = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{M} \sum_{m=1}^{\sqrt{M}} Q \left( \sqrt{\frac{3 E_{s1}/N_0}{M-1}} + (2m - 1 - \sqrt{M}) \sqrt{\frac{3 \alpha_1^2 E_{s1}/N_0}{M-1}} \right) \quad (121)$$

$$P_{es-MQAM-1 int} = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{M} \sum_{m=1}^{\sqrt{M}} Q \left( [1 + (2m - 1 - \sqrt{M})\alpha_1] \sqrt{\frac{3 E_{s1}/N_0}{M-1}} \right) \quad (122)$$

Ahora bien, si se piensa en  $k$  interferentes es obvio pensar que el conjunto muestral  $\mathbf{C}$  deber ser expandido, pero en función de  $k$  interferentes y sería representado como  $\mathbf{C}^K$  que tiene por orden  $Kx\sqrt{M}^K$  en cada fila se representa las combinaciones del espacio expandido.

De la misma manera para  $k$  interferentes existe varios  $\alpha_k$  que son los diferentes valores de la RSI de la señal de interés con la señal interferente formando un vector:

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k] \quad (123)$$

y debe ser relacionado con la matriz de expansión del espacio muestral teniendo la matriz:

$$\mathbf{f} = \mathbf{C}^k \boldsymbol{\alpha}^T \quad (124)$$

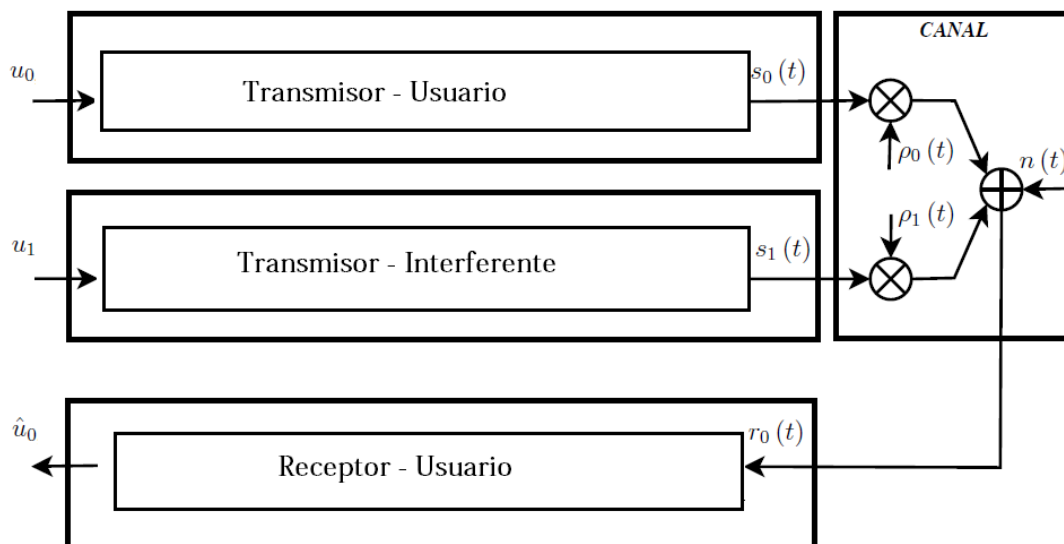
Si consideramos la ecuación (122) como base y la definición de la ecuación (124) se puede obtener la probabilidad de error de símbolo para un espacio M-QAM con  $k$  interferentes en una canal AWGN (Olmedo & Paredes, 2017):



$$P_{es-MQAM-k\ int} = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M^{k+1}}} \sum_{m=1}^{\sqrt{M^k}} Q\left([1+f_m] \sqrt{\frac{3 E_{s1}/N_0}{M-1}}\right) \quad (125)$$

### 3.3 Probabilidad de error de símbolo en Modulaciones Digitales con Ruido AWGN en presencia de la interferencia Co-canal sobre un canal Rayleigh.

El desvanecimiento plano y lento denominado Rayleigh como se habló en el capítulo II debe ser considerado en un canal inalámbrico por que se acerca mucho a la realidad de un enlace de radio, es por esa razón que en este capítulo es considerado y parametrizado para entender de la mejor manera el comportamiento y el efecto que causa en el rendimiento del sistema de transmisión tal como se muestra en la Fig. 46.



**Figura 46.** Modelo de un sistema de transmisión digital con ruido AWGN e interferencia co-canal con desvanecimiento Rayleigh.

El concepto se mantiene igual de cuando se modelo el canal inalámbrico con ruido AWGN e interferencia, pero si notamos en la Fig. 46 se puede observar que se multiplica al sistema el factor  $\rho$  que es el desvanecimiento *Rayleigh*, de esta manera la señal recibida sería  $r_o(t)$  y también estaría presente el ruido representado por  $n(t)$  entonces se tendría:

$$r_o(t) = \rho_o(t)s_o(t) + \rho_1(t)s_1(t) + n(t) \quad (126)$$

### 3.3.1 Probabilidad de error de símbolo de una modulación M-QAM en presencia de la interferencia co-canal y el desvanecimiento Rayleigh.

Todos los usuarios cuando transmiten la información deben pasar por el canal inalámbrico con la presencia del efecto del desvanecimiento Rayleigh con respuesta al impulso representado por:

$$h_k(t) = \rho_k e^{j\varphi_k} \delta(t) \quad (127)$$

donde  $\rho_k$  es la ganancia del canal, que se define como una variable aleatoria con distribución del tipo Rayleigh,  $\varphi_k$  es la fase que se introduce en la señal representada por la variable aleatoria de distribución uniforme en el intervalo  $[0, 2)$  y  $\delta(t)$  es la función impulso.

Se sabe por la ecuación (124) representa los niveles de interferencia por  $k$  interferentes, a esto se debe incluir la ganancia del canal  $\rho_k$  que produce el desvanecimiento *Rayleigh* y se define por el vector:

$$\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k] \quad (128)$$

Incluyendo la ecuación (128) a (124) se tiene la matriz  $z$  que contiene la interferencia y el desvanecimiento:

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}^k \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\rho}^T \quad (129)$$

Reemplazando la ecuación (129) en (125) se puede establecer la ecuación que obedece a una modulación M-QAM con  $k$  interferencias en un canal con desvanecimiento *Rayleigh* y está dada por:

$$P_{es-MQAM-k\ int-R} = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M^{k+1}}} \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \int_0^\infty \sum_{m=1}^{\sqrt{M}^k} Q\left([\alpha_0 + z_m] \sqrt{\frac{3 E_{s1}/N_0}{M-1}}\right) p(\rho_0) d_{\rho_0} p(\rho_1) d_{\rho_1} \dots p(\rho_k) d_{\rho_k} \quad (130)$$

donde:

$$p(\rho_k) = \frac{\rho_k}{\sigma_a^2} e^{-\frac{\rho_k^2}{2\sigma_r^2}} \quad (131)$$

donde:

$$\sigma_r^2 = \frac{E[\rho_k^2]}{2} \quad (132)$$

Por la experimentación de la simulación se puede decir que el nivel de desvanecimiento que más influye en el sistema de transmisión es solamente dos, el del usuario de interés y el usuario más dominante, para la solución se va mantener una única variable aleatoria  $\rho$  sobre los  $k$  interferentes, reduciendo únicamente a una integración doble teniendo una ecuación (130) cerrada, resolviendo se puede decir que la probabilidad de error de símbolo en este entorno es la ecuación (133) (Olmedo & Paredes, 2017):

$$P_{es-MQAM-k\ int-R} = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M^{k+1}}} \sum_{m=1}^{\sqrt{M}^k} \left(1 - \frac{f_m \sqrt{f_m^2 + \gamma} + \sqrt{1 + \gamma}}{1 + f_m^2 + \gamma}\right) \quad (133)$$

donde  $f_m$  responde a la ecuación (124) y  $\gamma$  está dado por:

$$\gamma = \frac{2(M-1)}{3E[\alpha^2]E_{s0}/N_o} \quad (134)$$

### 3.4 Modelamiento matemático del protocolo TCP para canales inalámbricos.

En el capítulo II ya se habló del protocolo TCP sus características, estructuras y versiones, en esta sección vamos a realizar la representación matemática del protocolo para poder simularlo junto con las expresiones obtenidas en las secciones anteriores y saber la eficiencia del protocolo TCP en entornos inalámbricos.

Para modelar al protocolo TCP es necesario establecer ideas iniciales para determinar las variables del sistema, se supone que TCP envía segmentos con una cantidad de bits fija, además el sistema tiene una tasa de transmisión TCP constante y se define como:

$$R_p = \frac{R_b}{N_{TCP}} \text{ segm./seg} \quad (135)$$

donde  $N_{TCP}$  es el número de segmentos TCP y  $R_b$  es la tasa de transmisión de bits, también el canal de transmisión tiene un sistema que el primer segmento en entrar es el primero en salir (FIFO, por sus siglas en inglés *first input-first output*) el buffer tiene un tamaño o memoria de capacidad  $B$  de segmentos TCP.

Se debe considerar el retardo que se provoca por la propagación de ida y vuelta del segmento TCP en el medio inalámbrico y se lo puede denominar  $\tau_p$  medido en segundos. De la misma manera

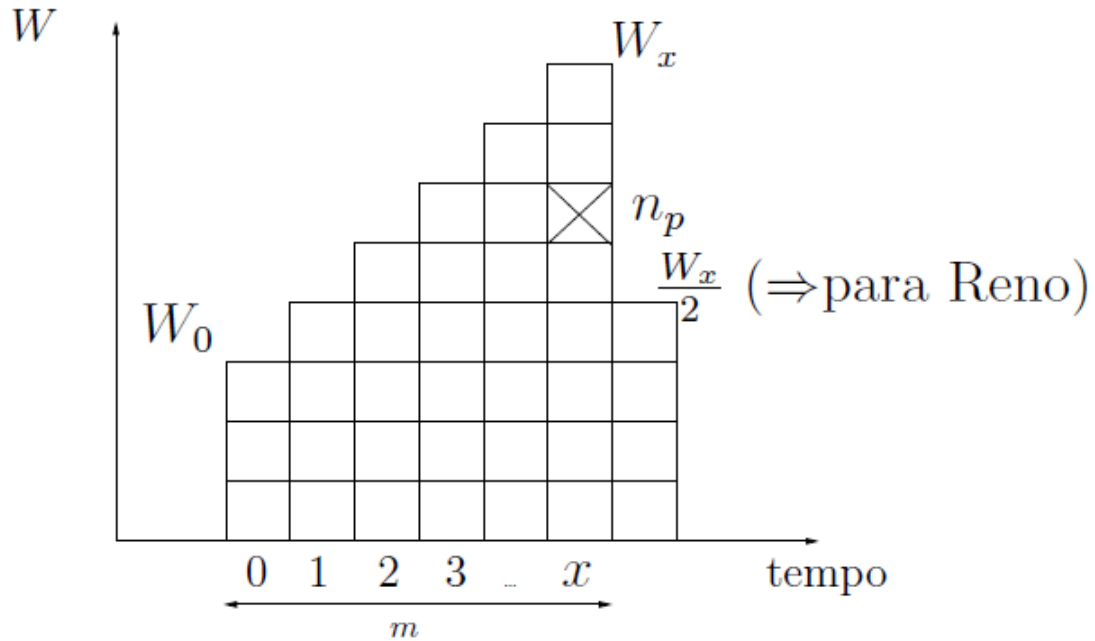
se debe considerar el tiempo en que toma un segmento TCP al inicio de la transmisión y la respectiva confirmación de su ACK al llegar al trasmisor conocido como RTT (RTT, por sus siglas en inglés *Round Trip Time*), y se lo puede denominar  $T_{RTT}$  quedando:

$$T_{RTT} = \frac{1}{R_p} + \tau_p \quad (136)$$

El sistema tiene que considerar un error de segmento TCP llamado  $P_{seg,TCP}$  y los ACK no contienen errores y el mecanismo del algoritmo TCP es *congestion avoidance*.

### 3.4.1 Análisis de la variación de la ventana de congestionamiento.

Para comprender el mecanismo de la ventana de congestionamiento existe la necesidad de analizarlo gráficamente en primer lugar y después describirlo para su mejor comprensión. En la Fig. 47 eje de las ordenadas representa el tamaño de la ventana  $W$  y el eje de las abscisas es la representación del tiempo, se observa que todo inicia con un tamaño de ventana inicial  $W_0$  en el ciclo 0 en un período  $m$ , a medida que no exista congestionamiento la ventana realiza un incremento lineal por cada ciclo, en el ciclo  $x$  se muestra que existe la primera perdida de un segmento y se lo denomina  $n_p$ , debido a esto el algoritmo que maneja TCP en este caso Reno realiza la disminución de la ventana a la mitad, es decir en el ciclo de tiempo  $x+1$  la ventana se verá reducida en  $\frac{W_x}{2}$ .



**Figura 47.** Variación de la ventana de congestión Reno.  
Fuente: (Olmedo, 2008)

Para el cálculo del tamaño de la ventana  $w_x$  cuando se produce la pérdida se puede observar que es el tamaño de ventana inicial  $w_0$  más el número de ciclos donde se produjo la pérdida y se puede escribir como:

$$w_x = w_0 + x \quad (137)$$

$$x = w_x - w_0 \quad (138)$$

Si el ciclo  $x$  lo llama  $c$  de capacidad de canal se puede definir la variable  $W_c$  y puede determinar mediante:

$$W_c = R_p T_{RTT} \quad (139)$$

De la ecuación (138) se puede decir que:

$$c = w_c - w_0 \quad (140)$$

Debido a la presencia del *buffer* del sistema permite que la ventana tenga un valor máximo y está dada por:

$$W_{max} = w_c + B \quad (141)$$

En el ciclo  $x$  o  $c$  en la ventana  $w_c$  existe el primer segmento TCP  $n_x$  o  $n_c$  y se puede determinar la secuencia de dicho segmento mediante:

$$n_x = 1 + w_0 x + \frac{x(x-1)}{2} \quad (142)$$

$$n_c = 1 + w_0 c + \frac{c(c-1)}{2} \quad (143)$$

Considerando el *buffer* se tiene:

$$n_{c,buffer} = 1 + w_0(c + B) + \frac{(c + B)(c + B - 1)}{2} \quad (144)$$

De la misma manera se puede definir la secuencia del segmento perdido cuando el *buffer* se llena con la expresión:

$$n_{of} = n_{c,buffer} + 2(W_c + B) \quad (145)$$

Pensemos que existe un ciclo cualquiera y lo denominaremos  $x_n$  es obvio que en ese ciclo también existiría un segmento con número de secuencia  $n$  y un atraso del segmento llamado  $r_{x_n}$ , el segmento está contenido en el intervalo  $1 \ll n \ll n_{of}$ , y se puede calcular el ciclo en donde está el segmento con secuencia  $n$  mediante:

$$x_n = \left[ -W_o + \frac{1}{2} + \sqrt{W_o^2 - W_o - \frac{7}{4} + 2n} \right] \quad (146)$$

$$r_{x_n} = n - n_{x_n} \quad (147)$$

Con esto se puede realizar el cálculo de instante de tiempo en que vamos a recibir la confirmación ACK de  $n$ -ésimo segmento recibido con una ventana inicial  $W_o$  esta dad por:

$$\Delta t(W_o, n) = \begin{cases} T_{RTT}(x_n + 1) + \frac{r_{x_n}}{R_p} & n \leq n_c \\ T_{RTT}(c + 1) + \frac{n - n_c}{R_p} & n > n_c \end{cases} \quad (147)$$

### 3.4.2 Cálculo de la ventana inicial.

Como se observa en la sección anterior que en las ecuaciones obtenidas es fundamental la ventana inicial  $W_o$  para su cálculo, en esta sección se presenta el análisis de como los algoritmos TCP tanto Reno como Westwood realizan este cálculo ya que es fundamental para su funcionamiento.



