



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Implementación de un sistema SDR para modulación analógica y digital
de señales AM, FM y M-PSK utilizando MatLab**

AUTOR:

Ing. Vacacela Morales, Jaime Angel

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

9 de agosto del 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Vacacela Morales, Jaime Angel** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, a los 9 días del mes de agosto del año 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Vacacela Morales, Jaime Angel**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación **“Implementación de un sistema SDR para modulación analógica y digital de señales AM, FM y M-PSK utilizando MatLab”**, previa a la obtención del grado Académico 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 responsabilizó del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis del Grado Académico en mención.

Guayaquil, a los 9 días del mes de agosto del año 2018

EL AUTOR

Vacacela Morales, Jaime Angel



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Vacacela Morales, Jaime Angel**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación titulada: **“Implementación de un sistema SDR para modulación analógica y digital de señales AM, FM y M-PSK utilizando MatLab”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 9 días del mes de agosto del año 2018

EL AUTOR

Vacacela Morales, Jaime Angel

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento	Jaime Vacacela MET2017.docx (D40520440)
Presentado	2018-07-06 14:29 (-05:00)
Presentado por	femandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	Revisión Jaime Vacacela Mostrar el mensaje completo 1% de estas 21 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes		Bloques
+	Categoría	Enlace/nombre de archivo
+	>	N6J_PEREZ F.pdf
+	Fuentes alternativas	
+	Fuentes no usadas	

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencias

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN
TELECOMUNICACIONES

TEMA: Implementación de un sistema SDR para
modulación analógica y digital de señales AM, FM y M-
PSK utilizando MatLab

AUTOR: Ing. Vacacela Morales, Jaime Angel

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado
Académico de Magíster en Telecomunicaciones

TUTOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

Dedicatoria

En especial al amor de mi vida, mi esposa Azucena, por ser el pilar fundamental de mi vida.

A mis hijas Ana Belén, Ana Bárbara y Ana Paula por ser mi fuente de inspiración plasmado en este trabajo de titulación.

A mis padres por haber fomentado en mi vida responsabilidad y deseos de superación.

Al Canal de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil que me acogió por casi 9 años de mi vida, donde me desarrolle como Ingeniero de Transmisiones y radiofrecuencia.

Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar a esta instancia de mi vida con salud, fuerza y sabiduría.

A todos los Catedráticos de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo que participaron en la quinta promoción de la Maestría en Telecomunicaciones, dedicando su tiempo a transmitir sus conocimientos y experiencias para el desarrollo de este trabajo.

A mi familia por su paciencia y comprender mi ausencia los fines de semana que tenía clases.

A mi tutor, el Msc. Fernando Palacios Meléndez, por su paciencia en el desarrollo de este trabajo.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f. _____

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f. _____

M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NESTOR ARMANDO
REVISOR

f. _____

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS
DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
Resumen.....	XV
Abstract.....	XVI
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.	17
1.1. Introducción.....	17
1.2. Antecedentes.	18
1.3. Definición del problema	19
1.4. Objetivos	19
1.5. Hipótesis.....	20
1.6. Metodología de investigación.	20
Capítulo 2: Modulaciones Digitales.....	21
2.1. Modulaciones binarias.....	21
2.1.1. Modulación ASK.....	24
2.1.2. Modulación FSK.....	26
2.1.3. Modulación PSK.....	28
2.2. Modulaciones M-arias.....	29
2.2.1. Modulación M-PSK.....	30
2.2.2. Modulación M-QAM.....	34
2.3. Comparación de las modulaciones.....	37
2.3.1. Moduladores.....	38
2.3.2. Espectro	38
2.4. Técnicas de detección/demodulación.....	41
2.4.1. Detección Coherente en Modulaciones binarias	41
2.4.2. Detección Coherente ASK.....	42
2.4.3. Detección Coherente PSK.....	44
2.4.4. Detección Coherente FSK.....	45
2.5. Detección en modulaciones M-arias.....	46

Capítulo 3: Implementación del sistema SDR	51
3.1. Estructura general del sistema.	51
3.2. Implementación del sistema de modulación.	52
3.3. Implementación del sistema de demodulación.	56
3.4. Análisis de resultados obtenidos.	62
Conclusiones	74
Recomendaciones	75
Bibliografía.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Pulso senoidal (representación en el tiempo).	22
Figura 2. 2: Pulso senoidal (representación en la frecuencia).	23
Figura 2. 3: Señal NRZ Unipolar en la codificación de la secuencia 101011.	24
Figura 2. 4: Modulador ASK binario.	24
Figura 2. 5: Señal modulada ASK.	25
Figura 2. 6: Modulador OOK binario.	26
Figura 2. 7: Señal modulada OOK.	26
Figura 2. 8: Modulador FSK binario.	27
Figura 2. 9: Señal modulada en FSK.	27
Figura 2. 10: Modulador PSK binario.	28
Figura 2. 11: Señal modulada en PSK.	28
Figura 2. 12: Descomposición de una señal en los componentes I y Q.	29
Figura 2. 13: Constelaciones M-PSK: a) B-PSK; b) Q-PSK; c) Q-PSK; d) 8- PSK.	31
Figura 2. 14: Señal NRZ bipolar utilizada para la modulación QPSK.	33
Figura 2. 15: Modulador QPSK.	33
Figura 2. 16: Concepto de modulación M-QAM (16-QAM).	34
Figura 2. 17: 16-QAM: a) niveles de energía; b) coordenadas de cada símbolo.	35
Figura 2. 18: Modulador M-QAM.	36
Figura 2. 19: Secuencia NRZ bipolar.	36
Figura 2. 20: Codificación del canal I.	37
Figura 2. 21: Codificación del canal Q.	37
Figura 2. 22: Espectro de una señal de banda base y modulada (ASK y PSK).	39
Figura 2. 23: Espectro de una señal de banda base y modulada FSK.	39
Figura 2. 24: a) receptor de correlación; b) filtro adaptado (filtro combinado); c) demodulador coherente.	41
Figura 2. 25: Detector ASK.	42

Figura 2. 26: Detección coherente para ASK.	42
Figura 2. 27: Detección coherente para OOK.	43
Figura 2. 28: Detector PSK.	44
Figura 2. 29: Detección coherente para PSK.	44
Figura 2. 30: Detector del sistema de modulación por desplazamiento de frecuencia.	45
Figura 2. 31: Detección coherente FSK del bit uno.	45
Figura 2. 32: Detección coherente FSK del bit cero.	46
Figura 2. 33: Diferentes formas de constelación 16-QAM: a) estrella; b) cuadrado; c) circular.	46
Figura 2. 34: Detección no coherente para las modulaciones M-arias.	47
Figura 2. 35: Detector coherente QPSK.	48
Figura 2. 36: Detector 16-QAM.	48
Figura 2. 37: Modulador genérico M-PSK y M-QAM.	49
Figura 2. 38: Detector M-PSK eM-QAM.	49

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diagrama de bloques del sistema de comunicación por radio. ...	51
Figura 3. 2: Modelo de sistema de comunicación por radio.	52
Figura 3. 3: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación normal. ...	52
Figura 3. 4: Diagrama de bloques del sistema transmisor BPSK.	53
Figura 3. 5: Diagrama de bloques del sistema transmisor QPSK.	54
Figura 3. 6: Diagrama de bloques del sistema transmisor BFSK.	55
Figura 3. 6: Diagrama de bloques del receptor de AM no coherente.	56
Figura 3. 8: Diagrama de bloques del receptor BPSK.	59
Figura 3. 9: Diagrama de bloques del proceso de recuperación de portadora.	59
Figura 3. 10: Diagrama de bloques del receptor QPSK.	61
Figura 3. 11: Diagrama de bloques del receptor FSK no coherente.	62
Figura 3. 12: Interface del transmisor.	62
Figura 3. 13: Interface del receptor.	63
Figura 3. 14: Gráfica de la señal original.	64
Figura 3. 15: Gráfica de la señal modulada en amplitud (AM).	64
Figura 3. 16: Gráfica de la señal AM recibida.	64

Figura 3. 17: Gráfica de la señal recibida después de FWR.	65
Figura 3. 18: Gráfica de la señal demodulada.....	65
Figura 3. 19: Señal portadora y señal FM modulada.....	66
Figura 3. 20: Gráfica de la señal FM recibida.....	67
Figura 3. 21: Señal demodulada.	67
Figura 3. 22: Gráfica de la señal original.....	68
Figura 3. 23: Parte de la señal modulada BPSK.	68
Figura 3. 24: Parte de la señal BPSK recibida.	68
Figura 3. 25: Gráfica de la señal BPSK truncada.	69
Figura 3. 26: Gráfica de la portadora recuperada.	69
Figura 3. 27: Señal demodulada.	70
Figura 3. 28: Señal original.	70
Figura 3. 29: Parte de la señal QPSK recibida.	71
Figura 3. 30: Gráfica de la señal QPSK recibida.....	71
Figura 3. 31: Gráfica de la señal demodulada QPSK.....	71
Figura 3. 32: Información original.....	72
Figura 3. 33: Parte de la señal BFSK.....	72
Figura 3. 34: Gráfica de la señal BFSK recibida.	72
Figura 3. 35: Señal después de la detección de envolvente.	73
Figura 3. 36: Gráfica de la señal FSK demodulada.	73

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Expresiones de cada símbolo para la modulación QPSK.....	32
Tabla 2. 2: Asignación de los valores de tensión al par de bits.	35
Tabla 2. 3: Resumen de las modulaciones binarias.	40
Tabla 2. 4: Modulaciones M-arias (ancho de banda y energía media por símbolo y por bit).	40

Resumen

El trabajo de grado consiste en implementar un sistema SDR para modulación analógico y digital de señales AM, FM, BPSK, QPSK y como valor agregado BFSK utilizando la plataforma de simulación MatLab y GUIDE. En la primera parte, se realiza la introducción del sistema de radio definido por software (SDR), así como trabajos relacionados con el uso de herramientas de simulación en la parte de antecedentes del trabajo de titulación. También, se define el problema, y los objetivos de la investigación. En la segunda parte, se realiza la descripción fundamental de las modulaciones digitales con sus respectivas características y funcionalidades. En la tercera parte, que es la más importante del trabajo, se realizó el diseño de una interfaz gráfica de usuario (GUIDE) y de los códigos de programación tanto para la modulación y demodulación análoga y digital utilizando MatLab. También, se evaluaron los resultados obtenidos del sistema SDR, cuyos resultados fueron aceptables y cumplieron las normativas de las comunicaciones inalámbricas.

Palabras claves: COMUNICACIONES, MODULACIÓN, FASE, FRECUENCIA, AMPLITUD, SDR

Abstract

The degree work consists of implementing an SDR system for analog and digital modulation of AM, FM, BPSK, QPSK signals and as a BFSK added value using the MatLab and GUIDE simulation platform. In the first part, the introduction of the software-defined radio system (SDR) is carried out, as well as work related to the use of simulation tools in the background part of the degree work. Also, the problem is defined, and the objectives of the investigation. In the second part, the fundamental description of the digital modulations with their respective characteristics and functionalities is made. In the third part, which is the most important part of the work, the design of a graphical user interface (GUIDE) and the programming codes for both analog and digital modulation and demodulation using MatLab was carried out. Also, the results obtained from the SDR system were evaluated, whose results were acceptable and complied with the regulations of wireless communications.

Keywords: COMMUNICATIONS, MODULATION, PHASE, FREQUENCY, AMPLITUDE, SDR

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

En los últimos años, las tecnologías requeridas para implementar el concepto de radio definida por software (*Software Defined Radio, SDR*) han madurado, y el SDR Forum presenta una taxonomía basada en niveles para las capacidades de varios sistemas SDR (SDR Forum, 2018). Los sistemas están apareciendo ahora que ofrecen flexibilidad y adaptabilidad a los desarrolladores de sistemas, brindando ventajas al abordar los problemas de los recursos espectrales restringidos, los cambios cada vez más rápidos en los estándares inalámbricos y el desarrollo rentable de productos para nichos de mercado. (Farrell, Sanchez, & Corley, 2009)

SDR incluye dispositivos tales como, arreglos de compuertas programables en campo (*Field Programmable Gate Array, FPGA*), procesadores de señales digitales (*Digital Signal Processors, DSP*), procesadores de propósito general (*General Purpose Processor, GPP*), sistema en chip programable (*System on Chip, SoC*) u otros procesadores programables específicos de aplicación SDR. El uso de estas tecnologías permite agregar nuevas características y capacidades inalámbricas a los sistemas de radio existentes sin requerir hardware nuevo. (Baldini, Sturman, Dalode, Kropp, & Sacchi, 2014)

El papel de la radio en los sistemas de comunicación se ha extendido desde comunicaciones simples de radio a comunicaciones móviles y más. La minimización o la sustitución del hardware en la tecnología de la comunicación a través del software se ha traducido en el nacimiento de una nueva tecnología, ampliamente conocida como SDR.

En los últimos años, a medida que los procesadores se hicieron más y más poderosos, capaces de ejecutar múltiples miles de millones de operaciones por segundo, generar energía de manera eficiente, el SDR se ha convertido en realidad, marcando el comienzo de una nueva era en el ámbito

de la comunicación inalámbrica. Algunas de las ventajas más significativas e incontestables de los SDR se enumeran a continuación: (Iancu et al., 2015)

1) Protocolos de comunicación reconfigurables y más flexibles. Funciones específicas como filtros, esquemas de modulación, codificadores/decodificadores, etc. se pueden reconfigurar de forma adaptativa en tiempo de ejecución.

2) Varios protocolos de comunicación pueden almacenarse en la memoria no volátil y también pueden coexistir en ciertas condiciones. La posibilidad de utilizar la misma plataforma (Hardware) para ejecutar protocolos de comunicación totalmente diferentes ofrece una gran versatilidad y un ahorro de costos tanto para el usuario final como para el proveedor del servicio.

3) Reconfigurable de forma remota, proporcionando un control de versiones de Software fácil y económico, y también una manera fácil de agregar nuevas características.

4) El tiempo de desarrollo se reduce significativamente proporcionando un tiempo acelerado de comercialización.

5) Proporciona la forma más atractiva de tratar con un nuevo estándar libera y, mientras tanto, asegura la compatibilidad con versiones anteriores.

1.2. Antecedentes.

Los sistemas de radio definida por software son muy utilizados en investigaciones científicas y realizan publicaciones en revistas de alto impacto. La búsqueda de información relevante de SDR se obtuvo de publicaciones en revistas, a continuación, se exponen algunos trabajos encontrados:

- a. Los autores Islam, Hannan, Samad, & Hussain, (2009) tratan del desarrollo de SDR para transferir información de un lugar a otro a través del canal inalámbrico. La señal analógica entrante se modula utilizando el tipo de modulación de desplazamiento de fase (*Phase Shift Keying, PSK*). Luego agregaron ruido o interferencia al canal. El transceptor demodula la señal modulada para recuperar la información transmitida. Los resultados confirman que el SDR

programado puede demodular los diversos tipos de señal de audio o cualquier señal mediante programación de software.

- b. Los autores Enagi & Ahmed, (2014) diseñaron un algoritmo para que una radio definida por software lleve a cabo la demodulación de la señal de amplitud modulada de doble banda lateral. El sistema diseñado fue evaluado por su selectividad. Se descubrió que se puede obtener una gran flexibilidad del uso de SDR y que la funcionalidad de la radio solo está limitada por la capacidad del dispositivo de hardware (velocidad de muestreo, etc.).
- c. Los autores Patil & Ohatkar, (2014) consideraron las técnicas de modulación básicas utilizadas en los sistemas móviles e inalámbricos. En base a este análisis, se propone un esquema de modulación PSK para SDR para elegir el tamaño de constelación que ofrezca la mejor calidad de señal reconstruida para cada SNR promedio. Los resultados de la simulación de transmisiones de señales confirman la efectividad del esquema de modulación PSK propuesto. El rendimiento de la técnica de modulación se evalúa cuando el sistema está sujeto a ruido e interferencia en el canal. La herramienta de simulación MatLab, se usa para evaluar VER para Radio definida por software.

1.3. Definición del problema

Necesidad de desarrollar la implementación de un sistema de radio definido por software (SDR) para modulación analógica y digital de señales AM, FM y M-PSK utilizando la plataforma de simulación MatLab y GUIDE.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

Desarrollar la implementación de un sistema modulador analógico y digital para señales AM, FM y M-PSK utilizando MatLab.

1.4.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir los fundamentos teóricos de la modulación digital necesarios en sistemas de comunicación.

- ✓ Diseñar el sistema SDR utilizando la herramienta de simulación MatLab y GUIDE.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos de las cinco técnicas de modulación analógica y digital utilizado en el sistema SDR.

1.5. Hipótesis

A través del desarrollo del sistema modulador analógico y digital para señales AM, FM y M-PSK utilizando SDR y MatLab, permitirá que los ingenieros maestrantes cuenten con una herramienta didáctica para orientar a futuros proyectos de grado.

1.6. Metodología de investigación.

El tipo de metodología utilizada en el presente trabajo de titulación es:

Explicativo:

Este es un tipo de investigación descriptiva específicamente diseñada para tratar problemas complejos. Su objetivo es ir más allá de "solo obtener los hechos" para dar sentido a la mirada de otros elementos involucrados, como los humanos, políticos, sociales, culturales y contextuales.

Evaluativo:

Esto implica hacer juicios sobre la calidad de los objetos o eventos. La calidad puede medirse en un sentido absoluto o en una base comparativa. Para ser útil, los métodos de evaluación deben ser relevantes para el contexto y las intenciones de la investigación.

Capítulo 2: Modulaciones Digitales.

En este capítulo se presentan las diversas modulaciones digitales donde se aborda el concepto de modulación digital binaria, en la que cada bit es codificado individualmente en función de una portadora. Esta modificación se obtiene en función de la variación de parámetros fundamentales de una senoide: amplitud, frecuencia y fase. Se abordan también las modulaciones M-arias.

2.1. Modulaciones binarias.

Se va tomar como referencia una señal sinusoidal genérica denominada portadora (carrier), que se describe por (2.1): (A. Sharma et al., 2017)

$$c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

Se verifica que esta señal varía en función de tres variables distintas, como: amplitud (A), frecuencia de portadora (f_c) y fase (ϕ). Cambiando el valor de una de estas variables en función de la señal a modular, es posible presentar las siguientes modulaciones binarias:

- Modulación por desplazamiento de amplitud (*Amplitud Shift Keying, ASK*), de la cual OOK (On-Off Keying) es un caso particular.
- Modulación por desplazamiento de frecuencia (*Frequency Shift Keying, FSK*);
- Modulación por desplazamiento de fase (*Phase Shift Keying, PSK*).

Asumiendo un signo genérico $m(t)$ que corresponde a la señal modulante, se puede describir matemáticamente una segunda modulación de amplitud (2.2), en que se controla la amplitud de la portadora manteniendo la frecuencia y fase:

$$s(t) = m(t)A \cos(2\pi f_c t + \phi),$$

Mientras, que para las modulaciones en frecuencia y en fase se describe por (2.3) y (2.4), respectivamente:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_i t + \phi), \text{ con } f_i = g(m(t)),$$

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_i), \text{ con } \phi_i = g(m(t)),$$

Donde la función $g(m(t))$ define la frecuencia o la fase a partir del mensaje. Estas tres modulaciones utilizan pulsos sinusoidales para la codificación de los bits. Ahora, se considera a la señal $m(t)$ como un pulso rectangular, que se describe por (2.5):

$$m(t) = A \Pi\left(\frac{t}{T_s}\right),$$

El resultado de la modulación, $s(t)$, resulta en un pulso sinusoidal que se representa en la figura 2.1.

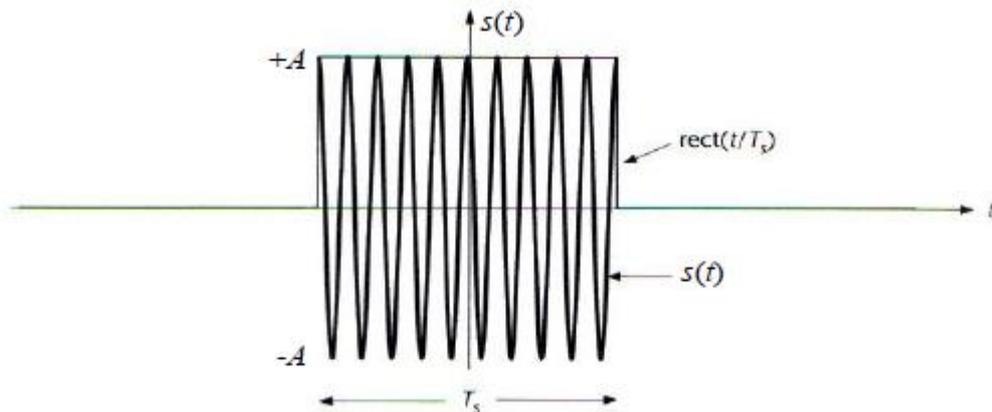


Figura 2. 1: Pulso sinusoidal (representación en el tiempo).

