



SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

“Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de modulación de amplitud en cuadratura (QAM)”

AUTOR:

Ing. Rodrigo Daniel Guayaquil Loor

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de
Magister en Telecomunicaciones**

TUTOR:

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

Guayaquil, 29 de junio del 2018



**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por Rodrigo Daniel Guayaquil Loor, como requerimiento parcial para la obtención del Título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, 29 de junio del 2018



**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, Rodrigo Daniel Guayaquil Loor

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación “**Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)**” previa a la obtención del Título de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, 29 de junio del 2018

EL AUTOR

Rodrigo Daniel Guayaquil Loor



**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

YO, Rodrigo Daniel Guayaquil Loor

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación**, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Titulación, “**Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de modulación de amplitud en cuadratura (QAM)**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 29 de junio del 2018

EL AUTOR

Rodrigo Daniel Guayaquil Loor

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por permitirme el haber llegado hasta este momento muy importante de mi formación profesional.

A mi familia, por compartir momentos significativos conmigo y en especial a mis adoradas hijas Valentina y Romina, a quienes guiare y cuidare hasta poder verlos hechos personas capaces y que puedan valerse por sí mismos.

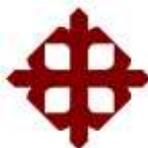
A mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo dedicación y valentía.

Agradecimientos

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

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (UCSG), por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo de investigación.

A mis profesores, en especial al MSc. Luis Córdova Rivadeneira y MSc. Manuel Romero Paz, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

MSc. Luis Córdova Rivadeneira
TUTOR

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz
DIRECTOR DEL PROGRAMA

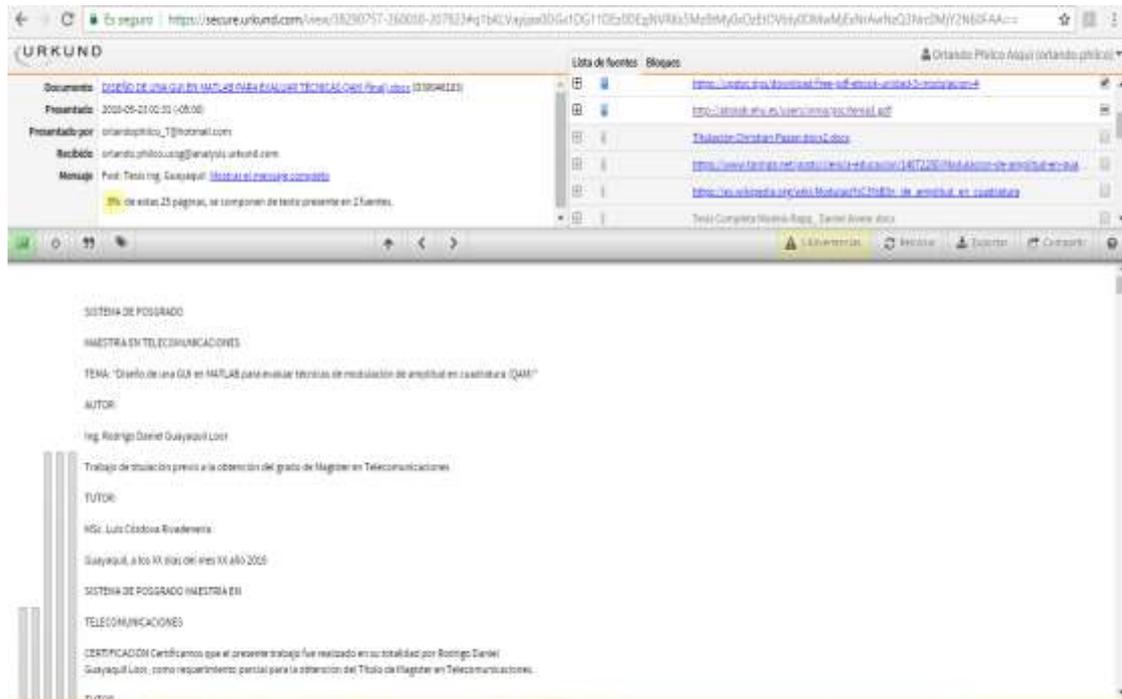
f. _____

MSc. Orlando Philco Asqui
REVISOR

f. _____

MSc. Miguel Heras Sánchez
REVISOR

REPORTE URKUND



Reporte Urkund del Trabajo de Titulación en Maestría de Telecomunicaciones; Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de modulación de amplitud en cuadratura (QAM) del ing. Rodrigo Guayaquil Loor al 3 % de coincidencias.

RESUMEN

El trabajo presenta la descripción del diseño de una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) en MATLAB que permite evaluar técnicas de Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) a través de la modelación de constelaciones uniformes y no uniformes. Se exponen las generalidades de los sistemas de comunicaciones digitales, los sistemas multiportadoras basados en la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) y se realiza un análisis de la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) como base teórica del diseño. Se fundamenta el uso de la herramienta GUIDE de MATLAB para el desarrollo del entorno gráfico. Se detallan las funcionalidades de la GUI y se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, se realiza la comparación de dichos resultados con los teóricamente esperados, avalando de esta forma, el correcto funcionamiento de la aplicación. Emplea el método de observación documental y científica para obtener la información necesaria y definir el problema, el método exploratorio y descriptivo al explorar y describir las características de los sistemas multiportadoras basados en las técnicas OFDM y QAM mediante su Estado del Arte. Además, es de paradigma "EMPÍRICO-ANALÍTICO" con un enfoque "CUANTITATIVO" porque se emplean cálculos matemáticos para diseñar la GUI en Matlab con las funcionalidades deseadas y "EXPERIMENTAL", porque se alteran las variables de estudio, para analizar los resultados.

Palabras clave: QAM, OFDM, GUI, MATLAB

ABSTRACT

The work presents the description of the design of a Graphical User Interface (GUI) in MATLAB that allows evaluating Quadrature Amplitude Modulation (QAM) techniques through the modeling of uniform and non-uniform constellations. The generalities of digital communication systems, multi-carrier systems based on the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technique and an analysis of Quadrature Amplitude Modulation as the theoretical basis of the design are exposed. The use of the MATLAB GUIDE tool for the development of the graphic environment is based. The functionalities of the GUI are detailed and the results obtained are shown. Finally, the comparison of the obtained results with the theoretically expected ones is made, guaranteeing in this way, the correct operation of the application. It uses the method of documentary and scientific observation to obtain the necessary information and define the problem, the exploratory and descriptive method when exploring and describing the characteristics of multi-carrier systems based on the OFDM and QAM techniques through their State of the Art. In addition, it is an "EMPIRICAL-ANALYTIC" paradigm with a "QUANTITATIVE" approach because mathematical calculations are used to design the GUI in Matlab with the desired functionalities and "EXPERIMENTAL", because the study variables are altered, to analyze the results

Keywords: QAM, OFDM, GUI, MATLAB

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
CAPITULO 1 . Descripción del proyecto de intervención.	2
1.1 Justificación del problema a investigar.	3
1.2 Antecedentes.....	4
1.3 Definición del problema.	5
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo General.	5
1.4.2 Objetivos específicos.	5
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Metodología de investigación.	6
CAPITULO 2 . Fundamentación teórica.	7
2.1 Comunicaciones digitales.....	7
2.2 OFDM.....	9
2.2.1 Generalidades de OFDM.	9
2.3 Modulación QAM.....	12
2.3.1 Constelaciones QAM.....	15
2.4 Características del canal de transmisión	21
2.4.1 Canal AWGN.....	21
2.4.2 Canal de Rayleigh.....	22
2.5 Parámetros de calidad.....	23
2.5.1 Tasa de Bit Erróneo	24
2.5.2 Proporción Potencia Pico-Potencia Media (PAPR).....	25
2.5.3 Eficiencia Espectral.....	25
CAPITULO 3 . Diseño de la Interfaz Gráfica de Usuario.	28
3.1 Herramienta GUIDE.....	29
3.2 Diseño de la estructura de la aplicación.	34
3.2.1 Diseño de la interfaz principal de la aplicación ModelQAM	
1.0. 35	
CAPITULO 4 . Evaluación de los resultados.	41
4.1 Análisis de las constelaciones M-QAM.....	41
4.2 Análisis de los efectos del canal.	43
4.3 Análisis de la eficiencia espectral.	45

4.4	Análisis del BER.	46
4.5	Análisis de la PAPR.....	49
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
	GLOSARIO DE TÉRMINOS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.Diagrama en bloques simplificado de un sistema de radio digital.	8
Figura 2.2.Principio de ortogonalidad desde el punto de vista frecuencial.....	10
Figura 2.3.Sistema de comunicación digital basado en la técnica OFDM.	11
Figura 2.4.Proyección de una señal "en fase" (coseno) y una señal "en cuadratura" (seno).	13
Figura 2.5.esquema en bloques de la generación de una señal QAM.....	14
Figura 2.6.Esquema de constelaciones 4, 16, 32 y 64-QAM.	15
Figura 2.7 Distribución uniforme de las constelaciones M-arias.	16
Figura 2.8.Constelaciones no uniformes de una dimensión.	17
Figura 2.9 Constelaciones no uniformes de dos dimensiones.	18
Figura 2.10 Constelación 64-QAM rotada.....	19
Figura 3.1. Interfaz gráfica del MATLAB 2014.	29
Figura 3.2.Ejecución de la herramienta GUIDE.	30
Figura 3.3.Ventana de acceso rápido del editor GUIDE.	31
Figura 3.4.Entorno de desarrollo GUIDE.	31
Figura 3.5.Fichero con el código de inicialización y callback de la interfaz creada.....	34
Figura 3.6. Algoritmo de diseño de una interfaz gráfica en MATLAB.....	35
Figura 3.7.Interfaz de la pantalla principal.	36
Figura 3.8.Editor de menús del GUIDE de MATLAB.	37
Figura 3.9.Código del elemento "Cerrar".	37
Figura 3.10.Panel para la introducción y selección de parámetros.....	38
Figura 3.11.Validación de los datos de entrada.	39
Figura 3.12.Panel de resultados mostrando los valores de una simulación.....	39
Figura 4.1.Control Axes mostrando una constelación uniforme para 64- QAM.....	41
Figura 4.2.Control Axes mostrando una constelación no uniforme de una dimensión para 64-QAM.	42

Figura 4.3.Control Axes mostrando una constelación no uniforme de dos dimensiones para 64-QAM.	42
Figura 4.4. Efectos del canal AWGN para 16-QAM NUC-2D y una SNR=10dB.....	43
Figura 4.5. Efectos del canal AWGN para 64-QAM NUC-2D y una SNR=10dB.....	44
Figura 4.6.Efectos del canal AWGN para 256-QAM NUC-2D y una SNR=10dB.....	44
Figura 4.7.Panel de resultados mostrando el resultado de la simulación de la eficiencia espectral.....	45
Figura 4.8.Orden de modulación.....	45
Figura 4.9.Representación del BER para 16-QAM-2D.	46
Figura 4.10.Representación del BER para 64-QAM-2D.	47
Figura 4.11.Representación del BER para 256-QAM-2D.	47
Figura 4.12.Representación del BER para constelaciones NUC QAM-1D en un canal AWGN.	48
Figura 4.13.Representación del BER para constelaciones NUC QAM-1D en una canal de Rayleigh.	48
Figura 4.14.Panel de resultados mostrando la PAPR.....	49
Figura 4.15.Control axes mostrando el resultado de la simulación PAPR para 16-QAM.	50
Figura 4.16.Control axes mostrando el resultado de la simulación PAPR para 64-QAM.	50
Figura 4.17.Control axes mostrando el resultado de la simulación PAPR para 256-QAM.	51

CAPITULO 1 . Descripción del proyecto de intervención.

En el presente capítulo se justificará y delimitará el problema a investigar, se establecerán los objetivos generales y específicos, la hipótesis y la metodología de investigación.

En telecomunicaciones el término modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos.

Existen varias razones para modular, entre ellas:

- Facilita la propagación de la señal de información por cable o por el aire.
- Disminuye las dimensiones de las antenas.
- Optimiza el ancho de banda de cada canal.
- Evita interferencia entre canales.
- Protege a la información de las degradaciones por ruido.
- Define la calidad de la información transmitida.

La modulación intenta conseguir una adecuación entre señal y canal, de modo que en las transmisiones a largas distancias con velocidades de transmisión relativamente altas se utilicen aquellas frecuencias en las que el canal proporciona la mejor respuesta.

De forma general se distinguen dos tipos de modulación, la modulación analógica, que se realiza a partir de señales analógicas de información y la modulación digital, que se lleva a cabo a partir de señales generadas por fuentes digitales.

La modulación analógica a analógica se puede conseguir básicamente de dos formas: modulación en amplitud (AM) y la modulación en frecuencia (FM).

La modulación de digital a analógico, es el proceso de cambiar una de las características de una señal de base analógica dígase amplitud, frecuencia y fase en información basada en una señal digital. Cualquiera de las tres características citadas puede alterarse proporcionando al menos tres mecanismos para modular datos digitales en señales analógicas: Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) y Modulación por desplazamiento de fase (PSK).

Existe un cuarto mecanismo que combina cambios en fase y amplitud, que se denomina Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM). Esta última se caracteriza por permitir la transmisión simultánea de dos señales diferentes dentro de una misma banda de frecuencia lo que propicia una eficiente utilización del ancho de banda disponible, es hoy en día muy utilizada en las transmisiones de datos a gran velocidad, tanto en sistemas de soporte físico (fibra óptica) como en sistemas de radio.

1.1 Justificación del problema a investigar.

El desarrollo de las redes de comunicaciones y las necesidades de los usuarios, demandan fiabilidad de los servicios, mejoramiento de la eficiencia espectral, flexibilidad y compatibilidad de los sistemas, objetivos presentes en los nuevos estándares de la Televisión Digital Terrestre (TDT), así como en la 5ta Generación de Telefonía Móvil (5G) próxima a implementarse a partir del 2020. Estos nuevos estándares proponen el empleo de técnicas de modulación OFDM, a partir de constelaciones no uniformes (NUC) de la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) que ofrecen mayores tasas de transmisión, sin que se tenga que ampliar el ancho de banda ni hacer un gran aumento en la potencia de transmisión.

De lo planteado anteriormente se deriva la importancia del aprendizaje y caracterización de las técnicas de Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) por parte de los estudiantes y profesionales de las Telecomunicaciones.

1.2 Antecedentes.

La Modulación de Amplitud en Cuadratura o QAM desde su concepción ha sido ampliamente utilizada en diversas aplicaciones dentro de las que destacan:

Los módems para velocidades superiores a los 2400 bps (por ejemplo V.22 bis y V.32).

Sistemas de transmisión de televisión, microondas, satélites.

Constituyó la base de la modulación TCM (*Trellis Coded Modulation*), que consiguió velocidades de transmisión muy elevadas combinando la modulación con la codificación de canal.

Fue la base de los módems ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) que trabajan en el bucle de abonado, a frecuencias situadas entre 24KHz y 1104KHz, pudiendo obtener velocidades de hasta 9Mbps, modulando en QAM diferentes portadoras.

Con el paso de los años, estas aplicaciones han ido evolucionando hasta el punto de requerir grandes anchos de banda para ofertar nuevos servicios. Prueba de ello es el continuo aumento de la capacidad del sistema ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), la oferta de televisión en HD (*High Definition*) o en 3D. En conclusión, la exigencia creciente del ancho de banda por parte del usuario ha sido el principal estímulo para el desarrollo de nuevas tecnologías de modulación que permiten una gran eficiencia espectral, tasas de transmisión más elevadas y una gran robustez. Un buen ejemplo de ello es la modulación multiportadora y en concreto OFDM a partir de constelaciones no uniformes de QAM.

1.3 Definición del problema.

Necesidad de desarrollar un entorno visual para el modelado de constelaciones QAM que permita la evaluación de esta técnica avanzada de modulación por parte de estudiantes y especialistas de las telecomunicaciones.

1.4 Objetivos.

A continuación, se detallan el objetivo general y los objetivos específicos:

1.4.1 Objetivo General.

Desarrollar una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) en MATLAB fácil de emplear, que permita tanto a estudiantes como a profesionales de las telecomunicaciones, modelar y evaluar la técnica de modulación QAM.

1.4.2 Objetivos específicos.

Describir las generalidades de los sistemas de comunicaciones digitales.

Describir las características generales de la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM).

Fundamentar la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM).

Analizar las características del canal de transmisión.

Describir el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI) realizada.

Analizar los resultados obtenidos y arribar a conclusiones.

1.5 Hipótesis.

A través de la modelación de la técnica avanzada de modulación QAM se podrá disponer de herramientas que permitan su estudio y evaluación.

1.6 Metodología de investigación.

En el actual trabajo investigativo previo al grado académico de Magister en Telecomunicaciones se emplea la siguiente metodología de investigación:

- Método de observación documental y científica: Permite obtener la información necesaria y lograr la definición del problema.
- Método exploratorio y descriptivo. Permite explorar y describir las características de los sistemas multiportadoras basados en la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal y de la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) mediante su Estado del Arte.