### 3.4.2.1 Ventana inicial de congestión con el algoritmo TCP-Reno

En el algoritmo de TCP-Reno cuando detecta la pérdida de un segmento en un período de tiempo  $m$ , realiza el cálculo de la ventana inicial a la mitad del último valor máximo que alcanzó la ventana en el período  $m-1$  y se puede calcular mediante:

$$\begin{aligned}
 W_o(m) &= f_w[W_o(m-1), n_p(m-1)] \\
 &= \max \left\{ 2, \left[ \frac{W_o(m-1), n_p(m-1)}{2} \right] \right\} \quad (148)
 \end{aligned}$$

donde  $n_p$  es el número de secuencia del segmento perdido.

### 3.4.2.2 Ventana inicial de congestión con el algoritmo TCP-Westwood.

El algoritmo TCP-Westwood opera de una manera distinta a diferencia de Reno, Westwood considera la información que entregan los ACK's para según esto, el algoritmo calcula el ancho de banda utilizado por el medio. Pensemos que la transmisión de un segmento fue exitosa y se recibe un ACK en un instante de tiempo que se le denominará  $t_n$ , dentro de la información dice que  $d_n$  bytes fueron recibidos, y se puede estimar el ancho de banda utilizado mediante:

$$b_n = \frac{d_n}{t_n - t_{n-1}} \quad (149)$$

donde  $t_{n-1}$  es el instante de tiempo del ACK fue recibido previamente.

En el momento que ocurre la congestión en el canal el algoritmo ejecuta un filtro Pasa-bajo para estimar el ancho de banda disponible, y es calculado mediante la aproximación de Tustin:

$$W_{n+1} \cong aW_n + (1 - a) \frac{b_{n+1} + b_n}{2} \quad (150)$$

donde:

$$a = \frac{2\gamma - \Delta_n}{2\gamma + \Delta_n} \quad (151)$$

donde  $1/\gamma$  representa la frecuencia de corte del filtro y  $\Delta_n = t_n - t_{n-1}$ .

Mientras que el cálculo de la ventana inicial en el periodo  $m$  se lo hace mediante:

$$W_o(m) = fw[W_o(m-1), n_p(m-1)]$$

$$W_o(m) \cong \max \left\{ 2, \left[ \frac{W_{n_p}(m-1)T_{RTT}}{N_{TCP}} \right] \right\} \quad (152)$$

Se debe considerar que:

$$b_n = \begin{cases} \frac{R_p}{W_c - W_{x_n} + 1} & n = x_n, x_n \leq c \\ R_p & \text{para otros casos} \end{cases} \quad (153)$$

### 3.4.3 Probabilidad de error de un segmento TCP en un medio inalámbrico

Al analizar la probabilidad de error de un segmento TCP que desde este momento lo denominaremos  $P_{seg,TCP}$ , tendremos que considerar dos condiciones muy importantes una de ellas será la probabilidad de error de un segmento TCP presente en el canal inalámbrico nombrado  $P_{seg,TCP,Aire}$ , y el la probabilidad de error de un segmento TCP que se produce por el congestionamiento llamado  $P_{seg,TCP,conge}$ , de esta manera se puede parametrizar la probabilidad de error de segmento TCP en un entorno inalámbrico mediante la ayuda de la teoría de probabilidades y se puede escribir como:

$$\begin{aligned} P_{seg,TCP} &= P(P_{seg,TCP,conge} \cup P_{seg,TCP,Aire}) \\ P_{seg,TCP} &= P_{seg,TCP,conge} + P_{seg,TCP,Aire} - P_{seg,TCP,Aire}P_{seg,TCP,conge} \\ P_{seg,TCP} &= P_{seg,TCP,conge} + P_{seg,TCP,Aire}(1 - P_{seg,TCP,conge}) \end{aligned} \quad (154)$$

Se sabe que la  $P_{seg,TCP,conge} \ll P_{seg,TCP,Aire}$  debido a las características diferentes en ambos medios con este principio se puede decir que (Olmedo, 2008):

$$P_{seg,TCP} \approx P_{seg,TCP,Aire} \quad (155)$$

Finalmente se puede establecer la probabilidad de error de un segmento TCP de secuencia  $n$  a partir de una ventana de congestión inicial  $W_o$  mediante (Olmedo, 2008):

$$P_r\{n|W_o\} = \begin{cases} P_{seg,TCP}(1 - P_{seg,TCP})^{n-1}, & n < n_{of} \\ (1 - P_{seg,TCP})^{n-1} & n = n_{of} \end{cases} \quad (156)$$

### 3.4.4 Análisis de la ventana inicial de congestionamiento.

Con la ayuda de los procesos de Márkov se puede entender y modelar como varia el tamaño de la ventana inicial después de cierto periodo  $m$  donde ocurre una pérdida de un segmento, se sabe que en el período  $m$  existe una  $W_o(m)$  inicial y este valor está fuertemente ligado al valor de la ventana inicial en un periodo anterior  $W_o(m - 1)$ , se puede definir la probabilidad que existe de pasar de un estado  $W_o(m - 1) = i$  al estado  $W_o(m) = j$  de la siguiente manera:

$$P_{i,j} = P_r\{W_o(m) = j | W_o(m - 1) = i\}$$

$$P_{i,j} = \sum_{n \in n_p} P_r\{n | W_o = i\} \quad (157)$$

donde  $n \in n_p$  representan todos los posibles valores de los segmentos perdidos en el periodo  $m-1$ , que provocan el cambio de la ventana inicial en el periodo  $m$ , lo que el algoritmo de control de congestionamiento estará en función de  $fw = [W_o(m - 1), n_p(m - 1)]$ .

La matriz de transición  $P$  de orden  $(W_c - 1) \times (W_c - 1)$  contiene los valores de  $P_{i,j}$ , cada fila representa el tamaño de la ventana inicial del periodo  $m-1$  y las columnas representan el tamaño inicial de la ventana en el periodo  $m$ . Mediante la probabilidad estacionara desarrollada por Márkov

cuando  $W_o$  posee un tamaño  $i$  y representada por  $\pi_{(W_o=i)}$  seguido por todos los valores posibles de  $i \in \{2,3, \dots, W_c\}$ , se puede obtener el vector de probabilidad de estados expresada por:

$$\pi W_o = [\pi_{(W_o=2)} \pi_{(W_o=3)} \pi_{(W_o=4)} \dots \pi_{(W_o=W_c)}] \quad (158)$$

Por la condición de estabilidad del proceso de Márkov se tiene:

$$\pi W_o = \pi W_o P \quad (159)$$

Sabiendo que  $\sum_{i=2}^{W_c} \pi_{(W_o=i)} = 1$  se puede resolver el sistema y obtener cada uno de los valores del vector  $\pi W_o$ .

### 3.4.5 Throughput de datos con el protocolo TCP.

Finalmente, con los análisis realizados en secciones anteriores se puede establecer la velocidad media de transmisión del protocolo TCP apoyándonos en la ecuación (146), (156) y la solución de (159) se puede obtener la siguiente expresión (Olmedo, 2008):

$$\bar{v}_{TCP} = \sum_{i=2}^c W_{(W_o=i)} \sum_{n=2}^{n_{of}(W_o=i)} \frac{n-1}{\Delta t(W_o=i, n)} P_r\{n|W_o=i\} N_{TCP} \quad [bits/s] \quad (160)$$

### 3.4.6 Parametrización del nuevo protocolo TCP-NACK

En la sección 2.6.3 ya se conoció sobre la nueva propuesta de un nuevo algoritmo llamado TCP-NACK donde la propuesta es directamente para ser analizado sobre canales inalámbricos, en breve resumen el algoritmo NACK trabaja mediante el envío de paquetes de “negación negativa” para que inmediatamente sea enviado el segmento faltante sin que afecte la ventana de congestionamiento por la pérdida del segmento, el algoritmo maneja uno de los bits de reserva del encabezado TCP indicando que se trata de un paquete NACK y a su vez indicarle al emisor la retransmisión del segmento perdido con su respectivo número de secuencia, así es como trabaja la nueva propuesta pero existe la necesidad de parametrizarlo para ser implementado en simulaciones y en esta sección se realiza el análisis del nuevo protocolo NACK y establecer las ecuaciones que responden al comportamiento del protocolo.

En la Fig. 48 se muestra el comportamiento del protocolo TCP con el uso de NACK's los segmentos que tuvieron inconveniente en llegar al receptor están representados con negrilla y el protocolo exige la retransmisión inmediata de los mismos en un tiempo igual a  $T_{RTT}$  y en la Fig. 49 se muestra el mecanismo del protocolo TCP con *congestion avoidance* usado por el protocolo TCP-Reno claramente se ve la disminución del *throughput* considerablemente, el nuevo algoritmo del protocolo NACK puede funcionar tanto con los segmentos de confirmación ACK's como con los NACK's el uno para informar la recepción exitosa y el otro para ser una alerta y exigir inmediatamente la retransmisión del segmento con dificultades y evitar que la ventana de congestionamiento se reduzca.

										80
									68	79
								56	67	78
							46	55	66	77
						38	45	54	65	76
					30	<b>37</b>	44	53	<b>64</b>	75
				23	29	36	43	52	63	74
			17	22	28	35	37	51	62	73
		11	16	21	<b>27</b>	34	<b>42</b>	50	61	72
	7	10	<b>15</b>	15	26	27	41	49	60	71
3	6	9	14	<b>20</b>	20	<b>33</b>	40	48	59	64
2	5	8	13	19	25	32	39	42	58	70
1	<b>4</b>	4	12	18	24	31	33	47	57	69
$x = 0$	1	2	3	$c=4$	5	6	7	8	9	10

**Figura 48.** Ventanas de congestionamiento con el uso de NACK's  
Fuente: (Olmedo, 2008)

						17	21			
		7								
3	6				13	16	<b>20</b>		25	29
2	5	9	10	12	<b>15</b>	19	22	24	26	28
1	<b>4</b>	8	4	11	14	18	15	23	20	27
$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Figura 49.** Ventanas de congestionamiento con el mecanismo normal.  
Fuente: (Olmedo, 2008)

Mediante el uso del mecanismo de control de congestionamiento desarrollado por el protocolo TCP-NACK se puede establecer el *throughput* de los datos en el sistema dependiente de la probabilidad de error del segmento TCP como se estableció para los otros protocolos y se puede escribir como (Olmedo, 2008):

$$\bar{v}_{TCP,NACK} = \sum_{i=2}^c W_{(W_o=i)} \sum_{n=2}^{n_{of}(W_o=i)} \frac{n-1(1-P_{seg,TCP})}{\Delta t(W_o=i, n)} P_r\{n|W_o=i\} N_{TCP} \quad [bits/s] \quad (161)$$

Con los resultados anteriores se puede observar que cuando se implementa en el algoritmo TCP el mecanismo NACK la ventana de congestionamiento incrementa constantemente para todos los periodos y el *throughput* de los datos disminuye en función de los segmentos con error, si consideramos el *throughput* de datos normalizado se puede decir que el *throughput* del sistema se puede calcular si consideramos que la ventana de congestión se incrementa de  $W_o$  a  $2W_o$  mediante la expresión:

$$\frac{\bar{v}_{TCP}}{R_b} = \frac{n_{2W_o} N_{TCP}}{\Delta t(W_o=i, n_{2W_o})} (1 - P_{seg,TCP}) \quad (162)$$

donde  $n_{2W_o}$  es el número de secuencia del segmento cuando la venta alcanza un valor de  $2W_o$  calculado mediante:

$$n_{2W_o} = \sum_{i=0}^{W_o} W_o + i$$

$$n_{2W_o} = \frac{3}{2} W_o (W_o + 1) \quad (163)$$

y  $\Delta t(W_o=i, n_{2W_o})$  el tiempo de llegada del ACK de la secuencia el segmento  $n_{2W_o}$  y puede ser calculado con:

$$\Delta t(W_o=i, n_{2W_o}) = T_{RTT} + \frac{n_{2W_o} - 1}{R_p} \quad (164)$$



Se sabe que  $W_{max} = 2W_o$  entonces de la ecuación (141) se tiene:

$$2W_o = W_c + B \quad (165)$$

Si se considera  $B = W_c$  se puede concluir que:

$$W_c = W_o = R_p T_{RTT} \quad (166)$$

Reemplazando la ecuación (163), (164) y (166) en (162) se tiene que el *throughput* de datos normalizado está dado por:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{v}_{TCP}}{R_b} &= \frac{3/2 W_o(W_o + 1)}{W_o + 3/2 W_o(W_o + 1) - 1} (1 - P_{seg,TCP}) \\ \frac{\bar{v}_{TCP}}{R_b} &= \frac{W_o(W_o + 1)}{(W_o + 2) \left(W_o - \frac{1}{3}\right)} (1 - P_{seg,TCP}) \quad (167) \end{aligned}$$

Considerando que  $W_o \gg 1$  se tiene que:

$$\frac{\bar{v}_{TCP}}{R_b} = \frac{W_o + 1}{W_o + 2} (1 - P_{seg,TCP}) \quad (168)$$

Sustituyendo la ecuación (166) en la ecuación (168) se tiene:

$$\frac{\bar{v}_{TCP}}{R_b} = \frac{\tau_p R_p + 2}{\tau_p R_p + 3} (1 - P_{seg,TCP}) \quad (169)$$

A observar el resultado entre el numerador y denominador siempre va ser menos que la unidad, con esto se puede establecer el *throughput* de datos del sistema que aproximadamente seria la probabilidad de éxito de los segmentos TCP mediante la ecuación (Olmedo, 2008):

$$\frac{\bar{v}_{TCP}}{R_b} = (1 - P_{seg,TCP}) \quad (170)$$

Se sabe por definición que:

$$P_{seg,TCP} = 1 - (1 - P_b)^{N_{TCP}} \quad (171)$$

Donde  $P_b$  es la probabilidad de error de *bit* y  $N_{TCP}$  es el número de *bits* por paquete TCP.