Elaborado por: Autor

La señal $s(t)$ resulta de la multiplicación del signo modulante (pulso sinusoidal) y la portadora (co-seno) con amplitud unitaria. La transformada de Fourier de la señal $s(t)$ resulta en la convolución entre la señal $C(f)$ y $M(f)$, según lo expresado por (2.6)

$$S(f) = C(f) * M(F)$$

$$= \left[\frac{1}{2} \delta(f - f_c) + \frac{1}{2} \delta(f + f_c) \right] * [AT_s \text{sinc}(fT_s)]$$

$$= \frac{AT_s}{2} [\text{sinc}((f - f_c)T_s) + \text{sinc}((f + f_c)T_s)]$$

Se verifica así que la señal resultante de la modulación $S(f)$ corresponde a la señal de banda base centrada en la frecuencia de la portadora. El

espectro de la señal expresada por (2.6) que se ilustra en la figura 2.2. Se observa que el espectro de banda base está centrado en f_c (frecuencia de la portadora sinusoidal). Se tiene así un espectro de tipo banda ancha. La energía de cada pulso sinusoidal que modula un bit es dado por la expresión (2.7).

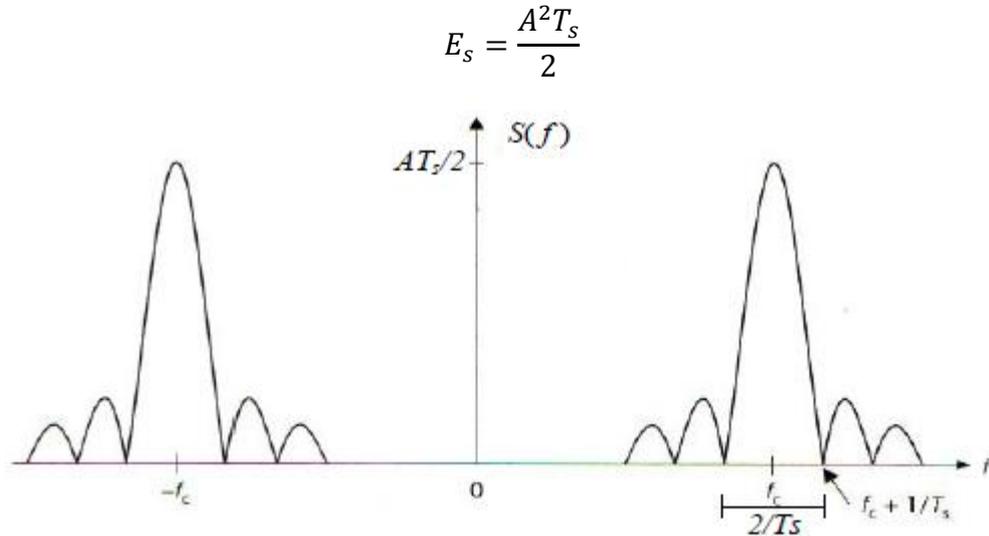


Figura 2. 2: Pulso sinusoidal (representación en la frecuencia).
Fuente: (AtlantaRF, 2018)

El ancho de banda de la señal de banda base puede determinarse mediante el criterio del primer cero espectral. Este criterio se basa en la concentración de energía en el lóbulo principal de la sincronización (el 92% del total de la energía). De este modo, en banda base, una vez que el sinc se centra en 0 Hz, el ancho de banda se contabiliza hasta el primer cero que ocurre en el espectro, en este caso, $1/T_s$.

En el caso de la señal modulada (pulso sinusoidal), el ancho de banda se contabiliza alrededor de la portadora, es decir, hasta los dos primeros ceros espectrales a la derecha y a la izquierda de la frecuencia f_c , como se describió en la figura 2.2. Para este caso, el ancho de banda es $2/T_s$, es decir, el doble del ritmo de símbolo, $2R_s$. De esta forma, se comprueba que el ancho de banda necesario para una transmisión es directamente proporcional al valor del ritmo de transmisión.

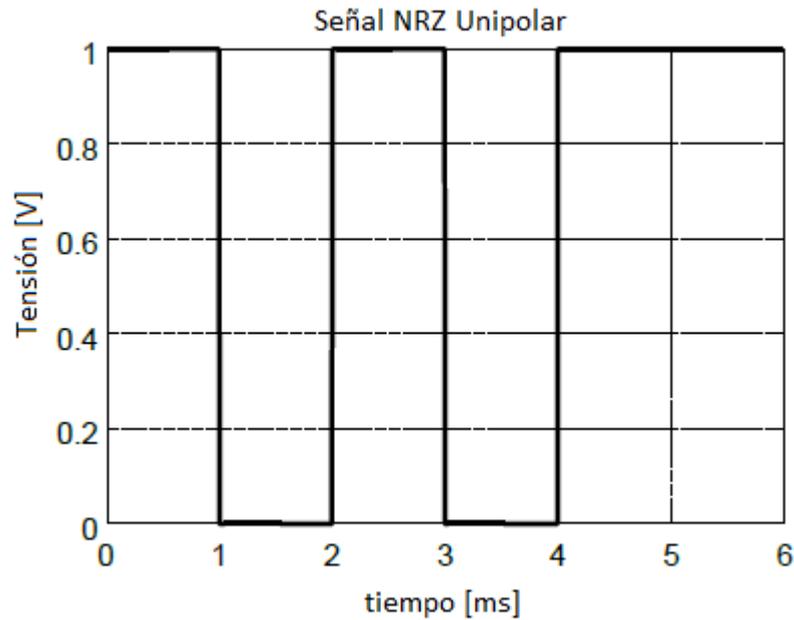


Figura 2. 3: Señal NRZ Unipolar en la codificación de la secuencia 101011.
Fuente: (Kulkarni, Arya, & Gaikar, 2011)

2.1.1. Modulación ASK.

Para obtener una modulación ASK es necesario, a partir de la codificación NRZ unipolar, cambiar el valor de la amplitud de la señal de salida en función del bit a transmitir. Con base en esta condición, se presenta en la figura 2.4 un diagrama de bloques posible para el emisor de esta modulación. El bloque inversor se caracteriza por modificar el valor de tensión presente en la salida del codificador NRZ. De este modo, el bit 0 corresponde al valor de tensión 1 V y el bit 1 corresponde a la tensión 0 V.

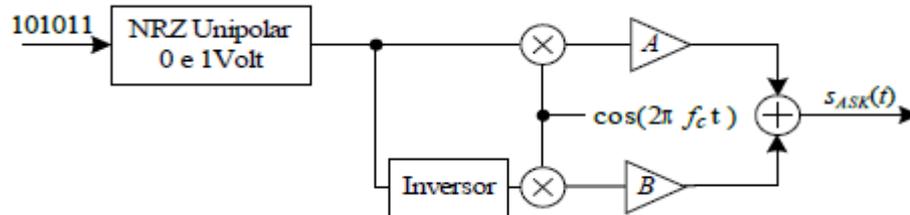


Figura 2. 4: Modulador ASK binario.
Fuente: (Jin & Pu, 2013)

La señal codificada en NRZ Unipolar, en la rama superior, es multiplicada por la portadora de frecuencia f_c y amplitud unitaria. En la rama inferior la señal es invertida y multiplicada por la misma portadora. La señal modulada ASK se obtiene por la suma de las contribuciones de las dos ramas. Para este

ejemplo se tiene $A = 10$ y $B = 5$. La expresión matemática que traduce esta modulación es dada por (2.8).

$$S_{ASK}(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t); & \text{bit 1} \\ B \cos(2\pi f_c t); & \text{bit 0} \end{cases}$$

La señal resultante $S_{ASK}(t)$ está representada en la figura 2.5. Como base en este diagrama de bloques, se verifica que el bit 1 fue modulado por un pulso sinusoidal con amplitud 10V y duración (tiempo de bit) de 1ms. El bit 0 fue modulado por un pulso sinusoidal con amplitud 5V y una duración de 1ms. La frecuencia de la portadora es $f_c = 2kHz$. Se observa que la frecuencia de la portadora debe ser tal que, en cada tiempo de bit se obtenga un número entero de períodos de ésta. Para este caso particular, por cada tiempo de bit se obtienen dos periodos de la portadora.

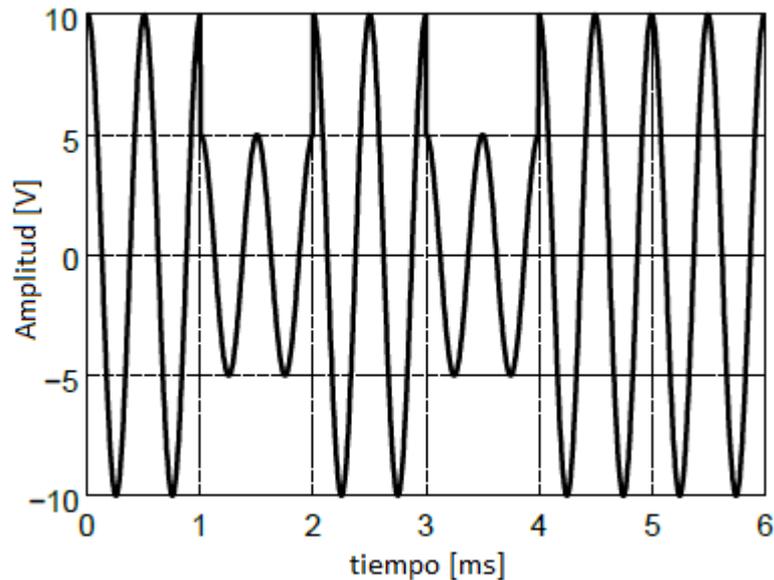


Figura 2. 5: Señal modulada ASK.

Fuente: (Jin & Pu, 2013)

Un caso particular de la modulación ASK es la modulación OOK. Esta técnica permite transmitir un pulso sinusoidal correspondiente a un determinado bit y el valor cero en el bit complementario. En este caso particular, el bit 1 se codifica de forma idéntica a la modulación ASK descrita en la sección 2.1.1 y el bit 0 se codifica con el valor cero con una duración de bit de bit. La expresión que traduce la modulación OOK se describe por (2.9).

$$S_{ook}(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t); & \text{bit 1} \\ 0; & \text{bit 0} \end{cases}$$

Se presenta en la figura 2.6 el diagrama de bloques para el emisor OOK. La señal resultante se representa en la figura 2.7. Típicamente, la modulación OOK es más usada que ASK, porque tiene un mejor rendimiento (menor tasa de errores).

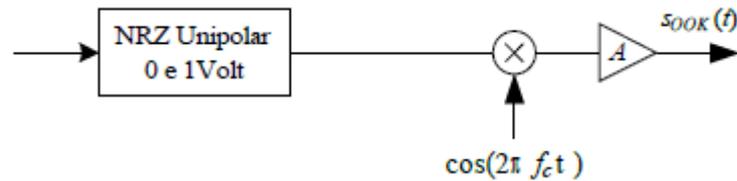


Figura 2. 6: Modulador OOK binario.

Fuente: (Pataca, Oliveira, Juriollo, Herbster, & Rocha, 2011)

El modulador OOK de la figura 2.6 se obtiene a partir del modulador ASK de la figura 2.4 haciendo $B = 0$ y sus respectivas simplificaciones.

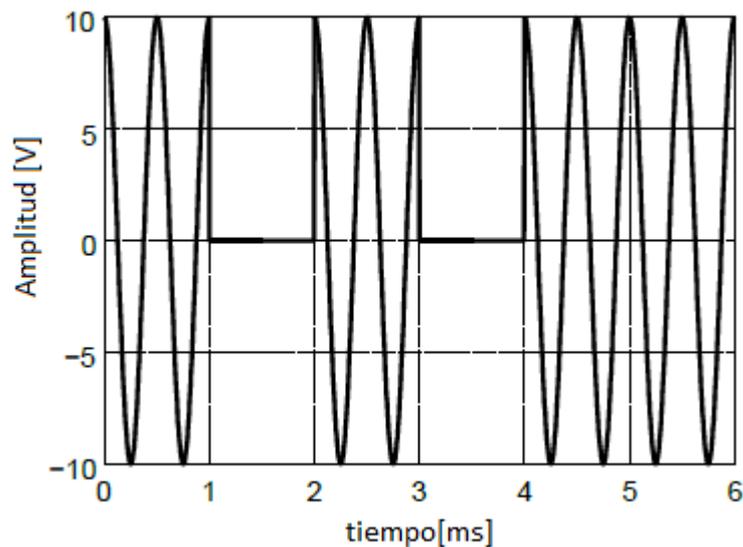


Figura 2. 7: Señal modulada OOK.

Fuente: (Pataca et al., 2011)

2.1.2. Modulación FSK

Siguiendo el razonamiento anterior, y tomando como base la variación de los parámetros fundamentales de una senoide, se puede realizar una modulación de una determinada señal en función de la frecuencia. Esta modulación se denomina FSK y el diagrama de bloques que realiza esta modulación está representado en la figura 2.8. Esta modulación se describe por la expresión (2.10). Se verifica así que para cada bit, sólo una de las ramas produce señal no nula.

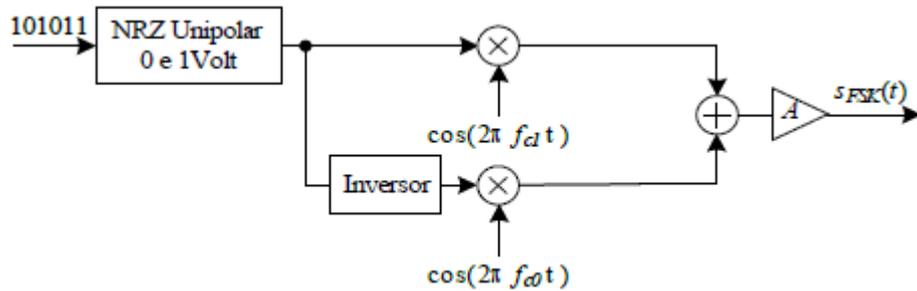


Figura 2. 8: Modulador FSK binario.

Fuente: (Meluk Orozco, 2012)

$$S_{FSK}(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_{c1} t); & \text{bit 1} \\ A \cos(2\pi f_{c0} t); & \text{bit 0} \end{cases}$$

El modulador representado está compuesto por un codificador NRZ unipolar, cuyo signo resultante se aplica a dos ramas distintas. En la rama superior la señal proveniente del codificador NRZ unipolar se multiplica por un co-seno con frecuencia fundamental f_{c1} . Los pulsos sinusoidales resultantes de esta multiplicación modulan el bit 1. En la rama inferior, la señal es invertida y varía entre 0 y -1V. Esta señal es multiplicada por el coseno con frecuencia fundamental f_{c0} . El resultado de ambas ramas es sumado y posteriormente amplificado por un factor A (este caso $A=5$), dando origen a la señal $S_{FSK}(t)$ representada en la figura 2.9.

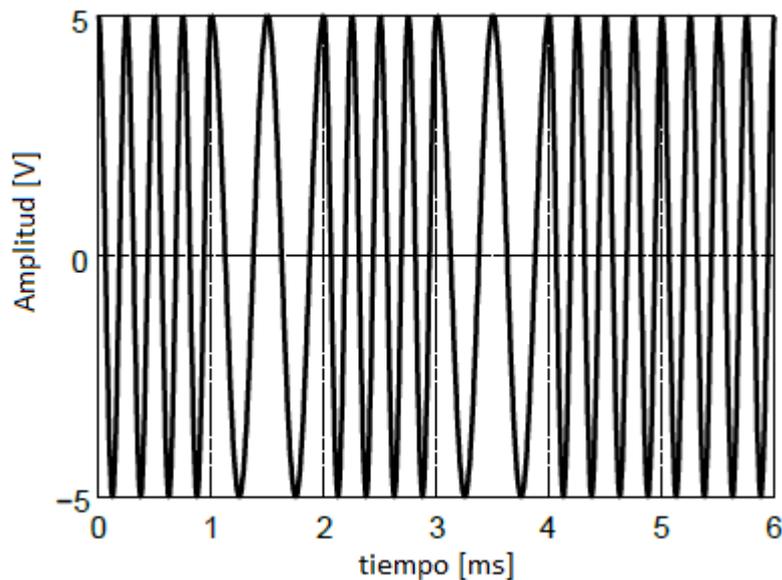


Figura 2. 9: Señal modulada en FSK.

Fuente: (Meluk Orozco, 2012)

Se verifica por la figura 2.9 que los pulsos sinusoidales generados por esta modulación tienen amplitud y duración (tiempo de bit) iguales, sin

embargo, lo que los distingue es la frecuencia de la senoide que lo genera. En el caso del bit 1, la frecuencia de la portadora es de 4 kHz y para el bit 0 la frecuencia de la portadora es de 2 kHz.

2.1.3. Modulación PSK

En cuanto a la modulación PSK se puede recurrir a la codificación de línea NRZ bipolar, facilitando la concepción del emisor. Una vez que el código de línea bipolar varía entre una tensión positiva y negativa, se obtiene de esta manera la diferencia de fase de 180°. El diagrama de bloques que describe este modulador está representado en la figura 2.10.

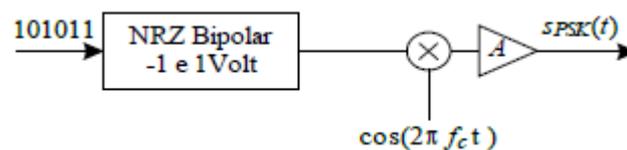


Figura 2. 10: Modulador PSK binario.
Fuente: (Meluk Orozco, 2012)

La señal PSK resultante de esta modulación está representada en la figura 2.11. Esta modulación es también conocida como BPSK (Binary PSK). Teniendo en cuenta que la señal codificada varía entre un valor positivo y negativo, correspondientes a los bits 1 y 0, respectivamente, es posible identificar fácilmente los bits modulados en la figura 2.11.

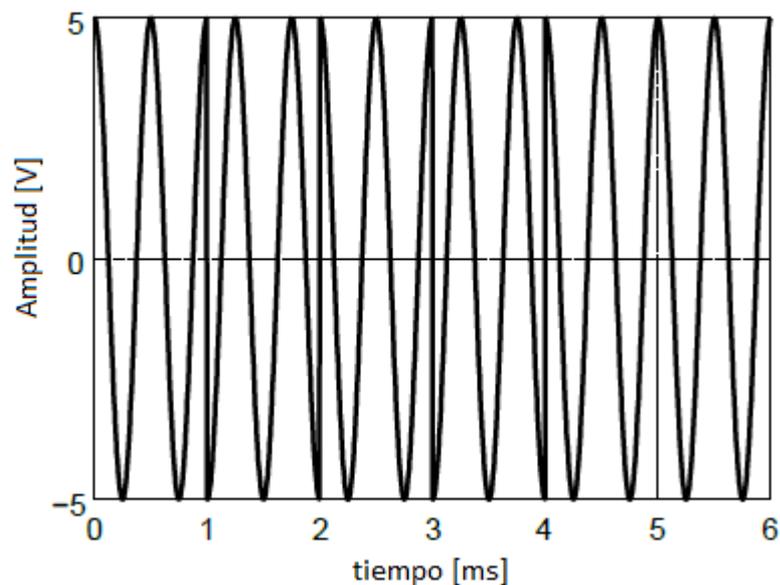


Figura 2. 11: Señal modulada en PSK.
Fuente: (Meluk Orozco, 2012)

Para esta modulación los valores de amplitud y frecuencia de la portadora son constantes, variando apenas la fase en 180° , conforme representado en la expresión (2.11). En la sección 2.3 se presentan, para cada modulación, los valores de energía media por bit y su ancho de banda.

$$S_{PSK}(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + 0); & \text{bit 1} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi); & \text{bit 0} \end{cases}$$

2.2. Modulaciones M-arias.

Las modulaciones descritas anteriormente se denominan modulaciones binarias, dado que los bits 0 y 1 se modulan en secuencias de pulsos sinusoidales con amplitud, frecuencia o fase variables, asociadas al bit a transmitir. Sin embargo, este tipo de modulación no es eficaz cuando se pretende alcanzar altas deudas. Es necesario codificar más de un bit simultáneamente.

