



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TEMA:

**Evaluación comparativa de rendimiento en sistemas OFDM  
utilizando diferentes métodos de modulación digital**

AUTOR:

Chase Mosquera, Anthony Stevens

Componente práctico del examen complejo previo a la  
obtención del grado de **INGENIERO EN  
TELECOMUNICACIONES**

REVISOR:

M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

Guayaquil, Ecuador

18 de septiembre del 2020



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

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **Chase Mosquera, Anthony Stevens** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR

\_\_\_\_\_  
M. Sc. Pacheco Bonórrquez, Héctor Ignacio

DIRECTOR DE CARRERA

\_\_\_\_\_  
M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 18 días del mes de septiembre del año 2020



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

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Chase Mosquera, Anthony Stevens**

**DECLARÓ QUE:**

El **componente práctico del examen complejo, Evaluación comparativa de rendimiento en sistemas OFDM utilizando diferentes métodos de modulación digital**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 18 días del mes de septiembre del año 2020

EL AUTOR

---

CHASE MOSQUERA, ANTHONY STEVENS



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

### **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Chase Mosquera, Anthony Stevens**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Evaluación comparativa de rendimiento en sistemas OFDM utilizando diferentes métodos de modulación digital** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 18 días del mes de septiembre del año 2020

EL AUTOR

---

CHASE MOSQUERA, ANTHONY STEVENS

# REPORTE DE URKUND

**URKUND** Fernando Palacios Meléndez (edwin\_palacios)

**Documento** Chase\_Anthony.docx.docx (D79060213)

**Presentado** 2020-09-13 14:43 (-05:00)

**Presentado por** fernandopm23@hotmail.com

**Recibido** edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

**Mensaje** Revisión EC Anthony Chase Mosquera [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de estas 15 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Categoría	Enlace/nombre de archivo	
	<a href="https://docplayer.es/79187623-Universidad...">https://docplayer.es/79187623-Universidad...</a>	<input type="checkbox"/>
	<a href="https://repositorio.unicordoba.edu.co/xmlu...">https://repositorio.unicordoba.edu.co/xmlu...</a>	<input checked="" type="checkbox"/>
	<a href="https://es.qwe.wiki/wiki/Phase-shift_keying">https://es.qwe.wiki/wiki/Phase-shift_keying</a>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Fuentes alternativas</b>		
	<a href="https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitst...">https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitst...</a>	<input type="checkbox"/>
	<a href="https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitst...">https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitst...</a>	<input type="checkbox"/>
<b>Fuentes no usadas</b>		

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencia

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

TEMA: Evaluación comparativa de rendimiento en sistemas  
OFDM utilizando diferentes

métodos de modulación digital

AUTOR: Chase Mosquera, Anthony Stevens

Componente práctico del examen complejo

previo a la obtención del grado de INGENIERO EN  
TELECOMUNICACIONES

REVISOR: M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

Guayaquil, Ecuador 10 de septiembre del 2020

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

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo investigativo a mi querida familia, en especial a mis padres, hermano, tíos y a mis abuelos, al sindicato de Chóferes de Daule; por confiar en mí todos estos años y por siempre empujarme hacia adelante, ya que con su ejemplo y motivación llenaron mi corazón con inspiración y alegría; y gracias a ellos he logrado llegar hasta la recta final de todo este proceso educativo el cual me ha formado como un profesional de bien para el beneficio y progreso del pueblo ecuatoriano.

EL AUTOR

CHASE MOSQUERA, ANTHONY STEVENS

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida de fe y esperanza, también a toda mi familia por estar siempre presentes.

De igual manera expreso mi agradecimiento a la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, a la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, a mis profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

También a mi inspiración personal: Carlos, Natalia y mi novia Jennifer.

EL AUTOR

CHASE MOSQUERA, ANTHONY STEVENS



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

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_  
**M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS**  
DECANO

f. \_\_\_\_\_  
**M. Sc. HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_  
**M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**  
OPONENTE

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
Resumen .....	XII
Capítulo 1: DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE PRÁCTICO .....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivo General.....	3
1.3. Objetivos Específicos.....	3
Capítulo 2: Fundamentación teórica.....	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Concepto de OFDM.....	5
2.2.1. Proceso de transmisión.....	7
2.2.2. Proceso de modulación.....	7
2.2.3. Prefijo Cíclico.....	7
2.2.4. Sufijo Cíclico (CS).....	8
2.2.5. Mecanismo de rellenado de ceros (ZP).....	8
2.2.6. Concepto de banda de guardia.....	10
2.3. Parámetros claves en el diseño de tramas OFDM.....	10
2.4. Cuestiones clave de diseño de tramas OFDM.....	11
2.5. Beneficios de los sistemas OFDM.....	12
2.6. Inconvenientes de los sistemas OFDM.....	12
2.7. Sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).....	13
2.8. Méritos del sistema MIMO.....	14
Capítulo 3: Diseño. Simulación y Resultados.....	15
3.1. Modelo de sistema para MIMO-OFDM.....	15
3.2. ¿Por qué la modulación digital?.....	17
3.3. Técnica de modulación BPSK.....	17

3.3.1.	Implementación del modelo matemático del sistema BPSK. .	17
3.3.2.	Características de la modulación BPSK. ....	18
3.3.3.	Aplicaciones de la modulación BPSK. ....	18
3.4.	Modulaciones M-arias. ....	18
3.4.1.	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK). .....	19
3.4.2.	Implementación del modelo matemático del sistema QPSK. .	19
3.4.3.	Ventajas y desventajas del sistema de modulación QPSK. ...	20
3.4.4.	Aplicaciones de los sistemas de modulación QPSK.....	20
3.5.	Modulación de amplitud de cuadratura (QAM). ....	20
3.5.1.	Implementación del modelo matemático del sistema QAM. ...	21
3.5.2.	Ventajas y desventajas del sistema de modulación QAM. ....	22
3.5.3.	Aplicaciones de los sistemas de modulación QAM.....	22
3.6.	Modulación por desplazamiento mínimo (MSK). ....	23
3.6.1.	Implementación del modelo matemático del sistema MSK. ...	24
3.6.2.	Aplicaciones del sistema de modulación MSK. ....	24
3.6.3.	Ventajas de la modulación MSK sobre la modulación QPSK. ....	25
3.6.4.	Ventajas del sistema de modulación MSK. ....	25
3.7.	Análisis de resultados de la simulación. ....	25
	Conclusiones.....	32
	Recomendaciones. ....	33
	Bibliografía. ....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Sistema MIMO-OFDM. ....	4
Figura 2. 2: Concepto de MCM. ....	5
Figura 2. 3: Concepto de PC en OFDM. ....	8
Figura 2. 4: Conceptos de CP y CS. ....	8
Figura 2. 5: Efecto de un canal multitrayecto sobre símbolos OFDM con ZP. ....	9
Figura 2. 6: Proceso de reducción de ICI. ....	10
Figura 2. 7: Modelos de diferentes tipos de MIMO. ....	13

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Estructura de trama OFDM. ....	15
Figura 3. 2: Proceso de diseño del enfoque propuesto. ....	16
Figura 3. 3: Diseño del modulador para el sistema QPSK. ....	20
Figura 3. 4: Modulador QAM. ....	21
Figura 3. 5: Diagrama de constelación de QAM-16. ....	22
Figura 3. 6: Modulación MSK. ....	23
Figura 3. 7: Señal MSK. ....	24
Figura 3. 8: Gráfico comparativo entre BPSK, QAM y QPSK. ....	26
Figura 3. 9: Gráfico de línea de comparación de QAM en diferentes Mod. ....	26
Figura 3. 10: Gráfico de barras para QPSK. ....	27
Figura 3. 11: Gráfico de barras para MSK. ....	27
Figura 3. 12: Gráfico de barras para BPSK. ....	28
Figura 3. 13: Gráfico de barras para QAM. ....	28
Figura 3. 14: Comparación de rendimiento de QPSK, MSK, BPSK y QAM. ....	29
Figura 3. 15: Gráfico de barras de comparación de QAM en diferentes Mod. ....	29
Figura 3. 16: Gráfico de barras de comparación de QAM en diferentes Mod. ....	30

## Resumen

El presente documento presenta el desarrollo del componente práctico del examen complejo denominado “Evaluación comparativa de rendimiento en sistemas OFDM utilizando diferentes métodos de modulación digital”. En el capítulo 1 se especifica una introducción al medio de comunicación utilizado, así como el objetivo general y los objetivos específicos de este proyecto práctico. En el capítulo 2 se especifica a la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*) conocido también como el esquema de acceso múltiple para las comunicaciones inalámbricas móviles de cuarta generación (4G-LTE). Las características positivas hacen de MIMO-OFDM un candidato prometedor para comunicaciones inalámbricas de alta velocidad de datos. En el capítulo 3 se diseñan escenarios de simulación de un sistema MIMO-OFDM con diferentes modulaciones digitales (BPSK, QPSK, QAM y MSK) utilizando el software de simulación MatLab/Simulink, Posteriormente, se presentan los resultados y se analiza comparativamente las simulaciones para cada escenario en el sistema MIMO-OFDM.

**Palabras claves:** SIMULACIONES, MODULACIONES, DIGITALES, MIMO, INALÁMBRICOS, OFDM.

## Capítulo 1: DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE PRÁCTICO

### 1.1. Introducción.

El mundo inalámbrico actual, exige aplicaciones que soporten una alta velocidad de transmisión de datos con alta eficiencia espectral y confiabilidad. Este requisito requiere una tecnología que aumente la eficiencia espectral y ofrezca alta calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*) a múltiples usuarios al mismo tiempo, tal como lo hace el sistema de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) con múltiples entradas y múltiples salidas (*Multiple Input Multiple Output, MIMO*) conocido como MIMO–OFDM. (Patil et al., 2017)

Cuando se utilizan sistemas MIMO, se puede observar una ganancia de capacidad significativa, ya que explota la multiplexación espacial al tener varias antenas de transmisión y recepción. A alta velocidad de datos, para canales dispersivos, la interferencia entre símbolos (ISI) juega un papel vital. Debido al efecto de ISI, la capacidad del sistema MIMO se degrada severamente. El OFDM proporciona una solución a este problema. En OFDM, la señal original se modula mediante tonos ortogonales. (Sharma et al., 2013)

El diseño de futuros sistemas inalámbricos se ha convertido en una de las áreas clave de interés para investigadores y académicos. Múltiples antenas de transmisión y recepción ahora se utilizan ampliamente para formar el sistema MIMO utilizado en las comunicaciones inalámbricas que ofrece varios beneficios, como una mayor capacidad (bps/Hz) a través del esquema de multiplexación espacial y una mejor calidad de transmisión (tasa de error de bits, interrupción) a través del esquema de diversidad de transmisión. (Ogale et al., 2013)

El sistema OFDM se aplica a los sistemas de comunicación digital inalámbrica de alta velocidad, como WiMAX, IEEE802.11n y IEEE802.11ac. Se ha observado que la capacidad del sistema MIMO aumenta linealmente a medida que aumenta el número de antenas de transmisión con la condición

de que la información de estado del canal (*Channel State Information, CSI*) sea perfectamente conocida. (Ishihara et al., 2013)

## **1.2. Objetivo General.**

Realizar una evaluación comparativa de rendimiento en sistemas OFDM utilizando diferentes métodos de modulación digital

## **1.3. Objetivos Específicos.**

- a. Describir los fundamentos teóricos del sistema OFDM y MIMO.
- b. Diseñar los escenarios de simulación de métodos de modulación digital para sistemas OFDM en el entorno MatLab/Simulink.
- c. Evaluar comparativamente los escenarios de simulación de métodos de modulación digital para sistemas OFDM.