Se observa en el análisis que las ecuaciones obtenidas estas dependen de algunos parámetros pero en especial siempre de la  $P_{seg,TCP}$  que a su vez como se demostró que es aproximadamente la  $P_{seg,TCP,Aire}$ , si se sabe que el segmento TCP está compuesto por una cantidad de bits, entonces con los cálculos obtenidos de la probabilidad de error de símbolo de las múltiples modulaciones digitales con diferentes entornos entonces con esto se puede obtener la probabilidad de error de cada bit en la interface aérea y se puede agruparlo en segmentos TCP para obtener la probabilidad

de error de un segmento TCP en la interface aérea, así se puede establecer el comportamiento de los diferentes algoritmos TCP en canales inalámbricos en diferentes modulaciones y diferentes entornos inalámbricos, en la siguiente sección se recopilara todos los resultados obtenidos de la simulación.

## CAPÍTULO IV

### 4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

#### 4.1 Desempeño del protocolo TCP en distintos escenarios inalámbricos.

##### 4.1.1 Análisis de resultados obtenidos con un interferente fuerte, canal AWGN.

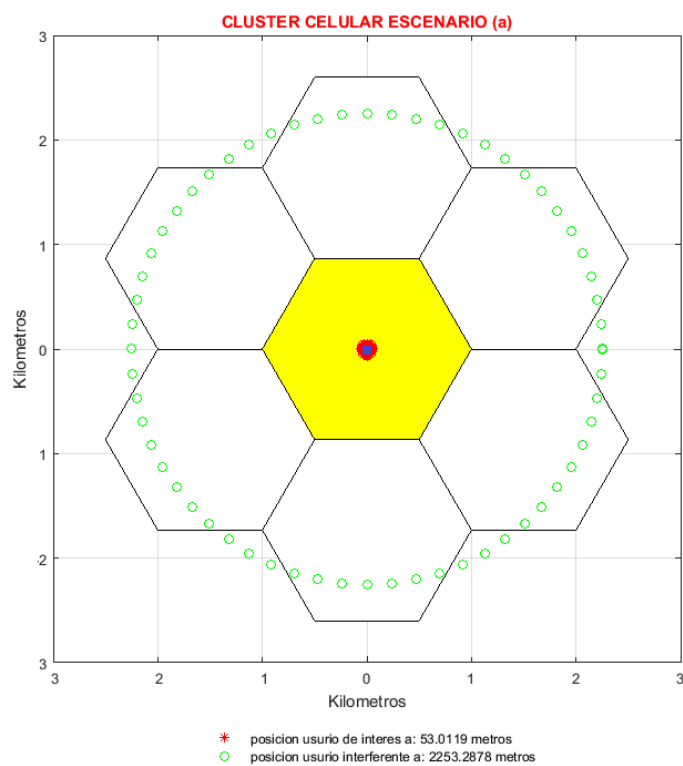
Se realizaron tres simulaciones donde el programa genera radios y distancias aleatorias tanto del usuario de interés como el del usuario interferente. Fueron utilizados los siguientes parámetros presentados en la Tabla 6:

**Tabla 6.**

*Parámetros de sistema.*

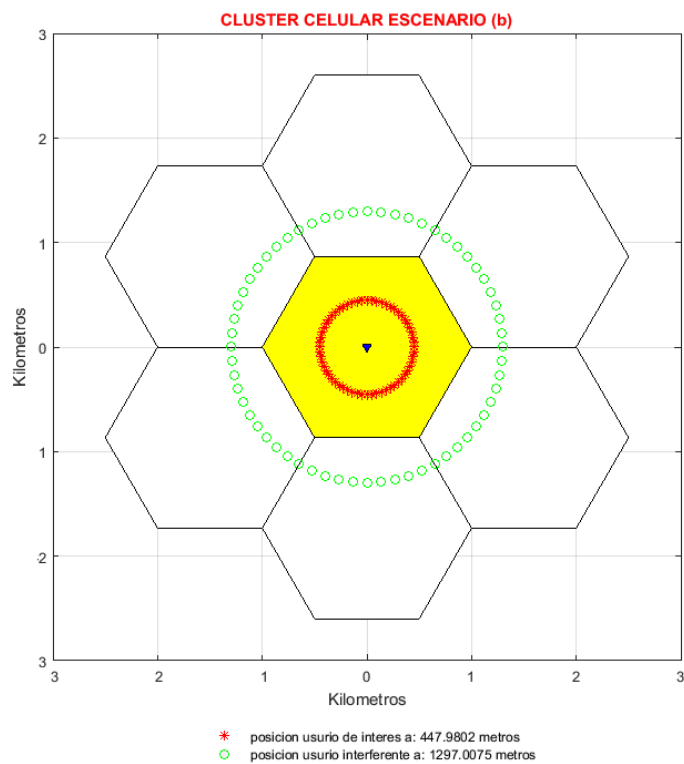
PARAMETRO	VALOR
Radio de la Célula	$R=1000\ m$
Exponente por perdida de Trayecto	$\beta=4$
Potencia de Transmisión	$P= 1w$
Tasa de bits	$Rb= 2Mbps$
Bits por segmento TCP	$N_{TCP} = 3200$
Tasa de segmento	$Rp=625\ segm/s$
Tamaño Buffer TCP	$44\ segmentos$
Retraso de propagación	$\tau_p = 70\ ms$
Numero de símbolos generados	$Nb=10000$
Factor de Reúso	$M=1$
K interferentes	$K=1$
Es/No	$0\ a\ 70\ dB$

Se modelaron los escenarios en relación a las distancias; en el escenario (a) el usuario de interés se encuentra a 53,01 metros y el interferente a 2253,29 metros, tal como se muestra en la Fig. 50.



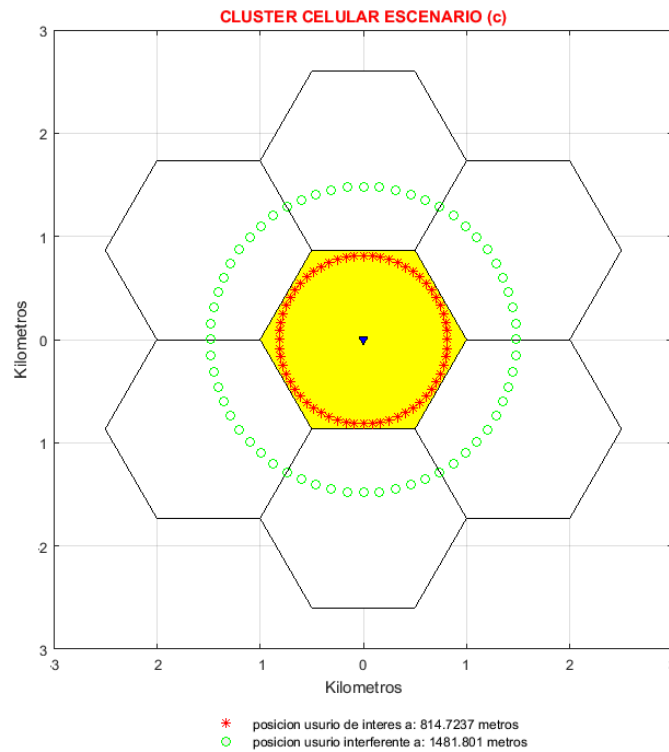
**Figura 50.** Escenario a, con color verde y marcada con círculos ubica todas las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario interferente y de color rojo las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario de interés.

En el escenario (b) el usuario de interés se ubica a 447,9802 metros y el interferente a 1297 metros, tal como se muestra en la Fig. 51.



**Figura 51.** Escenario b, con color verde y marcada con círculos ubica todas las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario interferente y de color rojo las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario de interés.

En el escenario (c) el usuario de interés se ubica a 814,72 metros y el interferente a 1481,80 metros, tal como se muestra en la Fig. 52.



**Figura 52.** Escenario c, con color verde y marcada con círculos ubica todas las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario interferente y de color rojo las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario de interés

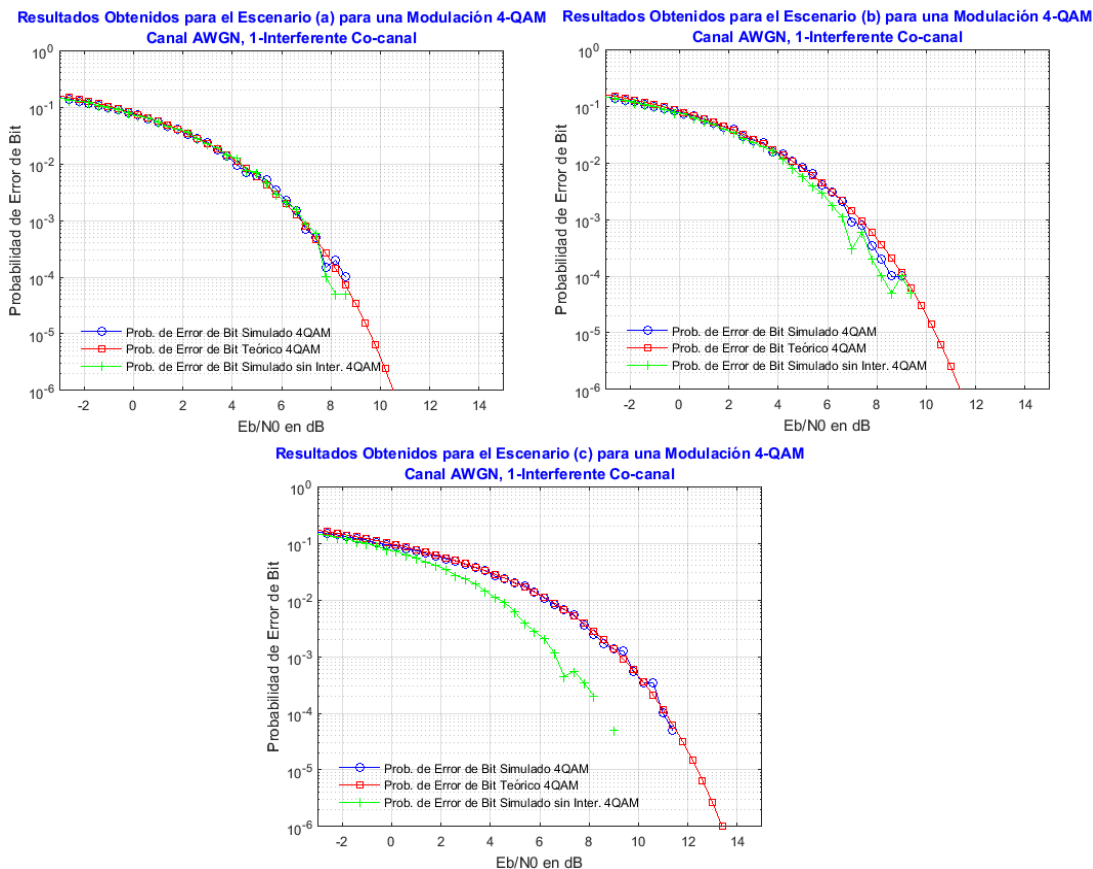
En los tres diferentes escenarios fueron evaluados el comportamiento del protocolo TCP en las versiones Reno, Westwood, NACK bajo un entorno inalámbrico con interferencia.

La Fig. 53 muestra la probabilidad de error de bit en función de la relación señal-ruido  $E_b/N_0$ , considerando en una modulación 4-QAM en los escenarios a, b y c respectivamente. Como se mostró en los capítulos anteriores, la eficiencia del protocolo TCP sobre un canal inalámbrico depende de, la probabilidad de error de bloque de TCP, el que se obtiene a partir de la probabilidad de error bit del canal inalámbrico AWGN y su evaluación con interferencia co-canal. Al considerar un interferente más representativo, según la Fig. 51 la interferencia co-canal no será muy fuerte por la distancia lejana con la estación radio base en relación con el usuario de interés.

En relación al escenario b tal como se muestra en la Fig. 51, la interferencia incrementa ya que el usuario de interés se aleja de la estación radio base y el usuario interferente se encuentra más cerca. Finalmente, aún más fuerte será la interferencia en el escenario c tal como se muestra en la Fig. 52.

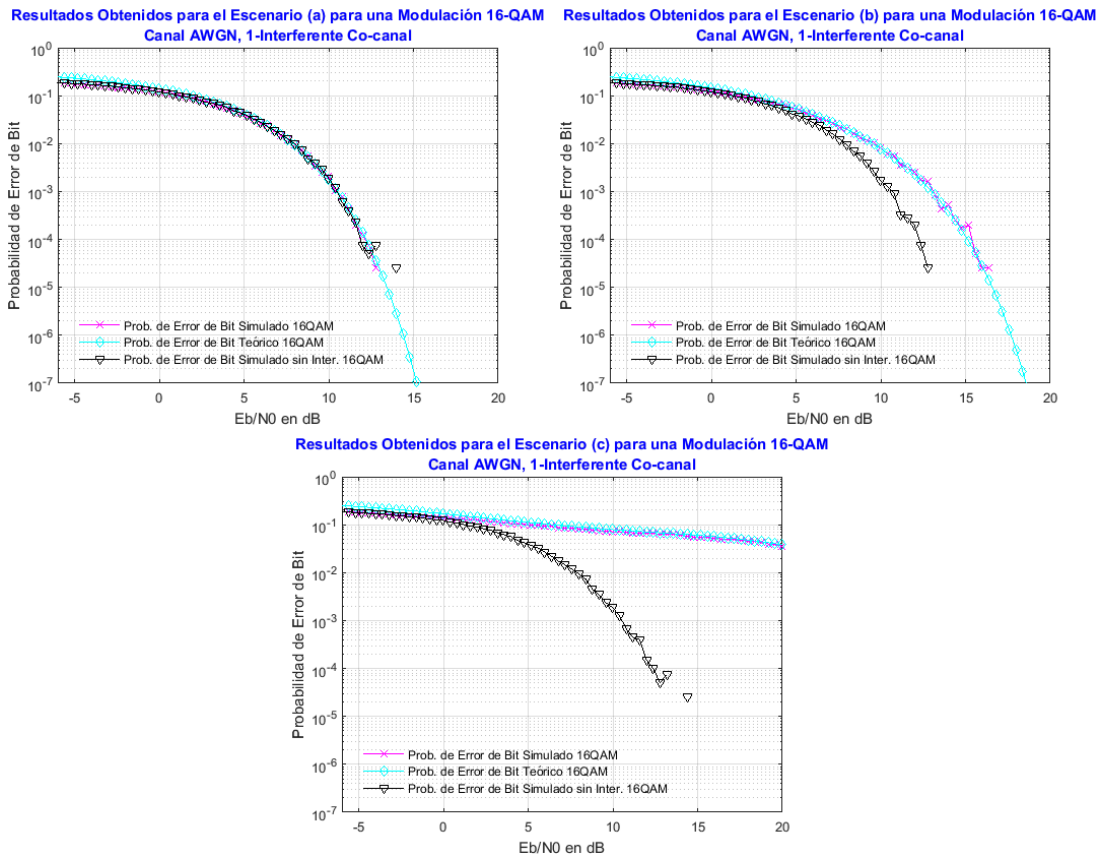
Los resultados se pueden observar en la Fig. 53 en los tres escenarios descritos anteriormente, se sabe que una modulación 4-QAM no es tan eficiente, pero es más robusta a la interferencia co-canal o al ruido, con estas características se observa que aun así se ve afectada esta modulación dependiendo de la distancia del usuario interferente, en los resultados se visualiza la probabilidad de error de bit con y sin interferencia co-canal que para el escenario a y b no se experimenta el efecto cosa que si sucede para el escenario c, tanto simulado como teórico para una modulación 4-QAM.