Con base en el espacio de señales, se puede recurrir al método geométrico para traducir el proceso de modulación. Se toma como ejemplo el espacio cartesiano, donde un vector es descrito por el par de coordenadas x , y . En este espacio, cualquier vector puede ser descrito por la combinación lineal del par de versores (vectores de norma unitaria), $(1,0)$ y $(0,1)$, que son ortogonal entre sí.

En el caso de que se produzca un cambio en el valor de la variable, se debe describir dos canales cuyos signos que los modelan se encuentran en cuadratura (desfasados en 90° y ortogonal como consecuencia), pudiendo ser descrito gráficamente como se representa en la figura 2.12.

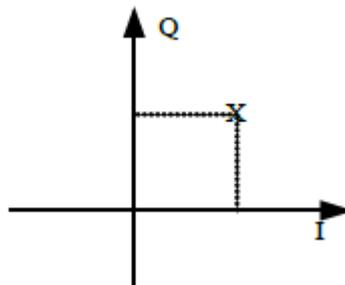


Figura 2. 12: Descomposición de una señal en los componentes I y Q.

Elaborado por: Autor

A través de este concepto es posible definir, en lo que se utiliza recurrentemente en telecomunicaciones, los canales I y Q (In-Phase y Quadrature). Estas señales son funciones trigonométricas en cuadratura: el seno y el coseno. En las secciones anteriores se presentaron varias técnicas de modulación binaria, en las que un bit representa la variación de uno de los parámetros de la senoide. En las modulaciones M-arias se codifican k bits que darán origen a M símbolos distintos,

$$M = 2^k.$$

Cada símbolo está representado por un pulso sinusoidal y con una duración correspondiente al símbolo correspondiente. De este modo se puede definir el valor de tiempo de símbolo T_s , en función del tiempo de bit (T_b)

$$T_s = T_b \cdot k$$

La frecuencia de transmisión, o ritmo binario, de la transmisión digital se da por (2.14), en la que la tasa de símbolos transmitidos se denomina *baud rate* [símbolos/s]

$$R_b = R_s \cdot \log_2(M) = R_s \cdot k$$

Todas las modulaciones descritas anteriormente pueden modular más de un bit, dando lugar a modulaciones como 4-ASK, 4-PSK y 4-FSK. La modulación M-PSK es más usada tanto con amplitud constante como con amplitud variable se denomina modulación en amplitud de cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation, QAM*). Esta última también se denomina APK (*Rango Phase Keying*). A continuación, se realiza una descripción de estas modulaciones en las secciones siguientes.

2.2.1. Modulación M-PSK.

Generalizando la modulación B-PSK en una modulación M-PSK, se obtiene una modulación bidimensional, ya que se utilizan dos funciones base para componer: coseno y seno. La expresión genérica que describe esta modulación es dada por:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_i + \alpha)$$

El valor de ϕ_i corresponde al valor del ángulo de cada símbolo y puede expresarse por (2.16), donde el valor de i es dado por el intervalo de valores $\{0, 1, 2, \dots, M-1\}$. El valor de a corresponde al ángulo de rotación igual para todos los símbolos (fase inicial).

$$\phi = \frac{2 \cdot \pi}{M} i$$

Con base en el canal I y Q, se pueden representar gráficamente las constelaciones asociadas a esta modulación, conforme se representa en la figura 2.13. Se observa que la diferencia entre las constelaciones representadas en la figura 2.13 b) y c), está en el valor de a .

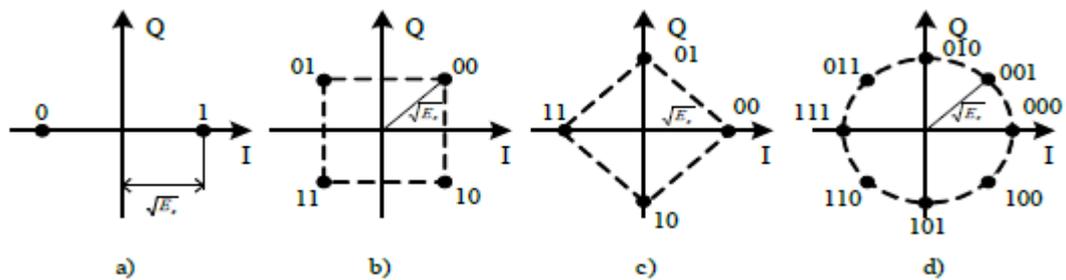


Figura 2. 13: Constelaciones M-PSK: a) B-PSK; b) Q-PSK; c) Q-PSK; d) 8-PSK.
Fuente: (Thuneibat, 2016)

La disposición de los símbolos en la constelación depende del número de símbolos, así como de la fase de cada uno, de acuerdo con la expresión (2.15). Tomando como referencia la constelación representada en la figura 2.13 b), el mapeo de los símbolos que componen esta modulación es dado por las siguientes expresiones (véase la tabla 2.1) obtenidas en función de la energía de símbolo (E_s).

Se observa que la modulación digital es invariante a la rotación de su constelación, es decir, la rotación no cambia la energía de símbolo ni el tiempo de símbolo. Los valores de I y Q representan las coordenadas del vector que resulta de la combinación entre el canal en fase y cuadratura, respectivamente.

Como se verifica, en la figura 2.13 d), todos los símbolos están sobre la misma circunferencia, es decir, todos los símbolos poseen la misma energía.

En base a (2.15), se puede representar matemáticamente una señal M-PSK genérica a la $\alpha = 0^\circ$, segundo (2.17)

$$s(t) = \sqrt{\left(\frac{2E_s}{T_s}\right)} \cos[2\pi f_c t + \phi_i(t)]$$

Tabla 2. 1: Expresiones de cada símbolo para la modulación QPSK

Bits	$s(t)$	Fase	I	Q
00	$s(t) = \sqrt{\left(\frac{2E_s}{T_s}\right)} \cos\left[2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}\right]$	45	1	1
01	$s(t) = \sqrt{\left(\frac{2E_s}{T_s}\right)} \cos\left[2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}\right]$	135	-1	1
10	$s(t) = \sqrt{\left(\frac{2E_s}{T_s}\right)} \cos\left[2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right]$	225	1	-1
11	$s(t) = \sqrt{\left(\frac{2E_s}{T_s}\right)} \cos\left[2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right]$	315	-1	-1

Elaborado por: Autor

Después de desarrollar (2.17), se obtiene la expresión M-PSK como combinación lineal de los dos canales, I y Q:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t) \cos[\phi_i] - A \sin(2\pi f_c t) \sin[\phi_i]$$

Se concluye que, con el aumento del número de símbolos (ver figura 2.13), la discriminación de los mismos en la recepción se vuelve más difícil, ya que estos se encuentran muy próximos. En presencia de ruido, esta discriminación se vuelve aún más difícil de realizar. La solución adoptada pasa por aumentar y diversificar el número de niveles (amplitudes y fases diferentes) de los símbolos que componen la constelación.

Se pretende ejemplificar el proceso de modulación QPSK de una señal NRZ bipolar cuya secuencia binaria es dada por 01001011. La señal resultante de la codificación de esta señal está representada en la figura 2.14.

Dada la modulación en cuestión (cuatro símbolos), se necesitan dos bits para codificar cada símbolo.

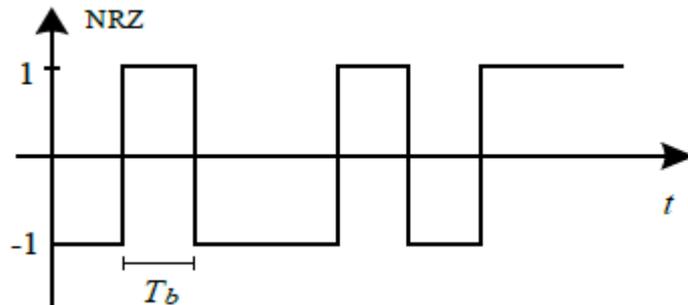


Figura 2. 14: Señal NRZ bipolar utilizada para la modulación QPSK.
Fuente: (N. Sharma & Yadav, 2012)

El modulador QPSK, representado en la figura 2.15, está compuesto por un bit splitter, dos bloques multiplicadores (portadores en fase y cuadratura) y un bloque de suma para combinar el resultado de ambas ramas, de acuerdo con (2.17) y (2.18).

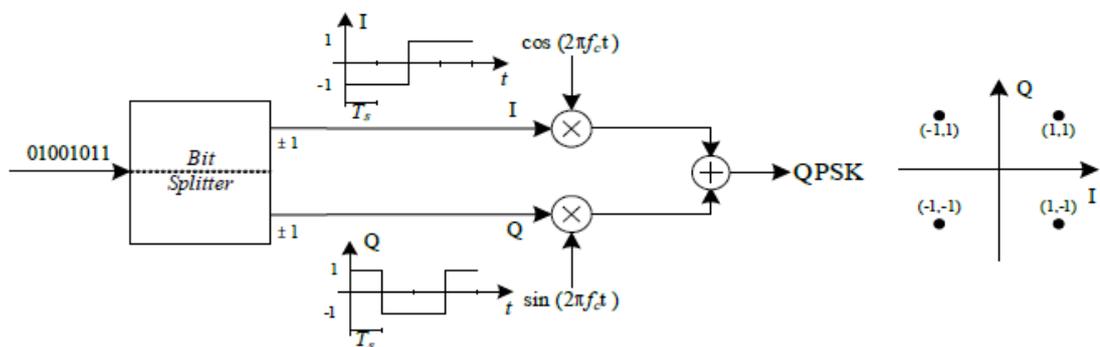


Figura 2. 15: Modulador QPSK.
Fuente: (N. Sharma & Yadav, 2012)

Al estudiar este modulador específico, se comprueba que la secuencia binaria presente en el sistema se separa alternativamente para el canal I y el canal Q. La señal generada por cada rama es NRZ bipolar donde cada bit se codifica con uno de dos valores de tensión posibles. En este ejemplo concreto el bit 0 se codifica con el valor -1V y el bit 1 con el valor 1V.

En esta fase del proceso de modulación, la duración asociada a cada valor de tensión corresponde al doble de la duración del tiempo de bit, es decir al tiempo de símbolo (T_s). Cada canal (I y Q), es modulado por dos señales sinusoidales en cuadratura (diferencia de fase entre ellos es de 90°). La suma

de la señal modulada en fase y cuadratura corresponde a la señal QPSK, cuya constelación se presenta en la figura 2.15. Una vez que cada rama codifica un bit a la vez con dos amplitudes posibles, se consiguen cuatro combinaciones para la constelación QPSK.

Con esta técnica es posible transmitir el doble de la información en el mismo ancho de banda, es decir, cada símbolo QPSK de duración T_s puede transmitir dos bits con duración T_b . En comparación con la codificación B-PSK tratada en la sección 2.1.3. Generalmente en una constelación con M símbolos se codifican k bits, donde $k = \log_2(M)$.

2.2.2. Modulación M-QAM

Se puede encarar la modulación M-QAM como una generalización de la modulación MPSK, en el sentido en que las amplitudes de los signos varían, dando origen a diferentes niveles de energía asociados a los símbolos que componen la constelación. En términos matemáticos se puede describir la modulación M-QAM según la expresión (2.19), donde todos los parámetros son idénticos a los de la expresión genérica M-PSK, excepto el valor de la amplitud que ahora varía en función del símbolo a codificar.

$$s(t) = A_i \cos(2\pi f_c t + \phi_i + \alpha)$$

Al igual que la modulación M-PSK, la modulación M-QAM, se obtiene sólo con dos ramas ortogonales, tal como se muestra en la figura 2.16. En este ejemplo se especializa para la modulación 16-QAM.

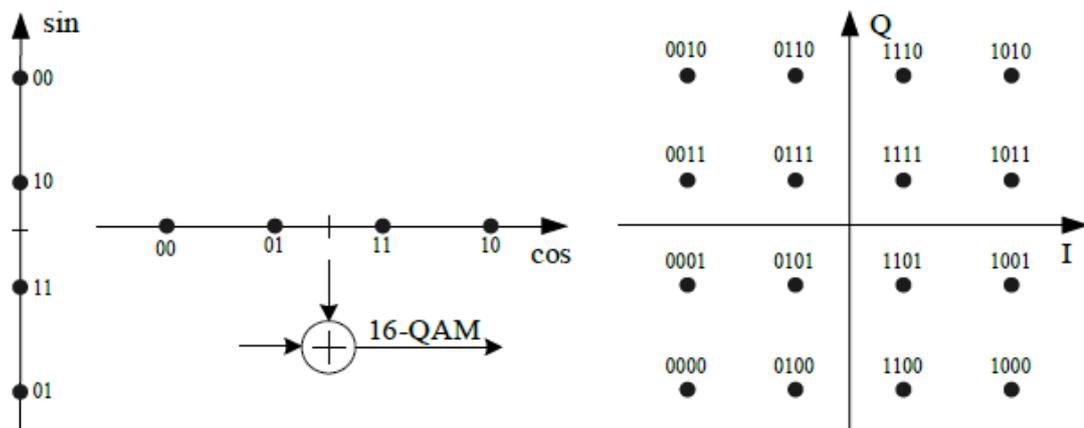


Figura 2. 16: Concepto de modulación M-QAM (16-QAM).
Fuente: (Thuneibat, 2016)

Como se muestra en la figura 2.17, los 16 símbolos se encuentran dispuestos sobre tres circunferencias correspondientes a los tres niveles de energía. Cada símbolo está equidistante entre el símbolo adyacente del valor de $2d$, donde d , corresponde a la distancia entre los símbolos de menor energía a los ejes.

Se comprueba que entre símbolos adyacentes, sólo cambia un bit (codificación de Gray), lo que permite minimizar la tasa de error. La asignación de cada par de bits y el valor de tensión se encuentra en la tabla 2.2.

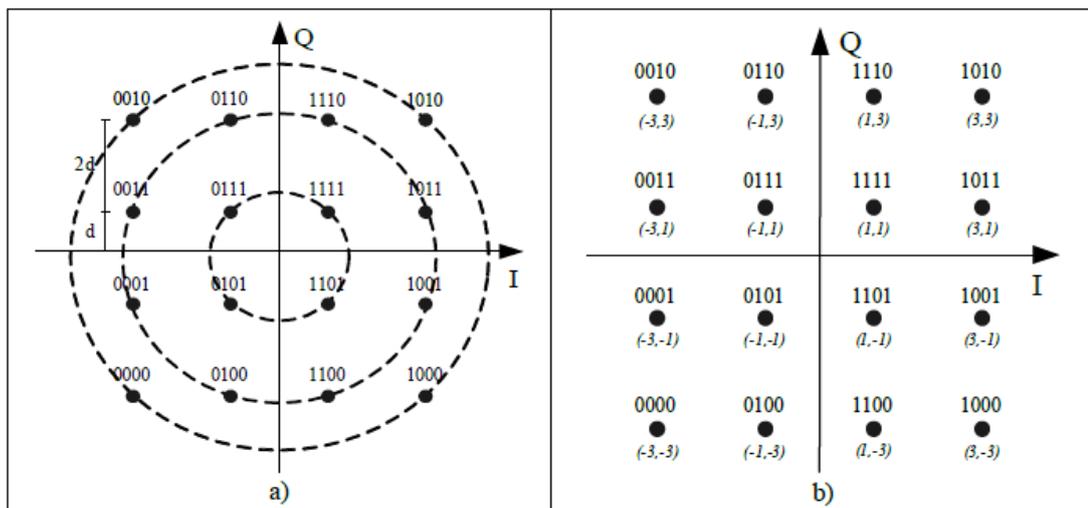


Figura 2. 17: 16-QAM: a) niveles de energía; b) coordenadas de cada símbolo.
Fuente: (Thuneibat, 2016)

Tabla 2. 2: Asignación de los valores de tensión al par de bits.

Bits	Valor analógico
00	-3
10	-1
11	1
01	3

La combinación de los valores obtenidos por la modulación en fase (I) y en cuadratura (Q) con valores de amplitud ± 1 y ± 3 , se obtienen, después de la suma de ambas contribuciones, una constelación compuesta por 16 símbolos, con 4 bits cada uno. La figura 2.18 representa una implementación posible para un modulador M-QAM. Esto se constituye, a semejanza del modulador QPSK, de un bit splitter, dos convertidores de k bits a M niveles y

sus multiplicadores para realizar desplazamiento de la señal de banda base a la frecuencia f_c .

La principal diferencia reside en la generación de más niveles de amplitud para variar los niveles de energía de la señal resultante, de acuerdo con la constelación.

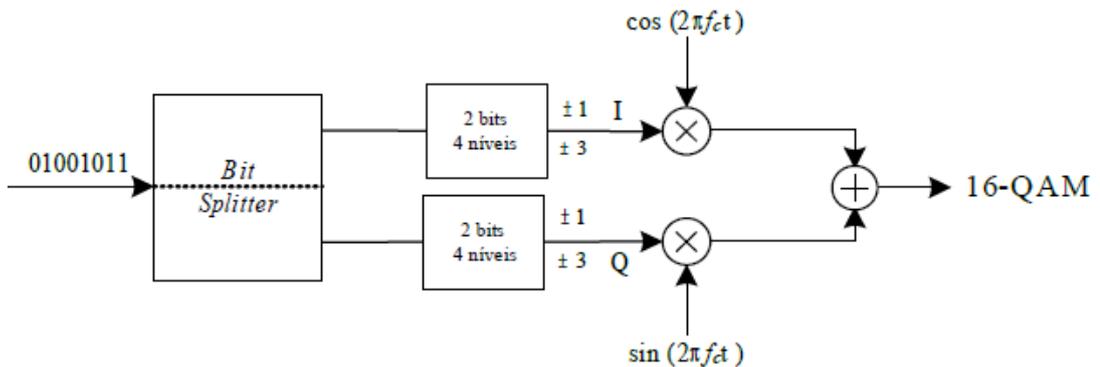


Figura 2. 18: Modulador M-QAM.
Fuente: (Odiannonen Omijeh, 2015)

A semejanza de la descripción efectuada para la modulación QPSK, se ejemplifica ahora para el caso de la modulación 16-QAM, cuyos primeros bits a codificar son: 01001011111100001, su representación codificada en NRZ bipolar está representada en la figura 2.19.

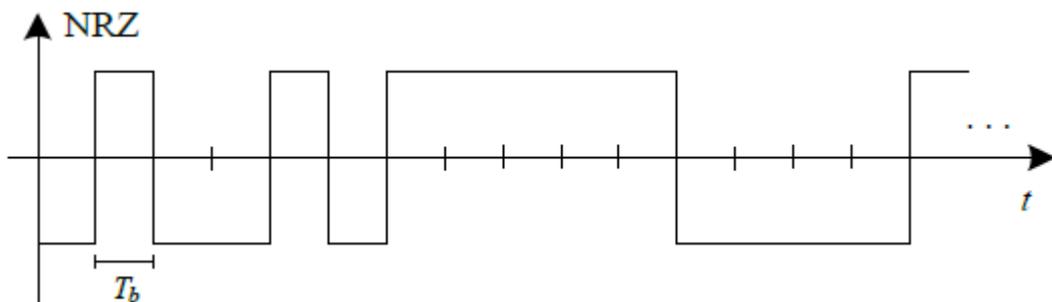


Figura 2. 19: Secuencia NRZ bipolar.
Elaborado por: Autor

Al igual que el ejemplo presentado para la modulación QPSK, la secuencia binaria presente en la entrada del bit splitter se separa para la rama I y Q. Sin embargo, en esta modulación en concreto se agrupan dos bits a la vez para cada rama, es decir, dos bits para el canal I y otros dos para el canal

Q. La duración de cada par de bits (T_s) correspondiente a cuatro veces el tiempo de bit (T_b).

En las figuras 2.20 y 2.21 están representadas las señales con cuatro niveles, correspondientes a los dos bits que lo codifican. La señal 16-QAM resulta de la suma de las contribuciones del canal I y Q.