## Capítulo 2: Fundamentación teórica.

### 2.1. Introducción.

La implementación de OFDM por transmisión de señales inalámbricas es un enfoque innovador. Esta innovación puede emplearse con una amplia variedad de formas. Junto con otros estándares inalámbricos populares, OFDM se utiliza en otros estándares inalámbricos como la red de área metropolitana, la red de área local, la transmisión de video digital y la transmisión de audio digital. Para la tecnología móvil 4G, OFDM funciona como un candidato potencial. Con la transmisión paralela de caracteres de datos de bloque en subportadoras, se utiliza OFDM, que funciona como esquema de modulación de bloque. (LaSorte et al., 2008)

En comparación con el sistema de un solo operador, el período de tiempo OFDM es muy grande. Después del convertidor analógico/digital (ADC), la operación de la transformada de Fourier en modo inverso se realiza en cada carácter. MIMO es la disposición de múltiples entradas y múltiples salidas, como su nombre indica, y para esto se utilizan múltiples antenas para enviar y recibir datos. En la figura 2.1 se muestra un sistema de transmisión y recepción de MIMO-OFDM.

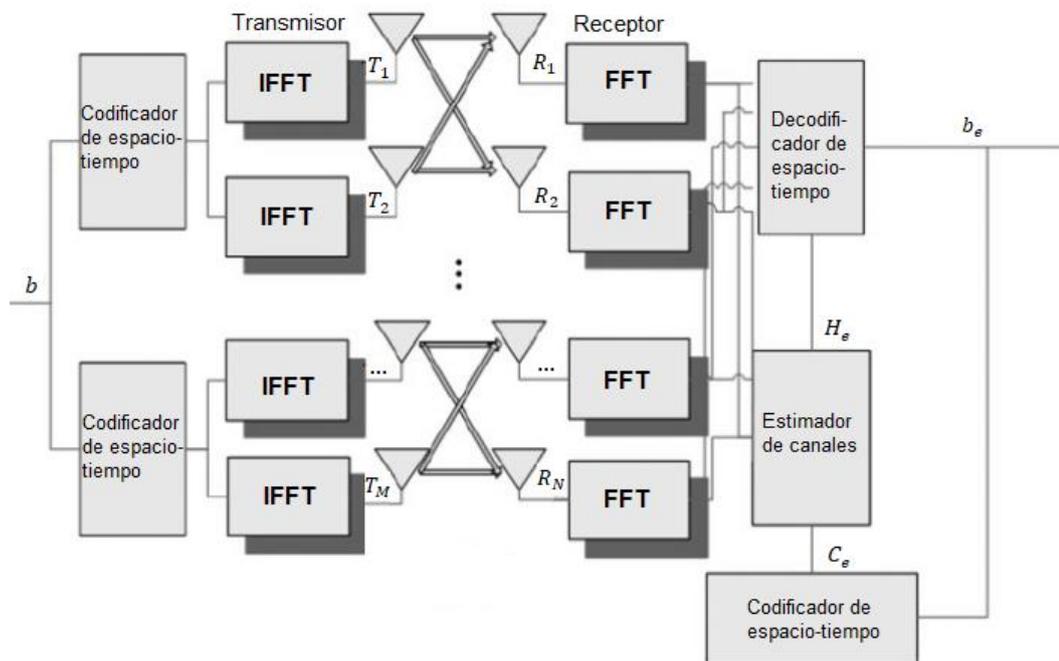


Figura 2. 1: Sistema MIMO-OFDM.  
Fuente: (Agrawal & Raut, 2011)

Para obtener tanto la diversidad como la capacidad para el desvanecimiento de la señal de combate, MIMO se implementa de muchas maneras típicas. MIMO se divide en tres categorías:

1. Con la ayuda de la mayor diversidad espacial, se mejora la eficiencia energética del sistema. Este método para aumentar la eficiencia energética incluye diversidad de retardo y varios códigos.
2. Para mejorar la capacidad, se utiliza la técnica en capas. Un ejemplo popular de esto es V-BLAST.
3. En el lado del remitente, ayuda a utilizar la información.

## 2.2. Concepto de OFDM.

OFDM está basado en los sistemas de multiplexación por división de frecuencia (*Frequency Division Multiplexing, FDM*) y modulación multiportadora (*Multi Carrier Modulated, MCM*). En la figura 2.2 se muestra el esquema de bloques del sistema de modulación multiportadora. En general, es el tipo de plan ideal con más número de portadoras que utilizan la modulación con un enfoque de vanguardia en forma digital. Aunque es conflictivo debido al proceso de desvanecimiento y obstrucciones. La cantidad de canales pequeños o subcanales diferentes reconocidos de manera contraria con la velocidad de información para cada subportadora individual, en consecuencia, mejora los tiempos de imagen. Esto se ocupa de la emisión de diferentes señales disponibles con cierto retraso en la atmósfera del tipo de trayectoria múltiple. Consecuentemente, los criterios de ortogonalidad entre sí por cada subcanal estarán satisfechos.

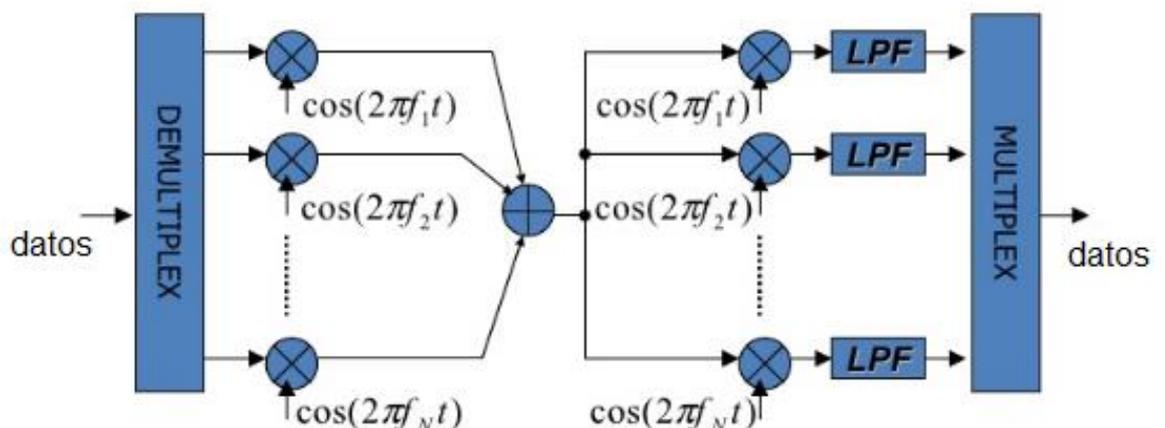


Figura 2. 2: Concepto de MCM.  
Fuente: (Agrawal & Raut, 2011)

Este criterio se basa en la separación de la portadora. Se podría elegir el espacio de la portadora, ya que debería ser igual al período de la imagen. Por último, eso es útil para reconocer una imagen y disminuir el proceso de ISI en el receptor con el procedimiento de relación.

$$\frac{1}{T} \int T a(t)b(t)dt = 0$$

donde,  $a(t)$  y  $b(t)$  son señales asumidas como distintivas. En el esquema básico de banda estrecha, la información se transmite sucesivamente en la estructura en serie y cada imagen involucra todo el ancho de banda. Mientras que, en la transmisión de información en paralelo, numerosas imágenes se transmiten todo el tiempo en cada subcanal. Posteriormente, el ancho de banda total se completa por numerosas imágenes. En la estrategia OFDM, el ancho de banda completo se divide en numerosas bandas (strips) que cumplen con los criterios de ortogonalidad.

Estas bandas están en forma superpuesta, y el rango de OFDM contiene numerosas subportadoras. Donde el canal remoto fuerza diversas reacciones de recurrencia a cada subportadora en varios momentos, cuando los datos de información se difunden a cada subportadora. Si ocurriera un desvanecimiento o una causa de desvanecimiento selectivo, algunos obtendrían diferentes formas de datos en comparación con el original, mientras que otros no transferirían datos con otro conjunto de dígitos conocido como código de corrección de errores.

Debido a esta mayor probabilidad de rectificar datos, a la luz del hecho de que el código identificado con datos socavados puede transmitirse en varias subportadoras, lo que no será con efecto del proceso de desvanecimiento. En este tipo de enfoque, cada pequeña portadora tiene una porción de datos, por lo que solo se tendrían fragmentos específicos de datos. La subportadora disponible casi soporta el nivel de efecto de desvanecimiento debido a que posee poco espacio en la velocidad de transferencia, lo que hace que el ajuste en el colector sea menos complejo.

### 2.2.1. Proceso de transmisión.

Esta es una forma de un sistema multicanal que es análogo al tema de transmisión que emplea múltiples subportadoras. En este sistema, no hay uso de osciladores individuales y filtros de banda limitada para cada subcanal. En este proceso, los espectros de las subportadoras se superponen para la eficiencia del ancho de banda. Estas señales de subportadoras ortogonales múltiples superpuestas se pueden hacer generalizando el criterio de Nyquist de una sola portadora en el criterio de multiportadora. Para la implementación de estas señales ortogonales, son útiles los procesos de transformación discreta de Fourier y de transformación inversa discreta de Fourier. Para la implementación eficiente de DFT e IDFT, se puede utilizar la transformación rápida de Fourier y la transformación inversa rápida de Fourier.

### 2.2.2. Proceso de modulación.

El transmisor OFDM juega un papel muy importante. En primer lugar, asigna los bits del mensaje en una secuencia de símbolos. Esa secuencia puede ser de QAM o PSK y posteriormente convertirse en N número de flujos paralelos. Después del proceso de conversión de serie a paralelo, cada uno de los N símbolos son llevados a cabo por diferentes subportadoras.

### 2.2.3. Prefijo Cíclico.

A continuación, se mencionan los dos métodos del prefijo cíclico (CP) para insertar el intervalo de guarda en los sistemas OFDM:

- 1) Cero rellenos
- 2) Prefijo cíclico: en este proceso, la última muestra de símbolos OFDM se copia en el frente.

Donde,  $T_g$  = longitud del prefijo cíclico en términos de muestras. Ahora la duración del símbolo OFDM extendido será  $T_{sym} = T_{sub} + T_g$  La figura 2.3 muestra dos símbolos OFDM con  $T_g$  como longitudes de muestra mientras ilustra el símbolo OFDM con longitud  $T_{sym} = T_{sub} + T_g$

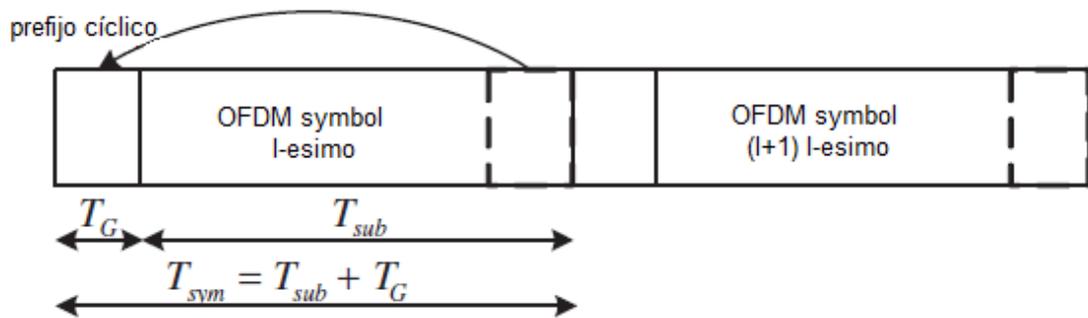


Figura 2. 3: Concepto de PC en OFDM.