Además, esta investigación es de paradigma “EMPÍRICO-ANALÍTICO” con un enfoque “CUANTITATIVO” porque se utilizan cálculos matemáticos para el diseño de la GUI en Matlab con las funcionalidades deseadas y “EXPERIMENTAL”, debido a que se alteran las variables de estudio, para proceder con el análisis de los resultados.

CAPITULO 2 . Fundamentación teórica.

En este capítulo se exponen las generalidades de los sistemas de comunicaciones digitales, se describen las características de los sistemas multiportadoras basados en la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM por sus siglas en inglés) y se realiza un análisis de la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM por sus siglas en inglés) como base teórica para la implementación de la interfaz gráfica de usuario en MATLAB.

2.1 Comunicaciones digitales.

El término comunicaciones digitales abarca una gran área de técnicas de comunicaciones, que incluyen la transmisión digital y la radio digital. Se aplica a la transmisión de pulsos digitales entre dos o más puntos en un sistema de comunicaciones. La radio digital es la transmisión de portadoras analógicas moduladas digitalmente entre dos o más puntos de un sistema de comunicaciones. Los sistemas digitales de transmisión requieren una instalación física entre el transmisor y el receptor, como un par de hilos metálicos, un cable coaxial o un cable de fibra óptica. En los sistemas digitales de radio, el medio de transmisión podría ser el espacio libre, la atmósfera o una instalación física, como un conductor metálico o de fibra óptica. (Tomasi, 2003)

En la transmisión digital la fuente original de información puede estar en forma digital o analógica. Si está en forma analógica debe convertirse en pulsos digitales antes de la transmisión y reconvertirse a la forma analógica en el extremo de recepción. En un sistema de radio, la señal moduladora de entrada y la señal demodulada de salida son pulsos digitales. (Tomasi, 2003)

La propiedad que distingue un sistema de radio digital de un sistema convencional de radio AM, FM o PM es la naturaleza de la señal demoduladora. Los sistemas digitales y analógicos usan, ambos, portadoras; sin embargo, en la modulación analógica la señal moduladora es analógica y en la modulación digital la señal moduladora es digital. (Tomasi, 2003)

En la figura 2.1 se muestra un diagrama en bloques de un sistema digital de radio. En el transmisor, el pre codificador hace la conversión de nivel, y a continuación codifica o agrupa, los datos que llegan en una palabra de control que modula a la portadora analógica. La portadora modulada se conforma (se filtra), se amplifica y a continuación se transmite por el medio de transmisión hasta el receptor. En el receptor la señal de entrada se filtra, amplifica y se aplica a continuación al circuito demodulador, que reproduce la información de la fuente original.

Los circuitos de reloj y de recuperación de portadora eliminan la información de la portadora y del reloj de sincronización de la señal modulada que entra.

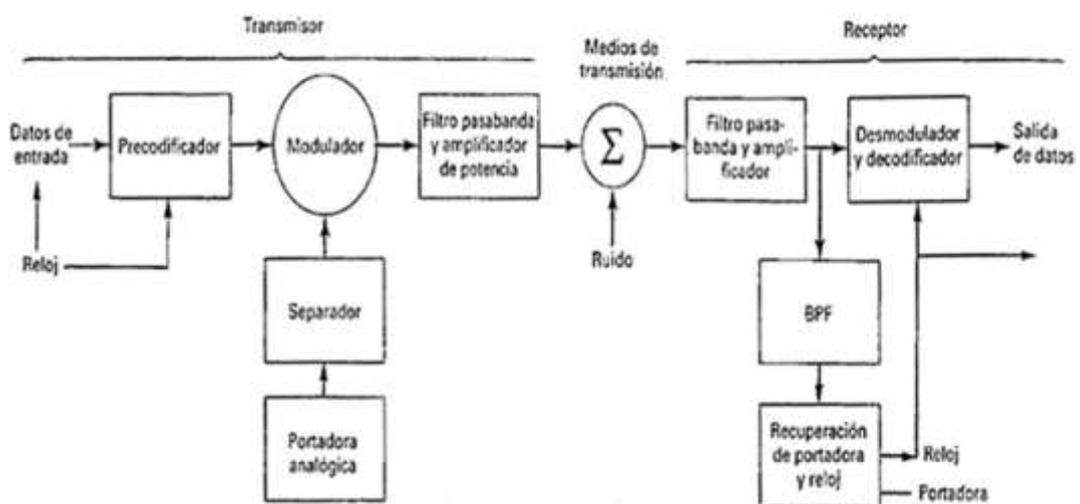


Figura 2.1. Diagrama en bloques simplificado de un sistema de radio digital.

Fuente: (Tomasi, 2003)

2.2 OFDM

La demanda de un mayor ancho de banda por parte del usuario ha sido el principal estímulo para el desarrollo de nuevas tecnologías de modulación que permitan una gran eficiencia espectral, tasas de transmisión más elevadas y una gran robustez. Un buen ejemplo de ello es la técnica OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales) la cual ha sido incluida en numerosos estándares de comunicaciones como el sistema ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), tecnologías como WLAN (*Wireless Local Area Network*), sistemas de radiodifusión de audio DAB (*Digital Audio Broadcasting*) o sistemas de radiodifusión de televisión como DVB-T, el recientemente aprobado DVB-T2 o el estándar DVB-SH, destinado a la radiodifusión a equipos móviles a través de una red híbrida terrestre-satélite. (García, 2011)

2.2.1 Generalidades de OFDM.

OFDM es una técnica de modulación multiportadora, donde cada una transporta información, la cual es modulada en QAM o en PSK, pero con una característica distintiva: la condición de ortogonalidad que deben cumplir las sub-portadoras entre sí. De esta forma, en un sistema OFDM, el canal de comunicación se divide en sub-canales, cada uno identificado por una determinada portadora, solapados en frecuencia, pero sin interferirse entre ellos debido a la condición de ortogonalidad que cumplen las portadoras entre sí (Armas, 2014).

La ortogonalidad es la propiedad que permite que múltiples señales sean transmitidas sobre un canal común y puedan ser recibidas perfectamente sin interferencia. Dos funciones son ortogonales si cumplen la condición de la ecuación 2.1.

$$\int_0^T s_i(t)s_j(t) dt = \begin{cases} C & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (2.1)$$

Es decir, si dos funciones diferentes son multiplicadas e integradas sobre el período del símbolo y el resultado es cero, entonces las funciones son ortogonales.

En la figura 2.2 se observa el principio de ortogonalidad desde el punto de vista frecuencial.

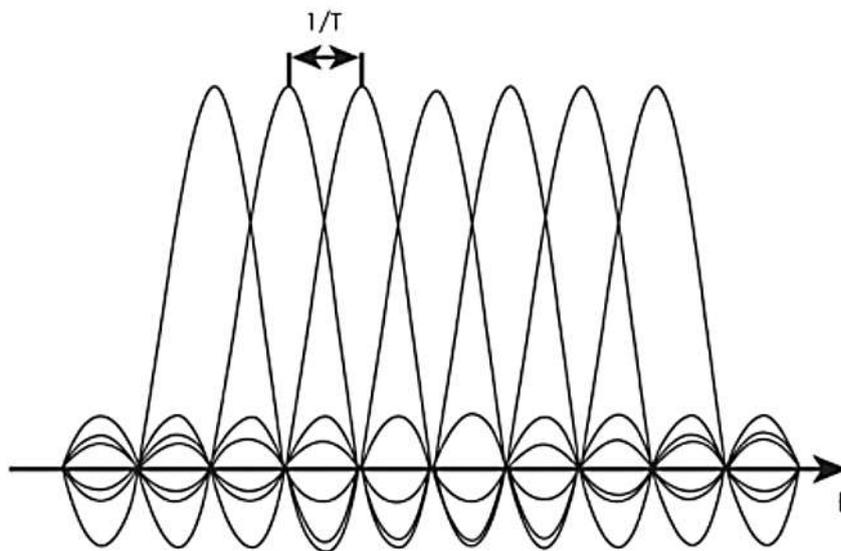


Figura 2.2. Principio de ortogonalidad desde el punto de vista frecuencial.

Fuente: (Armas, 2014)

En la figura 2.2 puede apreciarse que todos los nulos de las portadoras adyacentes pasan por cero en los máximos de cada portadora. La separación entre portadoras depende del tiempo de duración de los símbolos mediante la relación $\Delta f = 1/T$.

Las portadoras deben estar sincronizadas pues si se produce alteración en la amplitud, frecuencia o fase se pierde la ortogonalidad y las portadoras se interfieren entre sí ya que no existe coincidencia entre los nulos. Se produce entonces una alteración en las amplitudes en los puntos máximos provocando distorsión en la señal.

En OFDM la secuencia de entrada se convierte en bloques de bits paralelos cuyo tamaño k se define de acuerdo al tipo de modulación digital que se emplea, considerando $M = 2^k$, donde M es el tamaño de la constelación y corresponde al número de símbolos transmitidos y k los bits por símbolo transmitido en cada bloque bn . Cada uno de estos bloques modula uno a uno las N portadoras ortogonales de acuerdo al modulador M-QAM generando un símbolo complejo a transmitir de la forma $X_n = a_n + jb_n$, donde a_n y b_n son las componentes real y compleja respectivamente, $n = \{0, 1, 2, 3, \dots, N-1\}$ define el índice de las portadoras.

En un sistema OFDM donde cada portadora se modula en M-QAM, la señal de la k -ésima portadora se representa de la siguiente forma:

$$u_k(t) = \text{Re} \left[\sqrt{\frac{2}{T}} X_k e^{j2\pi f_k t} \right] \quad (2.2)$$

Donde $X_k = A_k e^{j\theta_k}$ es el punto de la señal en la constelación QAM que se transmite en la k -ésima portadora.

En la figura 2.3 se observa un esquema en bloques de un sistema de comunicación digital basado en la técnica OFDM.

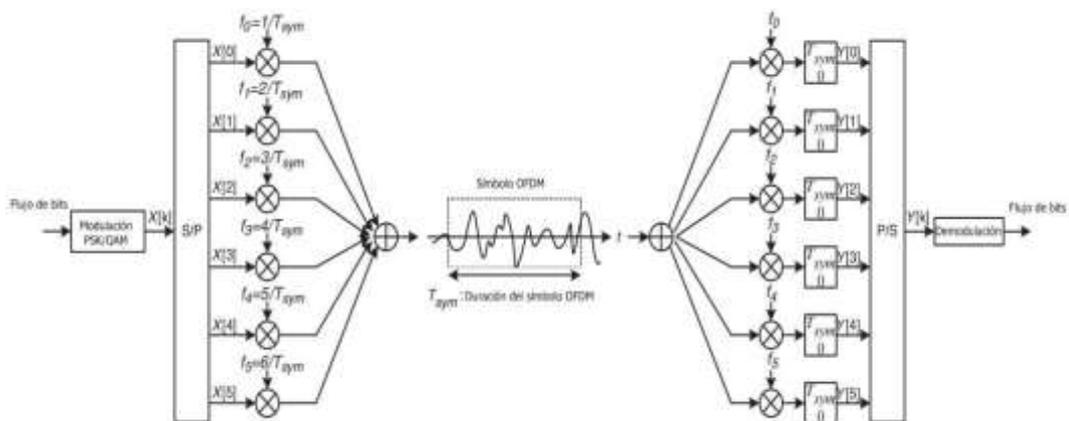


Figura 2.3. Sistema de comunicación digital basado en la técnica OFDM.

Fuente: (Armas, 2014)

En general la idea básica de la modulación multiportadora consiste en que un ancho de banda disponible W es dividido en un número de N subportadoras, cada una con un ancho de $\Delta f_c = W/N$. En vez de transmitir los símbolos en serie, un sistema multiportadora divide el flujo de datos en bloques de N símbolos que son transmitidos en paralelo por la modulación de N portadoras. La duración del símbolo para este tipo de sistemas es $T = N \cdot T_s$, donde T_s es la duración del símbolo tomando como referencia un sistema de portadora única. En canales con efecto multitrayectoria, el tiempo de dispersión multitrayecto T_m puede ser significativo comparado con el período de símbolo, lo cual puede resultar en interferencia intersímbolo (ISI).

La interferencia intersímbolo se elimina casi completamente por la introducción de un intervalo de guarda en cada símbolo OFDM, donde las señales OFDM son cíclicamente extendidas para evitar interferencias intersubportadoras.

2.3 Modulación QAM.

La modulación de amplitud en cuadratura, en inglés *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), es una modulación digital avanzada donde la información está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la portadora. Estas portadoras tienen igual frecuencia, pero están desfasadas 90° entre sí. Por lo que una señal modulada en QAM está compuesta por la suma lineal de dos señales previamente moduladas en DBL-PS (Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida).

La importancia de este sistema de modulación se debe a la gran cantidad de aplicaciones asociadas a ella:

Esta modulación se caracteriza por permitir la transmisión simultánea de dos señales diferentes dentro de una misma banda de frecuencia. Permite una eficiente utilización del ancho de banda disponible. Este sistema hoy

en día es muy utilizado en las transmisiones de datos a gran velocidad, tanto en sistemas de soporte físico (fibra óptica) como en sistemas de radio. (García, 2011)

La amplitud y la fase de una señal pueden modularse simultáneamente o por separado, aunque esto resulta difícil de generar y principalmente de detectar. En vez de ello, es muy práctico separar la señal en dos componentes independientes conocidas como I (componente “en fase”) y Q (componente “en cuadratura”), ambos ortogonales entre sí. Cuando se hace referencia a comunicaciones digitales, es común expresar la modulación en términos de estas dos componentes, razón por la cual, la representación de una constelación bidimensional I-Q es particularmente útil y puede asociarse a la mayor parte de los métodos de modulación digital.

En una “constelación I-Q”, la componente “en fase” se proyecta en el eje de las abscisas (eje x) y la componente “en cuadratura” se proyecta en el eje de las ordenadas (eje y) de un plano cartesiano. Se dice que una señal estará “en fase” cuando su ángulo de fase sea de cero grados (situada en el eje I) y que una señal estará “en cuadratura” cuando se encuentre desfasada 90° respecto a la señal en fase (situada en el eje Q), como se observa en la figura 2.4. (Barry, Lee, & Messerschmitt , 2004)

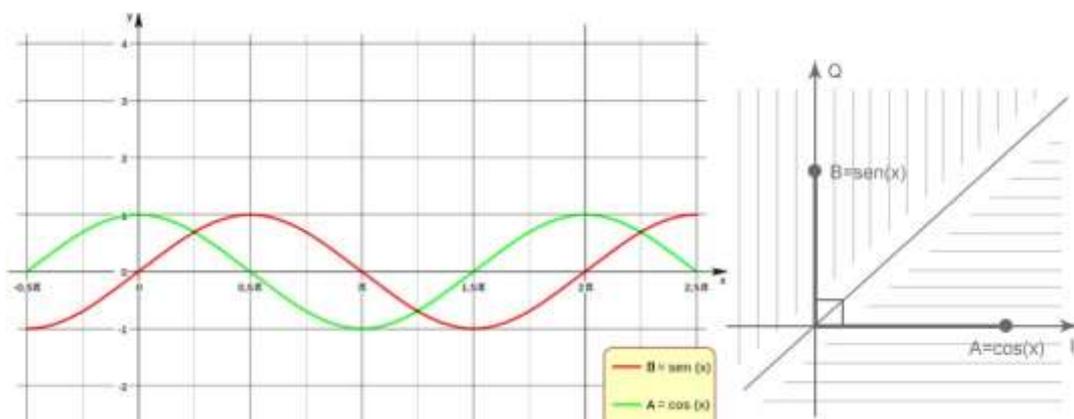


Figura 2.4. Proyección de una señal "en fase" (coseno) y una señal "en cuadratura" (seno).

Fuente: Elaborada por el autor

En la figura 2.5 se muestra un esquema en bloques de la generación de una señal QAM.

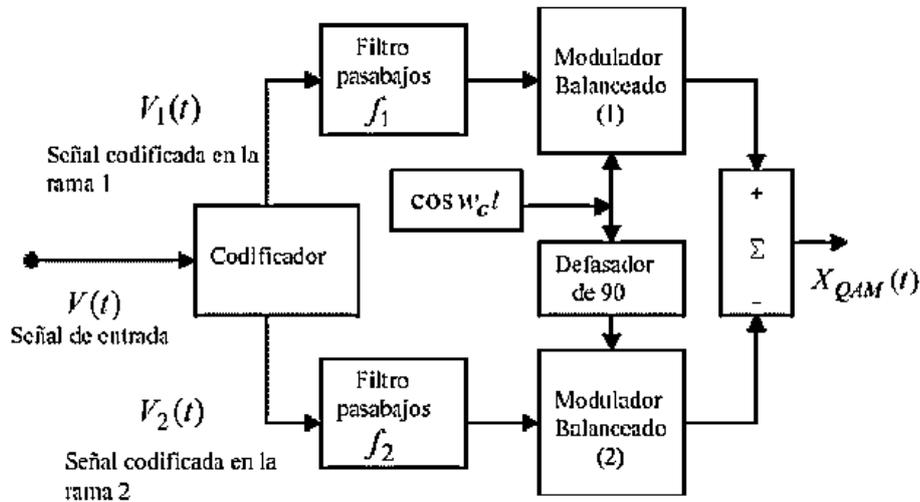


Figura 2.5. Esquema en bloques de la generación de una señal QAM.