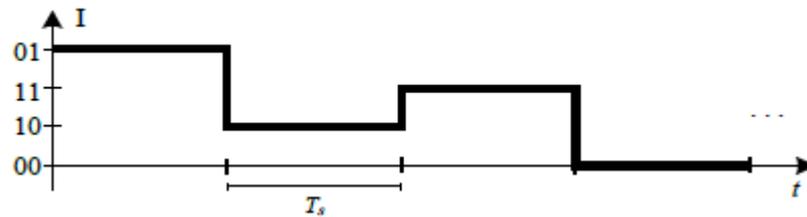


Figura 2. 20: Codificación del canal I.
Elaborado por: Autor

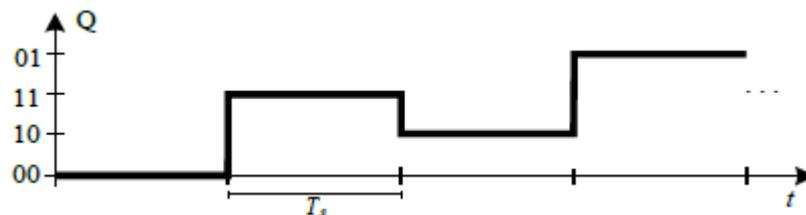


Figura 2. 21: Codificación del canal Q.
Elaborado por: Autor

Los cuatro niveles lógicos pueden describirse por cuatro valores de tensión: 3V, 1V, -1V y -3V, para los pares de bits 01, 11, 10 y 00 respectivamente, como se mostró en la tabla 2.2. Con esta modulación se consigue una mejor discriminación de los símbolos que en una constelación modulada en PSK para el mismo número de símbolos, esto es 16- SK. Comparando la señal NRZ con la modulación 16-QAM, se concluye que, para el mismo ancho de banda, la modulación en cuestión puede transmitir el cuádruple de la información, en relación con una modulación binaria, como ASK o PSK.

2.3. Comparación de las modulaciones.

En esta sección se hace un resumen de las modulaciones digitales binarias y de M-arias presentadas en las secciones anteriores. Se presentan

algunas comparaciones en función del tipo de moduladores, ancho de banda ocupada y energía media por bit y por símbolo.

2.3.1. Moduladores.

Por lo expuesto en la sección 2.1, se observa que los moduladores usados para las diferentes modulaciones binarias son distintas, en función de la modulación en cuestión. En las modulaciones ASK (OOK) y PSK, los moduladores son idénticos, ya que la inversión de fase se obtiene a costa del tipo de código de línea utilizado. En cuanto a la modulación FSK, esta presenta mayor complejidad ya que se necesitan dos ramas para generar las dos frecuencias deseadas. Su implementación en hardware, en comparación con las modulaciones ASK y PSK, se vuelve más compleja, ya que son necesarios dos osciladores (en el caso de la modulación binaria) con frecuencias distintas.

Los moduladores usados para realizar modulaciones M-arias son más complejos, en comparación con los moduladores binarios. Asumiendo como referencia la modulación en fase PSK, se observan varias diferencias entre el modulador binario y M-ario. En el primer caso sólo es necesaria una portadora que multiplica la señal NRZ bipolar.

La inversión de fase de 180° se obtiene por la variación de amplitud de la señal en banda base (ver sección 2.1.3). En el segundo caso el modulador está compuesto por dispositivos adicionales (*bit splitter, sumador*), así como por dos portadoras en cuadratura. Sin embargo, como se muestra en el capítulo 4, el rendimiento de las modulaciones M-arias respecto a la presencia del ruido, es superior al de las modulaciones binarias.

2.3.2. Espectro

Después de la multiplicación de la señal en banda base por la portadora con frecuencia f_c , expresión (2.2), el espectro de la señal modulada se centra en esta frecuencia, como se muestra en la figura 2.22. El formato del espectro representado en esta figura, en relación con el ancho de banda ocupado, es válido tanto para la modulación ASK (OOK) y PSK.

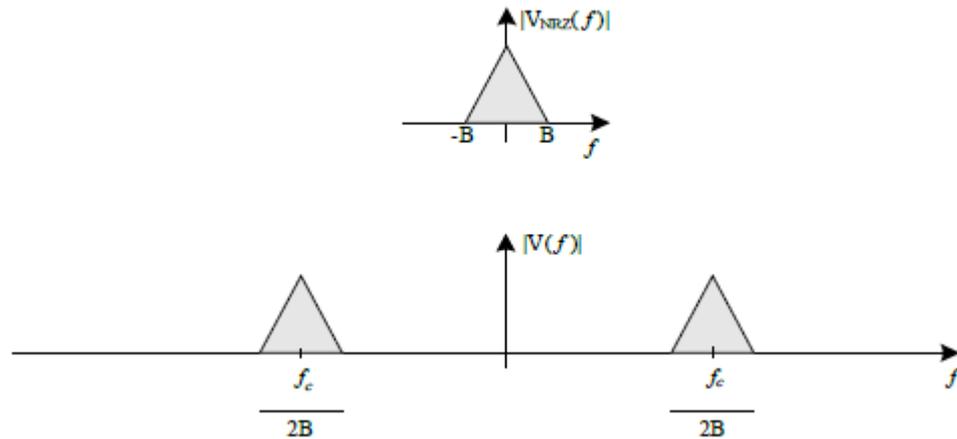


Figura 2. 22: Espectro de una señal de banda base y modulada (ASK y PSK).
Elaborado por: Autor

En el caso de la modulación FSK, el espectro es diferente del representado en la figura 2.22, ya que la señal en banda base se multiplica por dos señales de frecuencia de portadora diferentes f_{c1} y f_{c0} . En este caso el espectro resultante tiene la forma representada en la figura 2.23. El espectro de la densidad espectral de potencia de la señal modulada son dos señales de sincronización centradas en las frecuencias f_{c0} y f_{c1} con ceros en $f_{c0} \pm nR_b$ y $f_{c1} \pm nR_b$, con $n \in \mathbb{Z}$.

La densidad espectral de potencia de una secuencia aleatoria NRZ es dada por (2.20). El espectro de la densidad espectral de potencia de la señal modulada es desplazado en la frecuencia (convolución) resultante de la multiplicación en el tiempo por la portadora. Por lo tanto, el espectro de la señal dada por (2.20) se centra en la frecuencia f_c con ceros $f_c \pm nR_b$.

$$S_b(f) = \text{sinc}^2(fT_b)$$

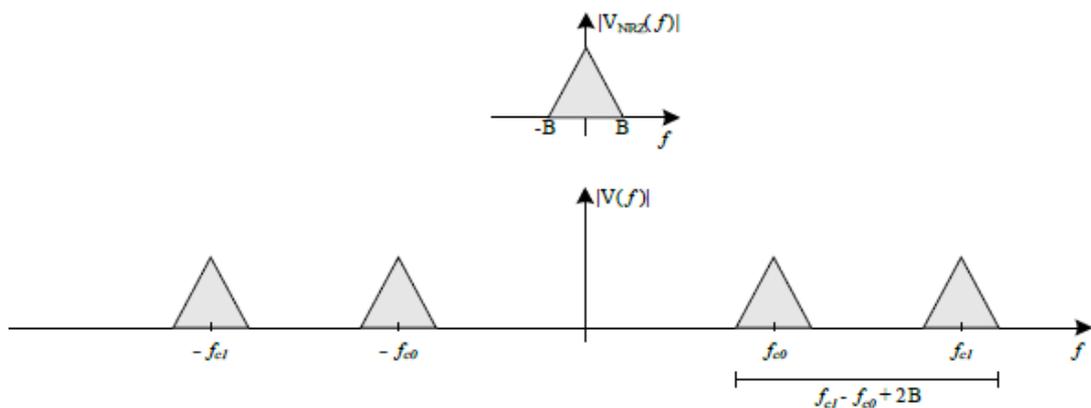


Figura 2. 23: Espectro de una señal de banda base y modulada FSK.
Elaborado por: Autor

Se observa que, para las modulaciones binarias presentadas, la que ocupa mayor ancho de banda es la modulación FSK ya que son necesarias dos frecuencias para generar los dos símbolos pretendidos. La tabla 2.3 muestra los valores de ancho de banda (considerando dos métodos de cálculo), y la energía media por bit para las modulaciones binarias. En la presencia de un filtro ideal ($\alpha = 0$), el ancho de banda corresponde a la mitad de la considerada por el criterio del primer cero espectral. Considerando el mayor ancho de banda del filtro ($\alpha = 1$), los valores de anchura son iguales.

Tabla 2. 3: Resumen de las modulaciones binarias.

Modulación binaria	1er cero espectral	Ancho de banda	Energía
OOK	$2R_b$	$R_b(1 + \alpha)$	$\frac{A^2}{4}T_b$
ASK	$2R_b$	$R_b(1 + \alpha)$	$\frac{A_0^2 + A_1^2}{4}T_b$
PSK	$2R_b$	$R_b(1 + \alpha)$	$\frac{A^2}{2}T_b$
FSK	$f_1 - f_0 + 2R_b$	$f_1 - f_0 + R_b(1 + \alpha)$	$\frac{A^2}{2}T_b$

Elaborado por: Autor

La energía media por bit, que se muestra en la tabla 2.3 para la modulación ASK y OOK es válida cuando los bits “1” y “0” son equiprobables. Los valores de A_0 y A_1 corresponden a los valores de amplitud asociados a los bits cero y uno, respectivamente. En la tabla 2.4 se presentan los valores del ancho de banda, la energía media por símbolo y la energía media por bit de algunas modulaciones M-arias.

Tabla 2. 4: Modulaciones M-arias (ancho de banda y energía media por símbolo y por bit).

Modulación M-aria	Ancho de banda	Energía (símbolo)	Energía (bit)
QPSK	$\frac{R_b}{2} \cdot (1 + \alpha)$	$\frac{A^2}{2}T_s$	$\frac{A^2}{2}T_b$
M-PSK	$\frac{R_b}{k} \cdot (1 + \alpha)$	$\frac{A^2}{2}T_s$	$\frac{A^2}{2}T_b$
M-QAM	$\frac{R_b}{k} \cdot (1 + \alpha)$	$\frac{A^2}{2}T_s$	$\frac{A^2}{2}T_b$

Elaborado por: Autor

En comparación con las expresiones de cálculo del ancho de banda para las distintas modulaciones, se concluye que para PSK, cuanto mayor sea el número de bits que componen el símbolo, el ancho de banda disminuye. Se observa que, las modulaciones M-QAM y M-PSK, tienen rendimiento binario, número de símbolos, factor de *roll – off*, y ancho de banda iguales.

2.4. Técnicas de detección/demodulación.

En esta sección se presentan las técnicas de detección/demodulación de señales digitales moduladas. Se presentan ejemplos de detección coherente, también se analizan técnicas de detección para modulaciones binarias y M-arias. Para este último caso la detección se explica sobre la base de correladores. Una vez que los medios de transmisión no son ideales, la señal enviada por el emisor no llega al receptor con el mismo formato. La señal sufre diversas perturbaciones, las cuales, si no se tratan correctamente, resultan en la decodificación incorrecta de la información. Estas perturbaciones son: atenuación, ruido y distorsión de amplitud y fase. El demodulador (receptor) tiene que tener la capacidad de minimizar el efecto de estas perturbaciones presentes en la señal recibida, maximizando la relación señal de ruido en el instante de decisión.

2.4.1. Detección Coherente en Modulaciones binarias

La modulación binaria genera señales, como ya se ha señalado en las secciones anteriores, que varían entre dos valores distintos, ya sean modulados en amplitud, fase o frecuencia. La detección de los bits (modulación binaria), o símbolos (modulación M-aria), puede ser realizada a través de los detectores/demoduladores presentados en la figura 2.24. El valor correspondiente al instante de decisión puede ser T_b o T_s (tiempo de bit o símbolo), en función del tipo de modulación que dio origen a la señal $s(t)$.

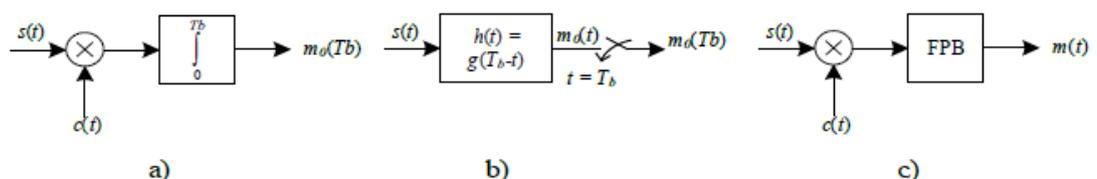


Figura 2. 24: a) receptor de correlación; b) filtro adaptado (filtro combinado); c) demodulador coherente.

Fuente: (Amin, 2011)

2.4.2. Detección Coherente ASK

La detección coherente ASK puede ser implementada según los detectores presentados en la figura 2.24 a) y b), el correlador o filtro adaptado, respectivamente. Particularizando para esta modulación en concreto, el detector puede ser representado según la figura 2.25.

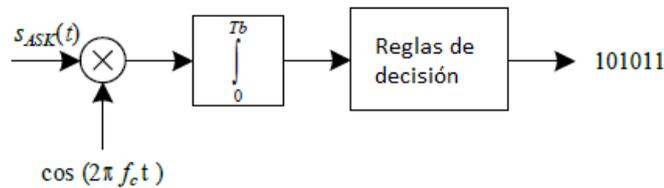


Figura 2. 25: Detector ASK.
Fuente: (Amin, 2011)

La señal $S_{ASK}(t)$ presente en la entrada del detector se multiplica por el signo de referencia correspondiente, cuya duración corresponde a un tiempo de bit. La señal resultante de esta operación se integra en el intervalo entre 0 y T_b . El resultado de esta operación está representado en la figura 2.26, con $A_0 = 5 V$, $A_1 = 10 V$ y $T_b = 1 ms$.

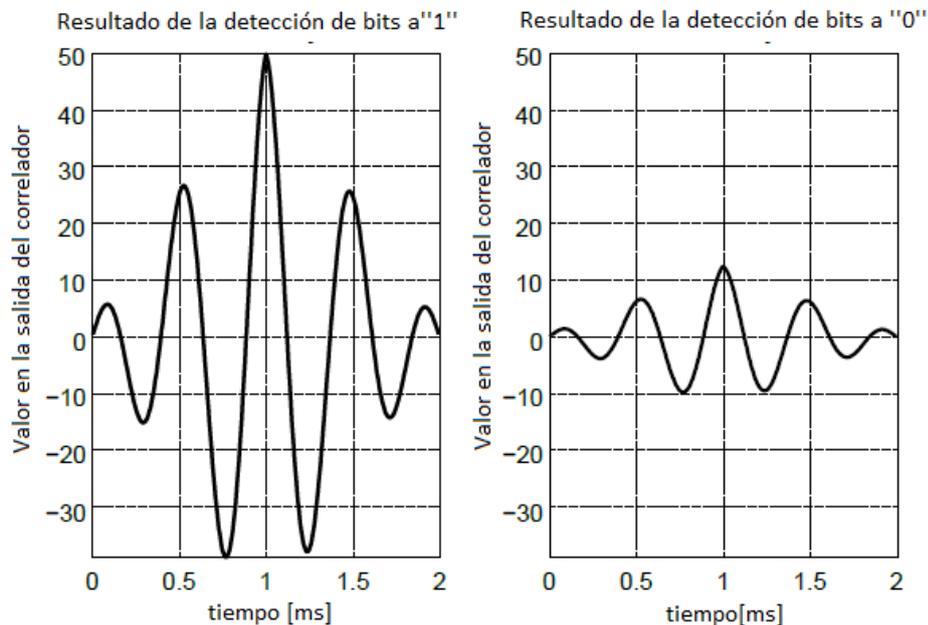


Figura 2. 26: Detección coherente para ASK.
Fuente: (Amin, 2011)

Este caso particular el pulso sinusoidal resultante presenta cuatro períodos de la senoide de referencia, lo que implica que la duración de la señal corresponde al doble de T_b . El valor de energía de bit se encuentra en

el instante correspondiente al T_b , que en este caso particular es de 1 ms. Dado que esta modulación tiene como principal característica la variación de la amplitud en función del bit a codificar, los valores de energía correspondientes a los dos bits codificados se distinguen a través de dos valores distintos: 50 mJ y 12,5 mJ, para el bit '1' y '0', respectivamente. Estos valores corresponden a la energía del pulso sinusoidal que da lugar a la modulación de cada uno de los bits. La regla de decisión se basa en la función de estos dos valores según se presenta en (2.20)

$$\text{Regla de decisión ASK} \begin{cases} 1; & T_b > \frac{50+12.5}{2} m.j \\ 0; & \text{caso contrario} \end{cases}$$

En el caso particular de la modulación OOK, el signo resultante se representa en la figura 2.27.

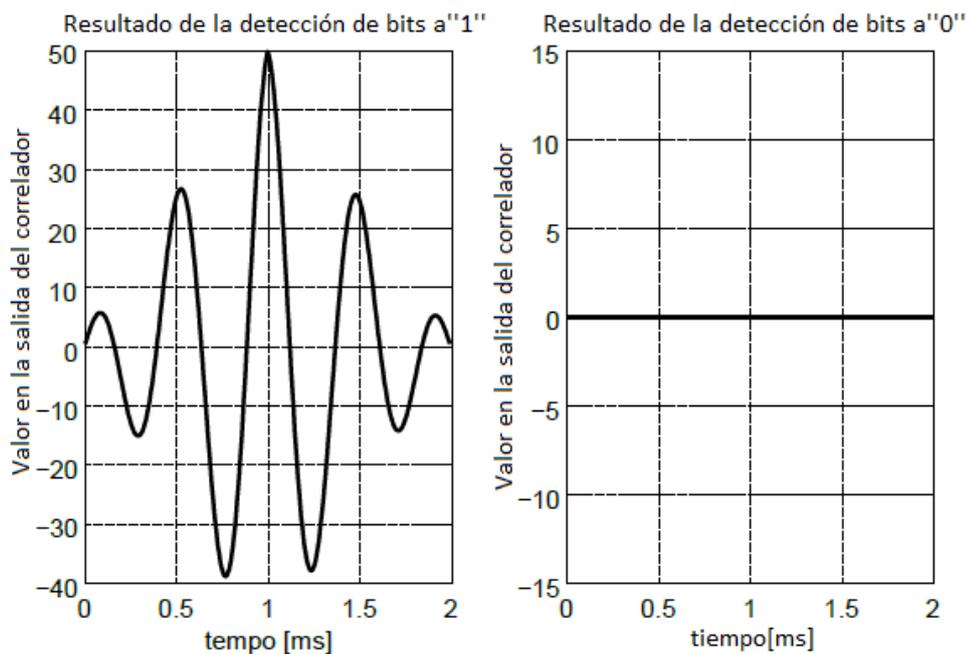


Figura 2. 27: Detección coherente para OOK.
Fuente: (Amin, 2011)

Al igual que la modulación ASK, el resultado es idéntico: dos valores distintos de energía asociados a los dos bits codificados. En este caso particular, dado que el bit a 0 se codificó con el valor 0, la energía de la señal resultante de la detección es nula. El valor máximo correspondiente a la detección del bit 1 corresponde al doble de la energía media por bit, o sea del

bit 1. De esta manera la energía media por bit es 25 mJ. La regla de decisión viene dada por (2.21)

$$\text{Regla de decisión OOK} \begin{cases} 1; T_b > \frac{50 + 0}{2} mJ \\ 0; \text{ caso contrario} \end{cases}$$

2.4.3. Detección Coherente PSK.

El método de detección PSK es similar al caso anterior, como se muestra en la figura 2.28. Las señales resultantes de esta detección tienen un valor igual en módulo, ya que el valor de la amplitud de la señal modulada es constante. La señal en la salida de correlación se presenta en la figura 2.28, para los casos del bit 1 y 0. Los valores utilizados para las reglas de decisión se encuentran a medio de la duración del pulso donde el valor en módulo corresponde a la energía media por bit. La simetría de las señales se debe a la diferencia de fase de 180° de la señal modulada.

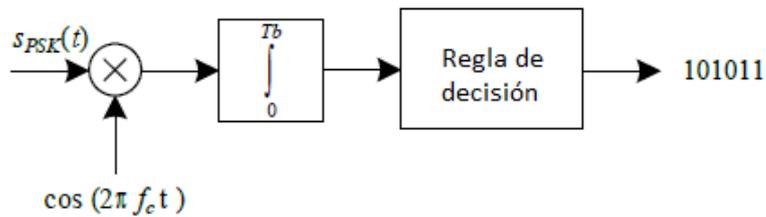


Figura 2. 28: Detector PSK.