Fuente: (Agrawal & Raut, 2012; Ajose et al., 2018; Rohling, 2011)

#### 2.2.4. Sufijo Cíclico (CS).

Este es también un proceso de extensión cíclica del sistema OFDM. Es la copia de la parte principal del símbolo OFDM. Siempre se inserta en la parte final del símbolo y se usa básicamente para controlar la cantidad de interferencia entre aguas arriba y aguas abajo. Tanto el prefijo cíclico como el sufijo encuentran la aplicación en VDSL basado en cremallera para suprimir el efecto ISI durante el proceso de seguro de ortogonalidad entre las señales ascendentes y descendentes. La técnica de duplexación de cremallera es similar a la multiplexación por división de frecuencia. En esto, se asignan diferentes bandas de frecuencia para transmisión ascendente o descendente. La Figura 2.4 muestra el concepto de CP y CS.

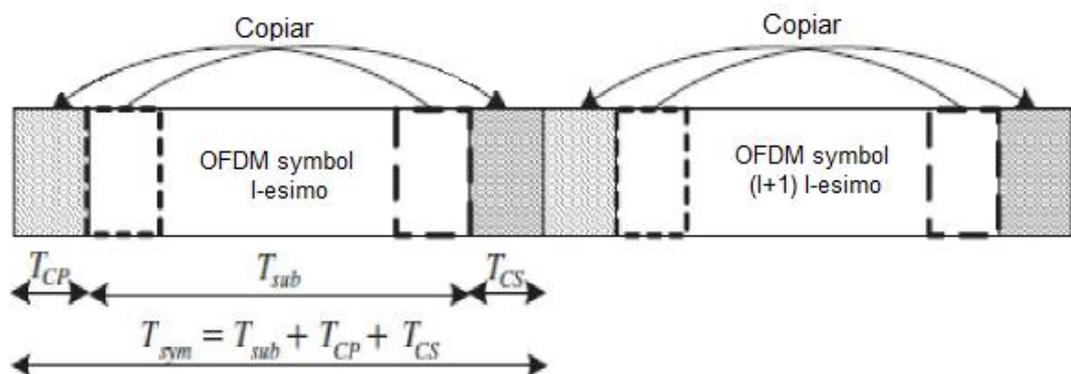


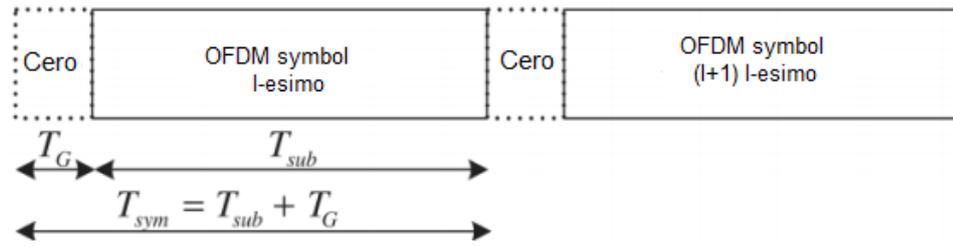
Figura 2. 4: Conceptos de CP y CS.

Fuente: (Agrawal & Raut, 2012).

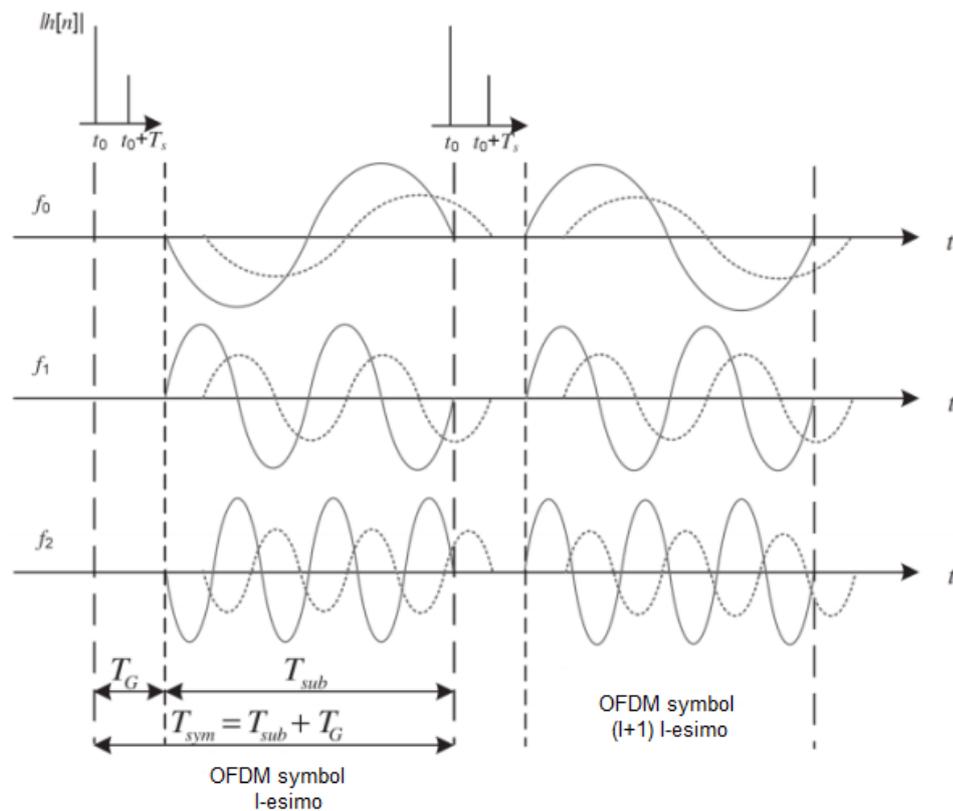
#### 2.2.5. Mecanismo de relleno de ceros (ZP).

El proceso de insertar el cero en el intervalo de protección se conoce como relleno de cero. Especialmente este tipo de proceso se utiliza en sistemas OFDM multibanda y OFDM de banda ultra ancha. La figura 2.5 (a)

muestra el símbolo OFDM con relleno cero. La figura 2.5 (b) muestra el efecto ISI del canal multitrayecto en los símbolos de OFDM para cada subportadora.



(a) Proceso de ZP.



(b) Efecto de ISI

Figura 2. 5: Efecto de un canal multitrayecto sobre símbolos OFDM con ZP.

Fuente: (Agrawal & Raut, 2012; Cho, 2010; Dinh et al., 2020).

Debido a la mayor longitud de ZP en comparación con el retraso máximo del canal multitrayectoria, una pequeña STO causa la discontinuidad del símbolo OFDM dentro de la transformación rápida de Fourier para evitar ICI, el proceso de adición de la parte del intervalo de guarda del siguiente símbolo OFDM en la parte principal de la corriente. Se emplea el símbolo de OFDM, tal como se muestra en la figura 2.6. Porque en el relleno de cero, los ceros se llenan (ZP), debido a esto la longitud de OFDM con CP o CS será mayor que el símbolo OFDM con ZP. Lo que da como resultado una pequeña longitud de

ventana rectangular para la transmisión y el espectro de tipo sinc será más ancho. La figura 2.5 muestra que el símbolo OFDM con ZP tendrá una pequeña ondulación dentro de banda y una gran potencia fuera de banda, lo que permite utilizar una gran potencia para la transmisión con la potencia fija de transmisión máxima.

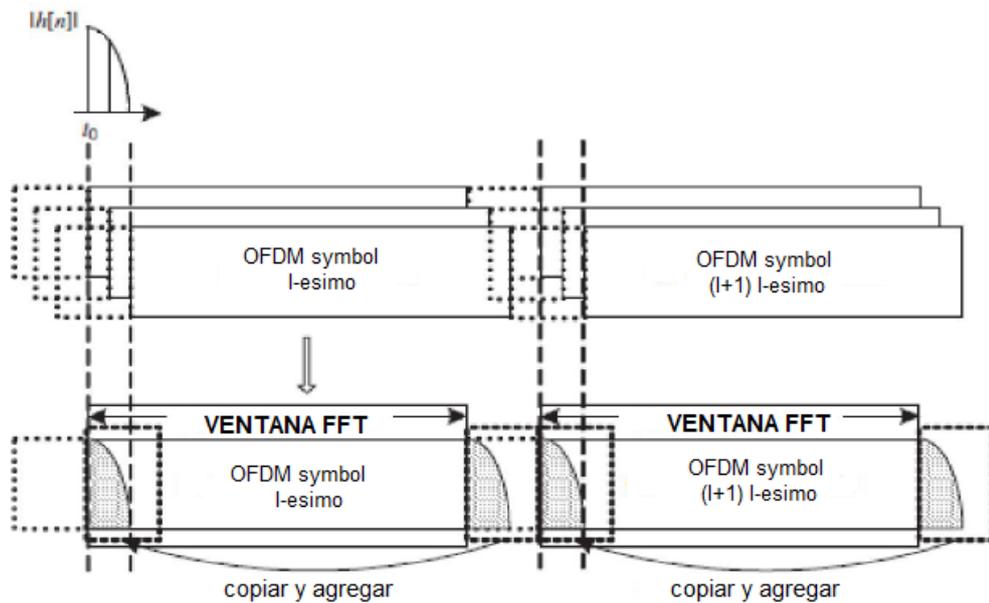


Figura 2. 6: Proceso de reducción de ICI.

Fuente: (Agrawal & Raut, 2011)

### 2.2.6. Concepto de banda de guardia.

Cada componente de subportadora con la duración  $T_{sub}$  de un símbolo OFDM se puede considerar como una señal de tono único que se multiplica por una ventana rectangular que tiene la función sinc como espectro con un ancho de banda de cruce cero de  $2/T_{sub}$  y la longitud de la ventana es  $T_{sub}$ . Por lo tanto, el espectro de potencia de la señal OFDM será la suma de la función sinc desplazada en frecuencia y tendrá más potencia fuera de banda de modo que se incurra en interferencia de canal adyacente. Por lo tanto, para reducir el efecto de la interferencia del canal adyacente, se requerirá una banda de guarda.

### 2.3. Parámetros claves en el diseño de tramas OFDM.

Hay muchos parámetros importantes necesarios para tener en cuenta el pensamiento genuino al crear y delinear el marco OFDM.

- 1) **Selección de cantidad de subportadora:** La tasa de información puede reducirse debido a una mayor cantidad de subportadora en el sistema. Esto dará como resultado una menor cantidad de dispersión que se ha producido debido al proceso de retraso en la ruta múltiple. El proceso de sincronización será más difícil en el lado del destino debido a la mayor cantidad de estas subportadoras.
- 2) **Importancia de la duración del símbolo:** debe ser muy alto. Si el valor de esto es muy alto, entonces se puede reducir la pérdida de señal a ruido. No debe ser lo suficientemente alto, su valor máximo puede crear un problema de gran número de subportadoras que afecta el costo del sistema y la naturaleza del sistema.
- 3) **Importancia de la banda de guarda:** en comparación con el valor RMS de propagación de retardo, su valor debería ser mayor hasta cuatro veces. El sistema será efectivo y proporcionará la mejor salida con este valor.
- 4) **Importancia del concepto de espacio entre subportadoras:** este es un parámetro muy importante. Debe seleccionarse de manera adecuada para que no haya ningún efecto en el lado del destino, es decir, en el tema de la sincronización. El ancho de banda del sistema y la cantidad de subcanal deben tenerse en cuenta durante la selección de este parámetro.
- 5) **Selección del plan de modulación:** este es un aspecto muy importante en el campo de la comunicación. Esto puede ser de tipo analógico o digital. Hay muchos métodos de modulación en el lado de entrada y demodulación en el lado de destino. La selección del plan adecuado depende del tipo de tarea o aplicación para la que alguien tiene que seleccionar el plan. Se debe tener en cuenta la simplicidad, el costo, la confiabilidad y la eficiencia del marco mientras se lleva a cabo el proceso de selección.