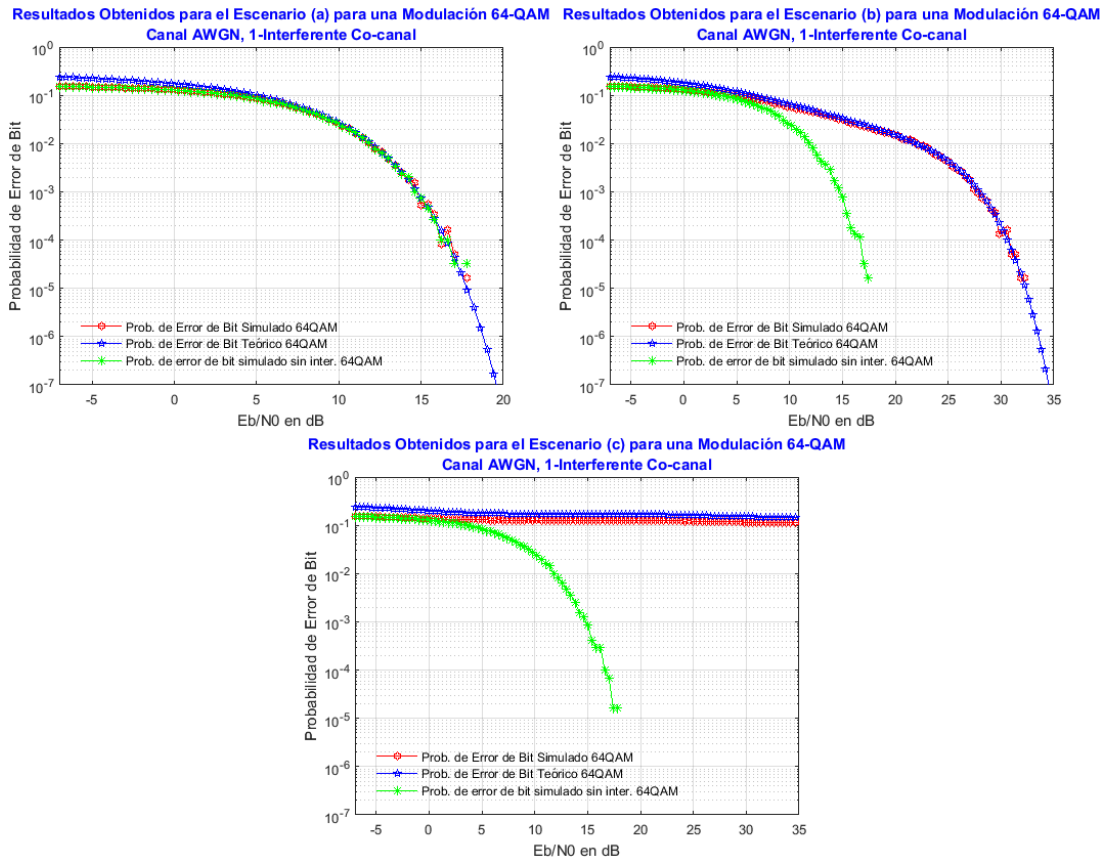
**Figura 53.** Resultados correspondientes a los escenarios a, b y c en una modulación 4-QAM, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  en un canal AWGN, 1-interferente co-canal.

Si la modulación cambia a 16-QAM los resultados se pueden visualizar tal como se muestran en la Fig. 54 para los distintos escenarios, se observa el efecto de la interferencia co-canal sobre el canal de comunicación cuando el usuario de interés se aleja a la estación radio base y el interferente se acerca, en el análisis se compara el comportamiento del canal inalámbrico con y sin interferente; y se observa como este fenómeno influye mucho más en el escenario b y c cuando existe un interferente fuerte.



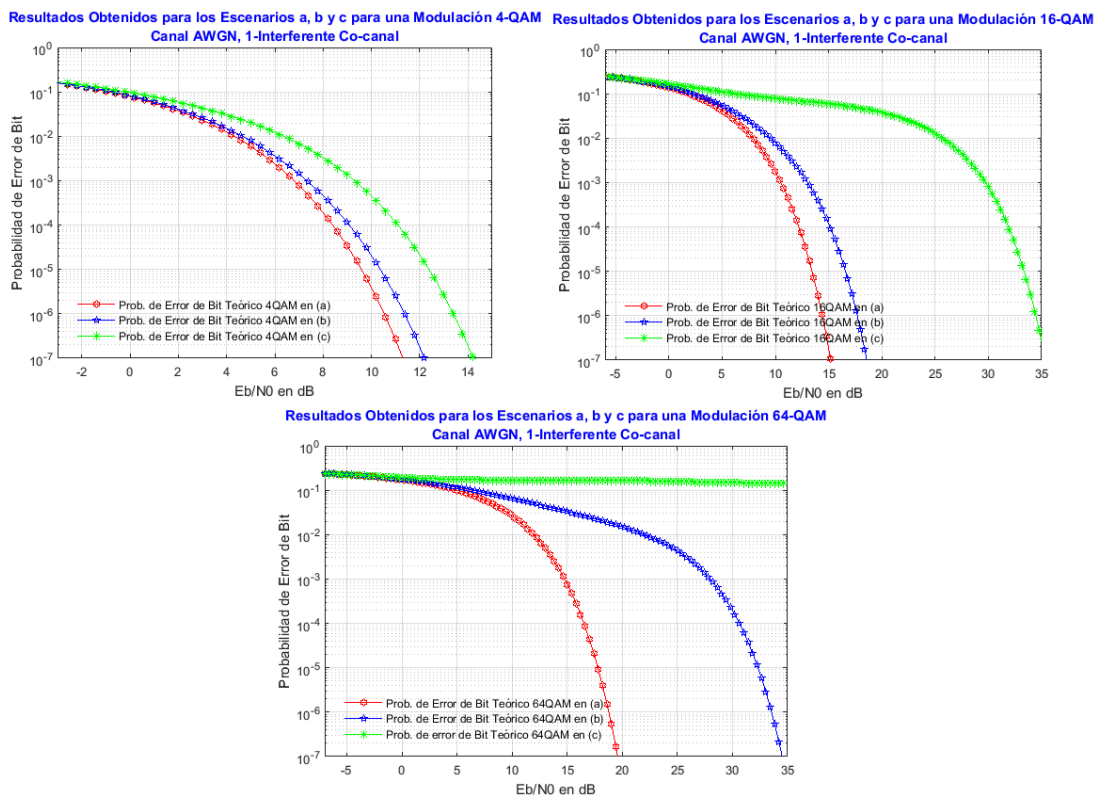
**Figura 54.** Resultados correspondientes a los escenarios a, b y c en una modulación 16-QAM, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  en un canal AWGN, 1-interferente co-canal.

En la Fig. 55 con una modulación 64-QAM se observa los resultados obtenidos para los escenarios a, b y c, se visualiza la interferencia co-canal sobre el canal inalámbrico afectando su rendimiento para los escenarios b y c donde la interferencia es más fuerte.



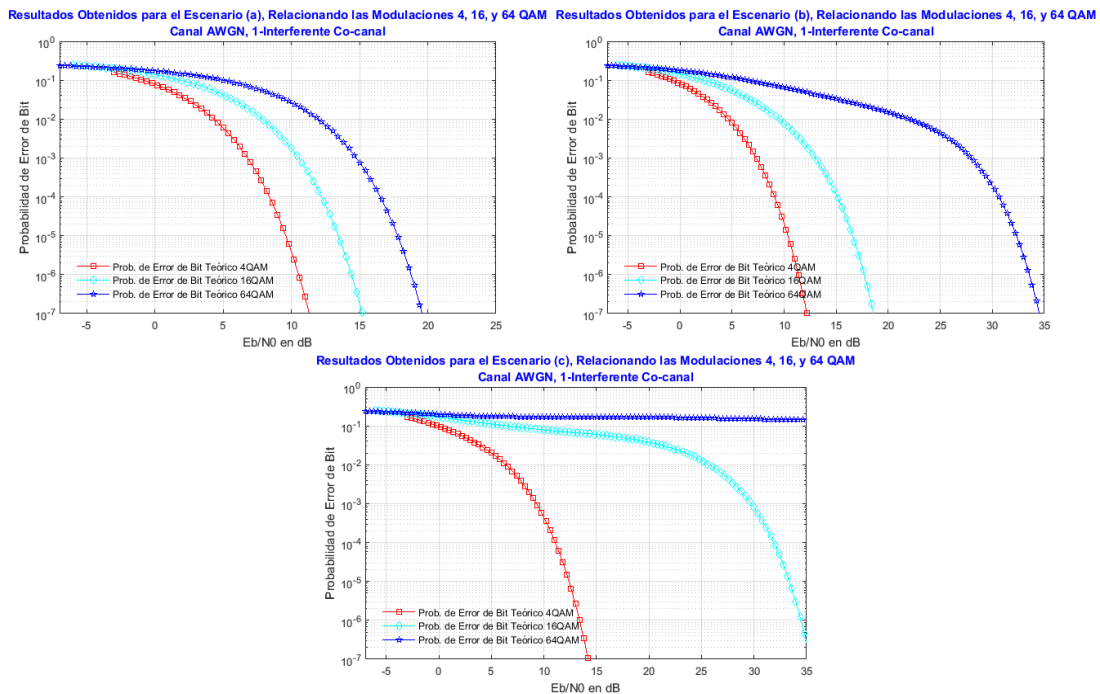
**Figura 55.** Resultados correspondientes a los escenarios a, b y c en una modulación 16-QAM, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  en un canal AWGN, 1-interferente co-canal.

En la Fig. 56 se presentan los resultados obtenidos de cómo influye la interferencia co-canal en cada una de las modulaciones 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM para cada escenario simulado a, b y c, en la figura se visualiza que la interferencia tiene un mayor efecto en el escenario c donde la interferencia es más fuerte.



**Figura 56.** Resultados obtenidos en relación a los escenarios a, b y c, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  para una modulación 4QAM, 16QAM, 64QAM, en un canal inalámbrico, Canal AWGN, 1-interferente co-canal.

Por último, en la Fig. 57 se observa la diferencia de cada una de las modulaciones 4, 16 y 64 QAM para cada escenario a, b y c, se verifica como la interferencia tiene mayor influencia en una modulación 64-QAM, en esta figura se observa como depende la eficiencia del canal con la modulación empleada y la distancias tanto del usuario de interés como del interferente.



**Figura 57.** Resultados obtenidos para los escenarios a, b y c, Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  en relación a las modulaciones 4QAM, 16QAM, 64QAM, en un canal inalámbrico, Canal AWGN, 1-interferente co-canal.

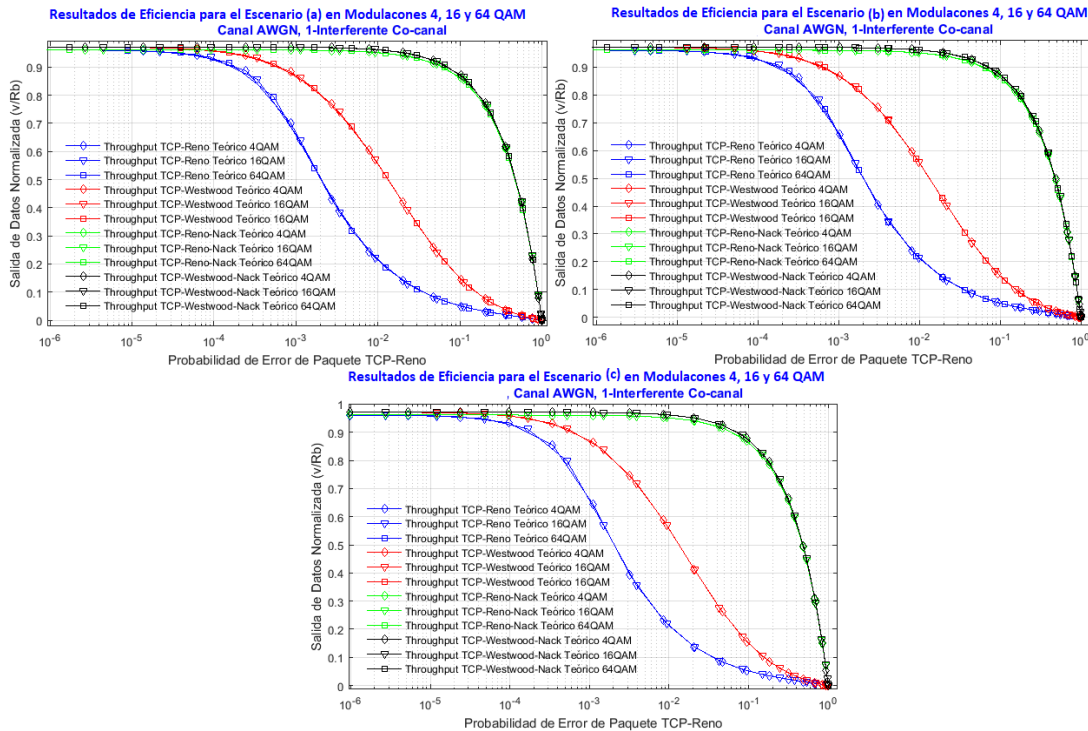
Para entender el comportamiento y establecer el *throughput* del canal inalámbrico en un ambiente TCP es necesario establecer la probabilidad de error de bit en cada una de las modulaciones que se usaron para la transmisión de los datos y así establecer el cálculo de la probabilidad de error de paquete TCP según la ecuación 171, para un mejor uso y entendimiento de los datos obtenidos estos han sido normalizados  $\bar{v}_{TCP}/R_b$ , en la Fig. 58 se observa el *throughput* de los tres escenarios simulados respectivamente en una modulación 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM.

En la Fig. 58 se observa las curvas de la salidad de datos normalizada en función de la probabilidad de error de paquete TCP en sus distintas versiones Reno, Westwood y Nack en este tipo de gráfica no se observa con claridad el comportamiento de TCP en las distintas modulaciones y distintas distancias tanto del usuario de interés como el interferente como se planteó en el análisis, ya que para el cálculo del *throughput* del sistema o salida de datos la ecuación teórica depende

unicamente de la probabilidad de error de paquete TCP y no directamente de la modulación y mucho menos del  $E_b/N_o$ .