Fuente: (Amin, 2011)

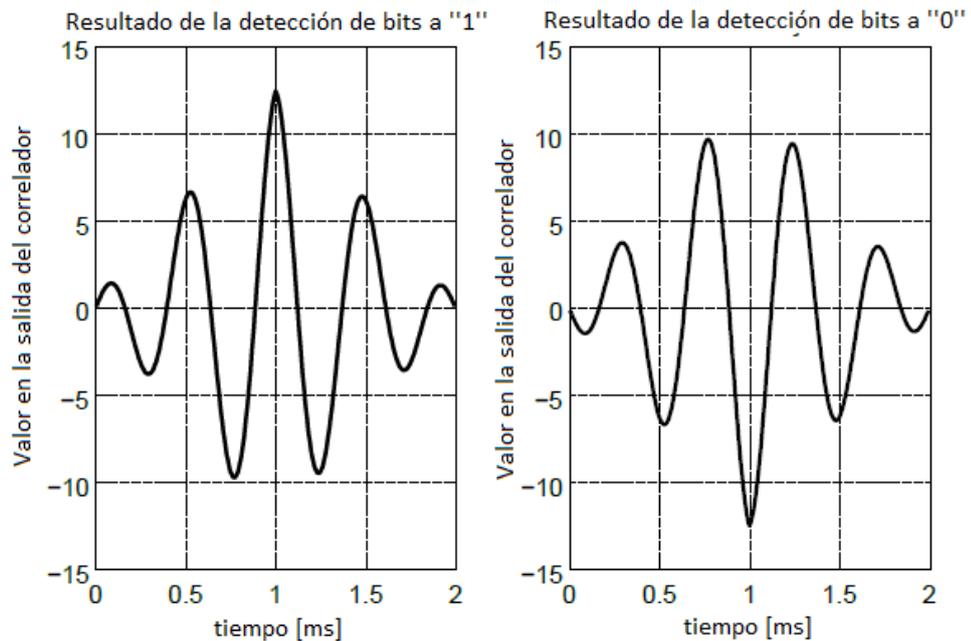


Figura 2. 29: Detección coherente para PSK.

Fuente: (Amin, 2011)

2.4.4. Detección Coherente FSK.

El método de detección FSK se basa en el mismo método de modulación ASK y PSK. Sin embargo, como se recurre a dos señales con frecuencias distintas para modular la señal, en la detección hay que tener ese factor en cuenta. El esquema del detector FSK presentado en la figura 2.30 está compuesto por dos ramas detectores coherentes cuya diferencia reside en la frecuencia de los cosenos. En la rama superior se realiza la detección del bit con valor uno. En la rama inferior se realiza la detección del bit con valor cero. Los valores de frecuencias de las señales de referencia de cada una de estas ramas son igual a las utilizadas en la modulación de cada uno de los bits.

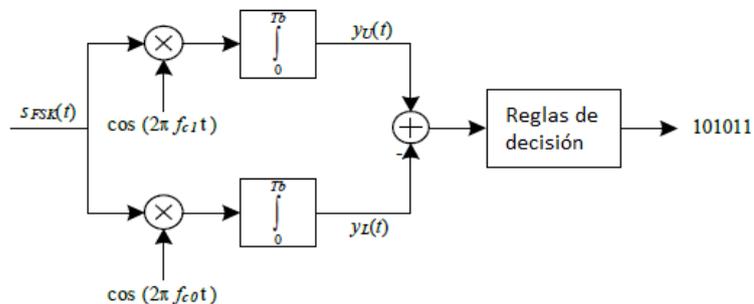


Figura 2. 30: Detector del sistema de modulación por desplazamiento de frecuencia.
Fuente: (Amin, 2011)

El resultado de la detección FSK resultante está representado en las figuras 2.31 y 2.32, para el bit a uno y a cero respectivamente.

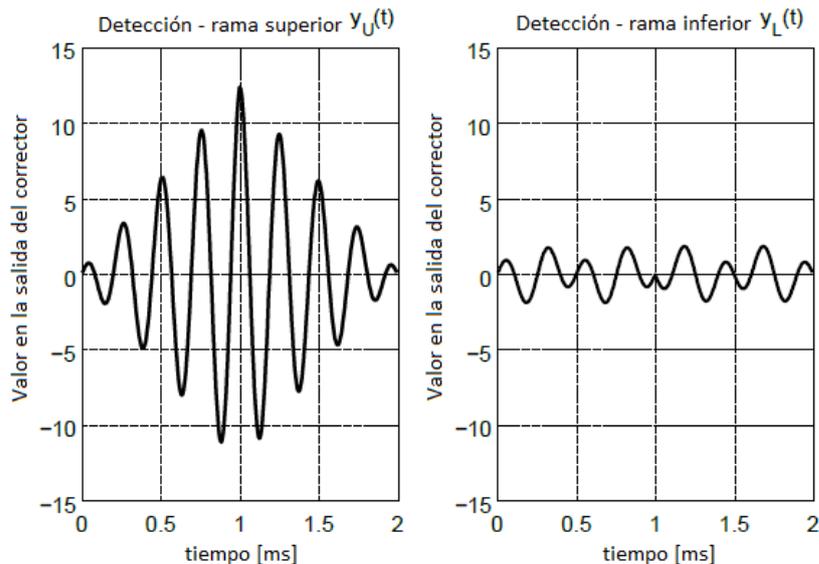


Figura 2. 31: Detección coherente FSK del bit uno.
Fuente: (Amin, 2011)

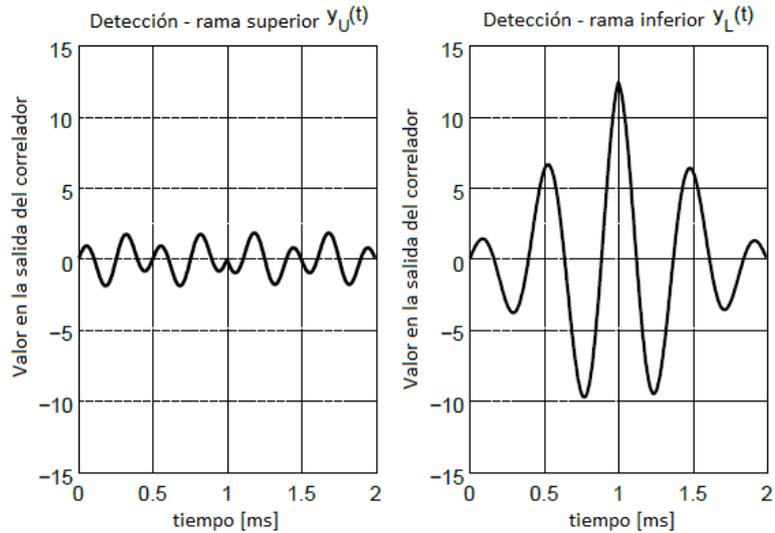


Figura 2. 32: Detección coherente FSK del bit cero.
Fuente: (Amin, 2011)

Los valores de energía asociados a los bits “1” y “0” son ambos 12.5 mJ, pero desglosados en diferentes ramas resultantes de la sustracción de los resultados de las dos ramas. Se observa que el valor de la energía es nulo en el instante T_b en las ramas donde la detección no corresponde al bit asociado a esa frecuencia.

2.5. Detección en modulaciones M-arias.

Como se explicó en secciones anteriores, la detección de símbolos en modulaciones binarias se realiza de forma similar, independientemente de la variable utilizada para realizar la modulación (amplitud, frecuencia o fase). Se pretende ahora presentar el método de detección de los símbolos en modulaciones M-arias. Independientemente del número de símbolos (M), así como el número de bits por símbolo (k), la detección efectuada en modulaciones M-arias se basa en el esquema genérico de la figura 2.34.

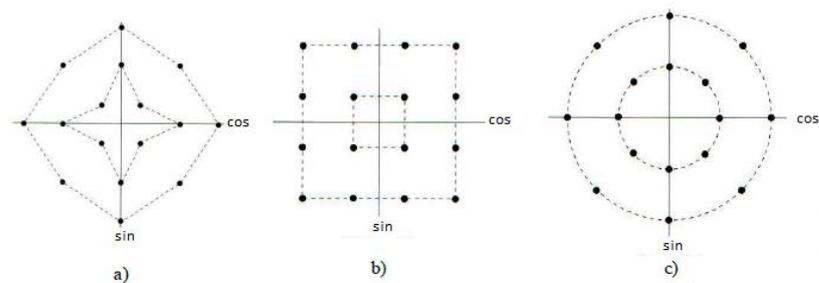


Figura 2. 33: Diferentes formas de constelación 16-QAM: a) estrella; b) cuadrado; c) circular.

Fuente: (Amin, 2011)

En las modulaciones digitales binarias ASK y FSK, la detección de los bits modulados es coherente, es decir, la fase de la señal recibida y de la señal de referencia son iguales. Sin embargo, en el caso de la modulación M-PSK y M-QAM, la detección puede no ser coherente en algunos símbolos, dependiendo de la disposición de éstos en la constelación. La figura 2.33 presenta tres constelaciones 16-QAM cuya disposición de los símbolos es diferente. En la figura 2.33 a) y c), la detección de los símbolos dispuestos sobre los ejes (coseno y seno) es coherente. Sin embargo, para los demás símbolos de estas constelaciones, la detección es no coherente. Para la constelación de la figura 2.33 b), la detección de todos los símbolos no es coherente.

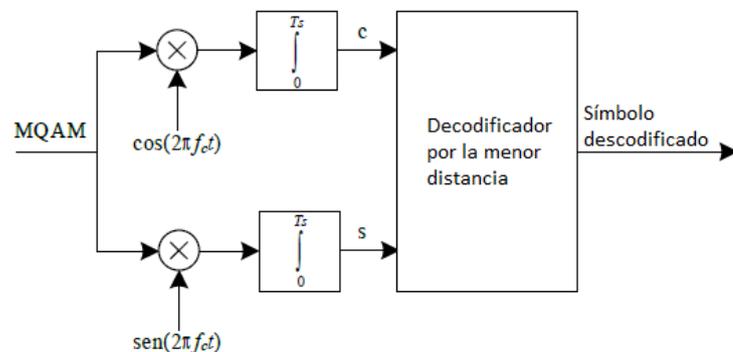


Figura 2. 34: Detección no coherente para las modulaciones M-arias.
Fuente: (Amin, 2011)

La expresión genérica de la señal modulada M-PSK o QAM está dada por:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t) \cos[\phi_i] - A \sin(2\pi f_c t) \sin[\phi_i]$$

Al efectuar la correlación de la señal $s(t)$ por co-seno se obtiene:

$$c = \int_0^{T_s} s(t) \cos(2\pi f t) dt = \frac{A \cos(\phi_i)}{2}$$

Al efectuar la correlación de la señal $s(t)$ por seno se obtiene:

$$s = \int_0^{T_s} s(t) \sin(2\pi f t) dt = \frac{-A \sin(\phi_i)}{2}$$

Los valores de c y de s corresponden a los valores de los componentes en fase y cuadratura de la señal demodulada. La descodificación del símbolo

asociado a estas dos variables es dada por la menor distancia entre el valor obtenido en la recepción y el valor esperado (presente en la constelación). Con base en esta comparación se pueden realizar medidas de rendimiento como el cálculo de la relación señal de ruido SNR, el ángulo de error EVM y, después de obtener la señal binaria el cálculo de la tasa de bits erróneos BER. Recordando, que la modulación de una señal QPSK, presenta en esta sección la detección de la misma señal efectuada a costa de dos correladores como se muestra en la figura 2.35.

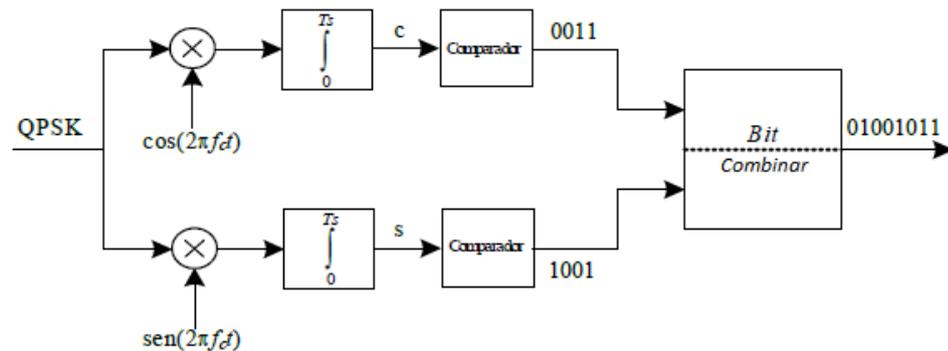


Figura 2. 35: Detector coherente QPSK.
Fuente: (Amin, 2011)

La señal QPSK presente en la entrada del detector está correlacionada con el componente en fase (coseno) y el componente en cuadratura (seno). Los resultados obtenidos en cada rama, c y s son valores decimales que se someten a una comparación. Esta comparación permite desglosar el valor binario asociado. Esta comparación se realiza sobre la base de un valor umbral que permite decidir si el valor binario es cero o uno. Los valores obtenidos en cada rama se combinan alternativamente para recuperar la secuencia binaria original.

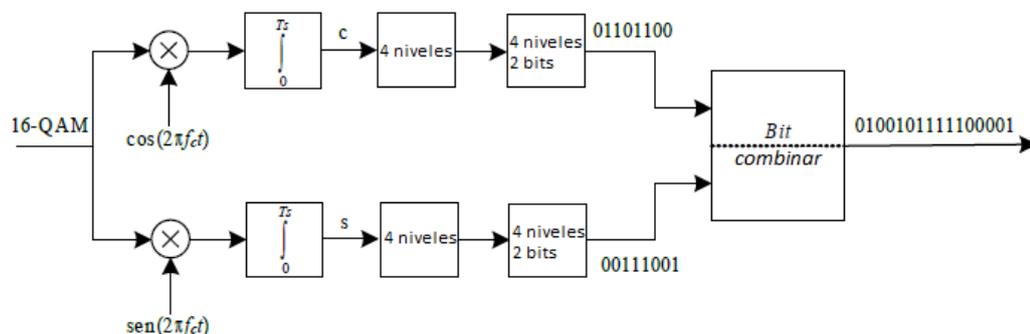


Figura 2. 36: Detector 16-QAM.
Fuente: (Amin, 2011)

En la figura 2.36 se muestra el detector para 16-QAM. Se observa que al igual que el detector QPSK, sólo se necesitan dos ramas para discriminar los componentes en fase y cuadratura. La principal diferencia entre los dos detectores reside en la discriminación de la amplitud (energía) asociada a los respectivos símbolos.

Los moduladores QPSK y 16QAM representados en las secciones 2.2.1 y 2.2.2, así como de los detectores para las mismas modulaciones son casos particulares donde el número de bits que componen cada símbolo es par. Sin embargo, cuando se pretende recurrir a modulaciones como 8-PSK o 32-QAM, el método de implementación es distinto. Para uniformizar un esquema adecuado a todas las modulaciones y demodulaciones, se presentan en las figuras 2.37 y 2.38 los respectivos esquemas.

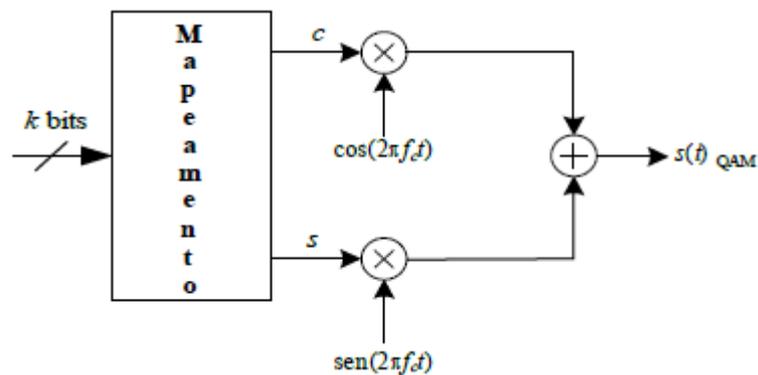


Figura 2. 37: Modulador genérico M-PSK y M-QAM.
Fuente: (Amin, 2011)

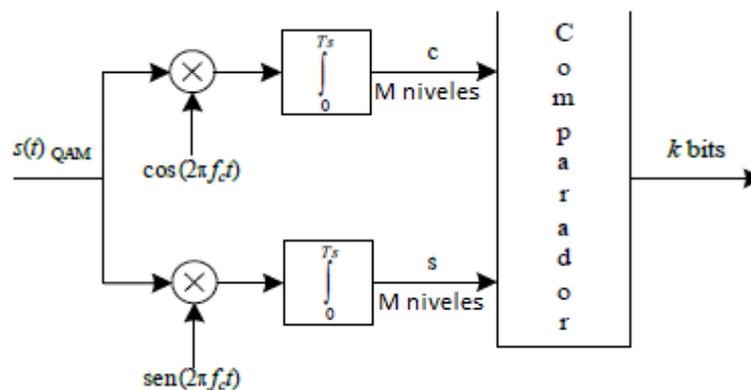


Figura 2. 38: Detector M-PSK y M-QAM.
Fuente: (Amin, 2011)

En la figura 2.37, el bloque de asignación realiza la asignación de los componentes c y s a partir de cada bloque de k bits, de acuerdo con la constelación de la modulación (M-PSK o QAM). En la figura 2.38, el bloque comparador busca el símbolo de la constelación más cercano a las coordenadas de entrada c y s ; el símbolo más cercano (con k bits) se coloca en la salida.

Capítulo 3: Implementación del sistema SDR

3.1. Estructura general del sistema.

Una implementación realista de SDR debería tener algunos equipos, como un convertidor A / D de alta velocidad, un potente procesador de señal. Ese equipo hace que la plataforma sea demasiado cara para que los estudiantes puedan estudiar la comunicación por radio. Para resolver este problema, Matlab se usa en este proyecto y la frecuencia de la señal de radio está limitada en la banda de audio. Cuando se configura el transmisor y el receptor, se utilizan dos sesiones de Matlab; uno funciona como transmisor y el otro como receptor. Todos los trabajos de modulación y demodulación se completan con la programación de Matlab. Cuando utilice este sistema, el usuario solo tiene que elegir el método de modulación y demodulación y los parámetros correspondientes.

Hay dos formas de transmitir la señal; uno está en el aire para simular la comunicación por radio, y el otro está usando un cable. El primero es muy estudiado. La figura 3.1 muestra la estructura básica de este sistema de comunicación por radio.

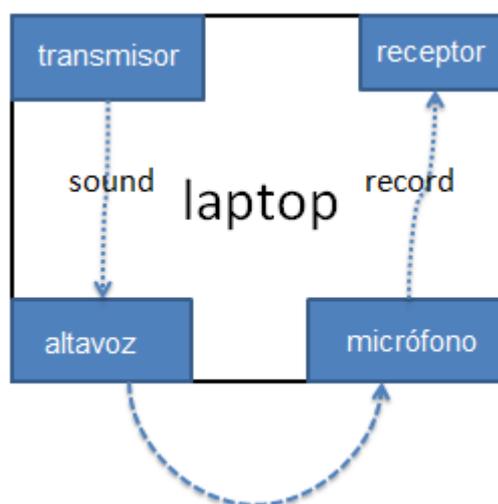


Figura 3. 1: Diagrama de bloques del sistema de comunicación por radio.
Elaborado por: Autor

Mientras que la figura 3.2 se observa una laptop en la misma incorporado con la plataforma de simulación Matlab 2017Rb, ya que este es suficiente para estudiar el proceso de comunicación por radio.

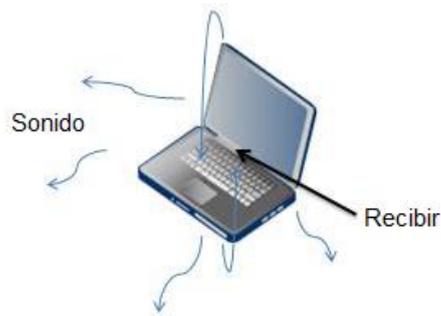


Figura 3. 2: Modelo de sistema de comunicación por radio.
Elaborado por: Autor

La señal es transmitida por cable, y utilizada tanto para el transmisor y receptor. La figura 3.3 muestra la estructura básica de un sistema de comunicación normal simulado por Matlab. Se necesita una tarjeta de sonido adicional para ofrecer interfaces de "entrada" y "salida" de línea. Es decir, que el cable sirve para transmitir la señal. Este sistema funciona muy bien, aunque la tarjeta de sonido puede afectar un poco la señal. Por ejemplo, puede causar mucha atenuación que conduzca al resultado de que el receptor reciba una señal modulada diferente.