#### **2.4. Cuestiones clave de diseño de tramas OFDM.**

Hay muchas cuestiones importantes que se deben tener en cuenta al pensar genuinamente al crear y delinear el marco OFDM.

- 1) **Ancho de banda del marco:** este es el factor principal. Este es el único factor que ayuda en el cálculo de la cantidad de subportadora para el marco. Su valor debe estar en el lado superior.
- 2) **Importancia de la tasa de bits:** el marco debe estar de acuerdo con la demanda de las industrias públicas con una tasa significativa de información.
- 3) **Importancia de la propagación de retrasos:** este factor puede verse afectado por la atmósfera de trabajo del cliente. Los resultados matemáticos tendrán un valor diferente para diferentes tipos de condiciones de trabajo. Por ejemplo, atmósfera interior o exterior.
- 4) **Importancia del rango Doppler:** este es un parámetro muy importante y juega un papel muy importante en el diseño del marco. El valor de este parámetro variará según el rango de velocidad del cliente. Ahora puede haber diferentes tipos de clientes para diferentes ambientes de trabajo. Por lo tanto, el valor de este parámetro variará según las especificaciones del cliente.

## **2.5. Beneficios de los sistemas OFDM.**

- 1) Debido a la característica de superposición, proporciona una utilización adecuada del espectro disponible.
- 2) Altamente resistente al proceso de desvanecimiento selectivo de frecuencia.
- 3) Con un solo rango de frecuencia, muy eficiente en el campo de la comunicación para diversas tareas.
- 4) Al aplicar el proceso de CP puede anular el efecto de ISI e ICI.
- 5) Al aplicar la técnica de codificación adecuada en el canal, se evita el proceso de pérdida de símbolo.

## **2.6. Inconvenientes de los sistemas OFDM.**

- 1) Debido a la gran proporción de fuerza de pico a normal, da como resultado un marco de flujo para disciplinar la inmersión y no lineal, y disminuye el dominio de la fuerza de los marcos.

- 2) La inserción de la banda de protección disminuye la productividad espectral y, a lo largo de estas líneas, todo el límite del canal afectado.
- 3) Problema de sincronización en la parte del colector

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

Múltiples caminos están generando una clave normal para el transporte de información en las tramas de conversación Wi-Fi. El canal Wi-Fi ahorra diversas impedancias al canal transportado y la reacción de la señal. Influye en la señal para ir en caminos múltiples entre transmisor y receptor. El destinatario obtiene símbolos idénticos de impresión en las entregas de aplazamiento. Los aplazamientos ocurren debido a difracciones, reflejos, sombras, refracciones, etc. Todo esto causado por las estructuras, los árboles, las naves aéreas, la suciedad, la temperatura, etc.

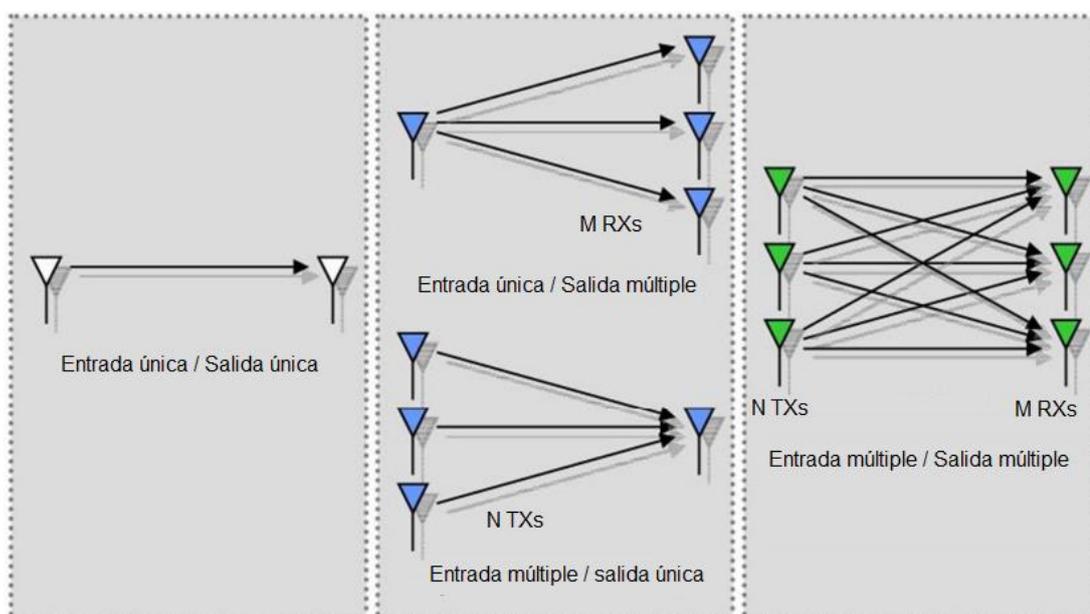


Figura 2. 7: Modelos de diferentes tipos de MIMO.  
Elaborado por: Autor.

La diferencia puede estar en la salida de la etapa alternativa o el tamaño de las señales. La trayectoria múltiple influye y difiere el perfil, disminuye la efectividad del canal, la salida y el beneficiario de datos corruptos. El impacto inteligente de múltiples rutas de MIMO es la utilización para ampliar el límite de la trama. En la señal de desvanecimiento de Rayleigh pasa por varias formas y se piensa que se debe tomar después de la conducta libre en cada

sentido, la etapa circula constantemente entre 0 y 2 y las significaciones cambian al azar. Mientras que en Rician se desvanece la línea de vista (LOS), es decir, una de las formas de coleccionista es mucho más sólida que la otra.

## **2.8. Méritos del sistema MIMO.**

- a. Resulta en una producción de aumento de QoS y área de cobertura.
- b. Mayor crecimiento de multiplexación que es la mejora del rendimiento de la eficiencia espectral.
- c. Gran ganancia de diversidad, menos posibilidades de pérdida de datos, mejora la calidad del servicio.
- d. Gran ganancia de multiplexación, que en consecuencia mejora la capacidad espectral.
- e. Se reduce la interferencia de ambos canales, lo que es beneficioso para mejorar la capacidad del sistema celular.

## Capítulo 3: Diseño. Simulación y Resultados.

### 3.1. Modelo de sistema para MIMO-OFDM.

Tanto para fines de modulación como de demodulación, la técnica multiportadora puede ejecutarse perfectamente con la ayuda de la transformada rápida de Fourier (FFT) y FFT inversa (IFFT) respectivamente. La forma de onda que se envía contiene dos parámetros, el primero son los coeficientes de dominio de frecuencia” y en el lado de salida esto contiene muestras de dominio de “tiempo”. La estructura de tramas de este enfoque se explica en la figura 3.1.

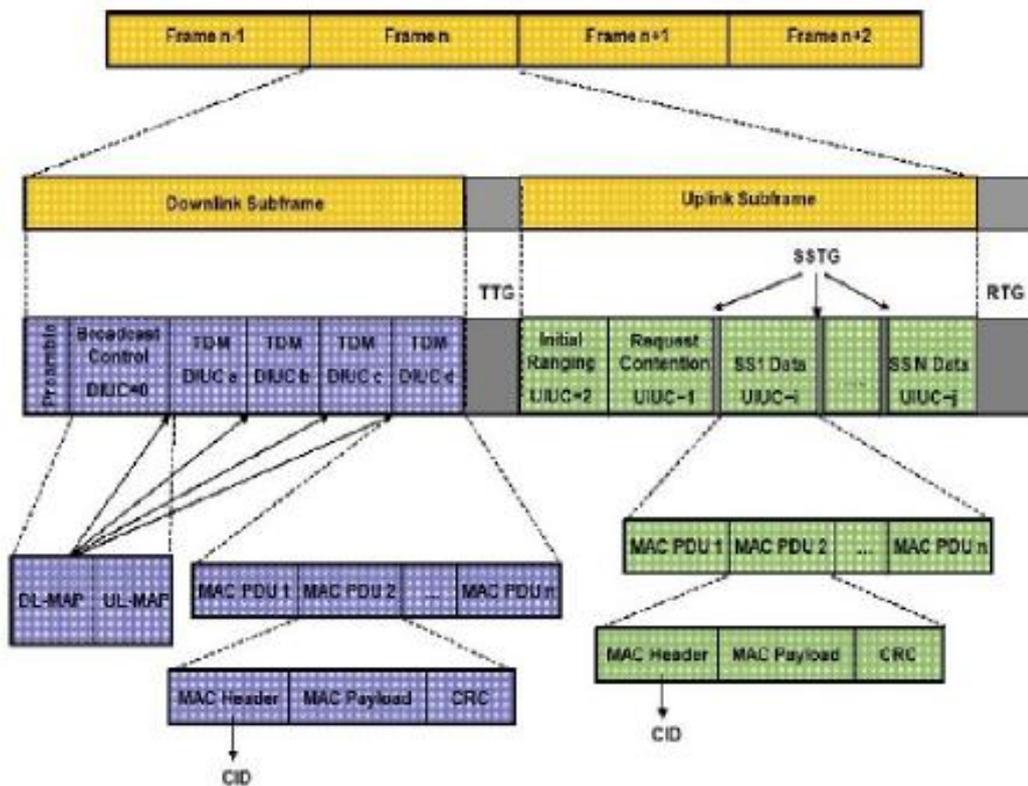


Figura 3. 1: Estructura de trama OFDM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.2 muestra la secuencia del proceso de diseño del sistema MIMO-OFDM. Como se muestra en la figura, el proceso comienza desde la generación del mensaje digital que pasa por el proceso de modulación OFDM. El proceso de diseño de la modulación OFDM comprende subportadora de datos, declaración de subportadora de datos y diseño de subportadora piloto. El sistema propuesto se simula en 100 cuadros. En el sistema propuesto, se ha asumido el desvanecimiento plano con el entorno de desvanecimiento

Rayleigh. Después de este aditivo, se agrega ruido gaussiano blanco. Básicamente esto se agrega para imitar el efecto de un proceso aleatorio.

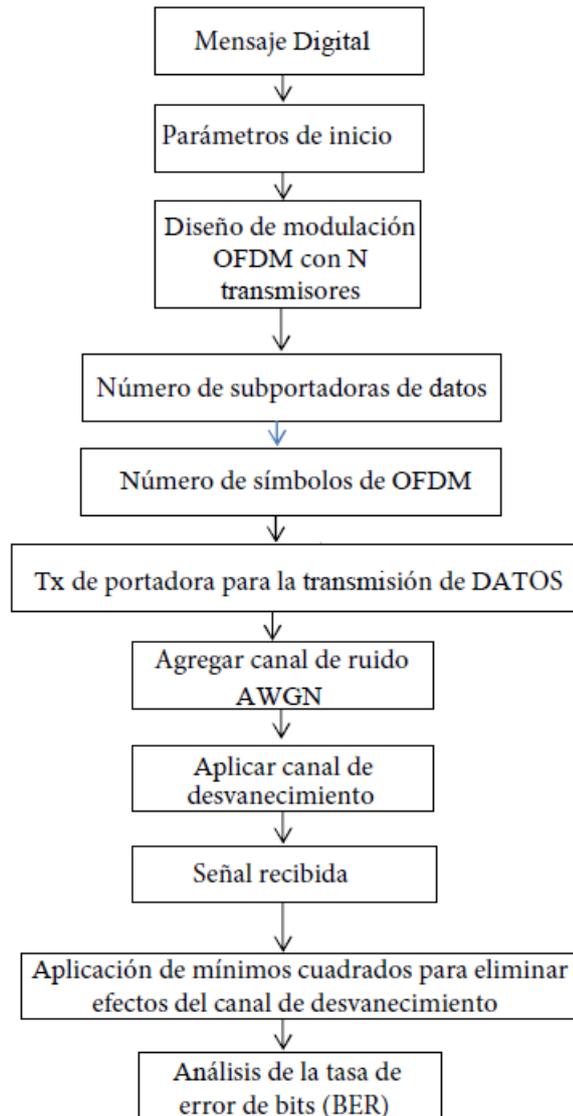


Figura 3. 2: Proceso de diseño del enfoque propuesto  
Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 1: Parámetros del sistema MIMO-OFDM utilizados para la simulación.