Fuente: Elaborada por el autor

La señal moduladora $V(t)$ con una velocidad de señalización de $V_s = 1/T$ dig/seg se lleva al codificador C que la descompone en dos señales bipolares $V_1(t)$ y $V_2(t)$ con velocidades de señalización $V_s/2$ dig/seg. Estas últimas señales se llevan a moduladores balanceados MB_1 y MB_2 respectivamente, donde las portadoras utilizadas se encuentran desfasadas en 90° (portadoras en cuadratura).

Teniendo en cuenta que las señales moduladoras son bipolares entonces las señales obtenidas $V_1(t)\cos(\omega_c t)$ y $V_2(t)\sin(\omega_c t)$ serán de doble banda lateral con inversión de fase portadora en cada cambio de polaridad de las señales $V_1(t)$ y $V_2(t)$ lo que corresponde con la señal de modulación binaria de fase (cambios de fase de 180°).

Al sumarse las dos señales se obtiene una señal con modulación en cuadratura, tal y como se expresa en la ecuación 2.3.

$$X_{QAM}(t) = V_1(t) \cos(\omega_c t) + V_2(t) \sin(\omega_c t) \quad (2.3)$$

2.3.1 Constelaciones QAM.

Una “constelación” es una representación geométrica de señales en un espacio de M dimensiones, donde se visualizan todos los símbolos de salida posibles que puede generar un modulador, en otras palabras, es la forma en la que se envían los diferentes bits en un sistema de comunicaciones digital. Gracias a que en una constelación cada símbolo tiene asociado un valor de magnitud y uno de fase pueden representarse en un plano de dos dimensiones. (Riche, 2012)

En la figura 2.6 puede apreciarse que para las constelaciones 4-QAM, 16-QAM, 32-QAM y 64-QAM, según el nivel de la constelación, así varían los niveles de amplitud y de fase de la señal.

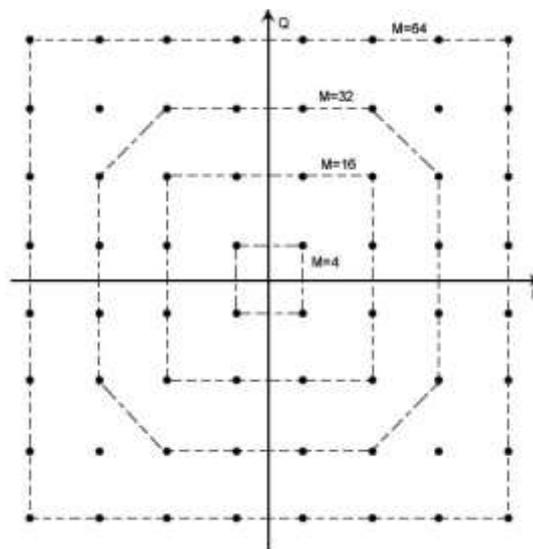


Figura 2.6. Esquema de constelaciones 4, 16, 32 y 64-QAM.

Fuente: (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004)

Añadiendo más bits de nivel a las componentes I y Q del modulador se obtendrán formatos QAM más eficientes tales como 64-QAM (2 bits de nivel y un bit de polaridad por componente) y 256-QAM (3 bits de nivel y un bit de polaridad por componente). Estos órdenes de constelaciones QAM son

los utilizados para las simulaciones realizadas en la interfaz gráfica desarrollada en el presente trabajo.

2.3.1.1 Constelaciones Uniformes (UC)

En las constelaciones uniformes los puntos de la constelación están uniformemente dispuestos en una rejilla cuadrada, con igual separación tanto horizontal como vertical, aunque son posibles otras configuraciones. En resumen, se caracterizan por su forma cuadrada y distribución uniforme de los símbolos, tal y como se observa en la figura 2.7.

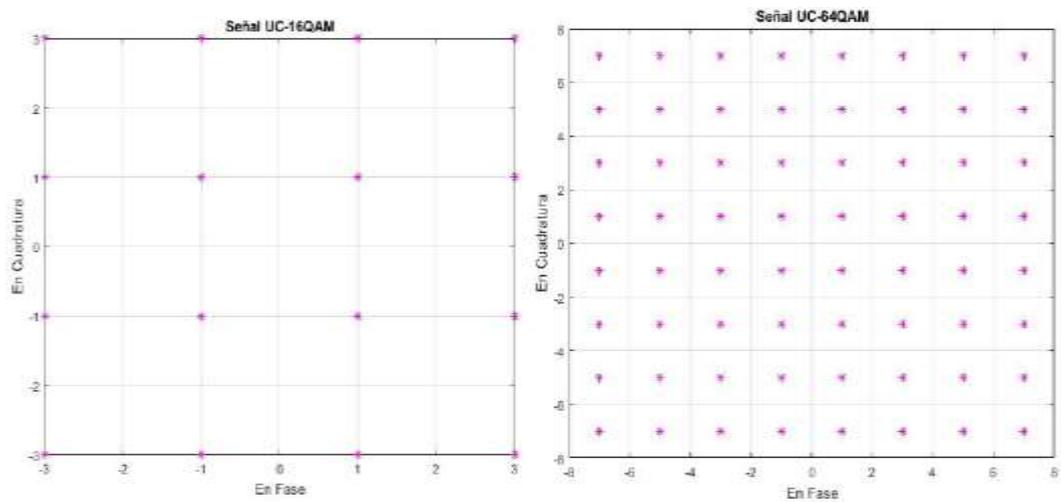


Figura 2.7 Distribución uniforme de las constelaciones M -arias.

Fuente: Elaborada por el autor

Sin embargo, el patrón uniforme de los puntos de constelación no proporciona la capacidad más alta de modulación con codificación de bits intercalados (BICM), por lo que se necesita un grado de no uniformidad para mejorar la capacidad BICM del sistema. (Zoellner & Loghin, 2013)

2.3.1.2 Constelaciones no Uniformes NUC

Recientemente, se han propuesto constelaciones no uniformes para sistemas de radiodifusión. Se ha demostrado que la capacidad de un sistema de comunicaciones puede incrementarse si todos los puntos de la constelación se adaptan al rango de SNR (relación entre la potencia y el

ruido recibido) en el que trabaja el sistema. Esto significa que para cada valor de SNR, hay una única posición para cada símbolo de la constelación que maximiza la capacidad del sistema, es decir, para una misma capacidad del sistema, esta técnica proporciona un valor más alto de SNR que el obtenido con una constelación uniforme. (Riche L. , 2012)

La no uniformidad de las constelaciones M-QAM viene dada a partir de la distribución de los símbolos en el eje de coordenadas (I, Q). En M-QAM dicha distribución se puede encontrar en una dimensión (1D) o dos dimensiones (2D).

2.3.1.3 Constelaciones no uniformes de una dimensión

En este tipo de constelaciones, se optimiza cada símbolo con respecto a un único eje de los dos posibles, lo que simplifica la complejidad de diseño de las mismas. Estas constelaciones se pueden demapear (obtener los bits recibidos a partir de los símbolos recibidos) con un simple demapeador de una dimensión. Las desventajas que presentan son, por un lado, el empeoramiento existente para valores de SNR menores de 11dB y, por otro que, al optimizar las constelaciones respecto a un solo eje, los grados de libertad de búsqueda de constelaciones optimizadas son menores y, por tanto, las constelaciones no son las más óptimas (véase figura 2.8).

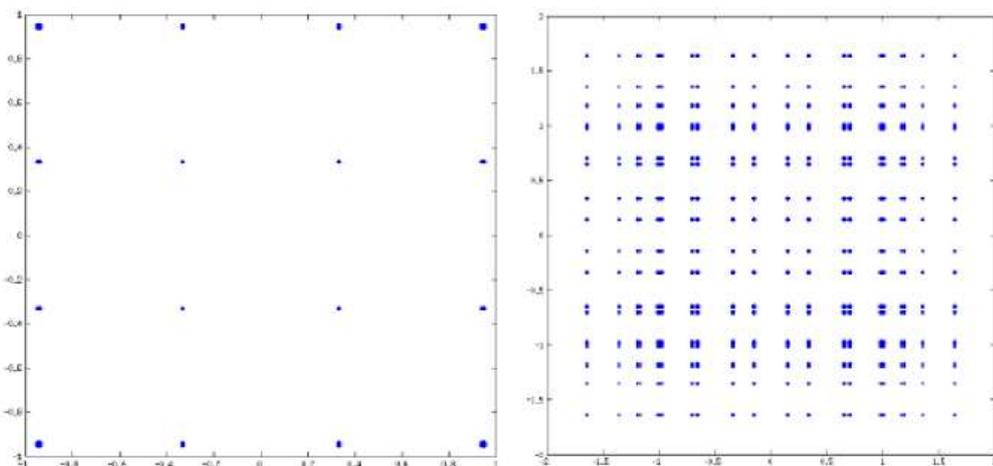


Figura 2.8. Constelaciones no uniformes de una dimensión.

Fuente: (Fontes Pupo, 2016)

2.3.1.4 Constelaciones no uniformes de dos dimensiones

En este caso, cada símbolo se optimiza con respecto a ambos ejes, resultando constelaciones con una forma circular (véase figura 2.9). La ventaja que presentan está en el incremento de la capacidad del sistema con respecto a las constelaciones no uniformes de una dimensión y las uniformes. Sin embargo, presentan una serie de desventajas ya que la complejidad a la hora del diseño y el procesado en la etapa de recepción es mayor que en el caso de las NUC-1D y las UC debido al mayor número de variables involucradas. (J.Scott, 2013)

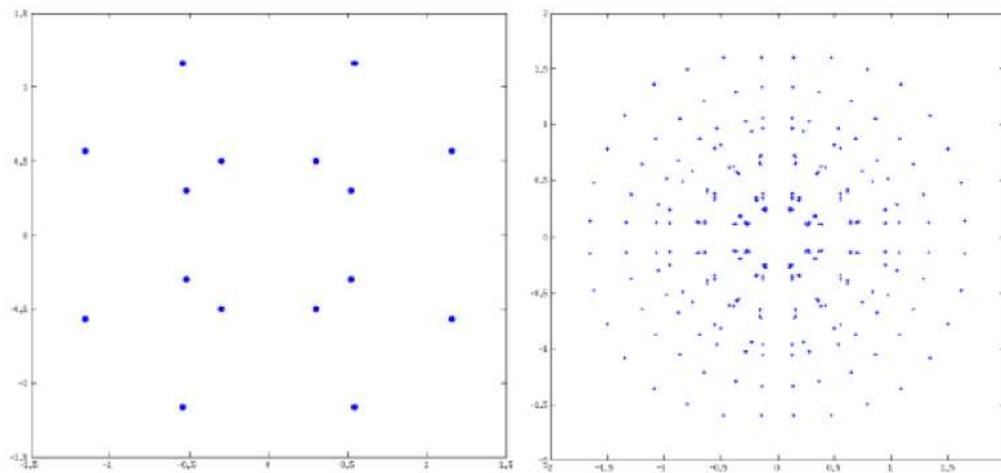


Figura 2.9 Constelaciones no uniformes de dos dimensiones.

Fuente: (Fontes Pupo, 2016)

La ganancia que puede presentar una constelación no uniforme en dos dimensiones respecto a una de una dimensión o una uniforme puede ser de varios dB para constelaciones de orden alto (para constelaciones de orden alto, el número de puntos a optimizar es mayor).

Por otro lado, se utiliza la constelación girada (RC), que es una técnica específica de diversidad de espacio de señal (SSD), para proporcionar robustez de señal en condiciones de difícil atenuación. Para la obtención de las constelaciones no uniformes, se tiene como primer paso la rotación de la constelación, técnica utilizada en la modulación digital, básicamente

en las modulaciones M-QAM, que consigue mejoras en la robustez (disminución del error de símbolo) y la eficiencia de la transmisión a partir de rotar las constelaciones de símbolos originales en un ángulo determinado. La idea básica es que los símbolos puedan reconstruirse a partir del valor de un único eje de la constelación, de forma que, si se pierde el valor del otro eje durante la transmisión, todavía se pueda reconstruir el símbolo enviado. (Ramirez, Ramirez, Chiang, & Nuñez, 2005)

2.3.1.5 Rotación de la constelación

El objetivo de las NUC 1D y 2D es hacer que las transmisiones de los dos canales no sean independientes entre sí, aumentando así la correlación entre estos. Como solución a este problema se ideó la rotación de la constelación (véase figura 2.10).

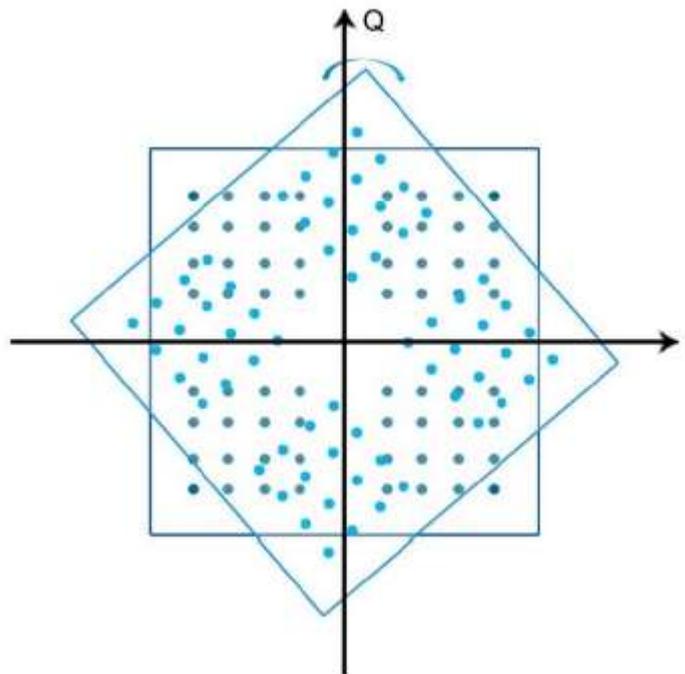


Figura 2.10 Constelación 64-QAM rotada.

Fuente: Elaborada por el autor

Se observa que si anteriormente se tenían 16 valores de amplitud (PAM o *Pulse Amplitude Modulation*) para cada eje, ahora hay 64 para cada eje, de forma que el 64-QAM rotado se parece a un 256-QAM. Intuitivamente, ya

se entiende que, si durante la transmisión se pierde el valor de uno de los ejes, con el valor del otro eje ya se tendría suficiente para poder determinar una posición dentro de la constelación. En este caso, el valor de I sí que brinda la información sobre el valor de Q y viceversa. (Wu, Rong, Salehian, & Gagnon, 2012)

2.3.1.6 Retardo del canal en cuadratura. Entrelazado.

Una vez que se generan los símbolos según la nueva constelación rotada, no tendría sentido enviarlos al mismo tiempo, ya que, si una interferencia ocurriese durante la transmisión, afectaría a los dos símbolos por igual y todo este proceso no tendría sentido, en el receptor no podría reconstruir el símbolo. En consecuencia, es vital separar los dos componentes de forma que el ruido les afecte de manera distinta a cada uno y existan mayores posibilidades de recibir al menos una parte del símbolo bien, porque debido a la rotación con esta única información se tiene suficiente. (Zhang, y otros, 2014)

Para conseguir esta separación entre canales se utiliza un entrelazado coordinado que separa de forma distinta los valores según el canal, el entrelazado se emplea para modificar la posición de símbolos consecutivos variando su posición en el tiempo, para así combatir los errores de la transmisión en ráfaga. De esta forma siempre el canal (Q) estará desfasado un tiempo de pulso con respecto al canal (I). Dicho de forma sencilla, se introduce un retardo de un tiempo de pulso en el canal de cuadratura.

Es importante resaltar que este paso es vital para el buen funcionamiento del sistema y que toda rotación de la constelación requiere también de un retardo en el canal de cuadratura. Se consigue disminuir la probabilidad de error de símbolo en recepción para una misma relación señal-ruido. Cuanto más grandes son los valores de relación señal-ruido, más eficaz es la rotación de la constelación. Por lo tanto, en un canal ruidoso, la utilización de esta técnica permitirá tener más robustez y en transmisión de señales

audiovisuales esta técnica ayuda a poder reducir el SNR (*Signal-Noise Ratio*) mínimo necesario, hecho que la convierte en una técnica muy valiosa. (Regueiro, et al., 2015)

2.4 Características del canal de transmisión

Un elemento básico de un sistema digital de comunicaciones es el canal, pues es el medio físico que es usado para enviar una señal desde el transmisor hasta el receptor.