En la Fig. 57 en el escenario (a) si escogemos la probabilidad de error de bit de  $10^{-4}$  y trazamos una horizontal se observa que la probabilidad de error de bit es la misma tanto para 4, 16 y 64-QAM, es por eso que la curvas de la Fig. 58 mantiene la misma tendencia, esto no quiere decir que los resultados esten mal de lo contrario si nos fijamos en las curvas de la Fig. 58 los puntos o marcas son diferentes valores para cada modulación pero mantienen la misma tendencia por que es la curva típica teorica de rendimiento TCP que ya se estudio en otros trabajos de investigación, para poder experimentar diferencias entre protocolos, modulaciones y realizar un analisis de lo que se planteo en el tema de investigación se debería graficar la salida de datos o *throughput* en función del  $E_b/N_o$ , tomando en cuenta que la probabilidad de error de bit se calcula o depende directamente de los niveles de  $E_b/N_o$  con este tipo de graficas ya se observara el comportamiento del algoritmo TCP en ambientes inalámbricos.

De la Fig. 58 se puede obtener el siguiente análisis el protocolo TCP-Westwood es aproximadamente 40% más eficiente que TCP-Reno dependiendo de su Probabilidad de error de bit, mientras que el Protocolo TCP-Westwood-NACK y TCP-Reno-NACK son aproximadamente 40% mejor que TCP-Westwood y aproximadamente 70% mejor que TCP-Reno concluyendo que los dos protocolos muestran mejor respuesta en el *throughput* del sistema siendo estos dos últimos de igual rendimiento, análisis que ya fueron estudiados anteriormente pero es importante nombrarlos ya es base para la investigación planteada.



**Figura 58.** Resultados de Eficiencia Obtenidos para los Escenarios a, b y c en relación a modulaciones 4, 16 y 64 QAM, Múltiples Protocolos Reno, Westwood y Nack, Throughput en función de la Probabilidad de error de paquete TCP, Canal AWGN, 1-Interferente co-canal.

Como se mencionó en el análisis anterior para tener mejor claridad y visibilidad del comportamiento del protocolo TCP-Reno, Westwood y NACK en un ambiente inalámbrico con interferencia co-canal en sus distintas modulaciones y escenarios simulados, es necesario que las curvas sean representadas en función del  $E_b/N_0$  ya que la probabilidad de error bit es calculado en función de este parámetro y por cada valor de  $E_b/N_0$  define el comportamiento del canal dependiendo de la modulación. En la Fig. 57 en el escenario (a) para una probabilidad de error de bit de  $10^{-2}$  para una modulación 4-QAM se produce con un  $E_b/N_0$  de 4,8 dB, para una modulación de 16-QAM y 64-QAM se produce con un  $E_b/N_0$  8 dB y 12 dB respectivamente, es decir; pueden tener las mismas probabilidades de error de bit, pero a diferentes niveles de  $E_b/N_0$ .

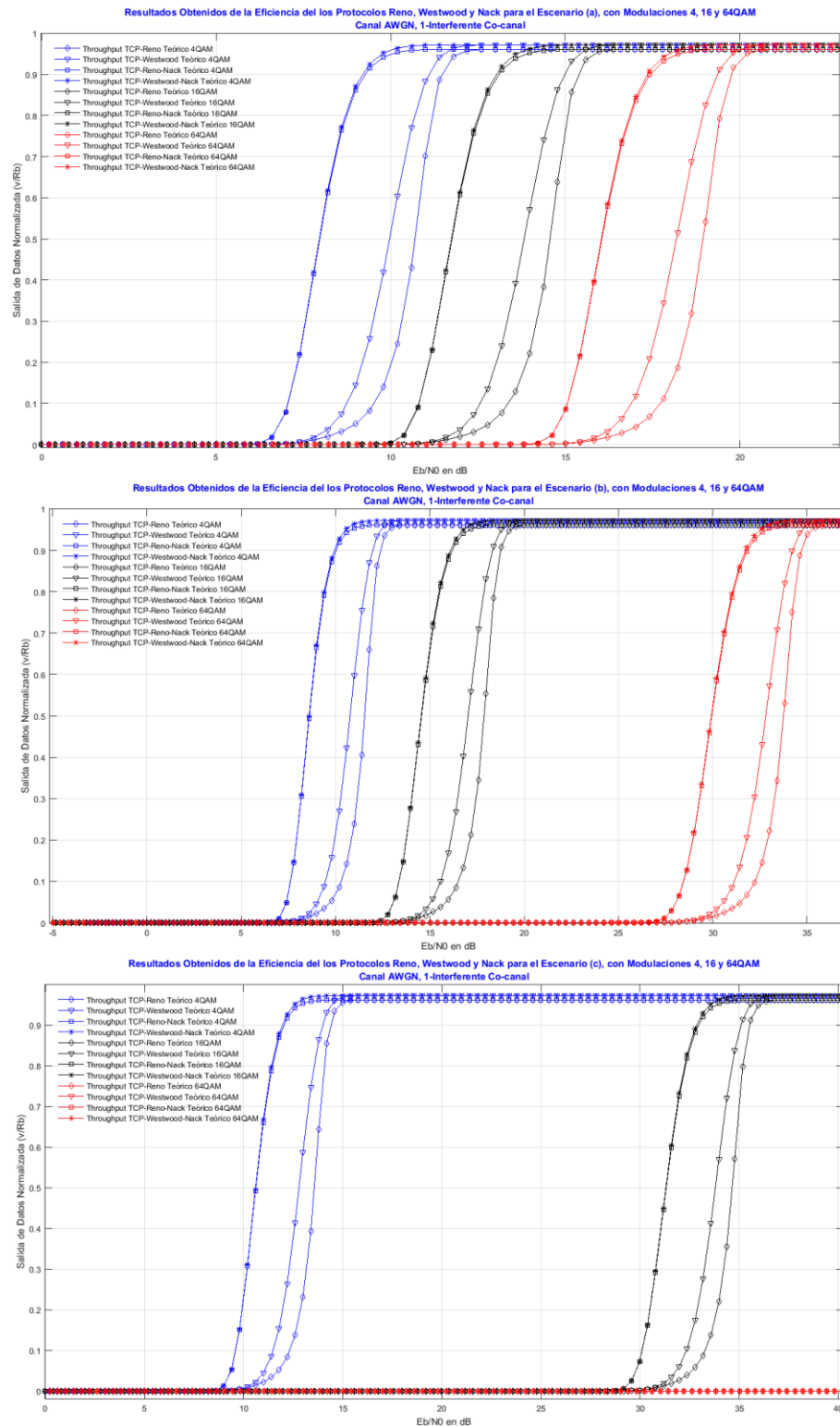
En la Fig. 59 se observa las diferentes curvas y eficiencia del canal inalámbrico trabajando bajo cada uno de los protocolos planteados, se visualiza el comportamiento con color azul usando una modulación 4-QAM, con color negro usando una modulación 16-QAM y con color rojo con una

modulación de 64-QAM, el primer análisis se centrara en la eficiencia entre protocolos en cada una de las modulaciones, posteriormente se analizara la influencia del usuario interferente sobre el canal de comunicación. Analicemos la región azul de la Fig. 59 en los tres escenarios a, b y c, se observa que tanto los protocolos TCP-Reno-NACK y TCP-Westwood-NACK son mucho más eficientes que TCP-Reno y TCP-Westwood como ya se analizó, se visualiza que en el protocolo TCP-Reno de color azul en el escenario (a) con marca rombo con 10,5 dB de  $E_b/N_0$  obtiene un *throughput* normalizado de 0.2443 que quiere decir aproximadamente unos 490 Kbps, mientras que TCP-Westwood con los mismos 10,5 dB alcanza un *throughput* normalizado de 0,6051 aproximadamente de 1,2 Mbps teniendo una eficiencia tres veces mejor que TCP-Reno, a partir de los 12 dB los dos protocolos alcanza su máximo *throughput* de rendimiento a 2 Mbps, se sabe que TCP-Reno-NACK y TCP-Westwood-NACK mantienen el mismo comportamiento, si se mantiene la misma referencia de 10,5 dB de  $E_b/N_0$  TCP-Reno-NACK y Westwood-NACK alcanzan un *throughput* normalizado de 0,9693 aproximadamente de 1,9 Mbps siendo 4 veces mejor que TCP-Reno y dos veces mejor que TCP-Westwood, a partir de los 10 dB los protocolos Nack alcanzan su máximo *throughput* y así se puede hacer el análisis en las demás modulaciones y escenarios.

Se observa que la proporción de eficiencia entre protocolos se mantiene tanto para 4-QAM, 16-QAM y 64QAM en cualquier escenario la diferencia radica en los niveles de  $E_b/N_0$  que maneja cada protocolo, se observa que en una modulación de 4-QAM en el escenario (a) de la Fig. 59 TCP-Reno-NACK y TCP-Westwood-NACK con 8 dB alcanzan ya su *throughput* normalizado de 0,5 mientras que TCP-Reno y TCP-Westwood tienen un *throughput* de 0, ratificando la eficiencia del protocolo NACK, también se puede decir que esto depende de los niveles de interferencia que se maneje en el canal, que a su vez depende de la distancia que se encuentra el usuario de interés y el usuario interferente a la estación radio base, además se visualiza en el Fig. 59 en el escenario (a) que los diferentes protocolos TCP con una modulación 4-QAM a 6 dB empieza a elevar su *throughput* mientras que con una modulación de 16-QAM lo hacen con 11 dB y para 64-QAM lo hacen a partir de los 14 dB.



En la Fig. 59 en el escenario (b) para 4-QAM a partir de los 6 dB los protocolos empiezan a elevar su *throughput* mientras que para 16-QAM lo hace a partir de 12 dB y en 64-QAM lo hace a partir de 27 dB y en el escenario (c) para 4-QAM su *throughput* empieza a elevarse con 8 dB , con 16-QAM a partir de 30 dB y en 64-QAM la interferencia es muy alta que el *throughput* es de 0, confirmado que el *throughput* del sistema depende tanto de la distancia de los usuarios que provocan el nivel de interferencia, la modulación que se utiliza y el protocolo TCP empleado para la transmisión.



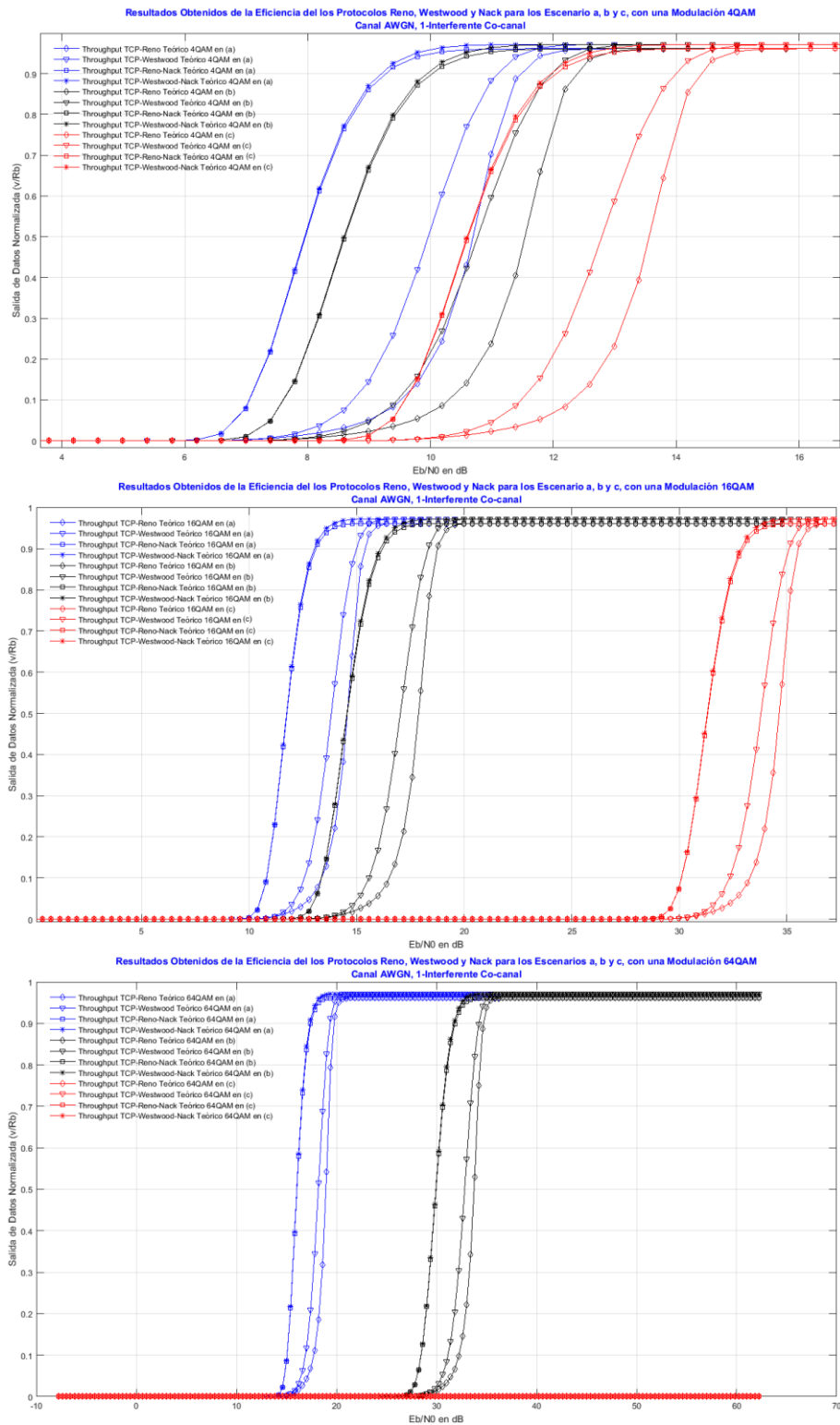
**Figura 59.** Resultados de Eficiencia Obtenidos para los Escenarios a, b y c en relación a modulaciones 4, 16 y 64 QAM, Múltiples Protocolos Reno, Westwood y Nack, Throughput en función del Eb/No, Canal AWGN, 1-Interferente co-canal.

En la Fig. 60 se plantea el análisis de la interferencia co-canal que influye sobre el enlace inalámbrico utilizando los diferentes protocolos TCP ya descritos anteriormente, en la figura se observa las curvas que representan las modulaciones en 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM, con color azul escenario (a), en color negro escenario (b) y en color rojo escenario (c), la primera figura de arriba abajo es en una modulación 4-QAM recordemos que el escenario (a) el usuario interferente se encuentra lejos de la estación radio base comparándola con la posición del usuario de interés hacia la estación radio base, en el escenario (b) el usuario interferente se acerca un poco más y en el escenario (c) la interferencia co-canal es muy fuerte por la cercanía del usuario interferente tal como se muestra en la Fig. 52, en la Fig. 60 para una modulación 4-QAM se puede destacar algunos aspectos, se sigue notando y ratificando que el protocolo TCP-NACK es el mejor, adicional se observa que ante una fuerte interferencia que es en el escenario (c) con 10 dB de  $E_b/N_0$  necesitamos transmitir bajo el protocolo TCP-NACK, mientras que a una menor interferencia como el escenario a y b es suficiente hacerlo con TCP-Reno y TCP-Westwood respectivamente.