Parámetro	Valor
Número de tramas	100
Longitud FFT	256
Antena transmisora	2, 4, 8
Antena receptora	2, 4, 8
Modulaciones	BPSK, QPSK, MSK y QAM
Tipo de desvanecimiento	Rayleigh

Elaborado por: Autor.

### 3.2. ¿Por qué la modulación digital?

Debido a la gran cantidad de beneficios de las técnicas de modulación digital en comparación con las técnicas de modulación analógicas, el uso de técnicas de modulación digital aumenta día a día en el campo de las comunicaciones inalámbricas. A continuación, se discuten en las siguientes secciones las técnicas de modulación que son utilizadas en la implementación del sistema OFDM.

### 3.3. Técnica de modulación BPSK.

Esta es la forma muy simple y fácil de modulación por desplazamiento de fase binaria. En la modulación PSK la fase de la portadora se cambia entre dos o más valores en función de la señal digital de modulación de entrada. En este caso, se aplica el desplazamiento de fase  $180^\circ$  en las transiciones de bits. En esta técnica, solo se tienen en cuenta dos fases separadas por  $180^\circ$ . Debido a este factor, puede denominarse 2-PSK. También se conoce como incrustación de inversión de fase.

#### 3.3.1. Implementación del modelo matemático del sistema BPSK.

A continuación, se presenta la expresión que modela matemáticamente a la modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) también conocido como 2-PSK:

$$S_n(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c(t) + \pi(1 - n)), n = 0,1.$$

En otras palabras, en este modelo de BPSK solamente se tienen en cuenta dos fases, es decir  $(0, \pi)$ , definidas para un símbolo "0" por:

$$S_0(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t)$$

Y para un símbolo "1", definida por:

$$S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t)$$

Donde,  $f_c$  es la frecuencia de la señal portadora. El espacio de señal se puede representar mediante la función única que se muestra a continuación:

$$\Phi(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t)$$

Aquí, se deduce que:

$$1 = \sqrt{E_b} \phi(t)$$

$$0 = -\sqrt{E_b} \phi(t)$$

### 3.3.2. Características de la modulación BPSK.

A continuación, se enumeran tres características principales del sistema de modulación BPSK:

- 1) Tiene un ancho de banda inferior al de la señal BFSK.
- 2) Tiene muy buena inmunidad al ruido.
- 3) Tiene el mejor rendimiento de las tres técnicas de modulación digital en presencia de ruido, ya que produce el valor mínimo de probabilidad de error.

### 3.3.3. Aplicaciones de la modulación BPSK.

A continuación, se enumeran las aplicaciones más importantes en las que se emplea el sistema de modulación.

- 1) Es una técnica elemental que es muy utilizada en varios estándares inalámbricos.
- 2) Aplicaciones telemétricas del espacio profundo.
- 3) Procesamiento de imágenes médicas de alta velocidad de datos para cápsulas endoscópicas.
- 4) Utilizado en varias aplicaciones como CDMA 2000
- 5) Se utiliza en redes de computadoras portátiles o aplicaciones de comunicaciones portátiles.

### 3.4. Modulaciones M-arias.

En todas las técnicas de modulación binaria, la eficiencia del ancho de banda es de 1 bit/símbolo/s. Por ejemplo, para  $M=2$  con el fin de aumentar el

valor de eficiencia del ancho de banda de M se incrementa más allá de 2. El esquema de modulación resultante se conoce como esquemas de modulación digital M-aria.

### 3.4.1. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK).

Es una técnica de codificación M-aria con M=4. En esta técnica, en el caso de una sola frecuencia portadora, existe la posibilidad de cuatro fases de salida diferentes. Para estas fases de salida habrá cuatro combinaciones de entrada diferentes para llevar a cabo estos cambios de fase. En este método, se crean los diferentes grupos de dos bits de datos de entrada. Estos grupos de dos bits se conocen como dibits, esto indica que la velocidad en la modulación no varía, pero transmite doble información. Esto se conoce como desplazamiento de fase en cuadratura.

### 3.4.2. Implementación del modelo matemático del sistema QPSK.

La implementación del modelo matemático de la modulación QPSK es más general que la de modulación BPSK, y está definida como,

$$S_n(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + (2n - 1)\pi \frac{\pi}{4}\right)$$

Dónde,  $n = 1, 2, 3, 4$ , esto produce las cuatro fases  $\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$  y  $\frac{7\pi}{4}$  según sea necesario. Esto da como resultado un espacio de señal bidimensional con función de base de unidad. En la figura 3.3 se muestra el modulador del sistema QPSK. La función de primera base se utiliza como componente en fase de la señal:

$$\Phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t)$$

Y la función de segunda base se utiliza como el componente de cuadratura de la señal:

$$\Phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_c t)$$

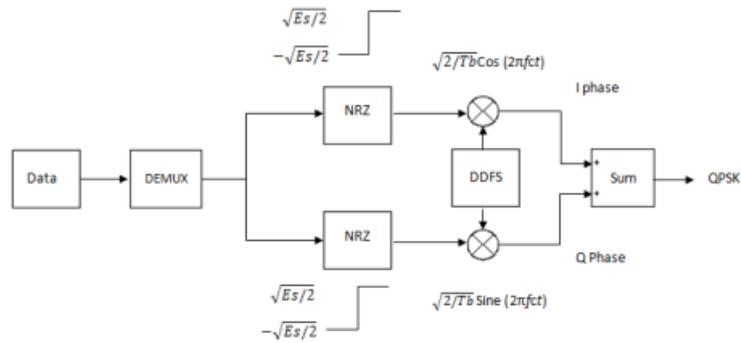


Figura 3. 3: Diseño del modulador para el sistema QPSK.  
Elaborado por: Autor.

### 3.4.3. Ventajas y desventajas del sistema de modulación QPSK.

A continuación, se enumeran dos ventajas principales del sistema de modulación QPSK:

- 1) Requiere menos ancho de banda.
- 2) La velocidad de transmisión es más alta.

A continuación, se enumeran dos desventajas principales del sistema de modulación QPSK:

- 1) Interferencias entre canales grandes en QPSK.
- 2) Es sensible a las variaciones de fase.

### 3.4.4. Aplicaciones de los sistemas de modulación QPSK.

Esta técnica encuentra aplicaciones en diferentes estándares inalámbricos como:

- 1) Radio terrestre troncalizada (*Terrestrial Trunked Radio, TETRA*).
- 2) Sistema de telefonía personal (*Personal Handy-phone Systems, PHS*).
- 3) Celulares digitales personales (*Personal Digital Cellular, PDC*).
- 4) Servicio de distribución local multipunto (*Local Multipoint Distribution Service, LMDS*).
- 5) Radiodifusión digital en banda L, como servicios de música, datos y video.

### 3.5. Modulación de amplitud de cuadratura (QAM).

También se conoce como amplificación por amplitud de fase, ya que tanto la amplitud como la fase varían según la modulación de la señal digital.

La modulación de amplitud de cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation*, QAM) explota la información de amplitud y fase de la señal portadora. Es decir, que se puede ver como una extensión de la modulación PSK multifase, donde en las dos señales de banda base se generan independientemente una de la otra, tal como se muestra en la figura 3.4.

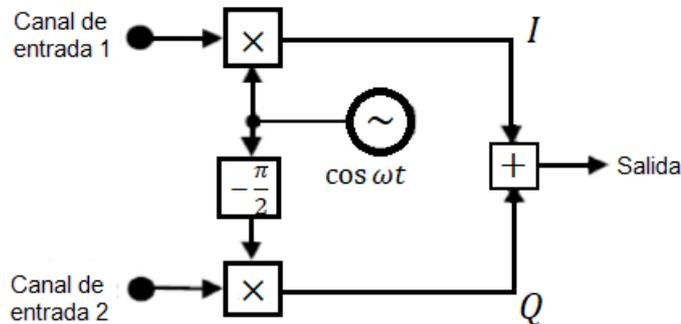


Figura 3. 4: Modulador QAM  
Elaborado por: Autor.

### 3.5.1. Implementación del modelo matemático del sistema QAM.

La implementación del modelo matemático de la modulación QPSK es más general que la de modulación QAM, y está definida como,

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_0}{T}} a_i \sin(2\pi f_c t) \dots \dots \dots 0 \leq t \leq T$$

$E_0$ = energía de la señal con la amplitud más baja.  $a_i$  y  $b_i$  = un par de enteros independientes elegidos de acuerdo con la ubicación del punto de mensaje pertinente.

La señal  $S_i(t)$  consta de portadores de cuadratura de dos fases, cada uno de los cuales está modulado por un conjunto de amplitud discreta; de ahí el nombre de modulación de amplitud en cuadratura. La señal  $S_i(t)$  se puede ampliar en términos de funciones básicas:

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t) \dots \dots \dots 0 \leq t \leq T$$

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t) \dots \dots \dots 0 \leq t \leq T$$

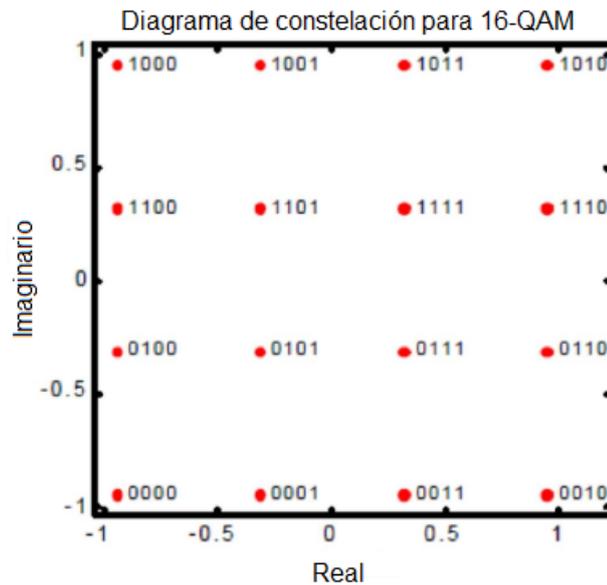


Figura 3. 5: Diagrama de constelación de QAM-16  
Elaborado por: Autor.

### 3.5.2. Ventajas y desventajas del sistema de modulación QAM.

A continuación, se enumeran dos ventajas principales del sistema de modulación QAM:

- 1) Se reducen los errores de datos.
- 2) Seguro para la transmisión.

A continuación, se enumeran dos desventajas principales del sistema de modulación QAM:

- 1) Es más susceptible al ruido.
- 2) Amplificadores lineales son menos eficientes y consumen más energía.

### 3.5.3. Aplicaciones de los sistemas de modulación QAM.

Esta técnica encuentra aplicaciones en diferentes tecnologías de las telecomunicaciones:

- 1) Acceso múltiple por división de código (*Code Division Multiple Access, CDMA*).
- 2) Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*).
- 3) Ampliamente utilizado como esquema de modulación para el sistema de telecomunicaciones digitales.

- 4) Muy utilizado en el sistema de comunicaciones por fibra óptica.
- 5) Sistemas en microondas terrestres y DVB-T mediante la modulación 32-QAM.
- 6) Utilizado en televisión digital por cable y cable módem.
- 7) Utilizado para comunicaciones de personal, WLANS y radiodifusión.
- 8) Sistemas de transmisión de televisión en color PAL y NTSC.
- 9) Muy utilizado en comunicaciones inalámbricas fijas y móviles (celular).
- 10) Muy utilizado en radio digital de microondas, módems, microondas terrestres; decodificador de banda ancha, DVB-C, DVB-T, MMDS.