La señal al transmitirse por un medio físico se corrompe por mecanismos tales como el ruido térmico y de disparo (generados por dispositivos electrónicos), ruido provocado por el hombre (ruido de ignición de los vehículos), y ruido atmosférico (descargas eléctricas de las tormentas) por tanto, un problema común en la transmisión de la señal a través de cualquier canal es el ruido que con mucha frecuencia ocurre en forma aditiva. (Proakis, 2008)

Otros tipos de degradaciones que se pueden encontrar en la transmisión sobre un canal son la atenuación de la señal, distorsión de amplitud y fase, y distorsión debido a las multitrayectorias. Asimismo, otra limitación básica es el ancho de banda del canal.

Los diferentes canales en la comunicación se modelan por lo general como un canal con ruido, en la mayoría de los casos se modelan como un canal con Ruido Aditivo Blanco Gaussiano (AWGN) por sus siglas en inglés, (*Additive White Gaussian Noise*), pero también se encuentran modelos con ruido Rayleigh, además del canal simétrico binario.

2.4.1 Canal AWGN

El canal AWGN (Ruido Aditivo Blanco Gaussiano) agrega ruido blanco gaussiano a la señal de entrada. Es uniforme en el tiempo y el espacio, no

contempla selectividad temporal ni frecuencial. No existe físicamente pero cuando el ancho de banda de la señal es mucho menor que el del canal, este se puede aproximar a un canal AWGN.

En los sistemas móviles, el ruido considerado como Aditivo Blanco Gaussiano se suma directamente a la señal transmitida (véase ecuación 2.4).

$$r(t) = \alpha * s(t) + n(t) \quad (2.4)$$

Donde α es el factor de atenuación, $s(t)$ es la señal transmitida, y $n(t)$ es el ruido aditivo. (Proakis, 2008)

Es llamado ruido gaussiano debido a que es un proceso aleatorio con distribución gaussiana de media cero ($\mu=0$), varianza σ^2 y densidad espectral de potencia $N_0/2$ (W/Hz), con una función de densidad continua. En la ecuación 2.5 se expresa la función de densidad de probabilidad de la distribución normal.

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.5)$$

2.4.2 Canal de Rayleigh

El canal Rayleigh es un canal lineal e invariante en el tiempo y selectivo en frecuencia que se puede descomponer en fase y en cuadratura. La señal recibida sufre variaciones rápidas debidas a los aportes destructivos y constructivos de las distintas multitrayectorias.

La función de densidad de probabilidad de la distribución Rayleigh está dada por la siguiente expresión:

$$P(x) = \frac{x}{\sigma^2} * e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad , \quad x \geq 0 \quad (2.6)$$

Donde x representa la amplitud del voltaje de la señal en recepción, $-x^2/2$ la potencia instantánea y σ^2 la potencia recibida.

Es uno de los modelos de desvanecimiento aplicado al canal inalámbrico para describir escenarios que no tienen un camino predominante o abierto, es decir en sistemas NLOS (*Non Line of Sight*), representando el peor escenario, es utilizado en ambientes difíciles como ciudades metrópolis y áreas urbanas. El modelo de Rayleigh se fundamenta matemáticamente con la distribución Rayleigh, donde representa estadísticamente la naturaleza variable en el tiempo de la envolvente de una señal en un esquema de desvanecimiento plan. (Fernández, 2014)

Un canal de señal en decremento o de Rayleigh, no es ruido en el sentido intuitivo de la familia del ruido blanco, sino un proceso aleatorio, el cual se analiza y modela de una forma semejante al del ruido gaussiano, lo que con la diferencia de que en Rayleigh el desvanecimiento (variación de la amplitud en tiempo y frecuencia de la señal) se caracteriza por ser una perturbación no aditiva de la señal en el canal inalámbrico, lo que se considera como otra fuente de degradación de la señal.

2.5 Parámetros de calidad.

No se puede hablar de un sistema de comunicaciones sin mencionar el uso eficiente del canal, la tasa de bit erróneo, la relación entre la potencia máxima de una señal y su valor medio y la optimización del espectro disponible. Estos son parámetros de calidad primordiales para lograr la eficiencia y el buen rendimiento de los diversos sistemas de comunicaciones.

2.5.1 Tasa de Bit Erróneo

Uno de los cambios que los sistemas de las comunicaciones digitales han traído a la ingeniería de radio es la necesidad de poder realizar mediciones de principio a fin del funcionamiento del sistema. Esta medición es usualmente la tasa de medición de bits erróneos BER (*Bit Error Rate* por sus siglas en inglés), la cual cuantifica la fidelidad completa del sistema de comunicación desde bits de entrada a bits de salida, incluyendo las antenas electrónicas y los canales de la señal en medio.

La BER se define como:

$$BER = \frac{Bre}{Bt} \quad (2.7)$$

Donde *Bre* es la cantidad de bits erróneos y *Bt* es el total de bits transmitidos en un intervalo de tiempo definido.

Con una señal fuerte y un canal de señal sin perturbaciones, este número es tan pequeño que sería insignificante, pero se vuelve significativo cuando la transmisión es imperfecta a través de los circuitos electrónicos (amplificadores, filtros, mezcladores y convertidores digital/analógico), y el medio de propagación.

Por tanto, con el uso de la BER es que los equipos receptores pueden determinar qué símbolos se transmitieron correctamente. Teniendo en cuenta que, la señal mapeada en la constelación tiene asociada una “región de decisión” y que, conforme una señal se propaga a través del canal de comunicación, se verá afectada por ruido, provocando una modificación en la posición de los símbolos mapeados en la constelación. Cuando uno de estos símbolos se ubica más allá de la “región de decisión” que le corresponde, éste se confundirá con alguno de los símbolos adyacentes y, en consecuencia, provocará un error de bits.

2.5.2 Proporción Potencia Pico-Potencia Media (PAPR)

Se define como PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) a la relación entre la potencia máxima de una señal y su valor medio. Un valor grande de PAPR da la idea de una señal con una gran dispersión en sus amplitudes. Por lo tanto, el máximo teórico de PAPR se obtendrá cuando el total de las portadoras se encuentren en fase.

Dado que la modulación OFDM consiste en una transmisión en paralelo de N sub-portadoras simultáneas, estas pueden sumarse de forma constructiva provocando una PAPR elevada. Por lo que se hace necesario el estudio del parámetro PAPR en la modulación OFDM, puesto que un valor elevado de la misma provocaría el trabajo en régimen lineal de los amplificadores de alta potencia con la consecuente pérdida de eficiencia en los mismos.

La PAPR se define según la siguiente ecuación:

$$PAPR(s(t)) = 10 \log \frac{\max |s(t)|^2}{E[|s(t)|^2]}, 0 \leq t \leq T_s \quad (2.8)$$

Donde T_s representa el tiempo de símbolo, $E[\cdot]$ el valor esperado y $s(t)$ es expresión de un símbolo OFDM en tiempo continuo.

Puesto que el valor máximo teórico del PAPR es $10 \log[\cdot]$, aquellos sistemas donde el número de sub-portadoras sea muy elevado, la PAPR resulta un fenómeno negativo a tener en cuenta.

2.5.3 Eficiencia Espectral

La eficiencia espectral es uno de los parámetros de calidad más importantes a medir en un sistema de comunicaciones, siendo uno de los

objetivos primordiales de los nuevos estándares de comunicación NGB-W y ATSC 3.0, el uso eficiente del espectro disponible.

Las técnicas de transmisión digital hacen un uso más eficiente del espectro radioeléctrico. Esa mayor eficiencia se debe, entre otras razones, a que la tecnología digital permite transmitir la misma información que se transmitiría con tecnología analógica, pero utilizando para ello menos recursos del espectro. Además, con esta tecnología no existe la necesidad de disponer de importantes canales de guarda entre canales adyacentes para evitar interferencias, como ocurre en el caso de la televisión analógica.

Conforme comiencen a ofrecerse nuevos servicios digitales como telefonía, video por demanda y otras aplicaciones interactivas, será necesario hacer un uso más eficiente del espectro, lo que invita a pensar en formatos de modulación como 256-QAM. Aun cuando algunos de los equipos terminales del suscriptor, como cajas decodificadoras y cable-módems, ya están habilitados para recibir información en 256-QAM, la migración hacia una red que permita transmisiones más eficientes es aún considerada un reto.

El uso eficiente del espectro para OFDM depende, en gran medida del orden y tipo de modulación, el tipo de constelación, además de la longitud del prefijo cíclico y del FFT (*Transformada Rápida de Fourier*).

$$\eta_{\text{OFDM}} = m * \frac{N_{\text{FFT}}}{N_{\text{FFT}} + N_{\text{cp}}} \quad (2.9)$$

De donde se tiene que $m = \log_2 M$, siendo M el orden de modulación, N_{FFT} es la longitud de la FFT y N_{CP} la longitud del prefijo cíclico.

Mientras mayor sea el número de bits que pueda transmitirse por cada símbolo, podrá alojarse la misma cantidad de información en un ancho de banda menor.

Si se comparan diferentes formatos de modulación QAM con cualquier otro esquema de modulación binaria, se puede apreciar que 16-QAM es cuatro veces más eficiente en el uso del ancho de banda, en tanto que 64-QAM y 256-QAM son, respectivamente, 6 y 8 veces más eficientes. No deberá olvidarse que existe un compromiso importante entre eficiencia en el uso del ancho de banda y la susceptibilidad al ruido de las señales transmitidas a través del canal de comunicación.

CAPITULO 3 . Diseño de la Interfaz Gráfica de Usuario.

En el presente capítulo se describe el diseño de la interfaz gráfica de usuario que se propone para la modelación y evaluación de la técnica modulación QAM a través de sus constelaciones uniformes y no uniformes. Para este fin se describen además las herramientas de MATLAB utilizadas.

MATLAB acrónimo de “*Matrix Laboratory*” es una herramienta de simulación o *software* matemático que presenta un lenguaje de programación propio (lenguaje M) además de la comunicación con otros programas en otros lenguajes y con dispositivos *hardware*. Es un lenguaje fácil de utilizar ya que integra el cálculo, la visualización y la programación en una interfaz sencilla, pero a la vez muy poderosa.

Es el programa idóneo para realizar cálculos numéricos con vectores, matrices y números escalares, tanto reales como complejos; modelado, simulación y prueba de prototipos; análisis de datos, exploración y virtualización. Es capaz de desarrollar aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés). Es una aplicación muy atractiva y una de las herramientas más utilizadas para la resolución de problemas de gran envergadura, producto a su alta efectividad, precisión en los resultados y a la rapidez.

MATLAB actualmente está disponible para los sistemas operativos Windows, MacOS y GNU/Linux. La interfaz general del mismo se muestra en la figura 3.1.

El lenguaje de programación del MATLAB, llamado lenguaje M, se encuentra optimizado para el trabajo con matrices y números complejos, cuenta además con comandos para graficar y representar datos tanto en 2D como en 3D.

Así mismo, MATLAB cuenta con un conjunto de herramientas diseñadas para trabajos específicos en determinadas áreas llamadas *Toolboxes*. Una gran parte de estos comandos han sido desarrollados para el estudio y análisis de las comunicaciones y procesamiento digital de señales.

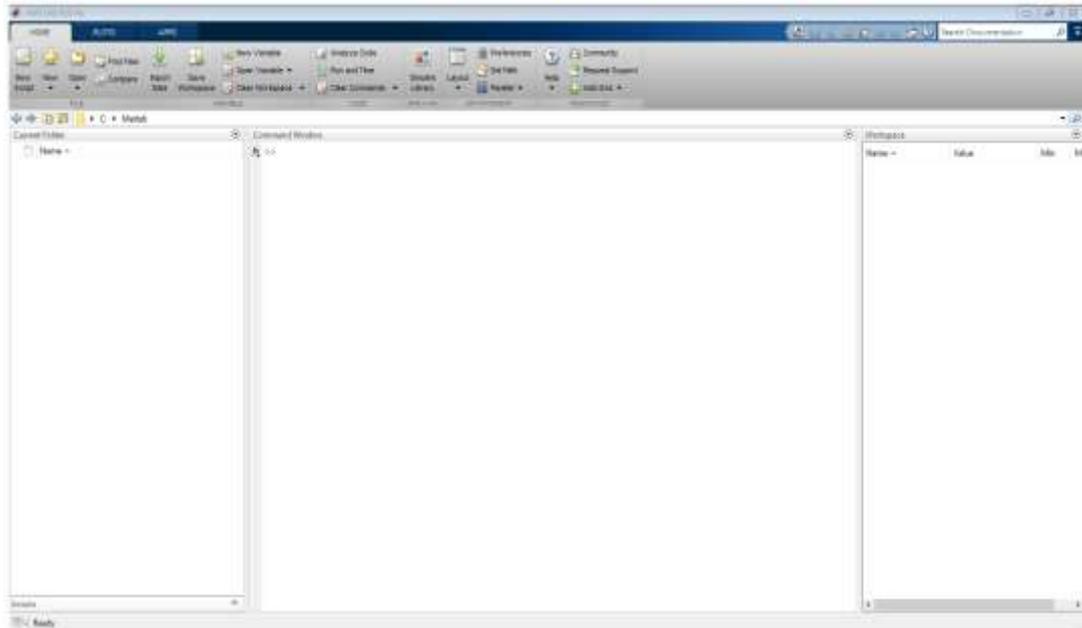


Figura 3.1. Interfaz gráfica del MATLAB 2014.

Fuente: Elaborada por el autor

3.1 Herramienta GUIDE.

El desarrollo de una aplicación en MATLAB es llevado a cabo programando uno o varios algoritmos agrupados en un fichero con extensión `.m` denominado *script*. Estos ficheros solo pueden ser usados empleando la consola de comandos del MATLAB.

Para facilitar y mejorar la experiencia de usuario MATLAB brinda la herramienta GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*), con esta se pueden realizar interfaces graficas de usuarios, permitiendo a los usuarios interactuar con las aplicaciones desarrollados en MATLAB de una forma más amigable en un entorno visual sencillo y práctico de usar.

Con GUIDE se pueden realizar y ejecutar programas donde se necesiten ingresar datos, procesarlos y representar los resultados de forma gráfica. El entorno visual del mismo tiene las características básicas generales asociadas a los programas de desarrollo tales como Visual Studio o LabWindows.

La filosofía del trabajo en GUIDE es asociar cada componente gráfico con funciones de respuesta denominadas *callbacks*. La ejecución de cada *callback* se desencadena por alguna acción que realice el usuario sobre la interfaz gráfica, pudiendo ser esta dar clic sobre un botón, cambiar un valor en un cuadro de entrada de datos o la selección de una opción en un menú contextual.

Para acceder a la herramienta GUIDE en MATLAB basta con ejecutar el comando *guide* como se muestra en la figura 3.2. Al ejecutar el comando se abre la ventana de acceso rápido del editor GUIDE, mostrada en la figura 3.2, donde se brindan varias plantillas para la creación de interfaces, en este caso se escogió la opción plantilla en blanco como se muestra en la figura 3.3.

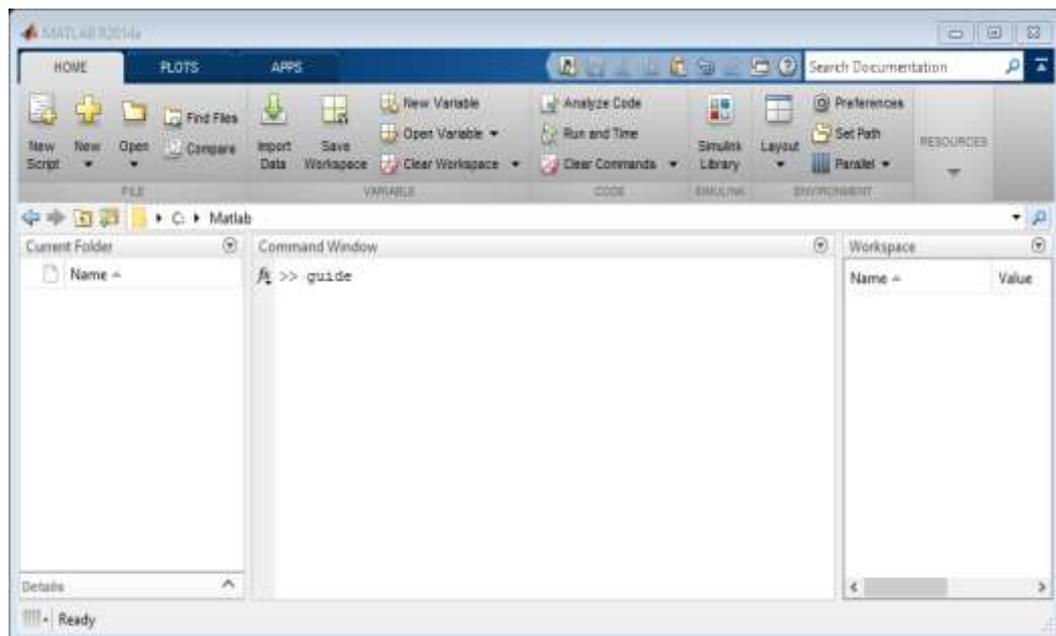


Figura 3.2. Ejecución de la herramienta GUIDE.