En la Fig. 60 la gráfica de la mitad se representa una modulación 16-QAM que es más eficiente, pero más inmune a la interferencia, las curvas lo ratifican ese criterio se observa que para esta modulación y un escenario donde la interferencia no es muy fuerte como el escenario (a) los protocolos necesitan como mínimo 10 dB de  $E_b/N_0$  para empezar a elevar su *throughput* y 18 dB para alcanzar su máximo *throughput*, mientras que al aumentar la interferencia como el escenario (b) para alcanzar su máximo *throughput* lo hace con 20 dB y mínimo 12 dB para empezar a funcionar, para el escenario (c) donde la interferencia es mucho más fuerte mínimo se debe tener 28 dB para empezar a funcionar y con 36 dB alcanzaría su máximo *throughput*, se observa que en el escenario (b) que a 14 dB de  $E_b/N_0$  con una modulación de 16-QAM se necesita trabajar bajo el protocolo TCP-NACK y las mismas condiciones en el escenario (a) se lo puede hacer con el Protocolo TCP-Reno.

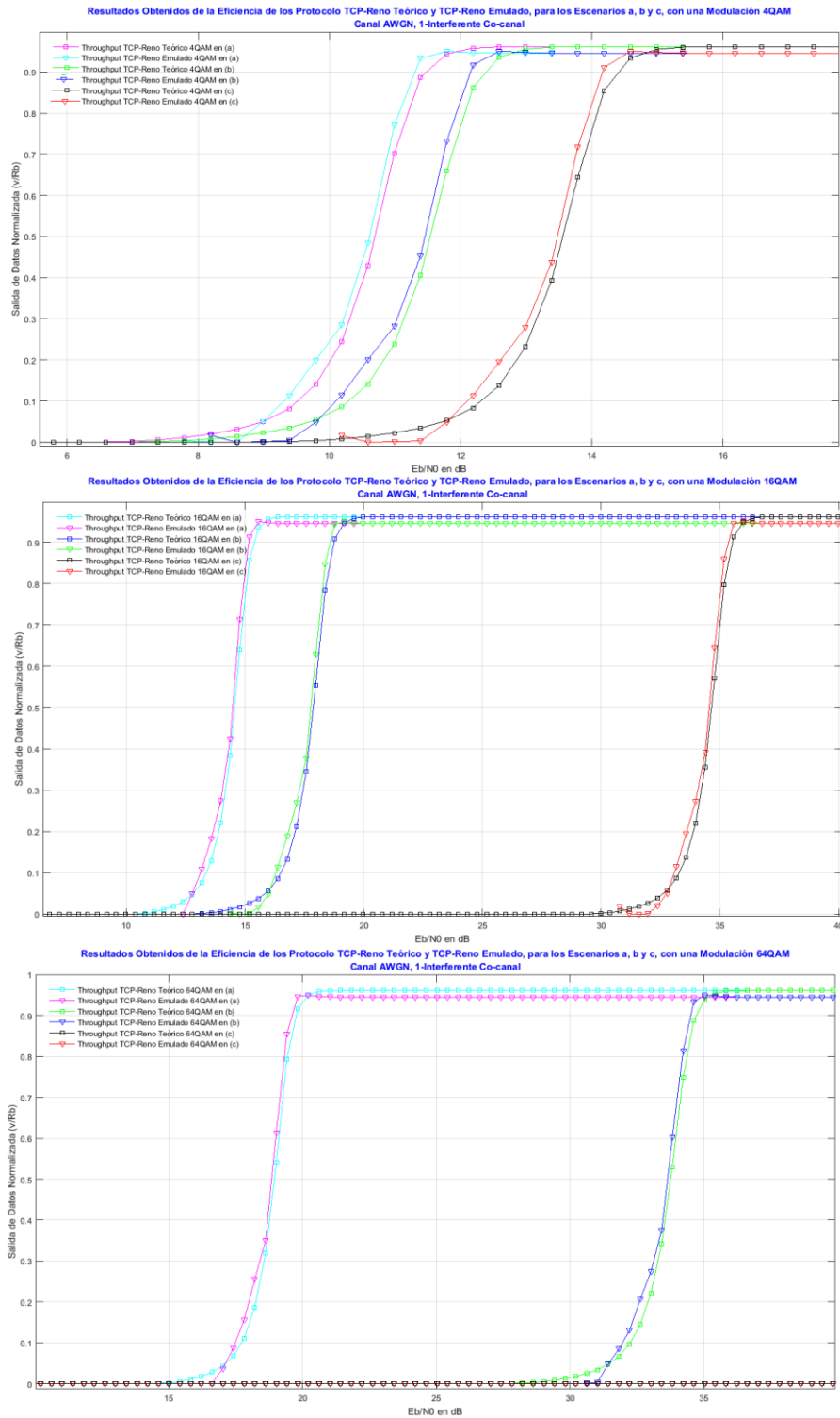
En la Fig. 60 en la última grafica se utiliza una modulación 64-QAM en los tres escenarios planteados, esta modulación es mucho más eficiente que las otras dos pero se puede observar que es mucho más inmune a la ruido y la interferencia co-canal, es notable la diferencia, se observa

que en el escenario (a) mínimo se necesita 12 dB de  $E_b/N_0$  para empezar trabajar y 21 dB para alcanzar su máximo desempeño, para el escenario (b) donde la interferencia es más fuerte mínimo se necesita 25 dB para elevar su *throughput* y alcanza su máximo *throughput* con 35 dB y en el escenario (c) donde la interferencia es muy fuerte esta modulación ya no responde a ningún nivel de  $E_b/N_0$  su *throughput* es de 0, con esto se observa la influencia de la interferencia co-canal como interviene en la transmisión de datos y el comportamiento de los distintos protocolo en los escenario planteados, se debe considerar que esto es solo para un interferente fuerte a medida que aumentan los interferentes el canal inalámbrico sufrirá de mayores inconvenientes para transmitir en estos ambientes de acuerdo a la teoría analizada en capítulos anteriores.



**Figura 60.** Resultados de Eficiencia Obtenidos en relación a los Escenarios a, b y c con modulaciones 4, 16 y 64 QAM, Múltiples Protocolos Reno, Westwood y Nack, Throughput en función del Eb/No, Canal AWGN, 1-Interferente co-canal.

En la Fig. 61 se observa en la primera grafica de arriba hacia abajo las curvas de la eficiencia del canal inalámbrica con una modulación 4-QAM en los tres escenarios planteados a, b y c tanto las curvas teóricas como las curvas emuladas datos emulados obtenidos en ambientes reales con la ayuda del trabajo de investigación de (Pilo-Pais & Olmedo , 2011) tal como se muestra en la Fig. 4, se observa cómo afecta la interferencia en el canal inalámbrico y se puede realizar el mismo análisis como se lo hizo en la Fig. 60, en la gráfica de la mitad se observa en cambio con una modulación de 16-QAM y en la última grafica se muestra las curvas usando una modulación 64-QAM, con esto se observa que tanto las ecuaciones teóricas como la práctica si concuerdan con un error mínimo.

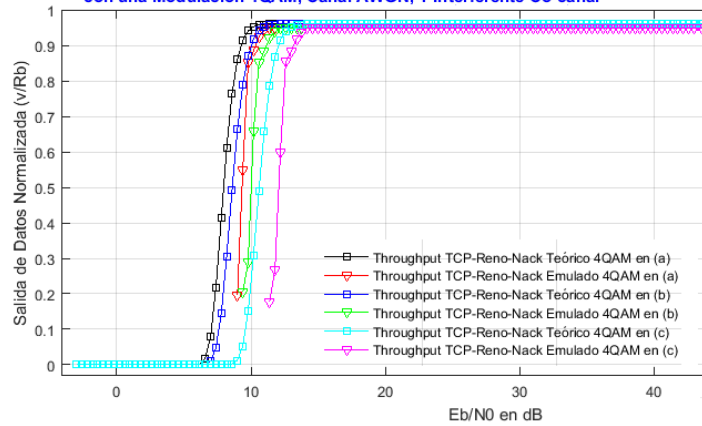


**Figura 61.** Eficiencia del canal inalámbrico bajo los protocolos TCP-Reno Teórico y TCP-Reno emulado con una modulación 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM, Canal AWGN, 1-interferente Co-canal.

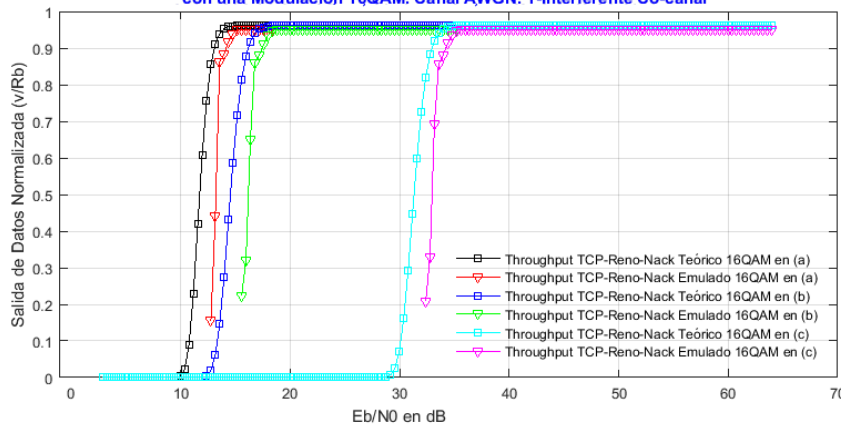
Por último se representa la Fig. 62 donde se observa las curvas de la eficiencia de canal en una modulación 4, 16 y 64-QAM bajo el protocolo TCP-Reno-NACK de la misma manera como lo hicimos en la Fig. 61 tomamos datos teóricos y datos emulados y se observa que la teoría si responde a la práctica, se puede decir que la tendencia de la curva teórica con la curva emulada es la misma, de igual manera se observa el efecto que tiene la interferencia dependiendo de las modulaciones que se utilice para la transmisión de datos.



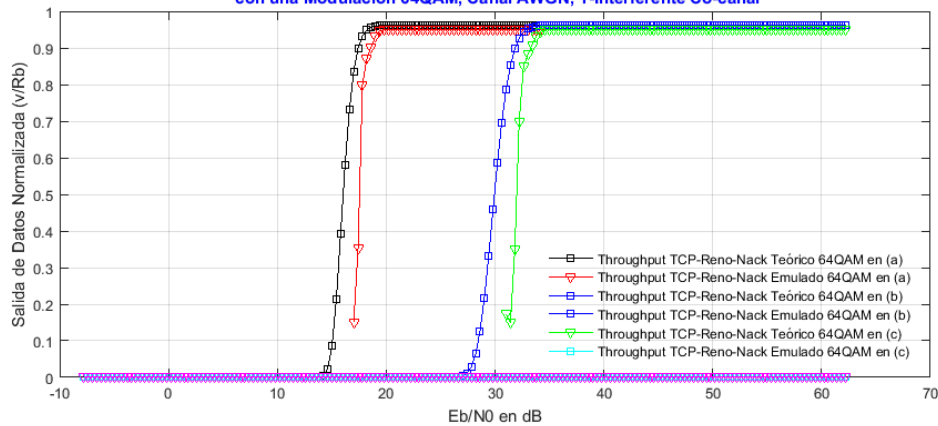
Resultados Obtenidos de la Eficiencia de los Protocolo TCP-Reno-Nack Teórico y TCP-Reno-Nack Emulado, para los Escenarios a, b y c con una Modulación 4QAM, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal



Resultados Obtenidos de la Eficiencia de los Protocolo TCP-Reno-Nack Teórico y TCP-Reno-Nack Emulado, para los Escenarios a, b y c con una Modulación 16QAM. Canal AWGN. 1-Interferente Co-canal



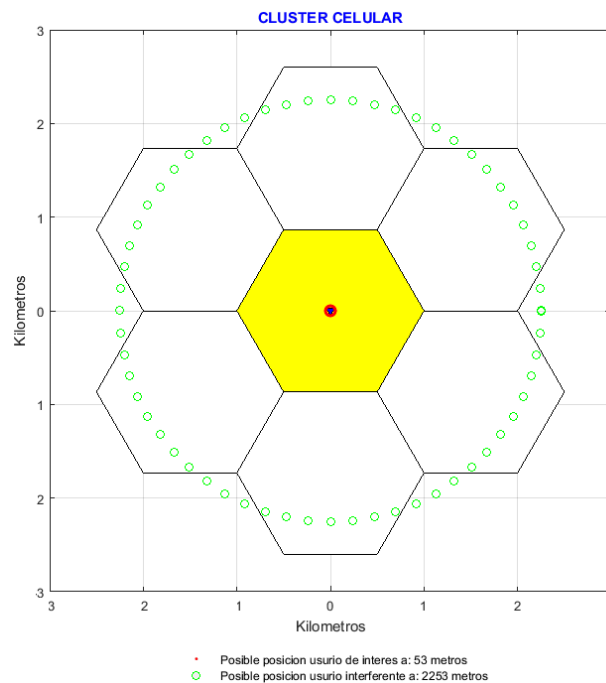
Resultados Obtenidos de la Eficiencia de los Protocolo TCP-Reno-Nack Teórico y TCP-Reno-Nack Emulado, para los Escenarios a, b y c con una Modulación 64QAM, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal



**Figura 62.** Eficiencia del canal inalámbrico bajo los protocolos TCP-Reno-NACK Teórico y TCP-Reno-NACK emulado con una modulación 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM, Canal AWGN, 1 Interferente co-canal.