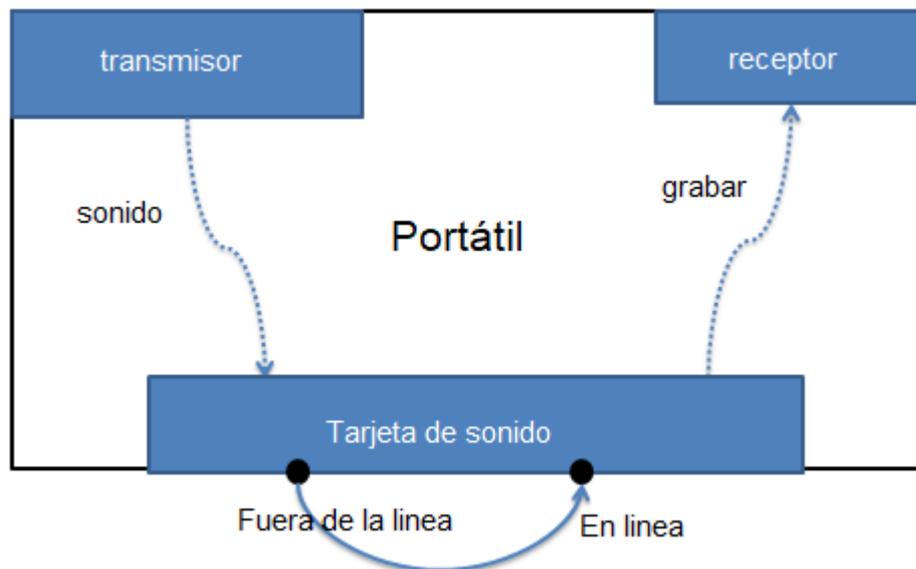


Figura 3. 3: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación normal.
Elaborado por: El Autor

3.2. Implementación del sistema de modulación.

A continuación, se desarrolla en MatLab el script del modulador, que está diseñado para modular cinco tipos de señales, que son: AM, FM, BPSK, QPSK y BFSK. El script 1 explicará los detalles sobre la modulación de AM, las dos

primeras líneas definen la señal de portadora y la señal de modulación. La frecuencia de portadora, f_c y el índice de modulación, m se pueden establecer dinámicamente. Esta función `sound(am, FS)`, se utiliza para hacer que la señal sea sólida, es decir, que la señal se transmite con este método.

```
carrier = 0.5*sin(2*pi*fc*t);
signal = sin(2*pi*fm*t);
am = (1+m*signal).*carrier; % generación de la señal AM
sound(am, FS);
```

Script 1: Modulación AM.

Ahora, para la parte FM, que es similar con AM, pero la ecuación utilizada para generar la señal FM es diferente, tal como se muestra en el script 2. La señal de modulación se pone en la ecuación de modulación directamente y la frecuencia es, f_m . La frecuencia de portadora, f_c y el índice de modulación, m_f se pueden establecerse dinámicamente. También, la función `sound(FM, FS)` es utilizada para la transmisión de señales FM.

```
carrier = VC*sin(2*pi*fc*t);
% generación de la señal FM
FM = VC*sin(2*pi*fc*t+m_f*sin(2*pi*fm*t));
sound(FM, FS);
```

Script 2: Modulación FM.

La señal digital es un poco más compleja que la señal analógica. Es decir, que una secuencia debe generarse en primer lugar como la señal de modulación original. Para la modulación BPSK, simplemente se forma de acuerdo con el diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.4.

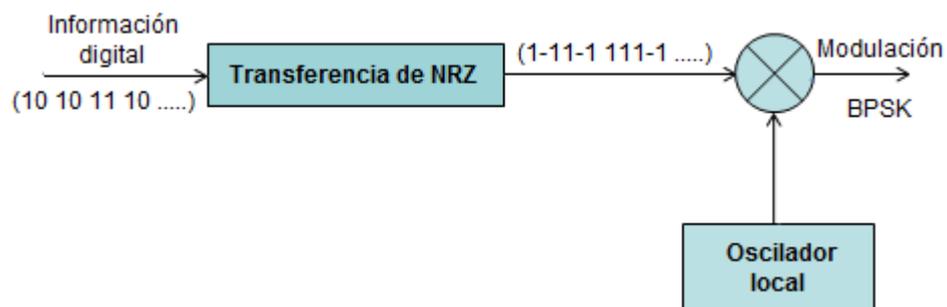


Figura 3. 4: Diagrama de bloques del sistema transmisor BPSK.

Elaborado por: Autor

En este proceso de modulación, la señal unipolar original se cambia a señal bipolar. Después de multiplicar con señal portadora, cuando el bit

original es “1”, la señal modulada es igual a la portadora y la fase es “0”; cuando el bit original es “0”, la señal modulada será, la portadora. De acuerdo con la ecuación $y_2 = \cos(2\pi f_c t + 180^\circ) = -\cos(2\pi f_c t) = -y_1$, está es la señal portadora original con un desfase de 180°. Así, en la señal modulada, la fase “0” presenta el bit de señal “1” y la fase “ π ” presenta el bit de señal “0”.

```

%señal de portadora
carrier=0.2*cos(2*pi*fc*t);
% señal de bits están preestablecidos
bk=[1 1 1 1 0 1 0 1 1 0 0 1];
% duplica la señal para transmitir dos veces de señal
bk2=[bk,bk];
% transferir la secuencia al dominio del tiempo
bkt= kron (bk2,ones(1,fs));
% modifica la señal de unipolar a bipolar,
% lo que significa que el bit '0' pasa a '-1'
bktp= 2*bkt-1;
% generación de la señal BPSK
bpsk=bktp.* carrier;
sound(bpsk, fs);

```

Script 3: Modulación BPSK

Para QPSK, la teoría de modulación básica es similar a la modulación BPSK, pero tiene algunos pasos adicionales, tal como se muestra en la estructura de programación del script 4. La programación de este modulador está diseñada según el sistema de transmisión QPSK que se muestra en la figura 3.5.

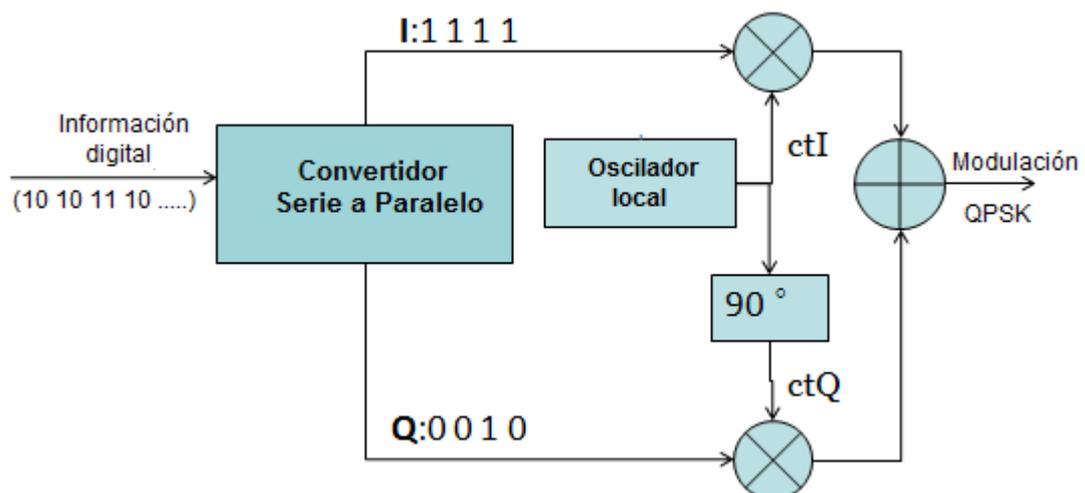


Figura 3. 5: Diagrama de bloques del sistema transmisor QPSK.
Elaborado por: Autor

```

ctI = A0*cos(2*pi*fc*t);
% dos portadoras con fases diferentes
ctQ = A0*cos(2*pi*fc*t + pi/2);
% 1) Generar al azar secuencia binaria bk y duplicarlo
% con el propósito de transmitir la señal dos veces
bk = [1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 ];
bk=[bk,bk];

% 2) Separar bk en bkI y bkQ, luego transferirlos al
% dominio de tiempo respectivamente
bkI = bk(1:2:N);
bkQ = bk(2:2:N);
BKI = 2*(kron(bkI, ones(1,fs)))-1;
BKQ = 2*(kron(bkQ, ones(1,fs)))-1;
% 3) Multiplicar bkI con ctI, y bkQ con ctQ;
% modular dos ramas de acuerdo con la teoría similar
% con BPSK
branch1 = ctI.*BKI;
branch2 = ctQ.*BKQ;
% 4) Añadir los resultados de multiplicar para obtener QPSK
qpsk = branch1 + branch2;
% 5) transmite la señal original 2 veces
sound(qpsk, fs);

```

Script 4: Modulación QPSK

Finalmente, la señal BFSK también se puede producir en este modulador. El proceso de producción de señal BFSK es totalmente diferente de PSK; está diseñado según la figura 3.6. En el script 5, esta parte es modulación BFSK; la frecuencia f_1 y f_2 de las dos portadoras se puede establecer dinámicamente. Existen dos señales de portadora con la misma amplitud y fase, pero con diferente frecuencia; cada uno presenta un estado de señal.

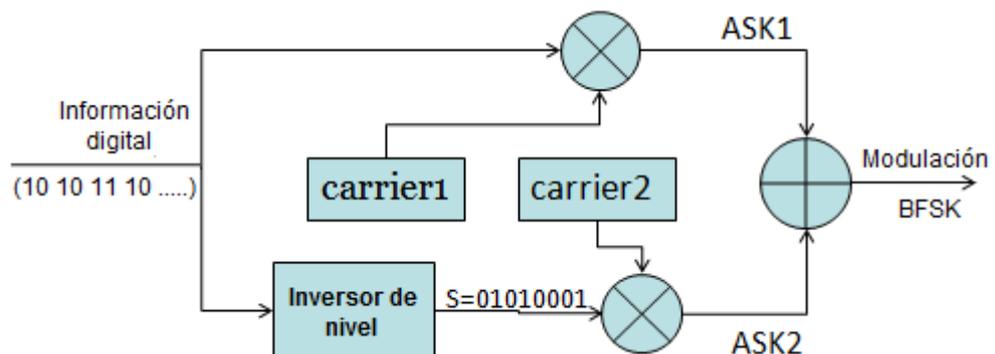


Figura 3. 6: Diagrama de bloques del sistema transmisor BFSK.
Elaborado por: Autor

```

carrier1=cos(2*pi*f1*t);
carrier2=cos(2*pi*f2*t);
% 1) Generar flujo binario aleatorio bk y transferirlos
%    al dominio del tiempo
bk=[1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 0];
bkt= kron (bk,ones(1,FS));
% 2) Genera dos señales ASK. El bit de señal 1 es presentado
%    por la frecuencia de portadora 1, mientras que el bit de
%    señal 0 será presentado por la frecuencia de otra portadora
ASK1=bkt.*carrier1;
ASK2= (-bkt+1).*carrier2;
% 3) Agregar dos señales ASK juntas para conseguir la señal FSK
fsk =ASK1+ASK2;

```

Script 5: Modulación BFSK.

3.3. Implementación del sistema de demodulación.

En correspondencia con el transmisor, el receptor también puede demodular los cinco tipos de señales moduladas. El receptor también está diseñado para que el usuario pueda elegir el método de demodulación y los parámetros correspondientes. En primer lugar, se tiene la señal AM, en el cual se demodula utilizando el método no coherente. De acuerdo con la figura 3.6, deberían diseñarse un rectificador de onda completa y un filtro de paso bajo.



Figura 3. 7: Diagrama de bloques del receptor de AM no coherente.
Elaborado por: Autor

Para el script 6, la primera parte es la demodulación AM que utiliza el método no coherente. La segunda parte, se encarga de diseñar el rectificador de onda completa. Es decir, cuando la señal AM es positiva, ($AM \geq 0$) devuelve 1 y ($AM < 0$) devuelve 0, entonces la señal positiva en sí misma quedará. Cuando la señal AM es negativa, ($AM < 0$) devuelve 1, entonces la señal ($-AM$) quedará. La parte negativa de la señal se convierte en positiva. De esta forma, toda la señal ha sido positiva. Por tanto, se ha realizado la función del rectificador de onda completa requerida. La tercera parte, se diseña un filtro pasa bajo. Es decir, que el primer parámetro define el orden del filtro y el segundo parámetro define la frecuencia con la que la señal puede pasar el filtro. Para el último paso, permite filtrar la salida FWR con el filtro diseñado en la tercera parte.

```

% Parte 1
% construcción del objeto grabador
recAM = audiorecorder (FS,16,1,1);
% empezar a grabar la señal para T (segundos)
recordblocking(recAM,T);
% obtener los datos de la señal desde el objeto de registro
AM=getaudiodata(recAM);
% Parte 2
fwr = AM.*(AM>=0) + (-AM).*(AM<0);
% Parte 3
B = fir1(501, 0.001);
% Parte 4
demod = filter(B, 1, fwr);

```

Script 6: Demodulación AM.

Finalmente, del script 6, se puede ver que es fácil manejar la señal con la programación. La señal se recibe al grabar el sonido, y luego deja que la señal recibida pase el rectificador de onda completa. Finalmente, después del filtro, se obtiene la señal original.

Para la señal de FM, la función de demodulación correspondiente en Matlab se usa para demodularla.

```

% 1. Recibir la señal FM grabada y luego obtener los datos
% de grabación.
recFM = audiorecorder (FS,16,1,1);
recordblocking(recFM,T);
FM=getaudiodata(recFM);
% 2. Llamar la función 'fmdemod()' para demodular la señal
signal= fmdemod(FM,fc,FS,mf*fm);
% 3. Diseño del filtro pasa bajo requerido. Después de la señal
% a través del filtro, la señal original puede demodularse
B = fir1(401, 2*fm/FS); signal2 = filter (B,1,signal);

```

Script 7: Demodulación FM.

Además de los dos métodos de demodulación analógica anteriores, también son necesarios tres métodos de demodulación digital. En la parte digital, se han estudiado métodos coherentes y no coherentes; más detalles están en la siguiente parte.

En primer lugar, es parte de demodulación BPSK. El método coherente se usa para demodular la señal BPSK. Esta es la parte de demodulación para

la señal BPSK; la recuperación de portadora se ha realizado en esta parte. Posteriormente, el código de programación se realiza en tres partes, tal como se indica en el script 8.

```

recBPSK = audiorecorder (FS,16,1,1);
recordblocking(recBPSK,T);
BPSK=getaudiodata(recBPSK);
% 1) Truncar la señal de la fase 0. Encontramos la fuerza máxima
% promedio, luego obtenemos el valor máximo correcto
BPSK2=FZY_smooth(BPSK);
[xr,locr]=findpeaks(BPSK2);
meanp = mean(xr);
[row,column]=find(xr>(meanp));
% Cortar la señal del valor máximo, es decir, la fase 0 de la
% onda cosenoidal
BPSK2=BPSK2(locr(row(1)):end);
%2) recuperar la portadora de la señal truncada BPSK2
% diseñar el filtro pasa alto
B = fir1(822,1.83*fc/(FS/2),'high');
% obtener la 2da potencia de la señal truncada
A=BPSK2.*BPSK2;
% permite que el resultado de potencia pase al filtro pasa alto
hpout=filter(B,1,A);
% obtener la señal de fase 0 para eliminar el retardo del filtro
% pasa alto
[x_loc] = findpeaks(hpout);
ls=loc(50);
hpout2=hpout(ls:end);

% divide la frecuencia para que sea la mitad; la frecuencia de
% la señal portadora debe ser fc, pero la frecuencia de 'hpout'
% es 2fc.
fdout=interp(hpout2,2);
carrier=fdout(1:length(fdout)/2);
%3) Demodular la señal BPSK truncada con la portadora recuperada
% diseñar filtro pasa bajo
BL= fir1(4001,2.5e-4);
% multiplicar la señal recibida con señal de portadora recuperada
y=BPSK2(1:length(carrier)).*carrier;
% permite obtener la señal del filtro pasa bajo
signal=filter(BL,1,y);

```

Script 8: Demodulación BPSK.

La señal de BPSK se demodula en base al proceso descrito en la figura 3.8, pero la parte de recuperación de portadora es un poco diferente de la descripción en la figura 3.9. En primer lugar, la señal recibida BPSK se ha truncado desde la fase 0 para ser una nueva señal BPSK2. La ecuación es:

$$BPSK2(t) = A\cos(2\pi f_c t + k\pi)(k = 0)$$

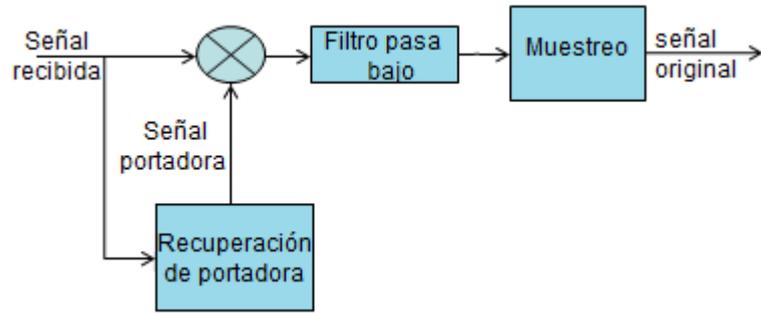


Figura 3. 8: Diagrama de bloques del receptor BPSK.

Elaborado por: Autor



Figura 3. 9: Diagrama de bloques del proceso de recuperación de portadora.

Elaborado por: Autor

Sin embargo, para una señal $r(t) = A\cos(2\pi f_c t + k\pi)$ ($k = 0,1$), sin importar el valor de k sea 1 o 0, la portadora puede recuperarse. No hay problema de φ . Por lo tanto, la señal portadora puede recuperarse del BPSK2 sin cambio de fase. La señal recibida también se puede trincar desde la fase π , y la señal de la portadora aún se puede recuperar mediante el mismo proceso.

Luego, para la señal QPSK, el preámbulo se usa para demodular la señal recibida. La secuencia "1 1 1 1" se envía antes que otros bits de señal de información. De acuerdo con el análisis en la parte de fondo de la tecnología se puede saber que el receptor debe recibir la señal de la fase $\frac{\pi}{4}$. El script 9 es la parte de demodulación de la señal QPSK. Esta es la parte de demodulación para la señal QPSK, y que es el proceso de recuperar la portadora. El preámbulo se usa para completar el proceso de demodulación descrito en la figura 3.10. Los resultados también son muy buenos, y se muestran en la sección 3.5.

```

recQPSK = audiorecorder (FS,16,1,1);
recordblocking(recQPSK,T);
QPSK=getaudiodata(recQPSK);
%1. cortar la señal recibida de la fase esperada
% Encontrar el valor máximo de la señal recibida y luego
% asegurarse cuántos datos se deben cortar para tener fase 0
QPSK2=FZY_smooth(QPSK);
[xr,locr]=findpeaks(QPSK2);
meanp = mean(xr);
[row,colmn]=find(xr>(meanp));
% la fase esperada debe ser pi/4 para los bits 1 1 que deben
% recibirse. Desde la fase esperada para asegurarse cuántos
% datos se deben cortar
phasetime=pi/4/(2*pi)*(1/fc);
shift1=ceil(phasetime*FS);
ls1=locr(row(10));
% primero se corta la señal de la fase 0 para obtener la señal
% QPSK2 y luego cortarla para obtener la señal truncada que
% comienza en la fase esperada
QPSK2=QPSK2(ls1:end);
ls2=ls1+shift1;
% cortar la señal de la fase pi/4
QPSK3=QPSK2(shift1:end);
% 2. definir las dos portadoras con el transmisor
ctI = cos(2*pi*fc*t3);
ctQ = cos(2*pi*fc*t3 + pi/2);

%3. demodular la señal según la figura 3.10
% multiplicar dos portadoras con la señal recibida
aip=QPSK3'.*ctI(1:length(QPSK3));
aqp=QPSK3'.*ctQ(1:length(QPSK3));
% diseñar el filtro pasa bajo
BL=fir1(15000,5e-5);
% dejar que pase la señal del filtro pasa bajo
aIPP=filter(BL,1,aip);
aQPP=filter(BL,1,aqp);
%4. Declaramos la señal, la señal original precisa se puede
% obtener después de la declaración.
aIPPP=aIPP>0; aQPPP=aQPP>0;

```

Script 9: Demodulación QPSK.