Fuente: Elaborada por el autor

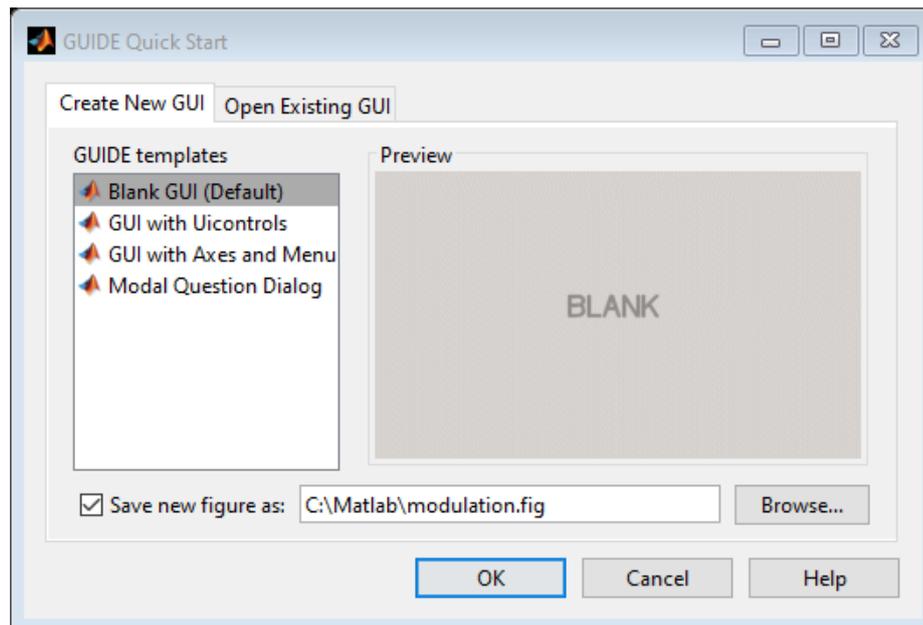


Figura 3.3. Ventana de acceso rápido del editor GUIDE

Fuente: Elaborada por el autor

Al seleccionar la plantilla en blanco aparece el editor de la interfaz tal como se muestra en la figura 3.4.

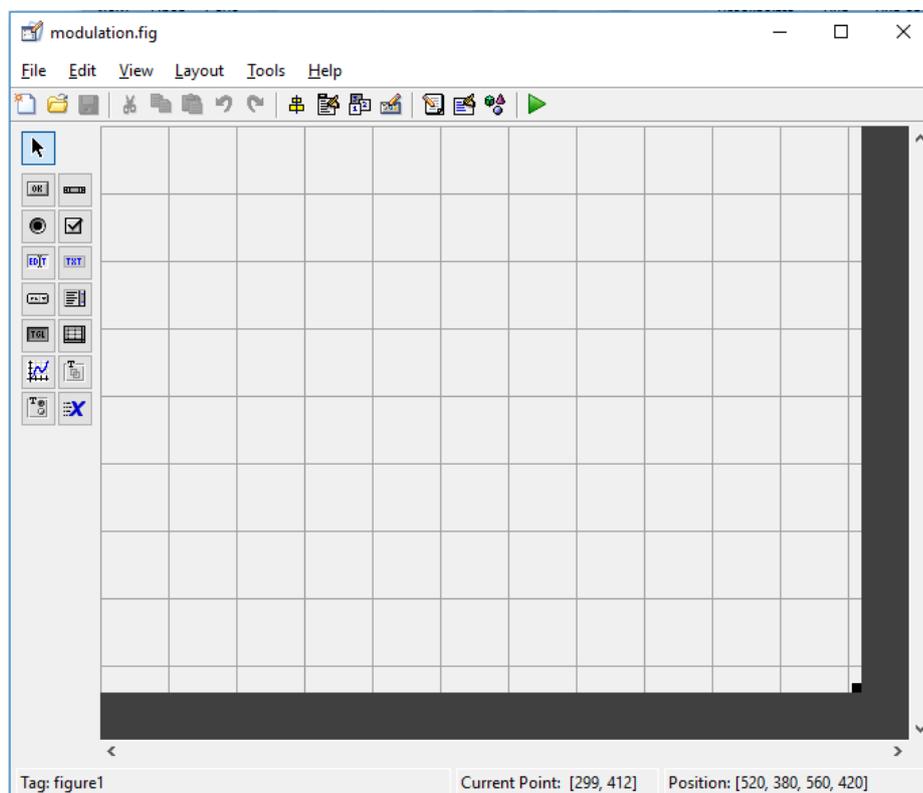


Figura 3.4. Entorno de desarrollo GUIDE

Fuente: Elaborada por el autor

El entorno de desarrollo GUIDE cuenta con un cuadro de componentes a la izquierda donde se encuentran los controles gráficos que se pueden emplear en el desarrollo de las aplicaciones. En la parte superior se encuentra la barra de menús y la barra de herramientas, y en la parte derecha se encuentra la región de trabajo, donde arrastrando componentes desde el cuadro de controles es posible diseñar la aplicación para que tenga el aspecto que se desea obtener.

Los controles gráficos disponibles se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Controles gráficos del GUIDE

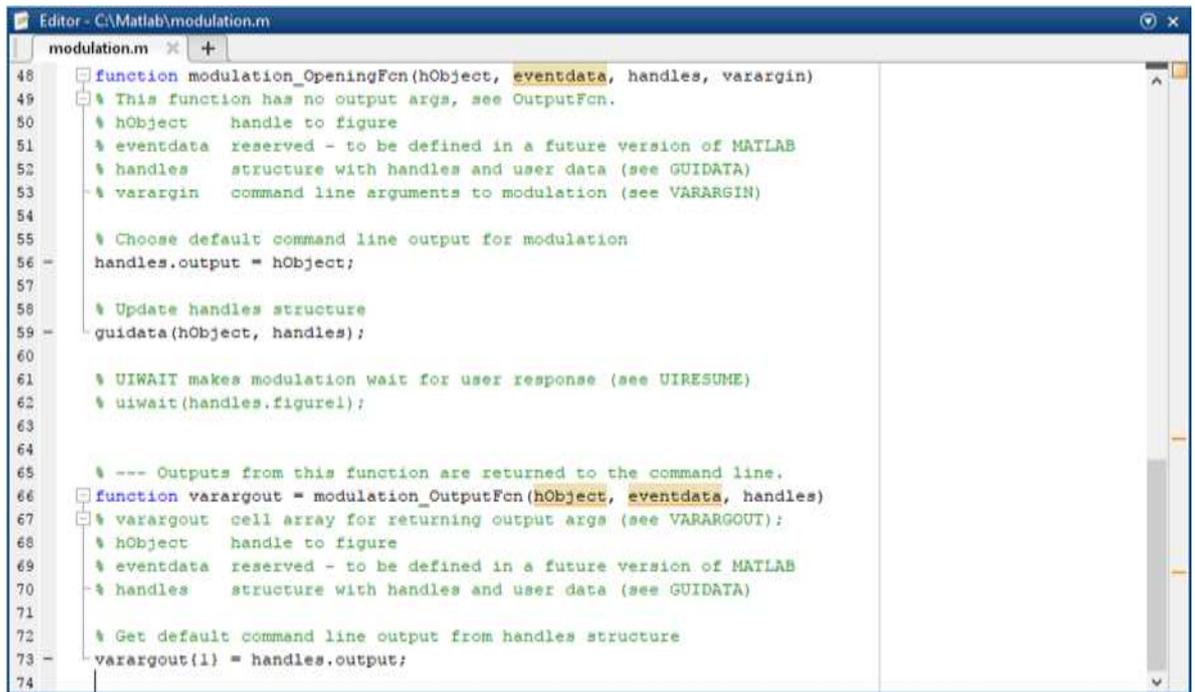
	<p><i>Push Button</i>, botón de pulsación, genera una acción al ser presionado.</p>
	<p><i>Slider</i>, barra deslizadora: permite seleccionar un valor numérico de entre un rango, la posición de la barra indica el valor seleccionado.</p>
	<p><i>Radio Button</i>, botón de selección: permite escoger una opción de entre un conjunto de opciones disponibles.</p>
	<p><i>CheckBox</i>, cuadro de selección: activa o desactiva una opción.</p>
	<p><i>Edit Text</i>, texto editable: control de entrada de datos en forma de cadena de texto. Permite la introducción de número pero se debe realizar la conversión de texto a número por código.</p>
	<p><i>Static Text</i>, texto estático: muestra un texto no editable, sirve para brindar información sobre otros controles o instrucción de uso de la aplicación.</p>
	<p><i>Pop-up Menu</i>, menú desplegable que despliega un conjunto de opciones permitiendo escoger un valor.</p>
	<p><i>Listbox</i>, lista: presenta una lista de elementos, permitiendo seleccionar uno o varios de ellos.</p>

	<i>Toggle Button</i> , botón de estado: al igual que el <i>Push Button</i> genera una acción al ser presionado, visualmente muestra dos estados, al ser presionado se mantiene activado y al ser presionado nuevamente vuelve a su estado normal o desactivado.
	<i>Table</i> , tabla: permite mostrar información en forma de tablas.
	<i>Axes</i> , ejes: permite mostrar gráficos.
	<i>Panel</i> , permite ordenar o agrupar componentes gráficos, facilitando el orden de las interfaces.
	<i>Button Group</i> , conjunto botones, agrupa <i>Radio Buttons</i> o <i>Toggle Buttons</i> de forma que el estado de uno dependan de los de los otros.
	<i>ActiveX</i> , control que permite la inserción de un control realizado en un programa fuera del entorno de MATLAB.

Fuente: Elaborada por el autor

Una aplicación desarrollada con la herramienta GUIDE es guardada en dos ficheros diferentes. El primero tiene extensión “.fig” y contiene la descripción gráfica de los controles empleados en el diseño, este fichero solo se puede abrir con la herramienta GUIDE.

El segundo fichero tiene extensión .m y básicamente es un *script* que contiene el código de inicialización y configuración de las plantillas, así como las funciones del tipo *callback* donde se desarrollan las acciones de la interfaz. Se muestra en la figura 3.5.



```
48 function modulation_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
49 % This function has no output args, see OutputFcn.
50 % hObject handle to figure
51 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
52 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
53 % varargin command line arguments to modulation (see VARARGIN)
54
55 % Choose default command line output for modulation
56 handles.output = hObject;
57
58 % Update handles structure
59 guidata(hObject, handles);
60
61 % UIWAIT makes modulation wait for user response (see UIRESUME)
62 % uiwait(handles.figure1);
63
64
65 % --- Outputs from this function are returned to the command line.
66 function varargout = modulation_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
67 % varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
68 % hObject handle to figure
69 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
70 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
71
72 % Get default command line output from handles structure
73 varargout{1} = handles.output;
74
```

Figura 3.5. Fichero con el código de inicialización y callback de la interfaz creada

Fuente: Elaborada por el autor

3.2 Diseño de la estructura de la aplicación.

Antes de diseñar la interfaz gráfica de la aplicación es necesario tener en cuenta los objetivos que se persiguen con la misma para poder diseñar las interfaces de acuerdo a estos. La figura muestra el algoritmo que se tomó como referencia para el desarrollo de la aplicación.

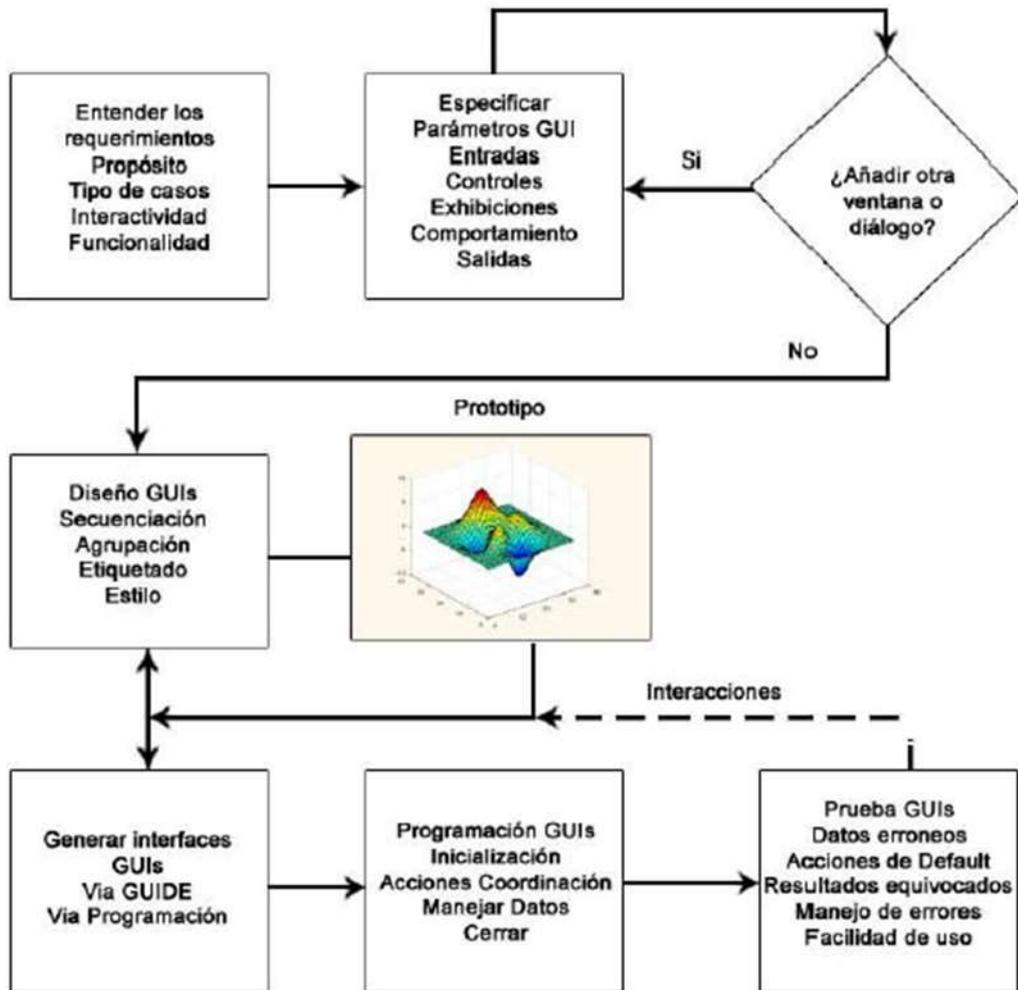


Figura 3.6. Algoritmo de diseño de una interfaz gráfica en MATLAB.

Fuente: (Sigmon, 2002)

La aplicación desarrollada en este trabajo lleva el nombre de “ModelQAM” y cuenta con una interfaz principal y una de ayuda. En los epígrafes siguientes se muestra el desarrollo de las mismas.

3.2.1 Diseño de la interfaz principal de la aplicación ModelQAM 1.0.

La interfaz diseñada en este trabajo va a permitir el estudio de las simulaciones de las constelaciones uniformes y no uniformes de la modulación de amplitud en cuadratura.

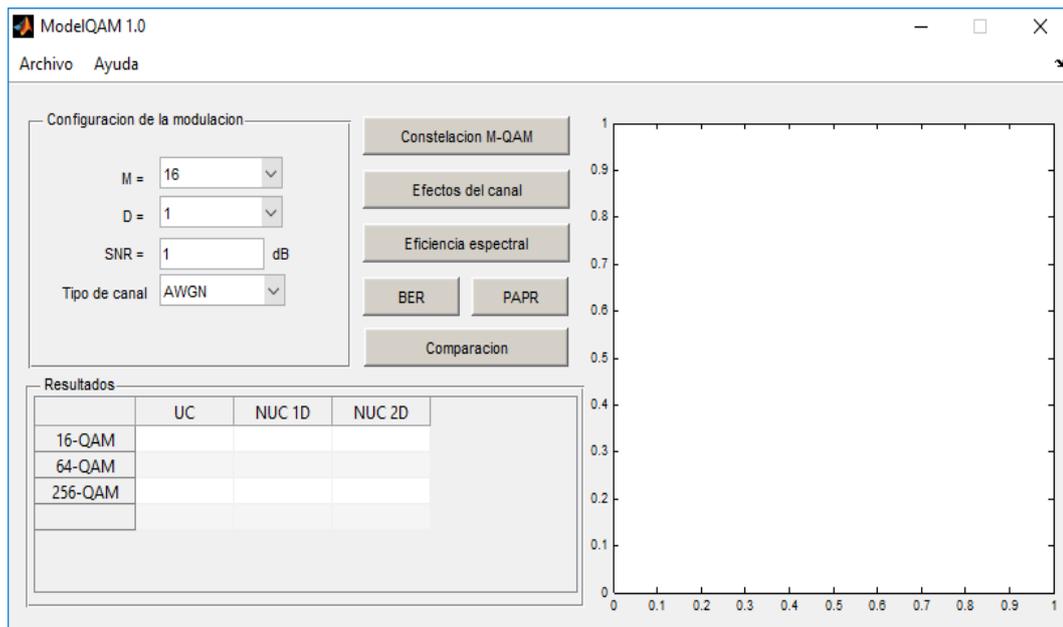


Figura 3.7. Interfaz de la pantalla principal.