### 3.6. Modulación por desplazamiento mínimo (MSK).

En la modulación QPSK se produce un cambio de fase abrupto en la transición del intervalo de bits. Para superar este problema, se introduce un tipo de modulación conocida como la modulación de fase continua. En esta técnica, la fase de la forma de onda resultante está tan ajustada que la forma de onda pasa a través de cero en el intervalo de tiempo  $k_{tb}$ .

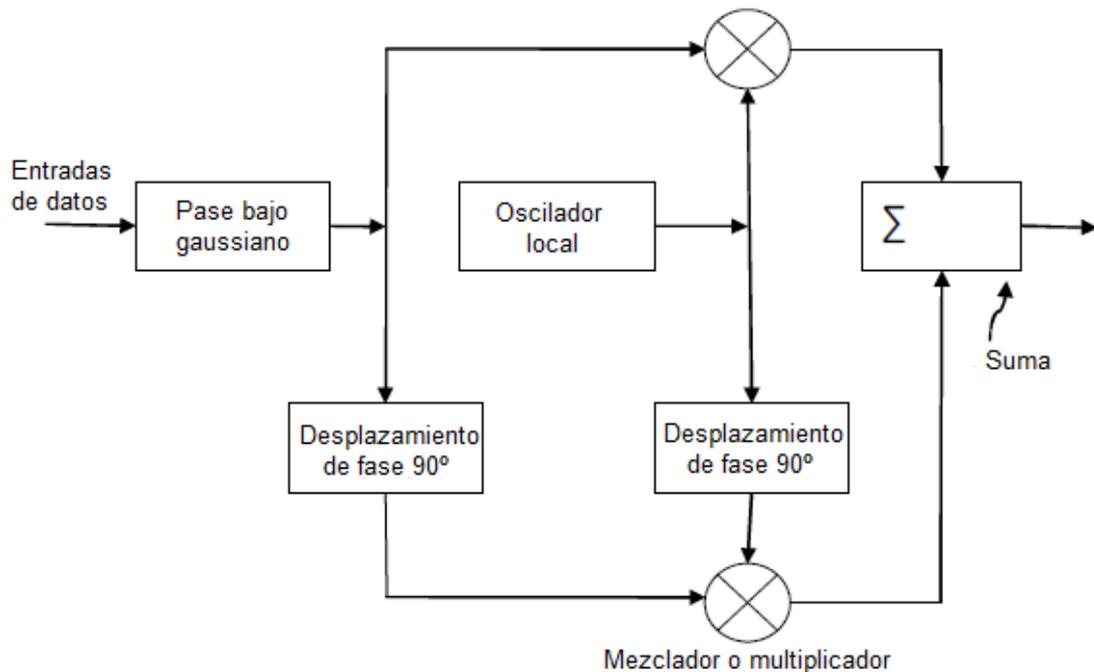


Figura 3. 6: Modulación MSK  
Elaborado por: Autor.

Donde  $T_b$  = intervalo de bits. La fase y la frecuencia de la forma de onda son tan variadas que la fase total de la forma de onda es cero o  $180^\circ$ , lo que

hará que la forma de onda tenga una transición más suave de un intervalo de bits a otro. MSK tiene mayor ancho de banda que QPSK.

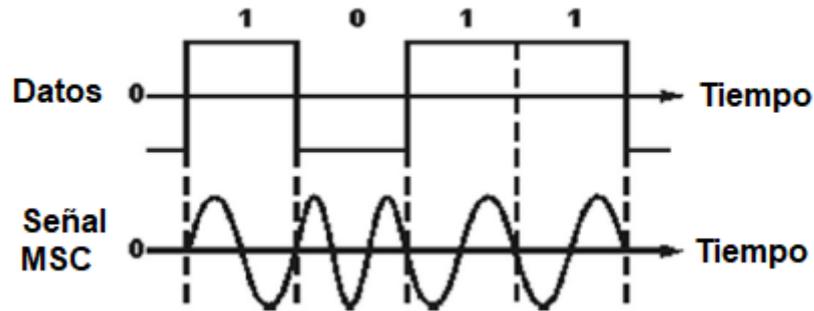


Figura 3. 7: Señal MSK  
Elaborado por: Autor.

### 3.6.1. Implementación del modelo matemático del sistema MSK.

En esta técnica, la diferencia de frecuencia más baja y frecuencia más alta es idéntica a la mitad de la velocidad de bits. La señal resultante se representa como se indica a continuación:

$$S(t) = a_1(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos(2\pi f_c t) - a_q(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin(2\pi f_c t)$$

donde,  $a_1(t)$  = codifica la parte par de información con un tren de onda cuadrada con una duración de  $2T$ .  $a_q(t)$  = Codifica la parte impar de información con un tren de onda cuadrada con una duración de  $2T$ .  $f_c$  = frecuencia de portadora. Con el uso de la identidad trigonométrica, la ecuación (1) se puede escribir como:

$$S(t) = \cos = \left[ 2\pi f_c t + b_k(t) \frac{\pi t}{2T} + \phi_k \right]$$

Donde,

$$b_k(t) = +1 \text{ cuando } a_1(t) = a_q(t).$$

$$b_k(t) = -1 \text{ cuando } a_1(t) \& a_q(t) \text{ tiene signos opuestos.}$$

$$\phi_k = 0 \text{ if } a_q(t) = 1 \text{ de lo contrario será igual a } \pi.$$

### 3.6.2. Aplicaciones del sistema de modulación MSK.

- 1) CDPD
- 2) tecnología celular
- 3) Para aplicaciones de alta velocidad de datos.

### **3.6.3. Ventajas de la modulación MSK sobre la modulación QPSK.**

- 1) La señal MSK tiene fase continua en todos los casos, mientras que QPSK tiene un cambio de fase abrupto de  $\pi$  o  $\pi / 2$ .
- 2) El lóbulo principal de MSK es más ancho que el de QPSK. El lóbulo principal de MSK contiene alrededor del 99% de la energía de la señal, mientras que el lóbulo principal QPSK contiene alrededor del 90% de la energía de la señal.
- 3) Los lóbulos laterales de MSK son más pequeños que los de QPSK. Por lo tanto, entre canales, la interferencia debido a los lóbulos laterales es significativamente grande en QPSK.
- 4) Para evitar interferencias entre canales debido a lóbulos laterales, QPSK necesita filtrado de paso de banda, mientras que no es necesario en MSK.

### **3.6.4. Ventajas del sistema de modulación MSK.**

- 1) MSK no contiene interrupciones de fase y cambios de frecuencia en el cruce por cero de la portadora.
- 2) No requiere un amplificador de potencia altamente lineal.
- 3) Tiene mayor eficiencia espectral.
- 4) Tiene baja complejidad demoduladora.

### **3.7. Análisis de resultados de la simulación.**

El gráfico anterior muestra la comparación entre la modulación BPSK, QAM y QPSK. Del gráfico está claro que la tasa de error de bit (BER) de BPSK. La modulación es muy baja en comparación con otras modulaciones y esta tasa disminuye gradualmente hasta el final. En el caso de QAM y QPSK, se ve que QPSK proporciona una tasa de error de bits baja en comparación con QAM. En un punto cuando la SNR está cerca de aproximadamente 25, estos dos valores se superponen y después de cierta flotación se encuentran en un punto.

Este gráfico compara los diferentes valores Mod de QAM. Los resultados experimentales demuestran que, con la potencia par de 2, la tasa de error de bits es muy baja en comparación con la tasa de potencia impar. Se puede

observar en el gráfico de barras 3.21 en el que la tasa de error de bits en QAM 256 es muy baja en comparación con otras. Una cosa importante para recordar es que todas estas modulaciones se realizan a través de 2 transmisores y 2 receptores. Para simplificar el gráfico de línea anterior, el gráfico de barras se muestra a continuación.

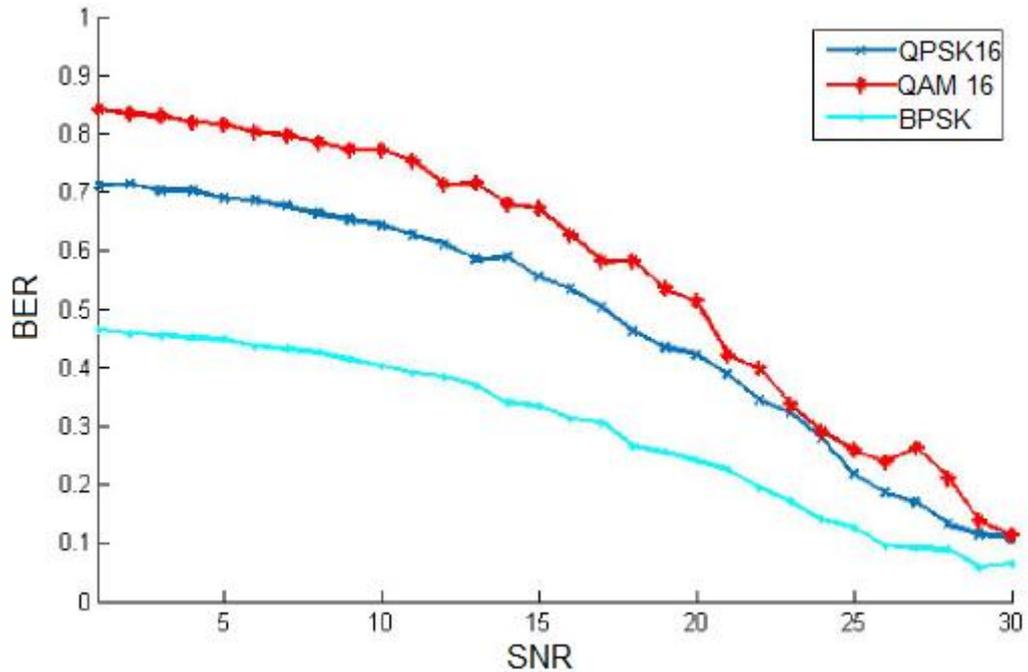


Figura 3. 8: Gráfico comparativo entre BPSK, QAM y QPSK  
Elaborado por: Autor.

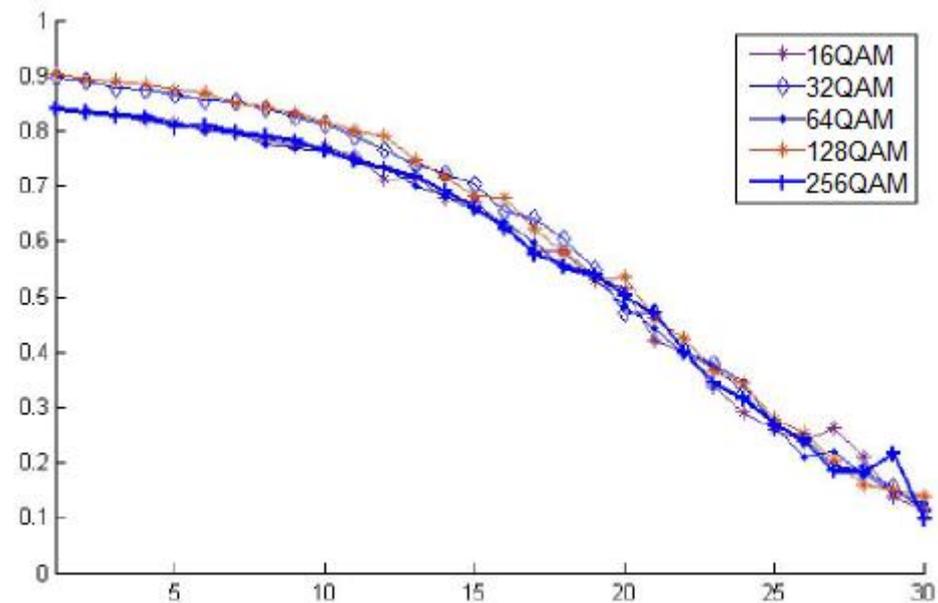


Figura 3. 9: Gráfico de línea de comparación de QAM en diferentes Mod  
Elaborado por: Autor.