Por último, se trata de señal BFSK. El método no coherente se usa para demodular la señal BFSK recibida. La demodulación de la señal BFSK se ha realizado en base al proceso de la figura 3.11. Se puede ver que los filtros y otras funciones requeridas se pueden completar bien con el software.

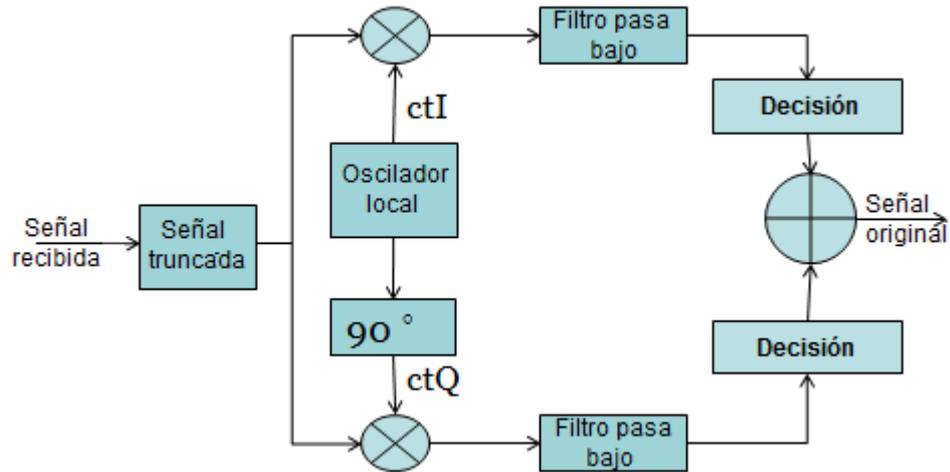


Figura 3. 10: Diagrama de bloques del receptor QPSK.
Elaborado por: Autor

```

recFSK = audiorecorder (FS,16,1,1);
recordblocking(recFSK,T);
FSK=getaudiodata(recFSK);
%1. A través del filtro de paso de banda, en primer lugar,
% se diseñan dos filtros de paso de banda diferentes de
% acuerdo con los valores de frecuencia esperados. BP1
% se utiliza para obtener la señal representada por la
% frecuencia f1. BP2 es para la frecuencia f2
parang=[0.9,1.1];
Wn1=f1*parang/(FS/2);
BP1=fir1(101,Wn1,'bandpass');
Wn2=f2*parang/(FS/2);
BP2=fir1(101,Wn2,'bandpass');
% En segundo lugar, dejar que la señal recibida FSK pase
% los dos filtros de paso de banda, respectivamente.
x1=filter(BP1,1,FSK);
x2=filter(BP2,1,FSK);
%2. Detección de envolvente, Matemáticamente, la
% envolvente e(t) de una señal x(t) se define como la
% magnitud de la señal analítica (señal compleja)/8/.
% En primer lugar, se modifica la señal de real a
% compleja con la función de Hilbert ().
y1=hilbert(x1);
y2=hilbert(x2);
% Basados en la teoría matemática descrita antes que
% los valores absolutos de la señal compleja puedan
% obtenerse con la función abs (). La envolvente de
% la señal recibida se detecta de esta manera.
envy1=abs(y1);
envy2=abs(y2);
%3. Muestra y decide, recibe la señal original de las
% dos señales envolventes
c1=(min(envy1)+max(envy1))/2;

```

```

c2= (min (envy2) +max (envy2))/2;
FSK1=envy1>c1;
FSK2=envy2>c2;
FSKOUT=FSK1>FSK2;

```

Listado 10 demodulación BFSK

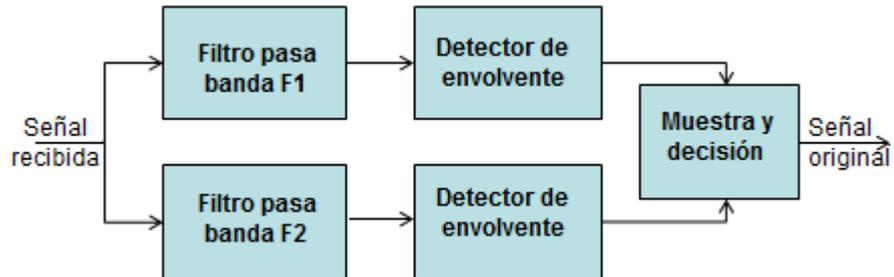


Figura 3. 11: Diagrama de bloques del receptor FSK no coherente.
Elaborado por: Autor

3.4. Análisis de resultados obtenidos.

Dos ventanas aparecen cuando el sistema funciona; uno es el transmisor y el otro el receptor. Fueron diseñados a través de GUIDE de MatLab. Las figuras 3.12 y 3.13 muestran las dos interfaces, en las que se establecen los métodos de modulación y otros parámetros correspondientes. Estos parámetros deben ser iguales en ambas GUI, o el resultado será incorrecto.

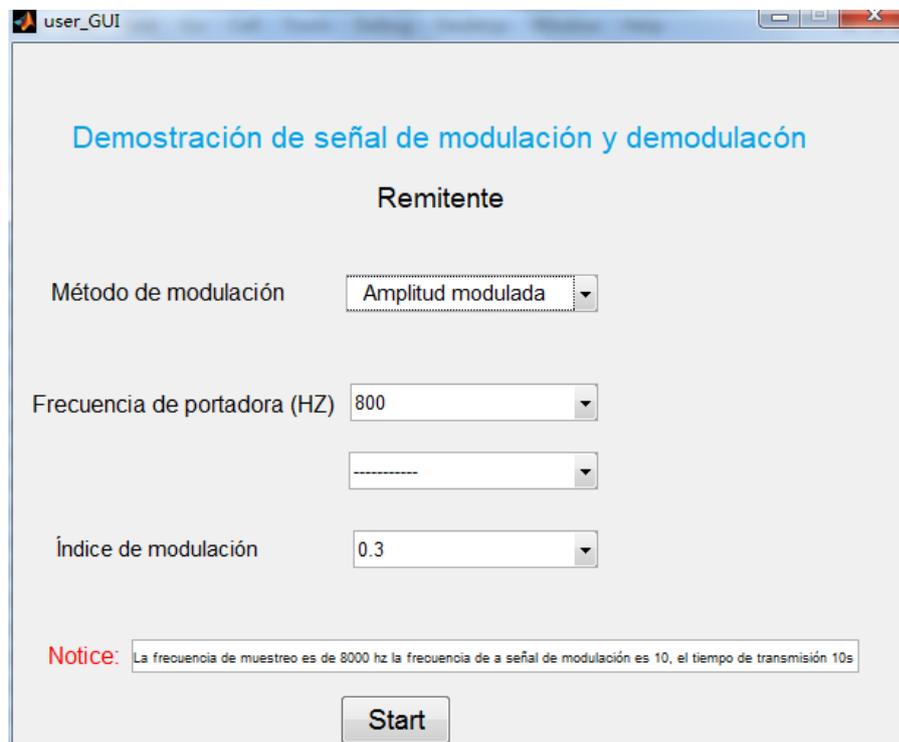


Figura 3. 12: Interface del transmisor.
Elaborado por: Autor

La figura 3.12 muestra un ejemplo de elección de la modulación de amplitud. La frecuencia portadora y el índice de modulación deben elegirse entre los valores disponibles. El aviso muestra otra información para esta modulación. En el receptor, debe establecerse el método de modulación de amplitud y los mismos parámetros.

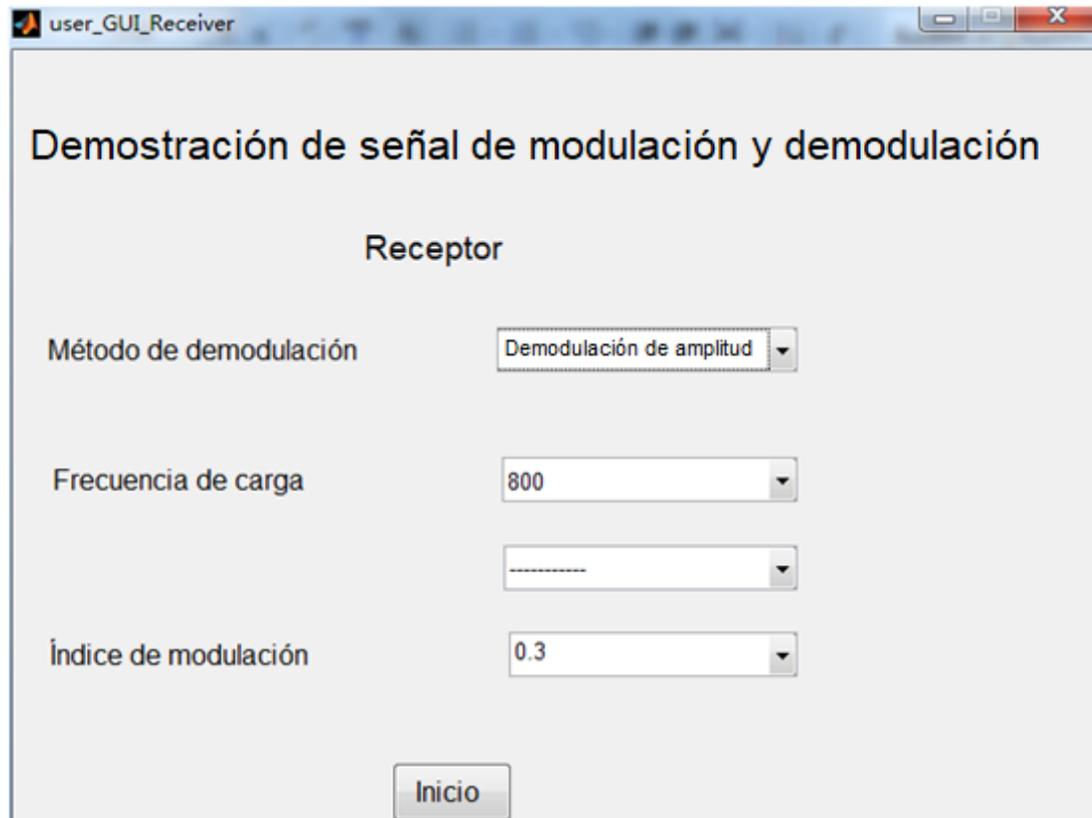


Figura 3. 13: Interface del receptor.
Elaborado por: Autor

La siguiente parte mostrará los resultados de modulación y demodulación para los cinco métodos de modulación escogidos. En primer lugar, se tiene a la señal AM. Las figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18 muestran la las gráficas para 1 kHz, con índice de modulación de 0.5.

La figura 3.14 muestra que la señal necesita ser transmitida. La figura 3.15 muestra la señal modulada en amplitud. Después de transmitir por el aire, la señal AM recibida se muestra en la figura 3.16. La forma de la señal AM aún se puede reconocer, pero tiene una pequeña atenuación. La amplitud ha disminuido mucho, esto se debe a la atenuación del canal de la tarjeta de sonido.

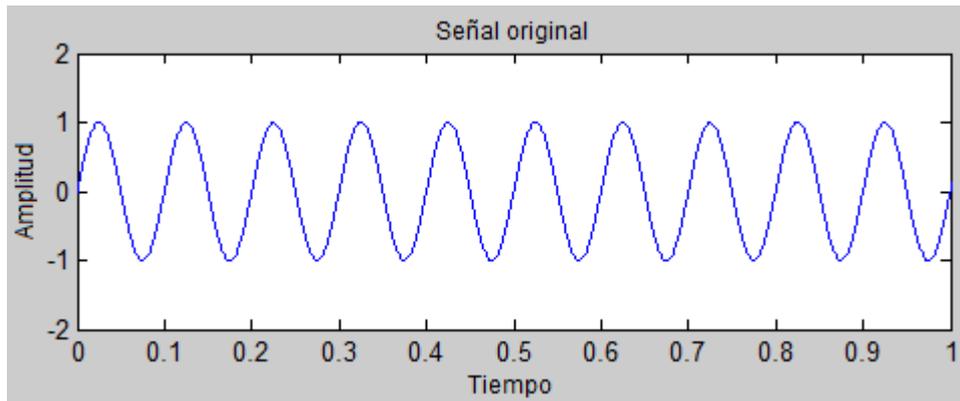


Figura 3. 14: Gráfica de la señal original.
Elaborado por: Autor

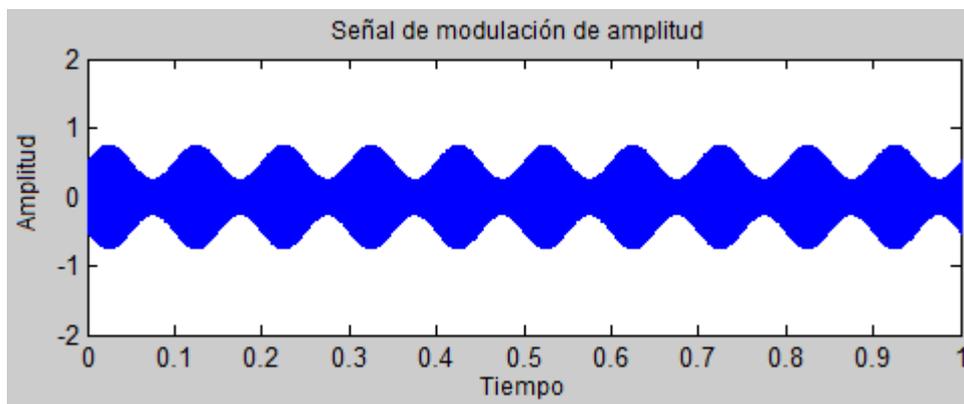


Figura 3. 15: Gráfica de la señal modulada en amplitud (AM).
Elaborado por: Autor

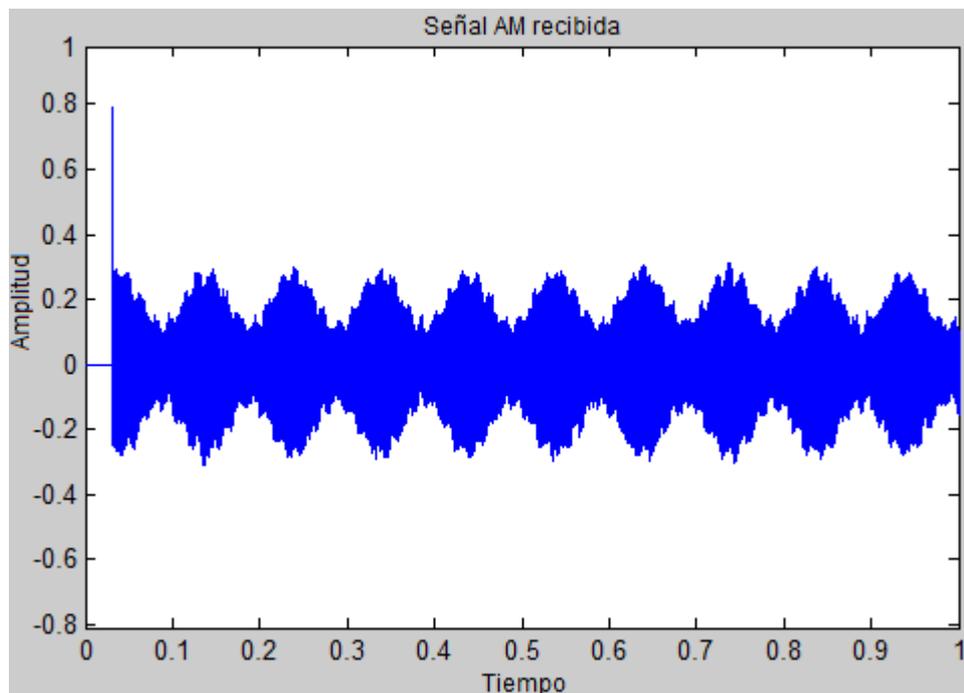


Figura 3. 16: Gráfica de la señal AM recibida.
Elaborado por: Autor

La figura 3.17 muestra la señal después de FWR. Se puede ver claramente que toda la señal ha sido positiva, lo que confirma que el FWR funciona. Finalmente, la figura 3.18 muestra la señal demodulada. Comparando con la figura 3.14, se puede ver que la señal original casi se recupera de la señal AM recibida, pero hay una atenuación de basura y retardo. La atenuación es causada tanto por el canal (aire) como por el filtro; sin embargo, la demora es causada por el filtro.

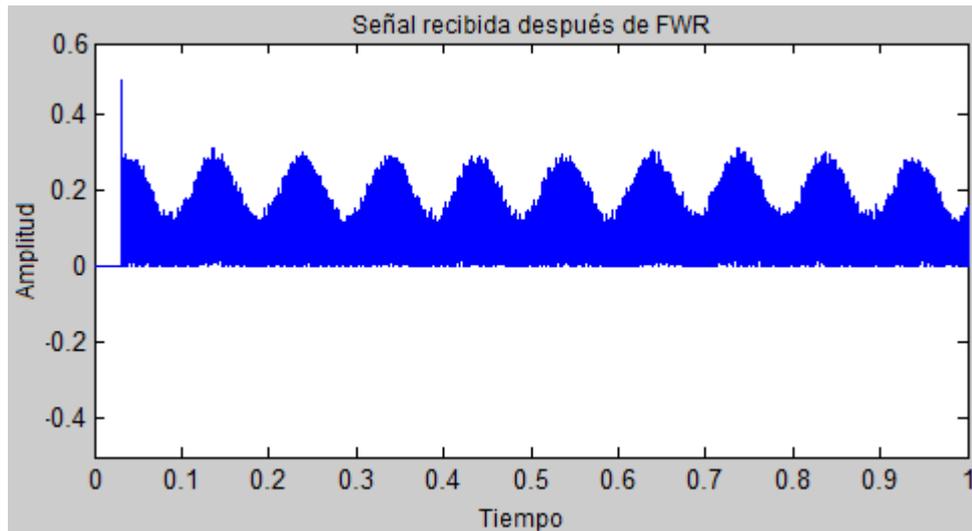


Figura 3. 17: Gráfica de la señal recibida después de FWR.
Elaborado por: Autor

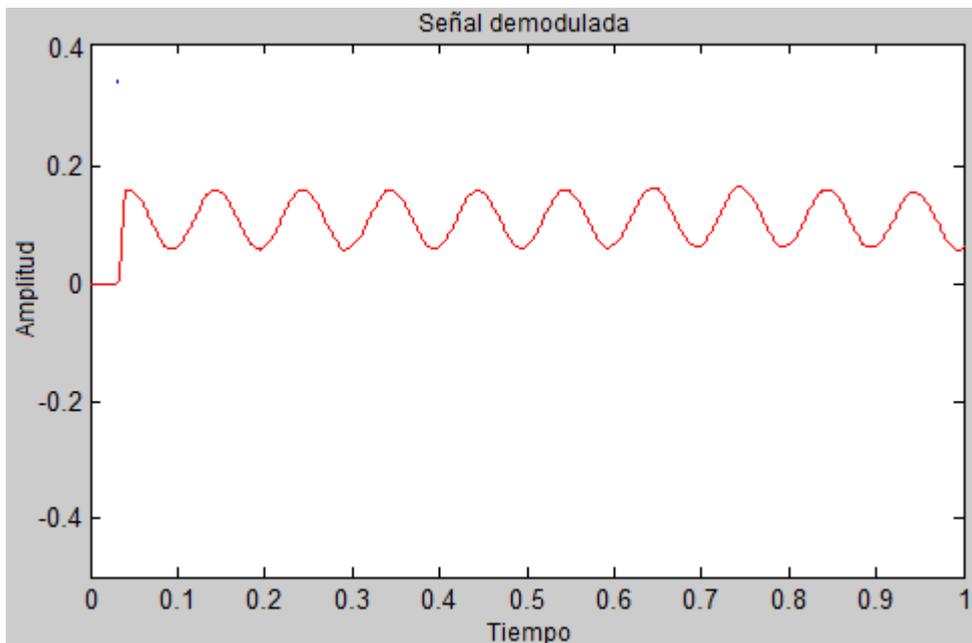


Figura 3. 18: Gráfica de la señal demodulada.
Elaborado por: Autor

En segundo lugar, se tiene la señal FM. La frecuencia de 1500 Hz y el índice de modulación 4 se utilizan para los resultados obtenidos de la modulación en frecuencia. En la figura 3.19, el primer diagrama muestra la señal de portadora. Se puede deducir que la frecuencia de la señal es de 1500 Hz. Luego, el segundo diagrama muestra la señal FM modulada. Es obvio que la frecuencia varía según el tiempo y la variación es regular.