Fuente: Elaborada por el autor

En la composición de la interfaz principal se emplearon varios elementos del cuadro de herramientas agrupados de forma que el entorno gráfico de la herramienta fuese sencillo y práctico a la hora de su utilización por parte del usuario de la aplicación.

Según esta idea se situaron los siguientes elementos, un panel de entrada de datos que contiene los parámetros de las simulaciones. Aquí es donde el usuario puede cambiar las variables de entrada. Un control axes para mostrar las gráficas de las constelaciones; un panel donde se muestran los resultados, conformado por un control del tipo *table* y varios *push buttons* que ejecutan diferentes acciones.

También se elaboró una barra de menú con las acciones de “Reiniciar”, “Salir” y “Ayuda”. Para la elaboración de estos menús se empleó la herramienta *Menu Editor* del GUIDE de MATLAB tal como se muestra en la figura siguiente.

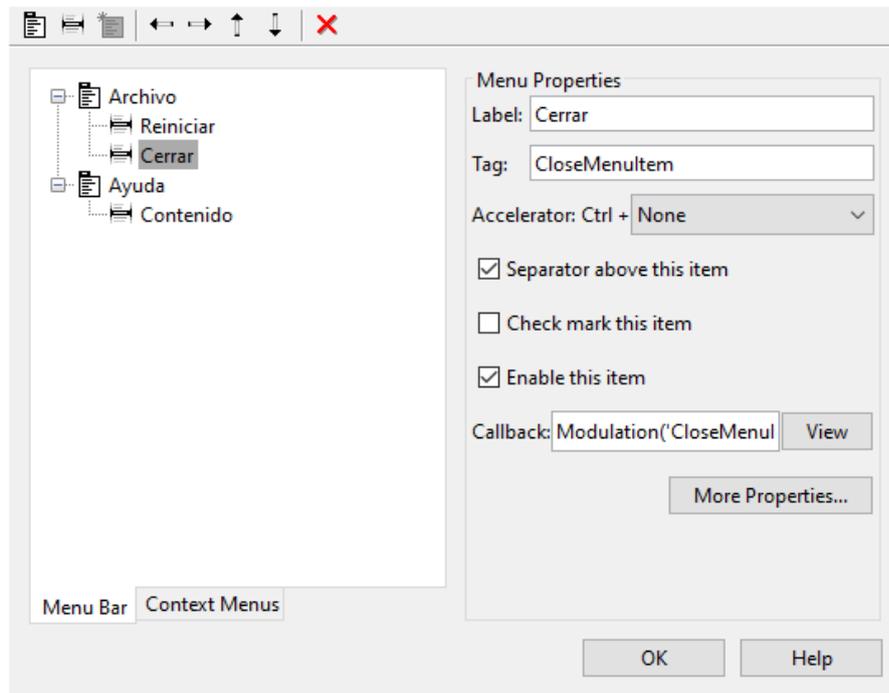


Figura 3.8. Editor de menús del GUIDE de MATLAB

Fuente: Elaborada por el autor

El elemento “Reiniciar” dentro del menú “Archivo” provoca que los valores de los controles de entrada vuelvan a sus valores por defecto, mientras que los controles de salida se quedan en blanco.

El elemento “Cerrar” muestra un cuadro de diálogo donde se le pide confirmación de salida al usuario, el código se muestra en la figura 3.9.

```

142 % -----
143 function CloseMenuItem_Callback(hObject, eventdata, handles)
144 % hObject    handle to CloseMenuItem (see GCBO)
145 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
146 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
147 - selection = questdlg('Desea salir de Modulation Toolkit?',...
148                      'Mensaje',...
149                      'Si', 'No', 'Si');
150 - if strcmp(selection, 'No')
151 -     return;
152 - end
153 - delete(handles.figure1)

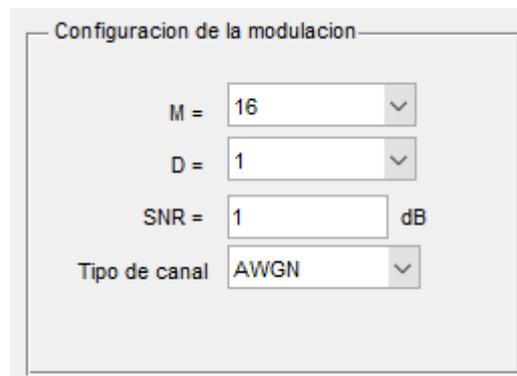
```

Figura 3.9. Código del elemento "Cerrar".

Fuente: Elaborada por el autor

3.2.1.1 Panel de entrada de datos.

En este panel se agrupan los elementos que permiten variar los parámetros de la simulación de las constelaciones QAM, en la figura se muestra este panel luego de haber introducido los parámetros: índice de modulación (M), la dimensión (D), la relación señal a ruido (SNR) y el tipo de canal (AWGN y Rayleigh).



The image shows a software interface titled "Configuración de la modulación". It contains four input fields arranged vertically. The first field is labeled "M =" and contains the value "16". The second field is labeled "D =" and contains the value "1". The third field is labeled "SNR =" and contains the value "1", with "dB" written to its right. The fourth field is labeled "Tipo de canal" and contains the value "AWGN". Each input field has a small downward-pointing arrow on its right side, indicating a dropdown menu.

Figura 3.10. Panel para la introducción y selección de parámetros

Fuente: Elaborada por el autor

De los elementos con que cuenta este panel el único en que el usuario puede cometer algún error a la hora de introducción de los datos es en el *Edit Text* de la relación señal a ruido, donde los valores admisibles son de 1 a 10dB, en caso de que se introduzca un valor fuera de este rango la aplicación responde con un mensaje de error tal como se muestra en la figura 3.11.

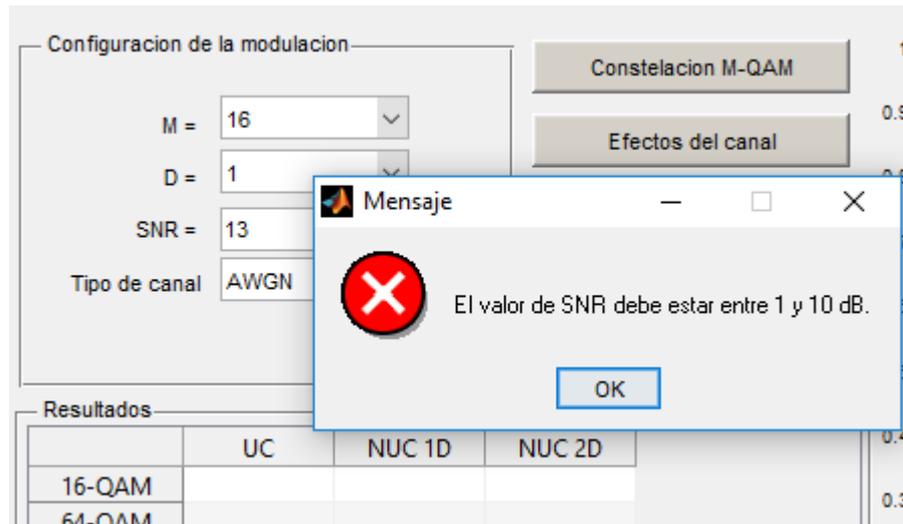


Figura 3.11. Validación de los datos de entrada

Fuente: Elaborada por el autor

3.2.1.2 Panel de resultados.

El panel de resultados está compuesto por un control del tipo *table*, donde se muestran los resultados derivados de las simulaciones realizadas, aquí se mostrarán luego de ser ejecutadas las *callback* asociadas a los botones “Comparación”, “PAPR” y “Eficiencia Espectral”, por lo que se adapta a los parámetros, tanto cuantitativos como cualitativos de cada botón.

En la figura 3.12 se muestra la visualización del panel de resultados cuando se presiona sobre el botón “Comparación”.

Resultados			
	UC	NUC 1D	NUC 2D
BER (%)	14	3	2
PAPR (dB)	10.5200	9.4800	9.5100
Ef. Esp. (bps/Hz)	11.2000	14.6800	17.1300

Figura 3.12. Panel de resultados mostrando los valores de una simulación

Fuente: Elaborada por el autor

3.2.1.3 Botón “Constelaciones M-QAM”.

Al presionar el botón “Constelación M-QAM” se obtiene en el control axes la modelación gráfica de la constelación correspondiente a los datos introducidos por el usuario en el panel de entrada de datos.

3.2.1.4 Botón “Efectos del canal”.

Este botón muestra en el control axes la relación señal a ruido de la señal transmitida para los valores de M-QAM seleccionados en el panel de entrada, ya sea en el canal AWGN o en el Rayleigh, el valor de SNR se toma del correspondiente campo de entrada en dicho panel.

3.2.1.5 Botón “Eficiencia espectral”.

Al presionar el botón “Eficiencia espectral” se mostrarán en el panel de resultados y en el control axes los resultados de la simulación de este parámetro. En el objeto *table* se muestra una comparación entre los valores de eficiencia de los tres tipos de órdenes de modulación disponibles 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM, tomando como base las longitudes de FFT de 4k, 8k, 16k y 32k.

3.2.1.6 Botón “BER”.

Con el botón “BER” se simula y muestra en el axes los resultados de la relación de los bits recibidos de forma incorrecta contra el total de bits transmitidos en un intervalo de tiempo determinado, para los valores de M, D y SNR previamente seleccionados por el usuario en el panel de entrada.

3.2.1.7 Botón “PAPR”.

En el caso de la Proporción Potencia Pico-Potencia Media se cuenta con el botón “PAPR” el cual actúa sobre el panel de resultados y sobre el control axes. En el control axes se representa gráficamente las magnitudes mostradas en el panel de resultados según el orden de modulación seleccionado en el panel de entrada.

CAPITULO 4 . Evaluación de los resultados.

En este capítulo se expone la validación del correcto funcionamiento de la interfaz gráfica de usuario diseñada. Para esto se realizan distintas operaciones sobre el *software* y se analiza si los resultados obtenidos concuerdan con los fundamentos teóricos del tema.

4.1 Análisis de las constelaciones M-QAM.

En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se pueden apreciar el resultado de graficar constelaciones uniformes y no uniformes de 1D y 2D para el caso de 64-QAM.

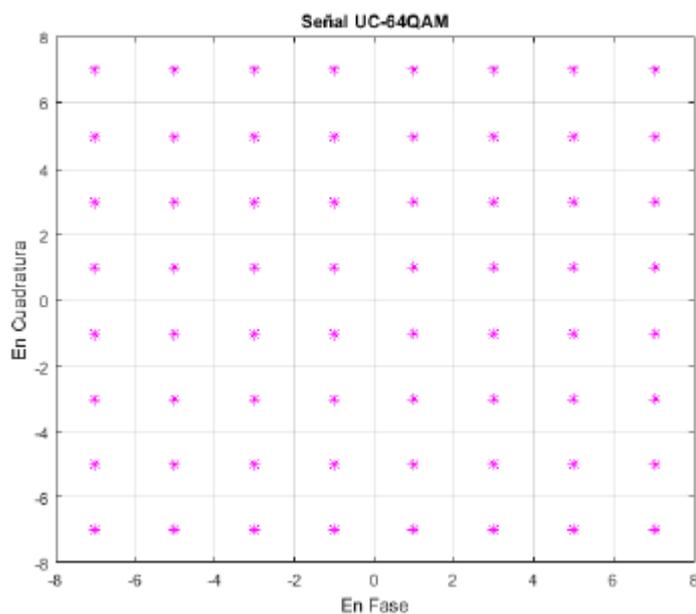


Figura 4.1. Control axes mostrando una constelación uniforme para 64-QAM

Fuente: Elaborada por el autor

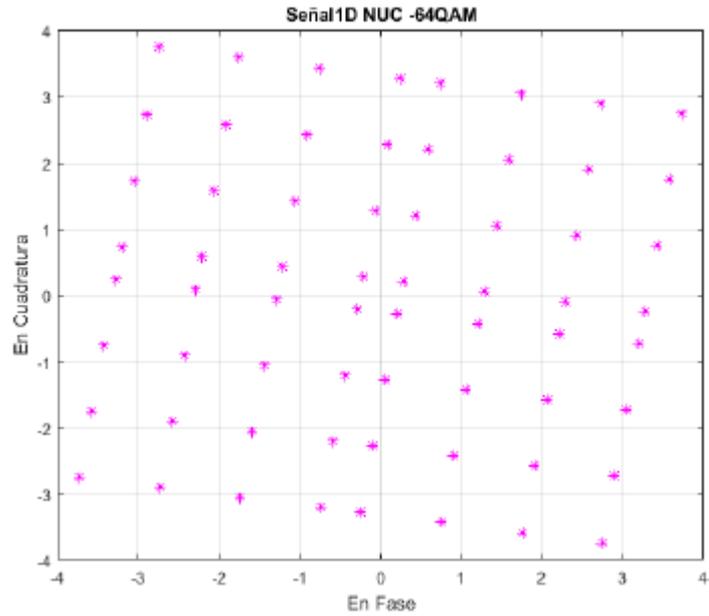


Figura 4.2. Control axes mostrando una constelación no uniforme de una dimensión para 64-QAM Fuente: Elaborada por el autor

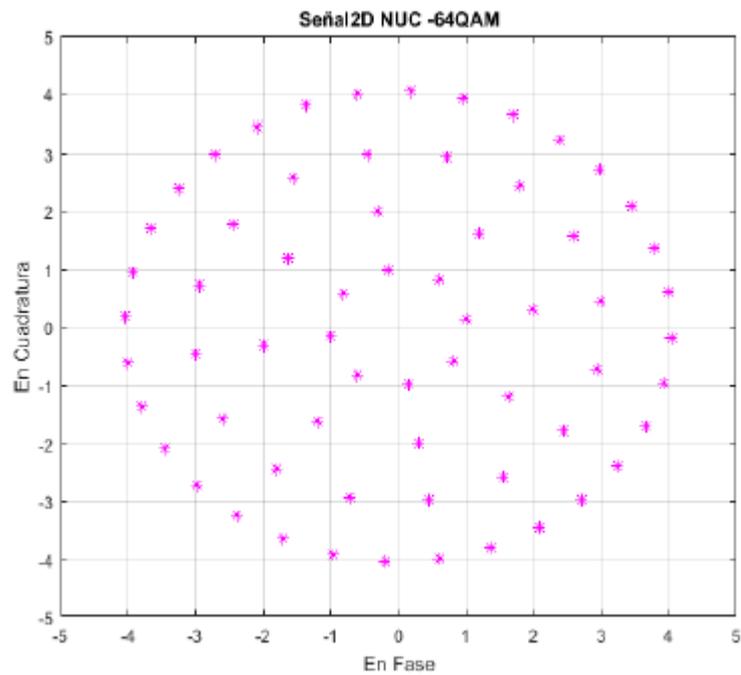


Figura 4.3. Control axes mostrando una constelación no uniforme de dos dimensiones para 64-QAM Fuente: Elaborada por el autor

De las figuras antes vistas, el usuario puede apreciar en el primer caso, la distribución cuadrada y uniforme de los símbolos y en los casos siguientes, las distribuciones no uniformes (NUC) con respecto al eje de coordenadas, en dependencia de la dimensión.

4.2 Análisis de los efectos del canal.

Tomando como referencia la NUC-2D, en un canal gaussiano con una SNR de 10dB se muestran en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 los resultados de los tres órdenes de modulación.

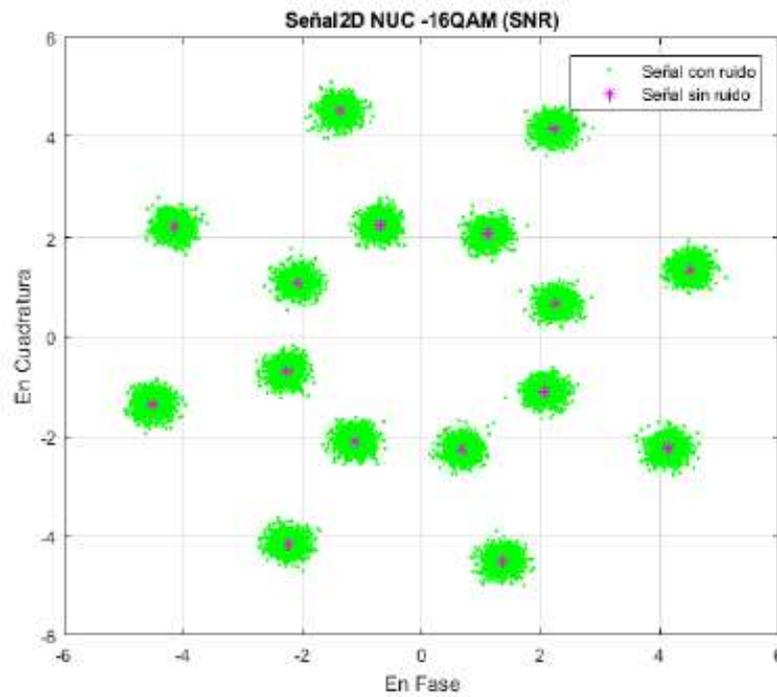


Figura 4.4. Efectos del canal AWGN para 16-QAM NUC-2D y una SNR=10dB.