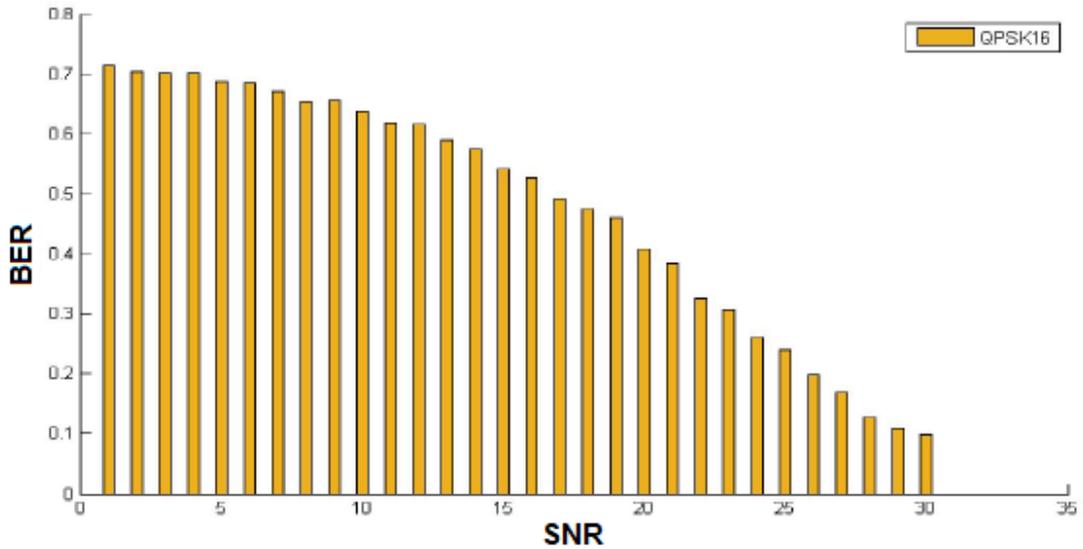


Figura 3. 10: Gráfico de barras para QPSK  
Elaborado por: Autor.

El gráfico anterior muestra el rendimiento de QPSK. QPSK muestra una tasa de error de bits muy alta al comienzo de la SNR, pero la tasa de error de bits de QPSK disminuye con un aumento continuo en el valor de SNR.

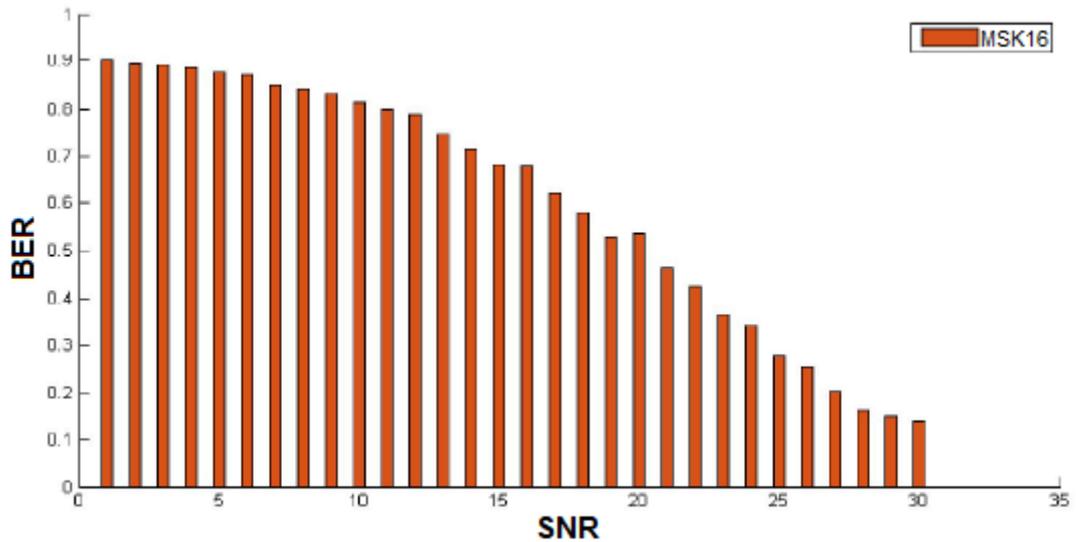


Figura 3. 11: Gráfico de barras para MSK  
Elaborado por: Autor.

El gráfico anterior muestra el rendimiento de MSK. Esto muestra una tasa de error de bit muy alta al comienzo de SNR, pero la tasa de error de bit de MSK disminuye con un aumento continuo en el valor de SNR.

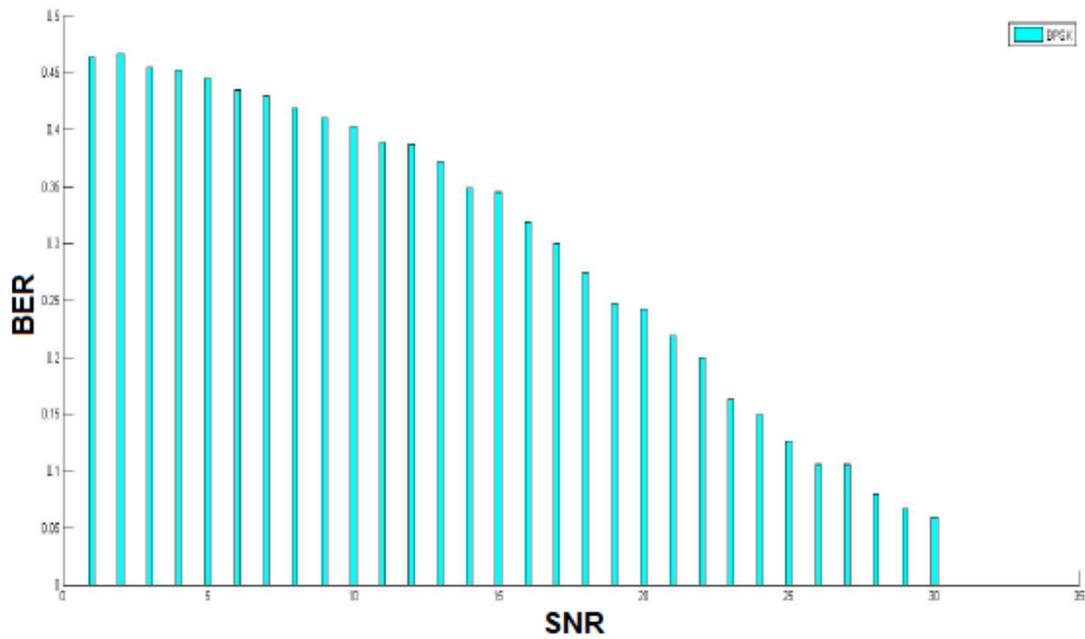


Figura 3. 12: Gráfico de barras para BPSK  
Elaborado por: Autor.

El gráfico anterior muestra el rendimiento de BPSK. BPSK muestra una tasa de error de bit muy alta al comienzo de SNR, pero la tasa de error de bit de BPSK disminuye con un aumento continuo en el valor de SNR.

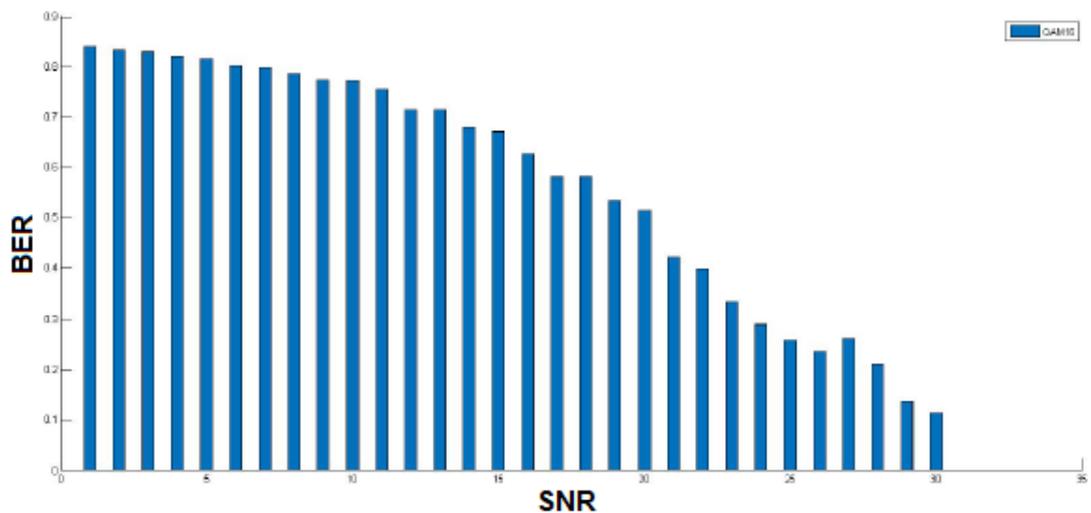


Figura 3. 13: Gráfico de barras para QAM  
Elaborado por: Autor.

El gráfico anterior muestra el rendimiento de QAM. QAM muestra una tasa de error de bit muy alta al comienzo de SNR, pero la tasa de error de bit de QAM disminuye con un aumento continuo en el valor de SNR.

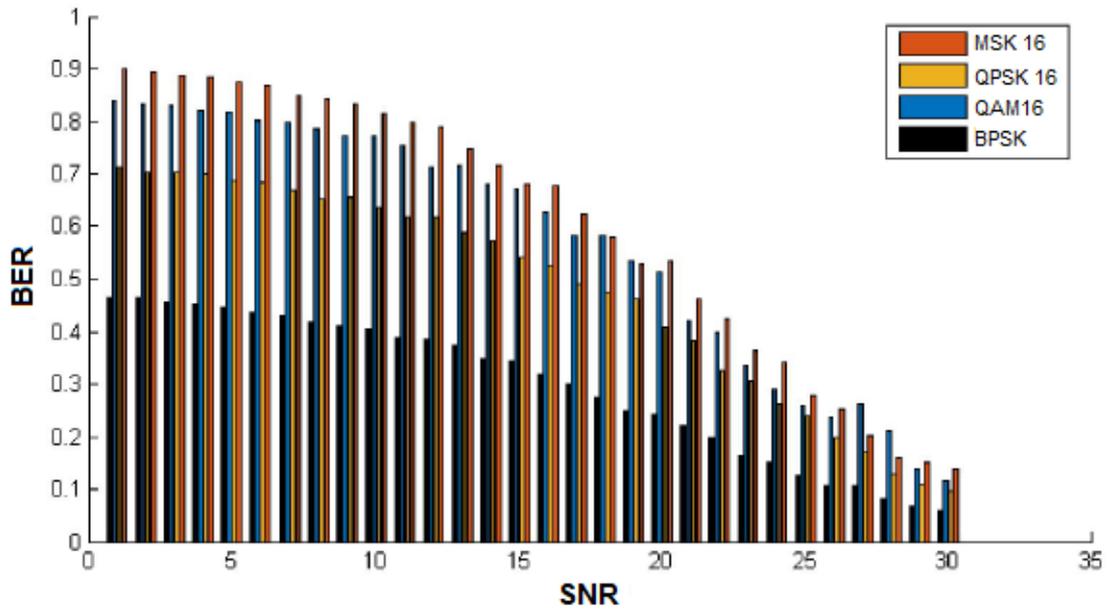


Figura 3. 14: Comparación de rendimiento de QPSK, MSK, BPSK y QAM  
Elaborado por: Autor.