#### 4.1.2 Análisis de resultados obtenidos con un interferente fuerte, canal AWGN y desvanecimiento Raleigh.

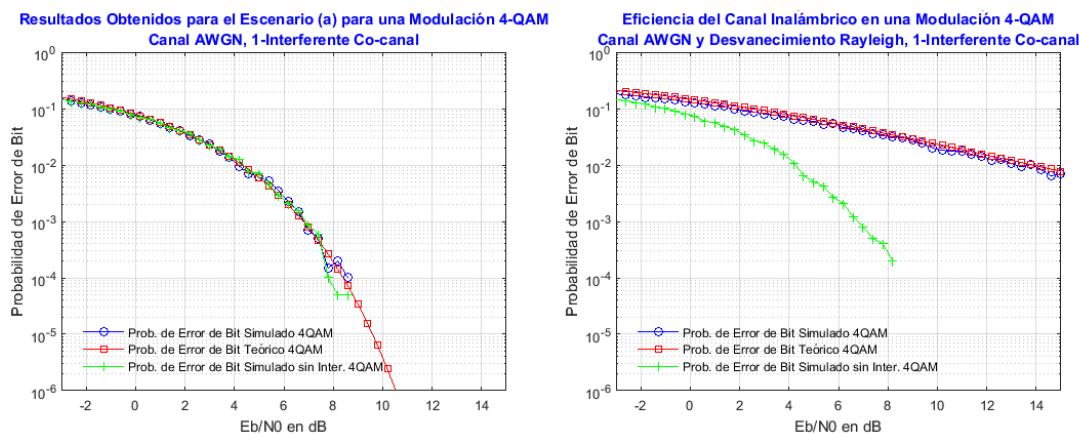
Para comprobar los efectos de la interferencia *Rayleigh* en el canal, se va a tomar un escenario de los generados por el programa tal como se muestra en la Fig. 63 el usuario de interés se encuentra a 53 metros y el interferente a 2253 metros. El programa fue calibrado con los mismos parámetros de la Tabla 6 la diferencia se encuentra en el canal inalámbrico donde se involucra al desvanecimiento *Rayleigh* como se plantea en la ecuación (126) y se va a comparar con los resultados obtenidos del canal sin desvanecimiento, el escenario escogido es:



**Figura 63.** Escenario escogido donde se introduce el desvanecimiento Rayleigh, con color verde y marcada con círculos ubica todas las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario interferente y de color rojo las posibles posiciones donde se puede ubicar el usuario de interés.

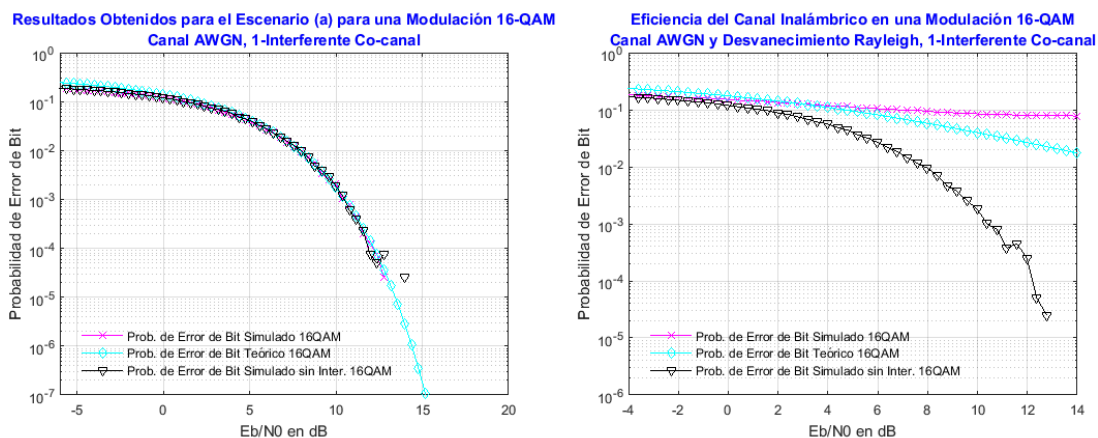
En la Fig. 64 se observa una modulación en 4-QAM, en el lado izquierdo se observa datos obtenidos sin desvanecimiento y en el lado derecho se hace presente el desvanecimiento, claramente se muestra la afectación que sufre el canal al verse presente este fenómeno, con color

verde en las dos graficas se representa la curva con datos donde no interviene ni la interferencia ni el desvanecimiento.



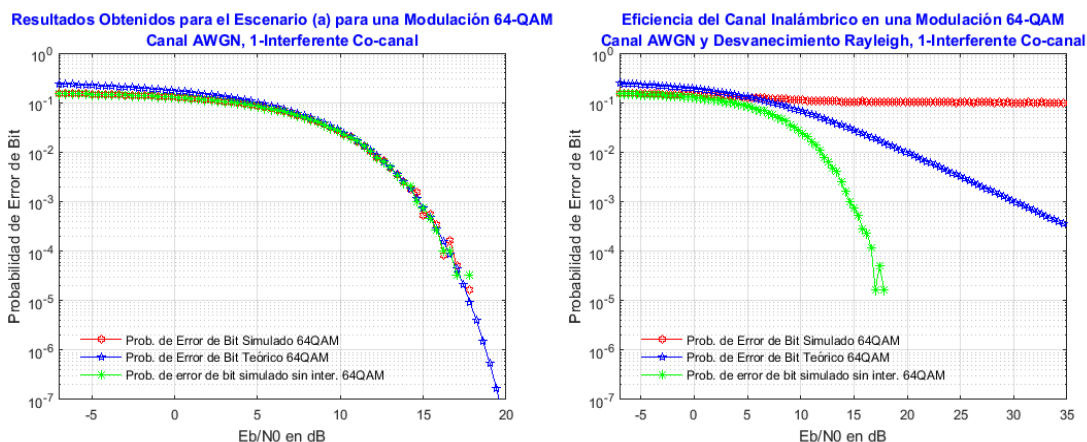
**Figura 64.** Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  para el escenario de la Figura 63 en una modulación 4-QAM, con interferencia co-canal y desvanecimiento Rayleigh.

Para una modulación de 16-QAM se tiene los resultados mostrados en la Fig. 65 en las curvas de la izquierda se observa que a esas distancias que se encuentran los usuarios el canal inalámbrico no se ve afectado el canal sigue comportándose como si fuera un canal solo con ruido AWGN, mientras que en las curvas del lado derecho ya se ve afectado por la presencia del desvanecimiento.



**Figura 65.** Probabilidad de error de bit en función del  $E_b/N_0$  para el escenario de la Figura 63 en una modulación 16-QAM, con interferencia co-canal y desvanecimiento Rayleigh.

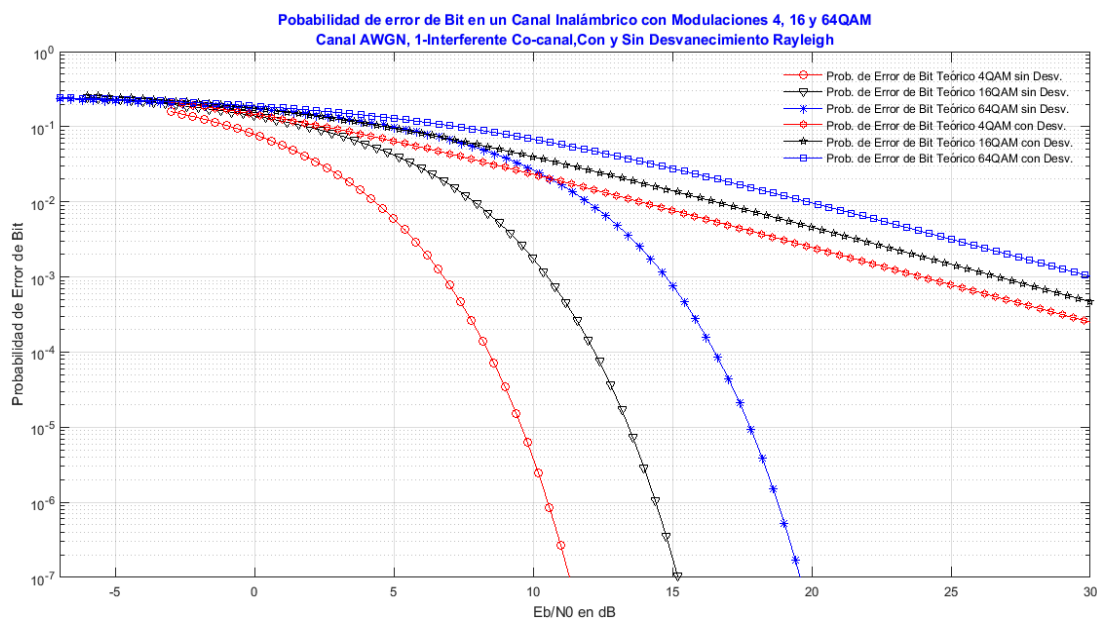
Por último, se presenta una modulación 64-QAM en la Fig. 66 se observa en las curvas de la derecha la afectación que provoca el desvanecimiento *Rayleigh* comparándolo con las curvas de la izquierda donde solo está presente el interferente co-canal.



**Figura 66.** Probabilidad de error de bit para los escenarios de la Figura 63 en una modulación 64-QAM, con interferencia co-canal y desvanecimiento Rayleigh.

En la Fig. 67 se muestra en resumen las modulaciones 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM, en la figura se encuentran las curvas con datos correspondientes a resultados con y sin interferencia en

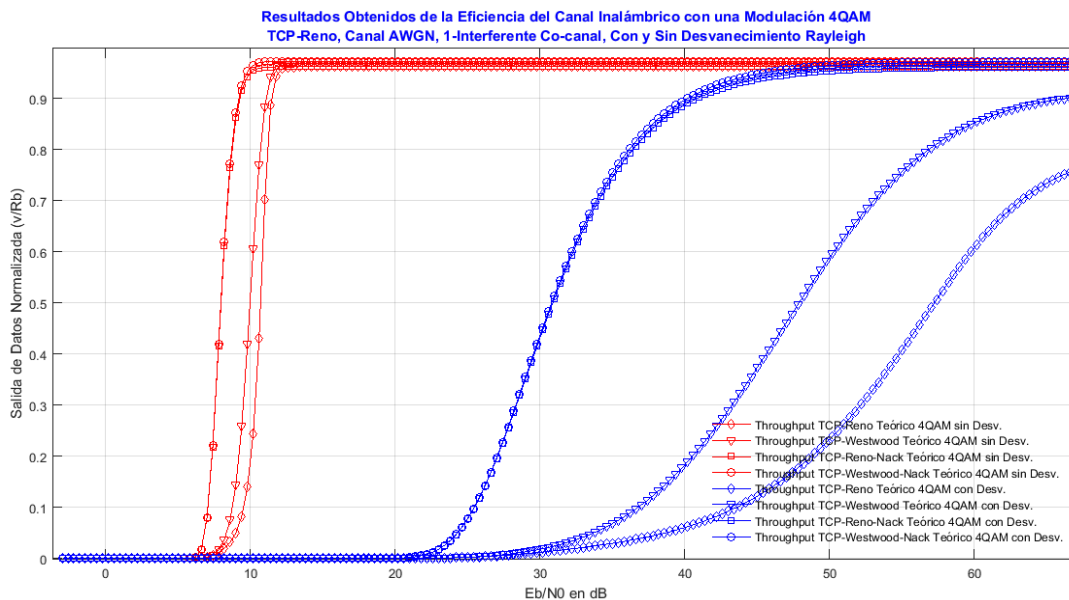
el escenario planteado, con color rojo y marca circulo se observa la modulación 4-QAM sin el fenómeno del desvanecimiento y con color rojo con marca hexágono la misma modulación pero con la presencia del desvanecimiento *Rayleigh*, claramente se observa el efecto que causa la presencia del desvanecimiento bajo los mismos parámetros, tomamos como referencia 5 dB de  $E_b/N_0$  para 4-QAM sin desvanecimiento y se produce 0,006 de Probabilidad de error de bit y los mismos 2 dB con la presencia del desvanecimiento *Rayleigh* produce 0,064 de probabilidad de error de Bit y así se puede hacer el ejercicio para las demás curvas y compararlas con y sin desvanecimiento, demostrando que el efecto *Rayleigh* tiene su importancia el momento que se pretenda entender la eficiencia del canal inalámbrico.



**Figura 67.** Resultados de la Probabilidad de erro de bit en un Canal Inalámbrico en relación a Modulaciones 4, 16 y 64QAM, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal, Con y Sin desvanecimiento Rayleigh.

En la Fig. 68 se observa una modulación 4-QAM y las respectivas curvas del *throughput* en función del  $E_b/N_0$ , se tiene datos obtenidos con y sin desvanecimiento, se observa que sin desvanecimiento con 6 dB como minino los protocolos TCP empiezan a trabajar como ya lo dijimos anteriormente a diferencia que cuando se involucra el desvanecimiento se necesita mínimo

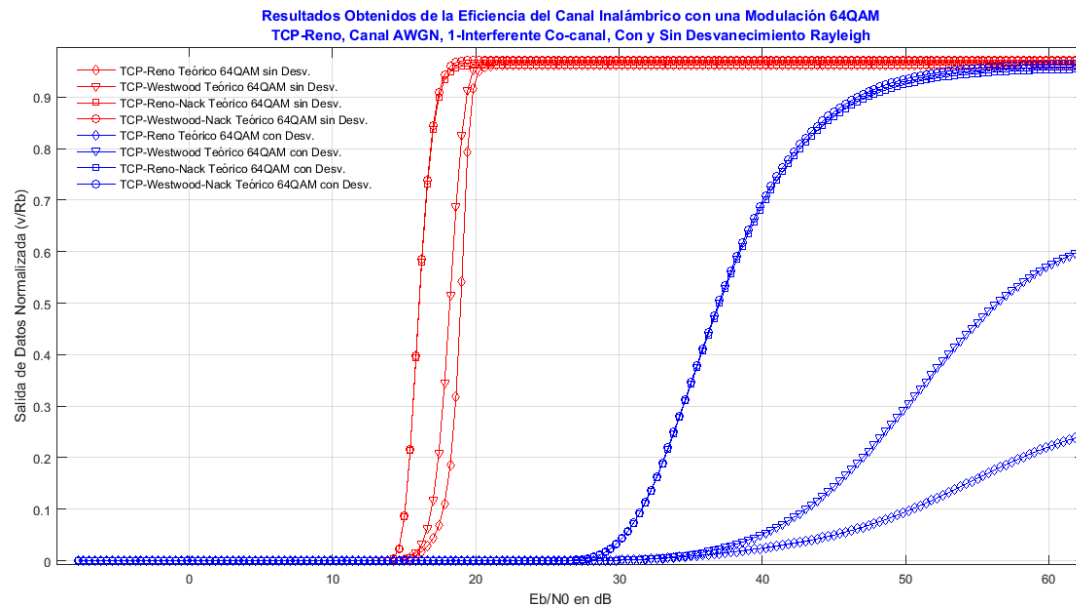
de 21 dB para que los protocolos TCP empiecen a elevar su rendimiento, en cambio a ese nivel de  $E_b/N_0$  los protocolos TCP sin desvanecimiento ya operan al 100% de su capacidad, es notable lo que el desvanecimiento *Rayleigh* provocó en el canal, analizando la región azul donde se realiza la simulación con la presencia del desvanecimiento se observa que el protocolo TCP-Reno-NACK y TCP-Westwood-NACK son los mejores, seguido por Westwood y por último Reno, en la región azul tomemos de referencia 51 dB en TCP-Reno se obtiene una salida de datos normalizada de 0,2619 que sería aproximadamente un *throughput* 523,8 Kbps mientras que TCP-Westwood con la misma referencia obtiene una salida de datos de 0,6276 aproximadamente un *throughput* de 1,255 Mbps casi tres veces mejor que TCP-Reno es decir un 36% mejor, en cambio TCP-NACK obtiene una salida de datos a ese nivel de  $E_b/N_0$  de 0,9658 aproximadamente un *throughput* de 1,93 Mbps casi dos veces mejor TCP-Westwood y cuatro veces mejor que TCP-Reno siendo un 30% mejor que Westwood y un 70% mejor que TCP-Reno.