Fuente: Elaborada por el autor

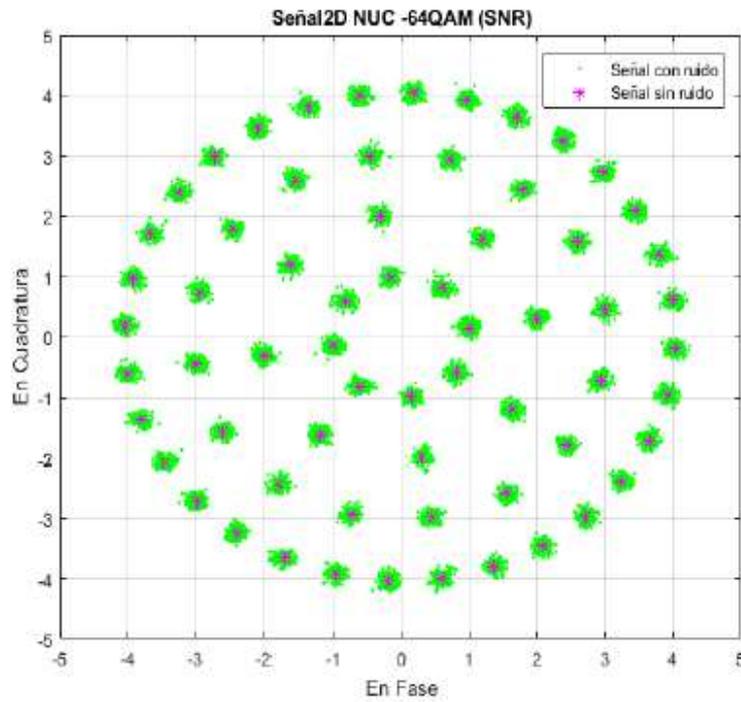


Figura 4.5. Efectos del canal AWGN para 64-QAM NUC-2D y una SNR=10dB.

Fuente: Elaborada por el autor

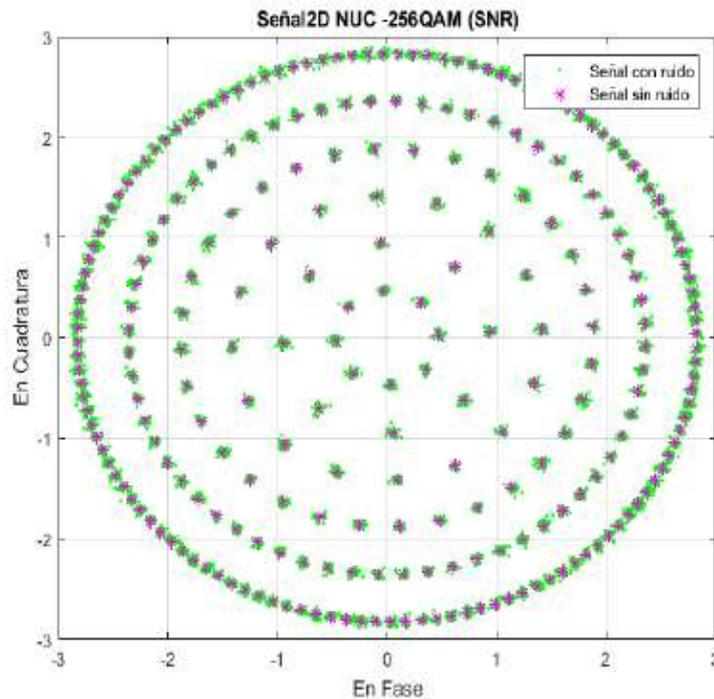


Figura 4.6. Efectos del canal AWGN para 256-QAM NUC-2D y una SNR=10dB

Fuente: Elaborada por el autor

Mediante el análisis de estas gráficas se concluye que mientras mayor es el orden de modulación mayor es el aprovechamiento del espectro, pero a su vez es más sensible al ruido y a la distorsión, debido a que la energía

promedio de la constelación sigue siendo la misma y que los símbolos de la constelación se distribuyen de forma más cercana entre ellos.

4.3 Análisis de la eficiencia espectral.

En la figura 4.7 se puede apreciar que el panel de resultados se adapta para mostrar una comparación entre los valores de eficiencia de los tres tipos de órdenes de modulación disponibles 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM, tomando como base las longitudes de FFT de 4k, 8k, 16k y 32k.

Resultados			
	16-QAM	64-QAM	256-QAM
4k	10.1030	13.6240	16.1230
8k	11.0180	14.5500	17.0387
16k	11.5140	15.0360	17.5350
32k	11.7730	15.2950	17.7950

Figura 4.7. Panel de resultados mostrando el resultado de la simulación de la eficiencia espectral Fuente: Elaborada por el autor

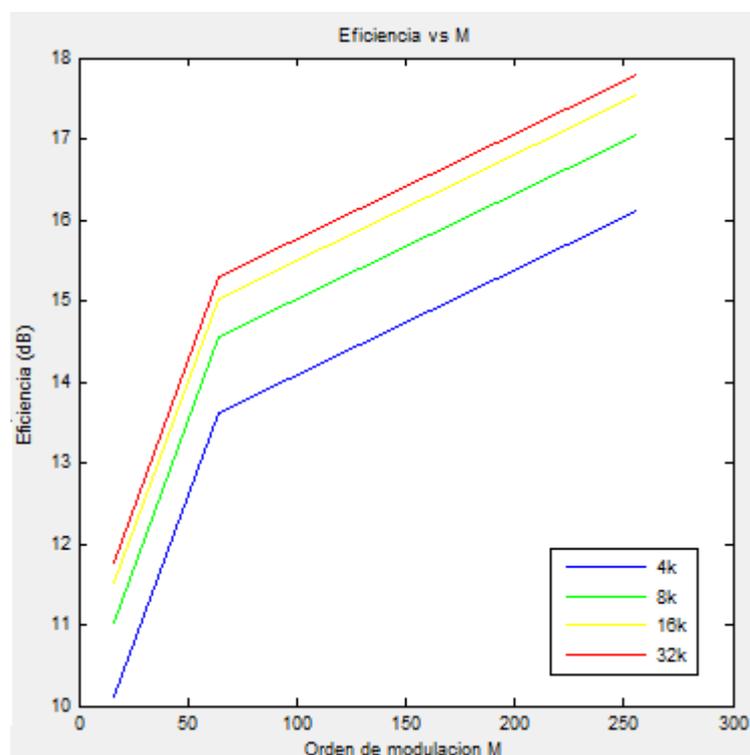


Figura 4.8. Orden de modulación

Fuente: Elaborada por el autor

El control axes, tal como se puede observar en la figura 4.8, permite mostrar en forma gráfica la información antes vista en el panel de resultados. Esto permite al usuario comparar los resultados y llegar a conclusiones de una forma más eficiente.

De acuerdo al gráfico obtenido se demuestra que efectivamente la eficiencia de la modulación aumenta de acuerdo al orden de la modulación, siendo más efectiva para el caso de 256-QAM.

4.4 Análisis del BER.

En las figuras siguientes se muestran los resultados del análisis del BER, tomando como modelo un canal de Rayleigh y un canal en presencia de ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN), para distintos órdenes de modulación.

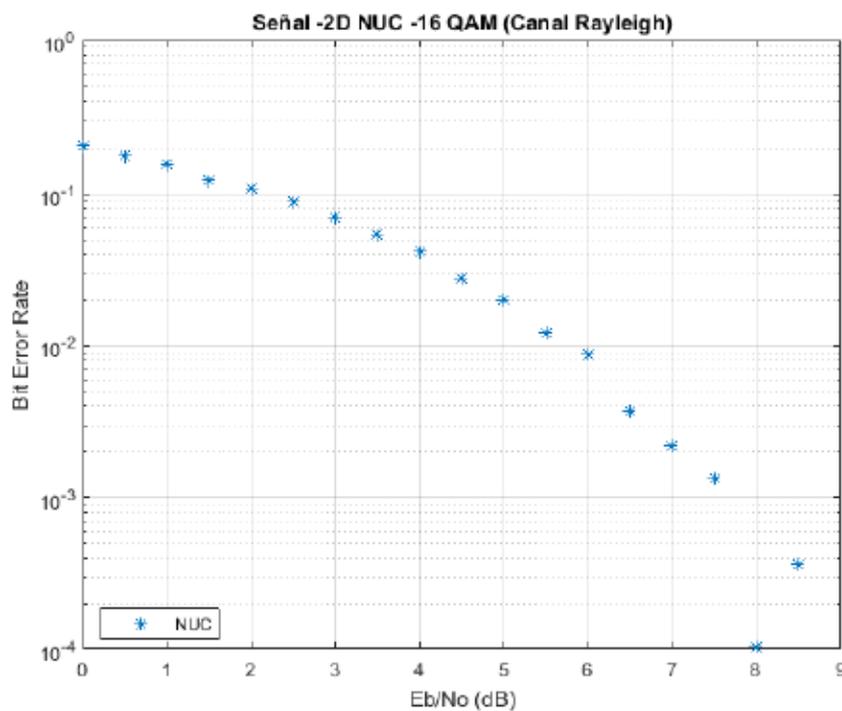


Figura 4.9. Representación del BER para 16-QAM-2D.

Fuente: Elaborada por el autor

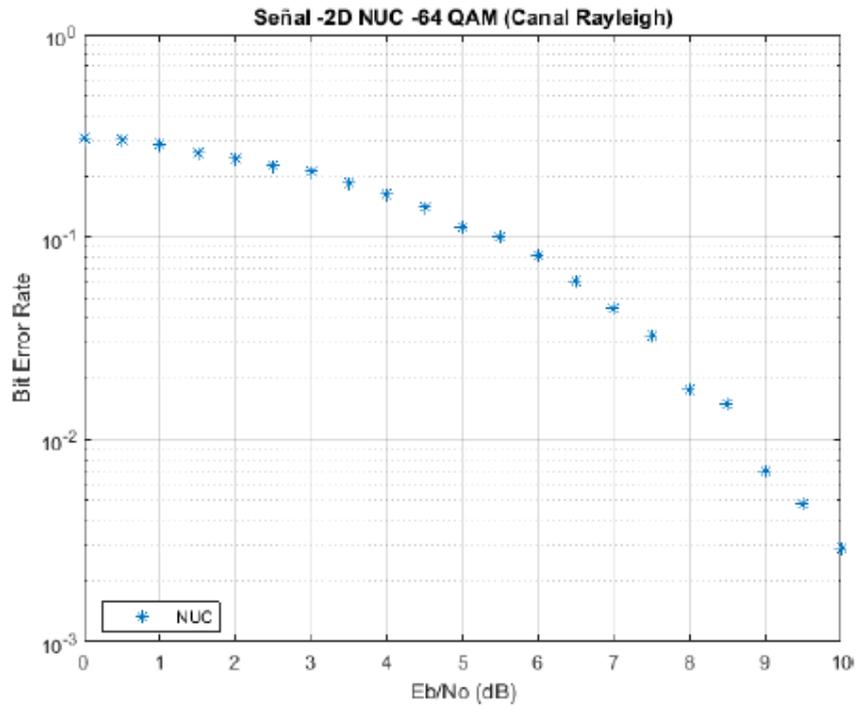


Figura 4.10. Representación del BER para 64-QAM-2D

Fuente: Elaborada por el autor

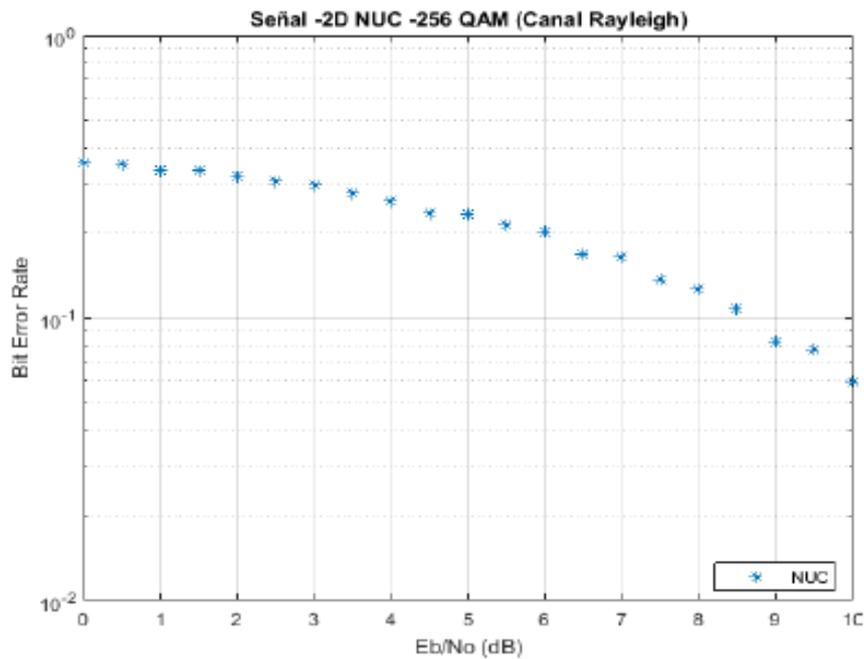


Figura 4.11. Representación del BER para 256-QAM-2D.

Fuente: Elaborada por el autor

Lo visto hasta ahora permite deducir que se puede transmitir mayor cantidad de bits por símbolos en una constelación de orden superior, pero esto resulta en una tasa de bit de erróneos más alta, por tanto, con

modulaciones QAM de orden superior se pueden transmitir más datos, pero es menos confiable que modulación de orden inferior.

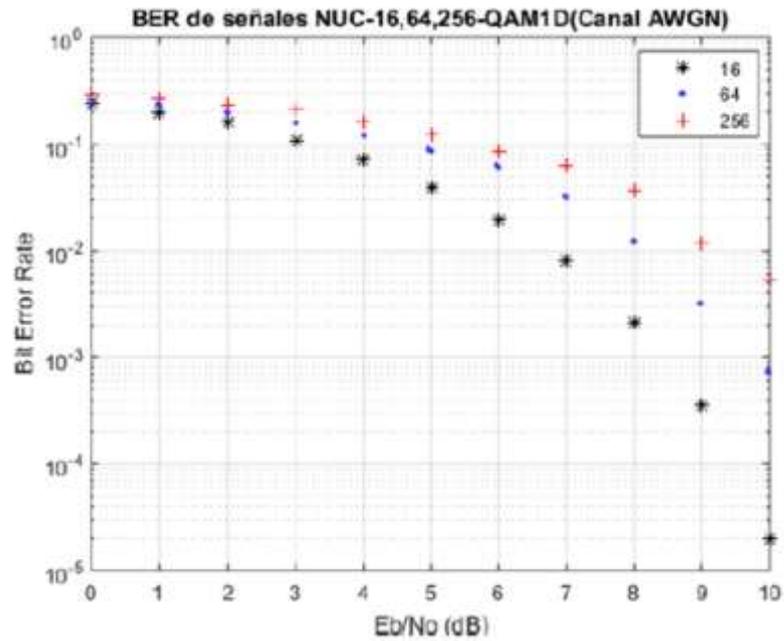


Figura 4.12. Representación del BER para constelaciones NUC QAM-1D en un canal AWGN

Fuente: Elaborada por el autor

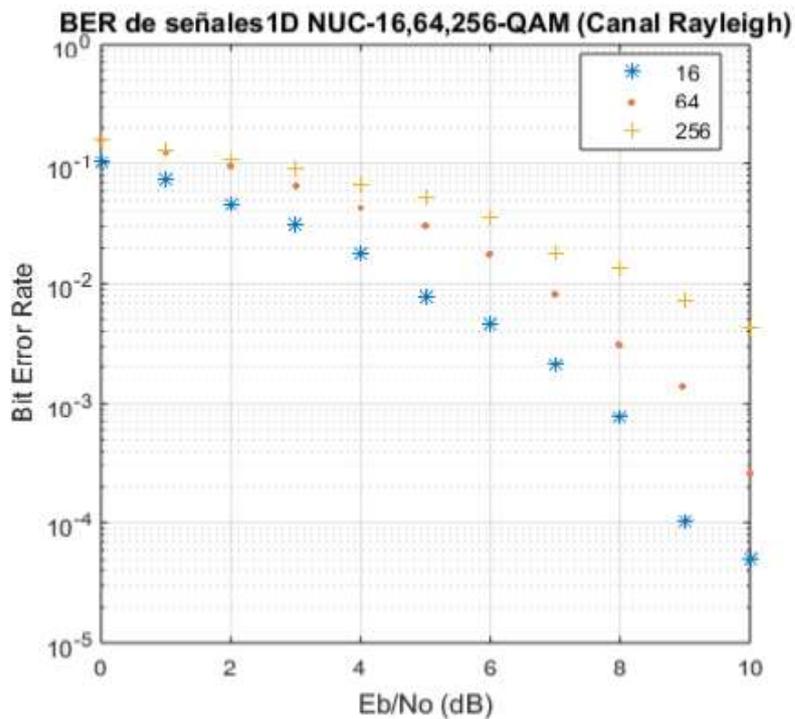
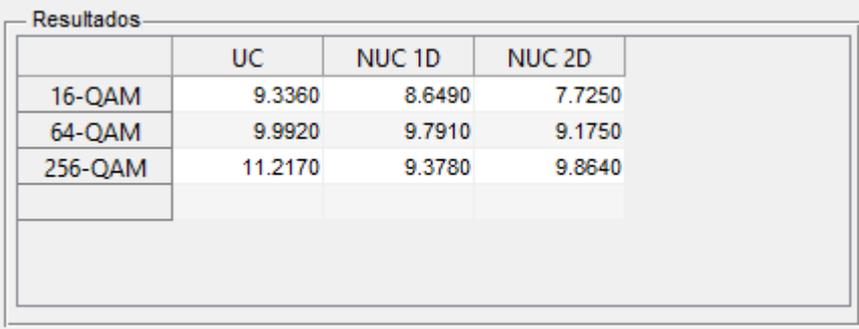


Figura 4.13. Representación del BER para constelaciones NUC QAM-1D en una canal de Rayleigh Fuente: Elaborada por el autor

Finalmente se puede llegar a la conclusión de que la tasa de bits erróneos en constelaciones uniformes es considerablemente mayor que en constelaciones no uniformes, y que en las constelaciones no uniformes de dos dimensiones se reduce el número de bits erróneos transmitidos respecto a las de una dimensión.