El gráfico anterior muestra la comparación de rendimiento de QPSK, MSK, BPSK y QAM. Del gráfico está claro que la tasa de error de bits de MSK es muy alta en comparación con todos los demás. Por otro lado, BPSK muestra una tasa de error de bits muy baja desde el principio hasta el final.

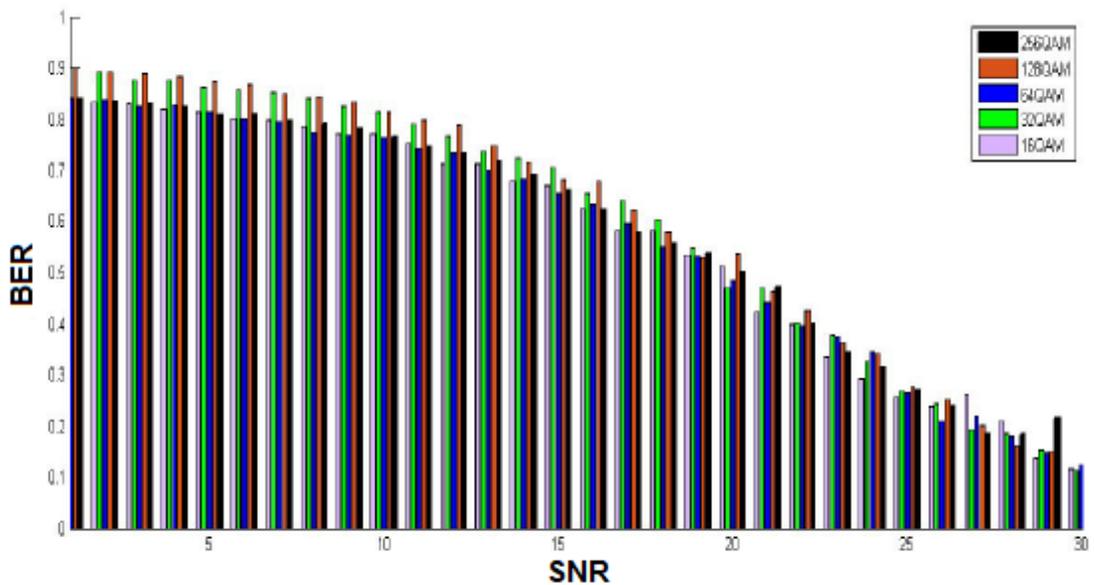


Figura 3. 15: Gráfico de barras de comparación de QAM en diferentes Mod  
Elaborado por: Autor.

El siguiente gráfico muestra la comparación de QAM en tres medios de transmisión diferentes. En primer lugar, está claro en el gráfico que cuando se

toman 2 transmisores y 2 receptores para el envío de información, la tasa de error de bits es muy alta.

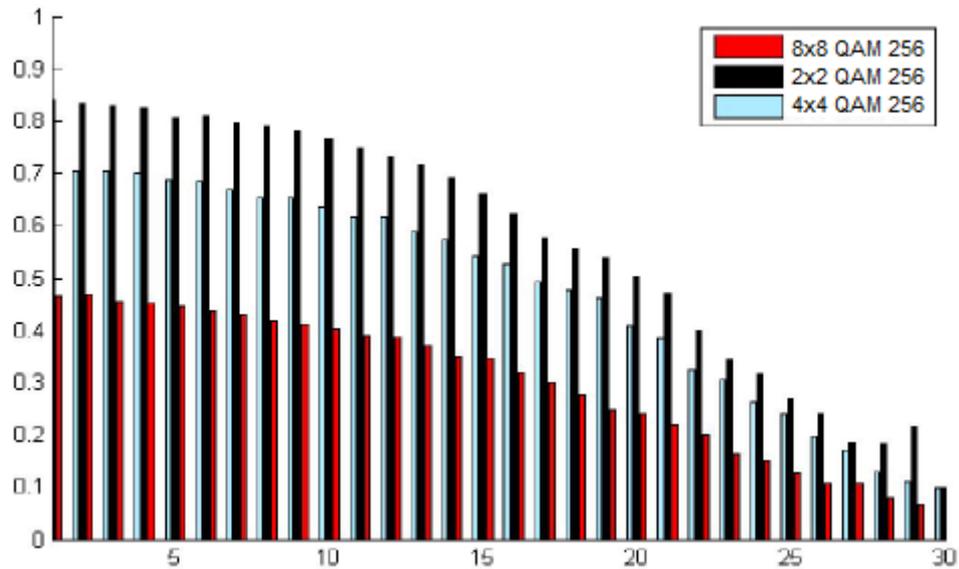


Figura 3. 16: Gráfico de barras de comparación de QAM en diferentes Mod  
Elaborado por: Autor.

Mientras que la tasa de error de 4 transmisores y 4 receptores es menor que la del primer caso. Pero la tasa es muy baja en el caso de 8 transmisores y 8 receptores.

En el trabajo propuesto, el rendimiento del sistema MIMO-OFDM se analiza utilizando diferentes técnicas de modulación digital como BPSK, QPSK, QAM y MSK. El rendimiento de BPSK, QPSK, QAM y MSK se ha comparado en términos de BER. Para el análisis de rendimiento, QAM se utiliza con diferentes modos. Se analiza que con el aumento de las antenas en los lados del transmisor y del receptor, la tasa de BER disminuye. La tasa de error de bit (BER) de la modulación BPSK es muy baja en comparación con otra modulación y esta tasa disminuye gradualmente hasta el final. La tasa de error de bit depende de la potencia de 2.

En el caso de una potencia uniforme, la tasa de error de bit es baja en comparación con la potencia impar en el caso de QAM. El rendimiento del sistema también depende del número de transmisor y receptor. Se utilizan diferentes combinaciones de antenas para el análisis, como 2 antenas en el

transmisor y 2 antenas en el receptor, 4 antenas en el transmisor y 4 antenas en el receptor y 8 antenas en el transmisor y 8 antenas en el receptor.

## Conclusiones

En el trabajo propuesto, el rendimiento de BPSK, QPSK, QAM y MSK se ha comparado en términos de tasa de error de bits (BER). Se analizó que con el aumento de antenas en ambos lados del transmisor y del receptor, la tasa de BER disminuye.

El valor BER de la modulación BPSK es muy bajo en comparación con otras modulaciones y esta frecuencia disminuye gradualmente hasta el final. En el caso de QAM y QPSK, se ve que QPSK da una tasa de error de bit baja en comparación con QAM. En un punto en el que la SNR está cerca de 25, ambos valores se superponen y después de cierta flotación se encuentran en un punto. La tasa de error de bit es del orden de potencia de 2. En el caso de potencia par, la tasa de error de bit es baja en comparación con la potencia impar en el caso de QAM. QAM-256 tiene una tasa de error de bit muy baja.

El rendimiento del sistema también depende del número de transmisores y receptores. También se concluye que la tasa de error de bits de 4 transmisores y 4 receptores es menor que la del primer caso cuando se utilizan 2 transmisores y 2 receptores. Pero la tasa es muy baja en el caso de 8 transmisores y 8 receptores. Se concluye que, si se utiliza una gran cantidad de transmisores y receptores, la tasa de error de bit es baja y lo mismo ocurre con lo contrario.

## **Recomendaciones.**

A continuación, se recomiendan las siguientes propuestas a futuro para desarrollar temas de titulación o del componente práctico del examen complejo:

1. Evaluar el rendimiento de los sistemas MIMO-OFDMA en canales de desvanecimiento correlacionados e interferencia no estacionaria.
2. Despliegue de MIMO de dimensionamiento completo (FD-MIMO) en la evolución de comunicaciones móviles LTE

## Bibliografía.

- Agrawal, M., & Raut, Y. (2011). BER Analysis of MIMO OFDM System for AWGN & Rayleigh Fading Channel. *International Journal of Computer Applications*, 34(9), 33–37.
- Agrawal, M., & Raut, Y. (2012). Evaluating the impact of Guard Period on the performance of MIMO-OFDM system. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 1(4), 2105–2110.
- Ajose, S. O., Imoize, A. L., & Obiukwu, O. M. (2018). Bit error rate analysis of different digital modulation schemes in orthogonal frequency division multiplexing systems. *Nigerian Journal of Technology*, 37(3), 727. <https://doi.org/10.4314/njt.v37i3.23>
- Cho, Y. S. (Ed.). (2010). *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. IEEE Press : J. Wiley & Sons (Asia).
- Dinh, V.-K., Le, M.-T., Ngo, V.-D., & Ta, C.-H. (2020). PCA-Aided Linear Precoding in Massive MIMO Systems with Imperfect CSI. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/3425952>
- Ishihara, M., Sasaoka, N., Yoshio, I., & Okello, J. (2013). MCMA equalization without signal permutation for MIMO-OFDM systems using M-QAM. *2013 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 101–104. <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2013.6645831>
- LaSorte, N., Barnes, W. J., & Refai, H. H. (2008). The History of Orthogonal Frequency Division Multiplexing. *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2008.ECP.690>
- Ogale, A., Chaoudhary, S., & Patil, A. J. (2013). Performance evaluation of MIMO-OFDM system using Matlab & Simulink with real time

image input. *2013 Tenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/WOCN.2013.6616176>

Patil, P., Patil, M. R., Itraj, S., & Bomble, U. L. (2017). A Review on MIMO OFDM Technology Basics and More. *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)*, 119–124. <https://doi.org/10.1109/CTCEEC.2017.8455114>

Rohling, H. (Ed.). (2011). *OFDM: Concepts for future communication systems*. Springer.

Sharma, M., Chadha, D., & Chandra, V. (2013). Capacity evaluation of MIMO-OFDM Free Space Optical communication system. *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 1–4.  
<https://doi.org/10.1109/INDCON.2013.6726078>



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **CHASE MOSQUERA, ANTHONY STEVENS** con C.C: # 094201121-4 autor del componente práctico del examen complejo: **Evaluación comparativa de rendimiento en sistemas OFDM utilizando diferentes métodos de modulación digital** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, 18 de septiembre del 2020

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

Nombre: CHASE MOSQUERA, ANTHONY STEVENS

C.C: 094201121-4

<b>REPOSITARIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Evaluación comparativa de rendimiento en sistemas OFDM utilizando diferentes métodos de modulación digital		
<b>AUTOR(ES)</b>	Chase Mosquera, Anthony Stevens		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TITULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	18 de septiembre del 2020	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	35
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas de Comunicaciones, Comunicaciones Inalámbricas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Simulaciones, Modulaciones, Digitales, MIMO, Inalámbricos, OFDM		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>El presente documento presenta el desarrollo del componente práctico del examen complejo denominado "Evaluación comparativa de rendimiento en sistemas OFDM utilizando diferentes métodos de modulación digital". En el capítulo 1 se especifica una introducción al medio de comunicación utilizado, así como el objetivo general y los objetivos específicos de este proyecto práctico. En el capítulo 2 se especifica a la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) conocido también como el esquema de acceso múltiple para las comunicaciones inalámbricas móviles de cuarta generación (4G-LTE). Las características positivas hacen de MIMO-OFDM un candidato prometedor para comunicaciones inalámbricas de alta velocidad de datos. En el capítulo 3 se diseñan escenarios de simulación de un sistema MIMO-OFDM con diferentes modulaciones digitales (BPSK, QPSK, QAM y MSK) utilizando el software de simulación MatLab/Simulink, Posteriormente, se presentan los resultados y se analiza comparativamente las simulaciones para cada escenario en el sistema MIMO-OFDM.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-9-67186120	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:achase_1996@hotmail.com">achase_1996@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-67608298		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			