**Figura 68.** Eficiencia del Canal Inalámbrico con Modulaciones 4QAM, TCP, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal, Con y Sin Desvanecimiento Rayleigh.

En la Fig. 69 se muestra una modulación 16-QAM bajo los protocolos planteados, la región roja representa sin desvanecimiento y con azul con desvanecimiento, si notamos la diferencia con





**Figura 70.** Eficiencia del Canal Inalámbrico con Modulaciones 64QAM, TCP, Canal AWGN, 1-Interferente Co-canal, Con y Sin Desvanecimiento Rayleigh.



## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 5.1 Conclusiones.

Como conclusión después de la elaboración del trabajo de investigación y la experimentación mediante la simulación se puede concluir que, partiendo desde el inicio del análisis de TCP se sabe que el protocolo fue diseñado para trabajar en ambientes alámbricos y por su naturaleza este cambia su *throughput* de acuerdo al tráfico o pérdida de datos trabajando en función de su ventana deslizante, mediante las ecuaciones desarrolladas se pudo obtener que el *throughput* de desempeño de TCP trabajando en ambiente inalámbricos y se concluye que está fuertemente ligado a las probabilidades de error ya sea de bit o de paquete TCP que existe en el canal inalámbrico.

Por otro lado analizando en cambio las técnicas de modulación y sus principios básicos se observa en sus expresiones matemáticas que su eficiencia se basa en su probabilidad de error de símbolo y este tiene un fuerte ligamento con los niveles de  $E_s/N_0$  que se sabe es la relación entre la energía de símbolo y el ruido espectral, y que a su vez se puede trabajarla como el  $E_b/N_0$  de esta manera se observó que la probabilidad de error de símbolo se convertiría en la probabilidad de error de bit para la modulación que se esté trabajando, se sabe que en el canal inalámbrico existen muchos parámetros que influyen en la transmisión como el ruido AWGN la interferencia y desvanecimiento entre otros y se pudo desarrollar expresiones matemáticas donde involucren a estos fenómenos para entender su funcionamiento.

Uniendo todos esta piezas del rompecabezas se puede decir y obtener la eficiencia del protocolo TCP sobre ambientes inalámbricos, con la probabilidad de error de símbolo se pudo obtener la probabilidad de error de bit y de esto se pudo obtener la probabilidad de error de paquete TCP y sabiendo que estos parámetros dependen de los niveles de  $E_s/N_0$  y  $E_b/N_0$  respectivamente, concluyendo que a la final la eficiencia del protocolo TCP en ambientes inalámbricos dependerá

de los niveles de  $E_b/N_0$  que se presentan ese momento en la transmisión, siendo los protocolos NACK los mejores para trabajar en estos ambientes como demostraron los resultados de las figuras presentadas, donde la salida de datos dependía de los niveles de  $E_b/N_0$ , con este análisis se pudo ver la eficiencia del protocolo TCP en ambientes inalámbricos bajos diferentes modulaciones 4, 16 y 64 QAM en un enlace Uplink, así se ha cumplido con los objetivos planteados y aportar con el presente trabajo a la comunidad de las telecomunicaciones esperando se realicen trabajos futuros donde se amplié el conocimiento y obtener más datos útiles para seguir desarrollando tecnologías cada vez más eficientes.

## 5.2 Recomendaciones.

El trabajado de investigación se presta para variaciones e inclusiones de otros escenarios, técnicas de modulación, interferencias, etc. pero al trabajar con ecuaciones matemáticas estas tienen por su naturaleza una complejidad porque se expresan por sumatorias, productos, etc. que dificultan la elaboración del algoritmos matemáticos desarrollados en software que responden a las ecuaciones obtenidas, a esto se le debe añadir la generación de símbolos aleatorios, codificación, decodificación, caculo de error etc., esto hace que nos encontremos limitados en software ya que fue programado en código de Matlab y este corre sobre un sistema operativo y no es hardware dedicado haciendo que para obtener datos o respuestas del programa se demore, la recomendación sería que se use tarjetas dedicadas como por ejemplo tarjetas FPGA para obtener datos más rápidos y probar a velocidades mayores y con la generación de más símbolos, incluir, decodificadores, entrelazadores, códigos de línea, códigos de bloque, códigos turbo etc., el trabajo de investigación se desarrolló para 2Mbps y 10000 símbolos y tardaba en simular 10 min con un procesador core i5, si a eso le sumamos más bloques que intervienen en una transmisión es posible que el software se cuelgue, los resultados obtenidos fueron buenos pero se pueden mejorar usando otro software y hardware adecuado.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- A. C., J. G., S. K., & C.-Y. W. (Febrero de 2002). Comparison of IP Micro-Mobility Protocols. *IEEE Wireless Communications*, 9(1).
- A. V. (Junio de 1999). *IETF: Cellular IP*. Obtenido de IETF:  
<https://www.ietf.org/proceedings/43/slides/mobileip-cellular-98dec.pdf>
- Altamirano, D. (2011). *Avaliação de Desempenho de Esquemas de Modulação e Codificação na Presença de Interferência de Co-Canal*. Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Comunicações - DECOM, Campinas.
- Balakrishnan, H. (1996). A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance Over Wireless Links. *ACM SIGCOMM*, 256-269.
- Benítez, E. (2011). *Avaliação da Eficiência Espectral Média do Enlace Reverso de Redes Celulares na Presença de Interferência de Co-Canal*. Campinas.
- Brakmo, L., O'Malley, S., & Peterson, L. (Octubre de 1994). TCP Vegas: New Techniques for Congestion Detection and Avoidance. *Computer Communication Review*, 24(4), 24-35. doi:10.1145/190809.190317
- C. F., & S. L. (2003). TCP VenO: TCP Enhancement for Transmission Over Wireless Access Networks. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, 21(2). doi:10.1109/JSAC.2002.807336
- Carrasco, F. (6 de Julio de 2014). *Estructura 7*. Obtenido de [http://estructura7.rssing.com/channel/5843076/all\\_p70.html](http://estructura7.rssing.com/channel/5843076/all_p70.html)
- Casetti, C., Gerla, M., Mascolo, S., Sanadidi, M., & Wang, R. (2002). TCP Westwood: End-to-End Congestion Control for Wired/Wireless Networks. *Wireless Networks*, 467-479. Obtenido de [http://nets.cs.ucla.edu/publication/download/41/Wn\\_02.pdf](http://nets.cs.ucla.edu/publication/download/41/Wn_02.pdf)
- Cerf, V., & Kahn, R. (1974). "A Protocol for Packet Network Interconnection". *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-22, págs. 637-648.

- Cheng, S., Cheng, Y.-h., & Leu, Y.-R. (2000). WTCP: an Efficient Transmission Control Protocol for Wired/Wireless Internetworking. *CiteSeerX*, 24(3), 176-185. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.136.9092&rep=rep1&type=pdf>
- Delgado, K. C. (2014). *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL NUEVO ALGORITMO DE TCP INALÁMBRICO EN AMBIENTES IN-DOOR Y OUT-DOOR SOBRE LAS TECNOLOGÍAS WIFI Y WIMAX*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento de Electrónica y Electronica, Sangolqui. Recuperado el Octubre de 2016, de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/9614>
- Domínguez, H. (2017). *Correo del maestro*. Obtenido de [http://www.correodelmaestro.com/publico/html5072014/capitulo2/El-efecto-Doppler-su-descubrimiento-explicacion-y-aplicaciones.html#\\*](http://www.correodelmaestro.com/publico/html5072014/capitulo2/El-efecto-Doppler-su-descubrimiento-explicacion-y-aplicaciones.html#*)
- H. W., Y. P., K. L., S. C., & J. M. (2002). Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis And Enhancement. *IEEE*, 599-607.
- Haro, R., & Olmedo , G. (2017). Sistemas de Comunicaciones. En *Sistemas de Comunicaciones* (pág. 70). Sangolqui: "En Edicion".
- Heng, L., Weimin, G., Yongmei, L., & Dongxue, Z. (2009). A New Method for TCP Congestion Control Based on AODV Congestion Indication. *IEEE*.  
doi:10.1109/WCSP.2009.5371630
- I. H., & E. Q. (Mayo de 2007). Análisis de Desempeño del Protocolo de Movilidad Celular IP. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 5(2).
- IETF:RFC 793. (1981). TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL.
- J. M., & Maguire, G. (2002). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18. doi:10.1109/98.788210
- J. R., F. C., & J. F. (s.f.). *Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones: Grupo de Comunicaciones Radio* . Obtenido de Universidad Politécnica de Cataluña:  
[http://www.grcm.tsc.upc.edu/sites/default/files/analisis\\_del\\_comportamiento\\_de\\_las\\_opciones.pdf](http://www.grcm.tsc.upc.edu/sites/default/files/analisis_del_comportamiento_de_las_opciones.pdf)

- Jacobson, V. (1988). "Congestion avoidance and control". *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*.
- Jacobson, V., Braden, R., & Borman, D. (1992). TCP Extensions for High Performance. *RFC 1323*.
- Kalden, R., Meirick, I., & Meyer, M. (2000). Wireless Internet Access Based on GPRS. *IEEE Personal Communications*, Abril.
- L. B., S. O., & L. P. (Octubre de 1994). TCP Vegas: New Techniques for Congestion Detection and Avoidance. *Computer Communication Review*, 24(4), 24-35.  
doi:10.1145/190809.190317
- Leal, R., & López, H. (2013). Análisis comparativo del desempeño de agentes TCP en redes de radio cognitiva. *researchgate*. Recuperado el Octubre de 2016, de <https://www.researchgate.net/publication/235783127>
- Ludwig, R., & Katz, H. (2000). The Eifel Algorithm: Making TCP Robust Against Spurious Retransmissions. *Comp. Commun.*, 30(1), 30-36.
- Mathis, M., Mahdavi, J., Floyd, S., & Romanow, A. (1996). TCP Selective Acknowledgment Options. *RFC 2018*.
- Mendioroz, MSc., F. (13 de Enero de 2015). *SlideShare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/fernandomendioroz/telefona-mvil-celular-0-a-4g-lteadvanced>
- mikrotikxperts. (2017). *mikrotikxperts: Modelo OSI y TCP/IP*. Obtenido de <http://mikrotikxperts.com/index.php/informacion/conocimientos-basicos/14-modelo-osi-y-tcp-ip>
- Moya, D., Altamirano, D., De Almeida, C., & Benítez, E. (2010). Evaluation of the Effects of Co-Channel Interference on the Bit Error Rate for QPSK and M-QAM Modulations. *International Telecommunications Symposium*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2016, de <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-the-Effects-of-Co-Channel-Ben%C3%ADtez-Quelal/2cbe68cc2272e2d726967c3aa315589b50c6afb8>

- Naranjo, D. B., Buenaño, D. C., & Mejía, I. T. (Noviembre de 2016). Evolución de la tecnología móvil. Camino a 5G. *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*. Recuperado el Noviembre de 2016, de <http://www.eumed.net/rev/cccss/2016/04/5G.html>
- Nokia Research Center. (Agosto de 2002). *IP Mobility Support for IPv4*. Recuperado el Noviembre de 2016, de <https://tools.ietf.org/html/rfc3344>
- Olmedo, G. (2008). "Controle de congestionamento do protocolo TCP em sistemas de comunicacao sem fio cdma usando estrategias de deteccao multiusuario, arranjo de antenas e correcao de erro fec"., (págs. 163-169). Campinas.
- Olmedo, G., & Paredes, N. (18 de Octubre de 2017). Analytical performance evaluation for M-QAM with cochannel interference in cellular networks over AWGN and Rayleigh fading channels. *Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2017 CHILEAN Conference on*. doi:10.1109/CHILECON.2017.8229603
- P. S. (Agosto de 2013). Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2(8), 47-53. Recuperado el Noviembre de 2016, de [www.ijcsmc.com](http://www.ijcsmc.com)
- Pilo-Pais, P. A., & Olmedo, G. (2011). *Verificacin del Desempeño un Nuevo Algoritmo de Control de Congestionamiento en Entornos Inalambricos Relales Mediante la Modificacion del Protocolo TCP en el Kernel de Linux*. Tesis de PreGrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Electrica y Electronica, Sangolqui.
- Proakis, J. (2001). *Digital Communications* (Cuarta ed.). Mc Graw-Hill.
- Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* (Segunda ed.). Prentice Hall.
- Reinbold, P., & Bonaventure, O. (2003). IP Micromobility protocols. *IEEE Communications surveys*, 5(1). doi:10.1109/COMST.2003.5342229

- RFC 1122. (1989). *Requirements for Internet Hosts -- Communication Layers*. Recuperado el 28 de Febrero de 2011, de IETF: <http://www.ietf.org/rfc/rfc1122.txt>
- RFC 1323. (1992). *TCP Extensions for High Performance*. Recuperado el 28 de Febrero de 2011, de IETF: <http://www.ietf.org/rfc/rfc1323.txt>
- RFC 2018. (1996). *TCP Selective Acknowledgment Options*. Recuperado el 28 de Febrero de 2011, de IETF: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2018.txt>
- RFC 2581. (1999). *TCP Congestion Control*. Recuperado el 28 de Febrero de 2011, de IETF: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2581.txt>
- RFC 793. (1981). *Transmission Control Protocol*. Recuperado el 28 de Febrero de 2011, de IETF: <http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt>
- SliderShare. (5 de Abril de 2010). *SliderShare: Probabilidad Variables Aleatorias*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/PZB200/probabilidad-variables-aleatorias>
- Tanenbaum, A. S. (2003). *“Redes de computadoras”* (Cuarta ed.). México: Pearson Educación.
- Universidad Central de Bogotá. (agosto de 2011). *ruido.wikispaces.com*. Obtenido de [ruido.wikispaces.com](https://ruido.wikispaces.com): RUIDO EN COMUNICACIONES: <https://ruido.wikispaces.com/RUIDO+EN+COMUNICACIONES>
- Vidal, C., & Enriquez, W. (2007). *Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO - OFDM*. *scielo*.
- wikipedia. (10 de Marzo de 2013). *wikipedia: Ventana deslizante*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Ventana\\_deslizante](https://es.wikipedia.org/wiki/Ventana_deslizante)
- Xylomenos, G., Polyzos, G., Mahonen, G., & Saaranen, M. (2001). TCP Performance Issues over Wireless Links. *IEEE Communications Magazine*.
- Yáñez Arias, P. C. (2010). *Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación*. QUITO: EPN. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1455>

Yun, J., Kim, B.-H., Hur, Y., So-In, C., Jain, R., & Al Tamimi, A.-K. (2009). Capacity Estimation and TCP Performance Enhancement over Mobile WiMAX Networks. *IEEE Communications Magazine*, 47(6).

Zhong, J. (s.f.). NS-2 Cognitive Radio Network model. Recuperado el Noviembre de 2016, de <http://www.ece.mtu.edu/~ljialian/>