4.5 Análisis de la PAPR.

En la figura 4.14 se muestra una captura del panel de resultados para el análisis de la Proporción Potencia Pico-Potencia Media.



	UC	NUC 1D	NUC 2D
16-QAM	9.3360	8.6490	7.7250
64-QAM	9.9920	9.7910	9.1750
256-QAM	11.2170	9.3780	9.8640

Figura 4.14. Panel de resultados mostrando la PAPR

Fuente: Elaborada por el autor

En el control axes se representa gráficamente las magnitudes mostradas en el panel de resultados según el orden de modulación seleccionado en el panel de entrada (véase figuras 4.15, 4.16 y 4.17).

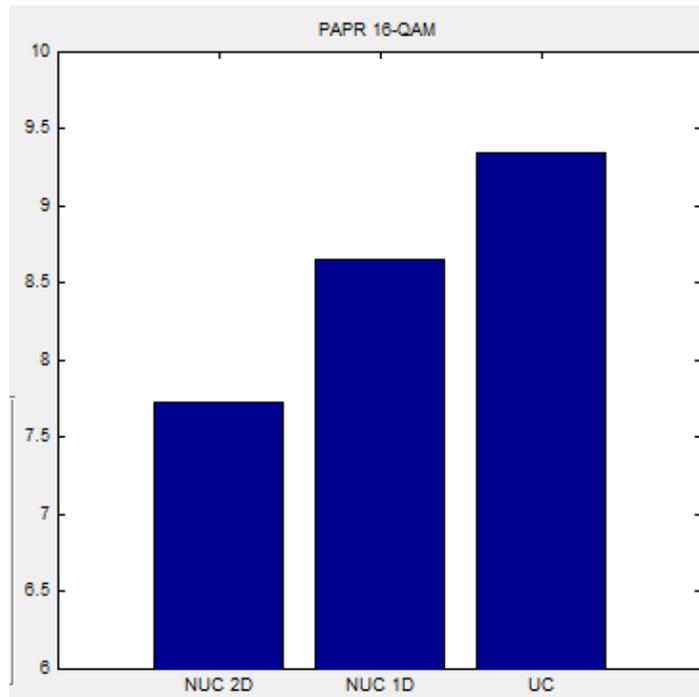


Figura 4.15. Control axes mostrando el resultado de la simulación PAPR para 16-QAM
Fuente: Elaborada por el autor

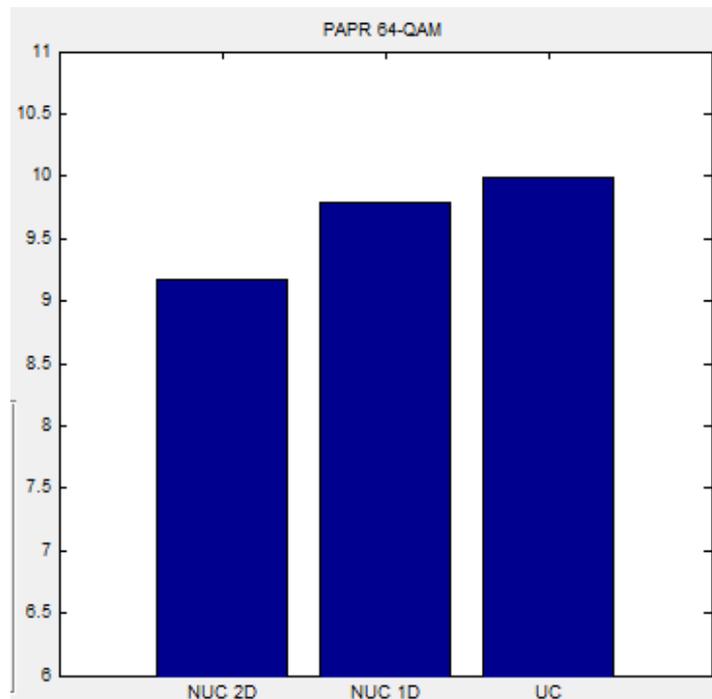


Figura 4.16. Control axes mostrando el resultado de la simulación PAPR para 64-QAM
Fuente: Elaborada por el autor

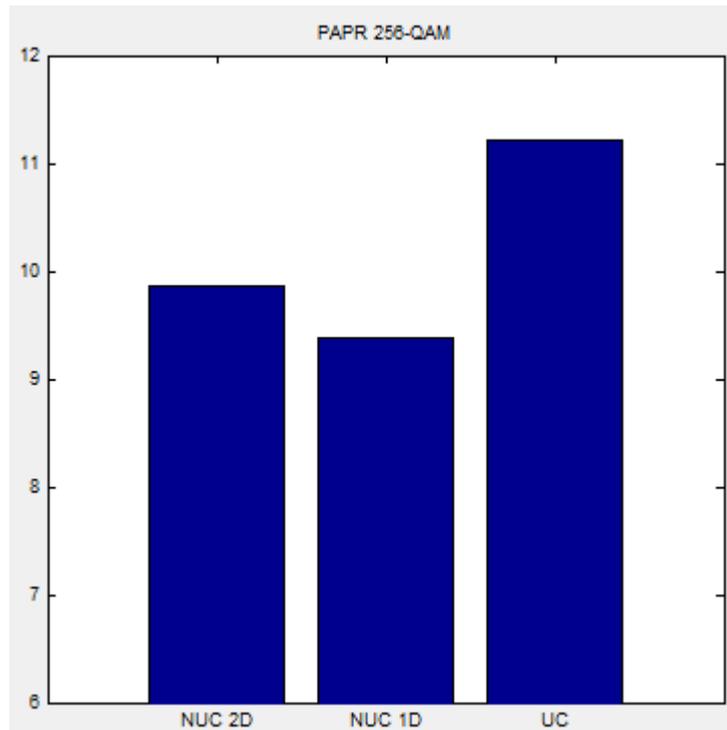


Figura 4.17. Control axes mostrando el resultado de la simulación PAPR para 256-QAM

Fuente: Elaborada por el autor

Después de mostrar gráficamente los valores cuantitativos de la PAPR para los tres órdenes de modulación, se puede observar que hay una disminución de este parámetro en las constelaciones no uniformes con respecto a las constelaciones uniformes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La Interfaz Gráfica de Usuario “ModelQAM” desarrollada cumplió las especificaciones del diseño al permitir la modelación de constelaciones uniformes y no uniformes de la técnica de modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

Se logró que de manera interactiva, sencilla y amigable el usuario de la misma pueda obtener:

- Los modelos de constelaciones QAM para los diferentes índices de modulación, dimensiones y niveles de relación señal a ruido.
- Parámetros muy importantes para un sistema de comunicaciones tales como la BER, la eficiencia espectral y la PAPR.

El análisis de los resultados obtenidos contribuye al arribo de conclusiones tales como:

1. Mientras mayor es el orden de modulación mayor es el aprovechamiento del espectro, pero a su vez es más sensible al ruido y a la distorsión.
2. La eficiencia de la modulación aumenta de acuerdo al orden de la modulación, siendo más efectiva, en nuestro caso, para 256-QAM.
3. La cantidad de bits por símbolos que se pueden transmitir aumenta mientras mayor sea el orden de la constelación pero resulta en una tasa de bit de erróneos más alta.
4. La tasa de bits erróneos en constelaciones uniformes es considerablemente mayor que en constelaciones no uniformes, y que en las constelaciones no uniformes de dos dimensiones se reduce el número de bits erróneos transmitidos respecto a las de una dimensión
5. La PAPR disminuye en las constelaciones no uniformes con respecto a las constelaciones uniformes.

Dados los fundamentos anteriores se puede afirmar que el uso de la aplicación “ModelQAM”, por estudiantes y especialistas de las telecomunicaciones, facilitará la comprensión de esta técnica avanzada de modulación.

Recomendaciones

Poner la aplicación “ModelQAM” a disposición de estudiantes y profesionales de las telecomunicaciones interesados en caracterizar las técnicas de modulación QAM.

Profundizar en el estudio y aplicaciones de esta técnica para otros tipos de modulación.

Realizar un análisis de los modelos de constelaciones QAM obtenidos para los diferentes índices de modulación, dimensiones y niveles de relación señal a ruido.

Analizar a profundidad el resultado mostrado acerca de que la tasa de bits erróneos en constelaciones uniformes es considerablemente mayor que en constelaciones no uniformes, y que en las constelaciones no uniformes de dos dimensiones se reduce el número de bits erróneos transmitidos respecto a las de una dimensión

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armas, S. (2014). *Emulación de la capa física (MIMO-OFDM) de redes celulares de 4ta generación (LTE-A), con codificación en espacio y frecuencia, basado en una plataforma de SDR*. Master en ciencias, Ensenada, Baja California, México.
- Barry, J. R., Lee, E. A., & Messerschmitt, D. G. (2004). *Digital Communication* (Tercera Edición ed.).
- Fernández, L. (2014). Estudio y simulación del canal móvil para bandas de LTE con distribuciones Rician y Rayleigh en el modelo de programación Okumura-Hata en base a Matlab.
- Fontes Pupo, E. (2016). *Next-Generation Digital Television Terrestrial Broadcasting Systems*. Research & Development Telecommunications Institute.
- García, J. (2011). *Aportaciones a nuevos estándares de televisión digital*. Máster en Electrónica, tratamiento de señal y comunicaciones, Electrónica. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería.
- Infante, A., Cruz, A., & Acosta, D. (2008). Simulador interactivo de redes inalámbricas basadas en IEEE 802.11a. *Rielac*. doi:10.1234/rielac.v29i2.31
- J.Scott. (2013). *CM and BICM Limits for Rectangular Constellations*. British broadcasting corporation.
- Proakis, J. G. (2008). *Digital Communications 5th edition*. New York: McGraw-Hill.
- Ramirez, I., Ramirez, D., Chiang, A., & Nuñez, M. (2005). *Capítulos sobre TVD del Estudio relativo a Nuevas Tecnologías Inalámbricas*. From Actualización Marco Regulatorio y Evolución Sector de Telecomunicaciones : www.tvd.cl/wp-content/uploads/2011/12/cap_tvd_est_nt_05.pdf
- Regueiro, C., Barrueco, J., Montalbán, J., Gil, U., Angulo, I., Eizmendi, I., . . . Velez, M. (2015). SHVC and LDM techniques for HD/UHD TV indoor reception. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 1-6. doi:10.1109/BMSB.2015.7177224

- Riche, L. (2012). *The performance of high-order quadrature amplitude modulation schemes for broadband wireless communication systems*. Atlanta University Center.
- Riche, L. (2012). *The performance of high-order Quadrature Amplitude Modulation schemes for broadband wireless communication systems*. Atlanta University Center.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2006). *Metodología de la Investigación*. Istadalapa: Mc Graw Hill.
- Sigmon, K. (2002). *Introducción a Matlab* (Segunda edición ed.).
- Tomasi, W. (2003). *Sistema de Comunicaciones Electrónicas* (Cuarta Edición ed.). Pearson Educación.
- Wu, Y., Rong, B., Salehian, K., & Gagnon, G. (2012). Cloud transmission: A new spectrum-reuse friendly digital. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 58(3), 329-337. doi:10.1109/TBC.2012.2199598
- Zhang, L., Wu , Y., Li , W., Mook Kim, H., Park , S.-I., Angueira , P., . . . Velez, M. (2014). Channel capacity distribution of Layer-Division-Multiplexing system for next generation digital broadcasting transmission. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 1-6. doi:10.1109/BMSB.2014.6873500
- Zoellner, J., & Loghin, N. (2013). Optimization of high-order non-uniform QAM constellations. *2013 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 1-6. doi:10.1109/BMSB.2013.6621711

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Término	Significado
1D	Una dimensión
2D	Dos dimensiones
5G	5ta Generación de telefonía móvil
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
ATSC 3.0	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
AWGN	Ruido Aditivo Blanco Gaussiano
BER	Tasa de Bit Erróneo
BICM	Modulación con codificación de bits intercalados
CP	Prefijo Cíclico
DBL-PS	Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida
DTMB	<i>Digital Terrestrial Multimedia Broadcast</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario
GUIDE	Entorno de Desarrollo de Interfaces Gráficas de Usuario (<i>Graphical User Interface Development Environment</i>)
HPA	Amplificadores de alta potencia
ICI	Interferencia entre portadoras
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado
IDFT	Transformada Discreta Inversa de Fourier
ISI	Interferencia Intersímbolo
NGH-W	<i>Next Generation Broadband Wireless</i>
NLOS	<i>Non Line of Sight</i>

NOMA	Acceso Múltiple no Ortogonal
NUC	Constelaciones no Uniformes
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
PAM	Modulación de Amplitud de Pulso
PAPR	Proporción Potencia Pico-Potencia Media
PSK	Modulación por desplazamiento de fase



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



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

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Guayaquil Loor Rodrigo Daniel**, con C.C: # **0922318969** autor/a del trabajo de titulación: **Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de modulación de amplitud en cuadratura (QAM)** previo a la obtención del título de **Magíster 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, 29 de junio de 2018

f. _____

Nombre: **Guayaquil Loor Rodrigo Daniel**

C.C: **0922318969**



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



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

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de modulación de amplitud en cuadratura (QAM)		
AUTOR(ES)	Guayaquil Loor Rodrigo Daniel		
REVISOR(ES)/TUTOR	MSc. Orlando Philco Asqui; MSc. Miguel Heras Sánchez / MSc. Luis Cordova Rivadeneira		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	29 de junio de 2018	No. DE PÁGINAS:	73
ÁREAS TEMÁTICAS:	Interfaz Gráfica de Usuario, MATLAB, Modulación de Amplitud en Cuadratura, constelaciones uniformes y no uniformes, sistemas multiportadoras.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	QAM, OFDM, GUI, MATLAB		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>El trabajo presenta la descripción del diseño de una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) en MATLAB que permite evaluar técnicas de Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) a través de la modelación de constelaciones uniformes y no uniformes. Se exponen las generalidades de los sistemas de comunicaciones digitales, los sistemas multiportadoras basados en la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) y se realiza un análisis de la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) como base teórica del diseño. Se fundamenta el uso de la herramienta GUIDE de MATLAB para el desarrollo del entorno gráfico. Se detallan las funcionalidades de la GUI y se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, se realiza la comparación de dichos resultados con los teóricamente esperados, avalando de esta forma, el correcto funcionamiento de la aplicación. Emplea el método de observación documental y científica para obtener la información necesaria y definir el problema, el método exploratorio y descriptivo al explorar y describir las características de los sistemas multiportadoras basados en las técnicas OFDM y QAM mediante su Estado del Arte. Además, es de paradigma "EMPÍRICO-ANALÍTICO" con un enfoque "CUANTITATIVO" porque se emplean cálculos matemáticos para diseñar la GUI en Matlab con las funcionalidades deseadas y "EXPERIMENTAL", porque se alteran las variables de estudio, para analizar los resultados.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-985404827	E-mail: rguayaquil@hotmail.es	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús		
	Teléfono: +593-994606932		
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			