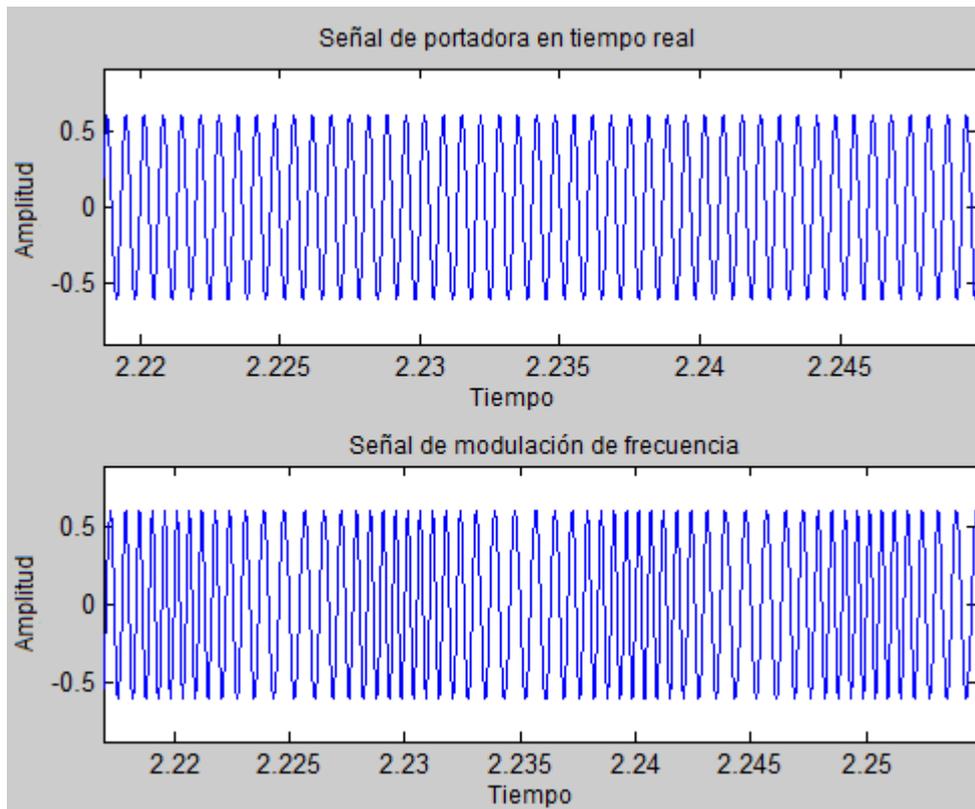


Figura 3. 19: Señal portadora y señal FM modulada.
Elaborado por: Autor

La figura 3.20 muestra la señal de FM recibida. La frecuencia de la señal varía como la señal de FM en la dosis del transmisor, pero la amplitud cambia. Esto no es correcto en una situación normal, pero no tiene ningún efecto en el proceso de demodulación para que la demodulación solo dependa de las variaciones de frecuencia. Sin embargo, es aún mejor eliminar la variación de amplitud en la figura 3.20, pero es difícil en este sistema. Se han intentado muchos métodos para resolver este problema, por ejemplo, ajustar el valor de la frecuencia o el índice de modulación. Esos métodos no funcionan. También se ha intentado reducir la amplitud de la señal de FM transmitida, ya que se supone que tal vez la tarjeta de sonido en la computadora portátil no pueda manejar la intensidad de la señal. Pero todavía falla. Por fin, se encuentra que

tal vez sea por los atributos del parlante y micrófono de la computadora portátil. Hay otros filtros o amplificadores en esos dos equipos que pueden cambiar de sobremanera la señal. Si se instala otra tarjeta de sonido en la computadora portátil, se pueden mejorar los resultados.

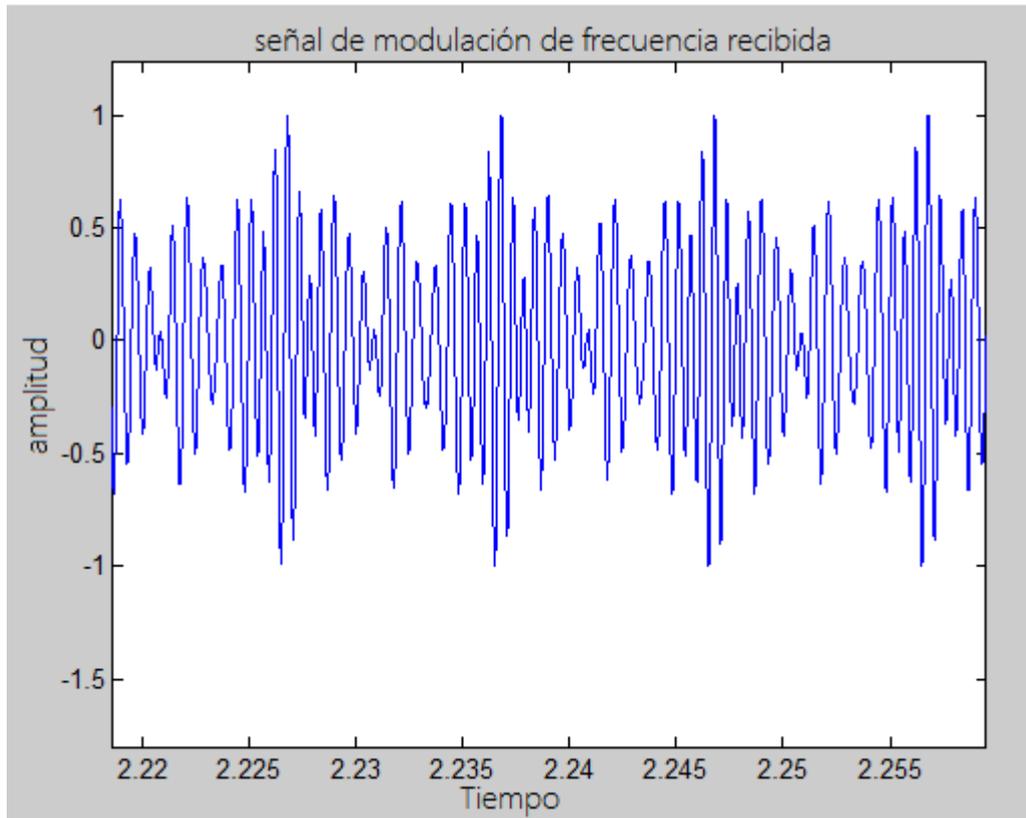


Figura 3. 20: Gráfica de la señal FM recibida.
Elaborado por: Autor

La figura 3.21 muestra la señal modulada; la frecuencia es la esperada. La modulación y demodulación de FM funcionan bien en este sistema.

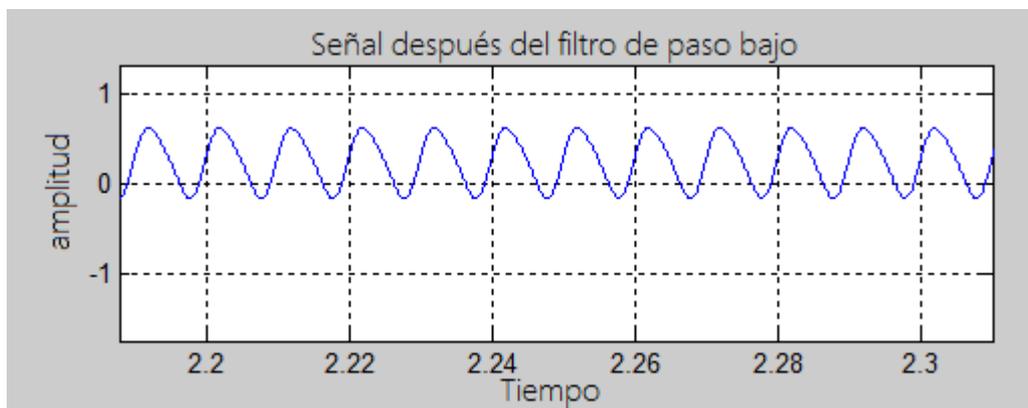


Figura 3. 21: Señal demodulada.
Elaborado por: Autor

En tercer lugar, se prueba la señal BPSK. La frecuencia de las señales de portadora es de 1500 Hz. La figura 3.22 muestra que el bit de señal cambia de 1 a 0 en cuarto de segundo. Luego, en la figura 3.23, se puede ver que la fase de la señal varía a π para representar el bit 0. La frecuencia de la señal es de 1500 Hz como se dijo anteriormente. La figura 3.24 muestra la señal BPSK recibida, aunque hay muchas distorsiones, todavía se puede ver que la fase de la señal ha cambiado a π repentinamente como la señal BPSK transmitida. La variación causa fluctuaciones de amplitud; sin embargo, pasa a un nivel casi normal después de un tiempo.

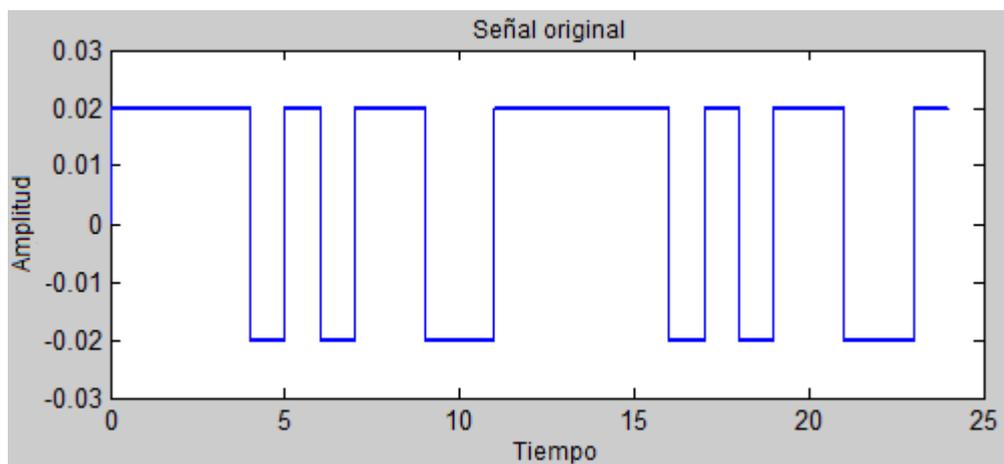


Figura 3. 22: Gráfica de la señal original.
Elaborado por: Autor

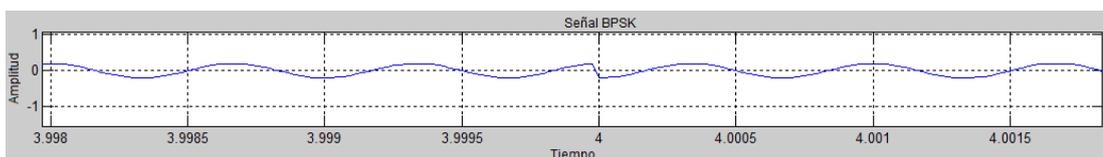


Figura 3. 23: Parte de la señal modulada BPSK.
Elaborado por: Autor

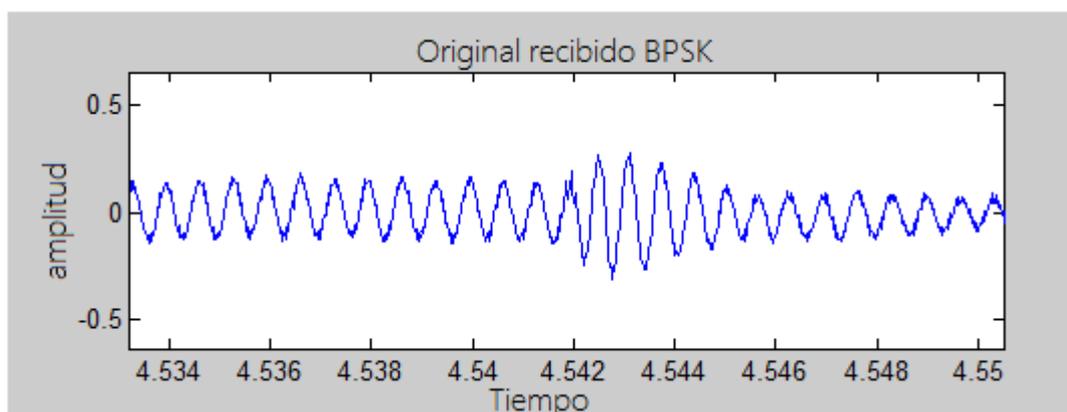


Figura 3. 24: Parte de la señal BPSK recibida.
Elaborado por: Autor

Como se dijo en el capítulo tres, la señal BPSK recibida se trunca para eliminar la fase extra ϕ . La Figura 28 muestra el resultado de truncamiento en el cual la señal comienza desde la fase 0. Para esta señal recibida, la portadora no necesita hacer un cambio de fase.

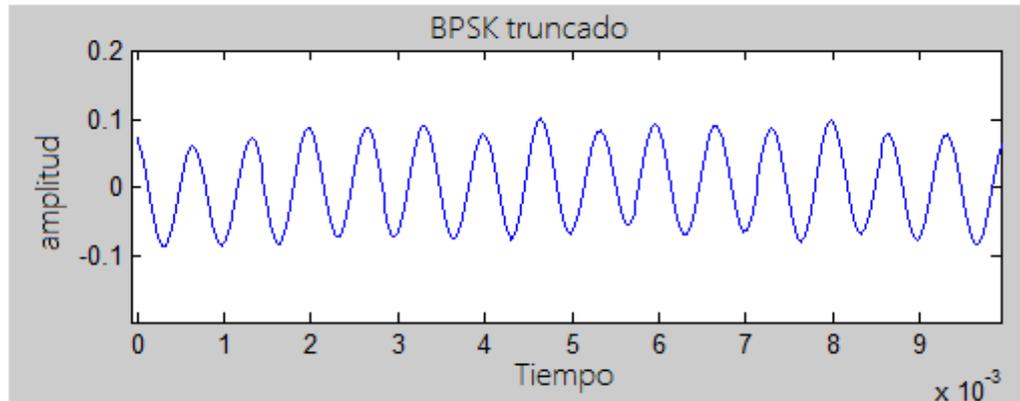


Figura 3. 25: Gráfica de la señal BPSK truncada.
Elaborado por: Autor

La portadora se ha recuperado con éxito, como se muestra en la figura 3.26. El valor de la fase del parámetro clave es 0, que es lo que se espera. El hecho de que la amplitud de la señal portadora recuperada sea menor que la señal BPSK recibida, entonces se realiza el proceso de recuperación de portadora. El procedimiento, es hacer que la potencia de la señal BPSK haga que la amplitud de la señal disminuya mucho.

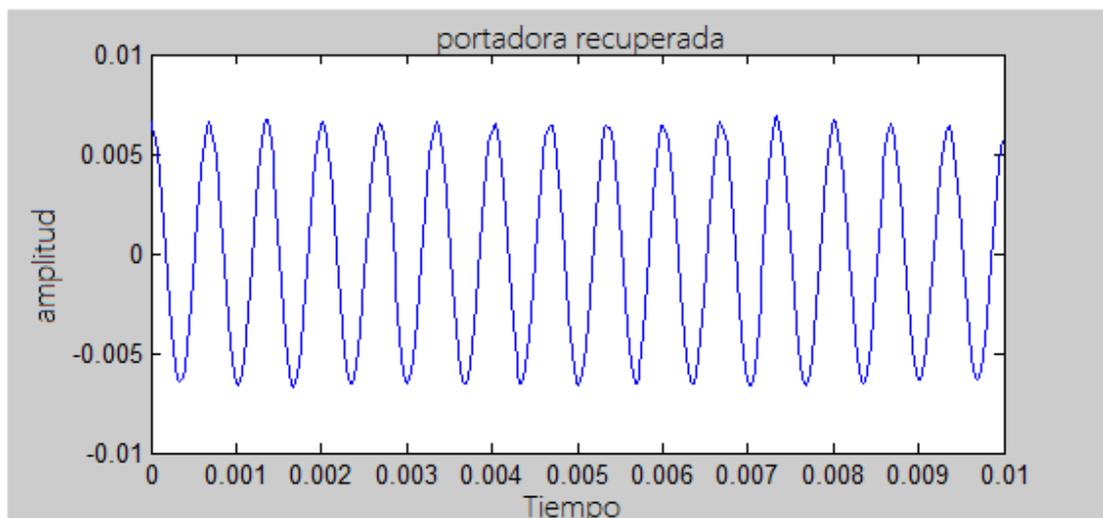


Figura 3. 26: Gráfica de la portadora recuperada.
Elaborado por: Autor

La figura 3.27 muestra el resultado de demodulación. Comparando con la figura 3.22, la señal original ha sido demodulada con éxito desde la señal

recibida. Sin embargo, hay menos bits de señal que el original porque el receptor se inicia más tarde que el transmisor, es decir, que el receptor no recibió los primeros bits.

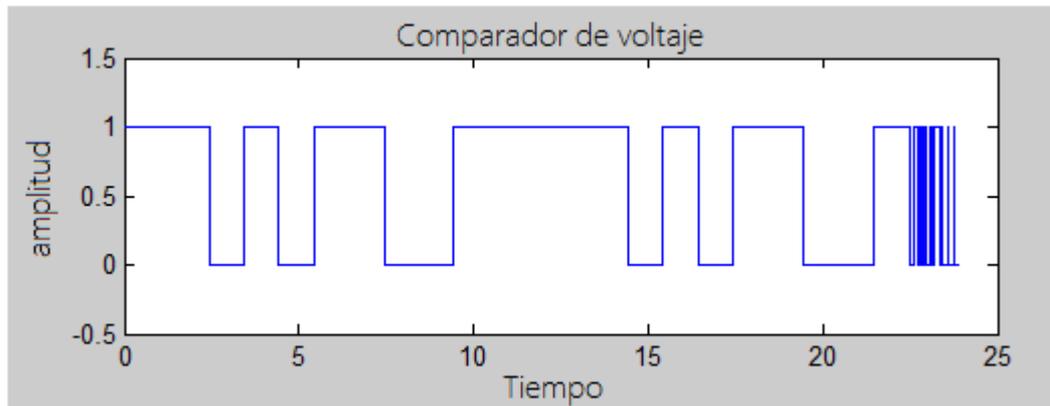


Figura 3. 27: Señal demodulada.
Elaborado por: Autor

En cuarto lugar, se tiene la señal QPSK. La frecuencia de portadora es 1000 Hz en esta simulación. Similar con BPSK, la fase es también el componente clave en QPSK. La figura 3.28 muestra la señal original del sistema. Mientras, que la figura 3.29 se observa que el valor de la fase varía a $5\pi/4$ para representar el bit binario "0 0", que es lo que se espera en la parte de fondo de la tecnología.

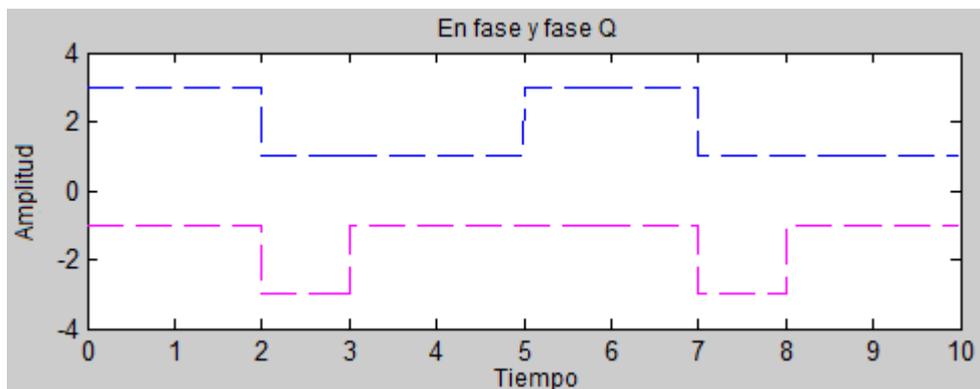


Figura 3. 28: Señal original.
Elaborado por: Autor

La figura 3.31 muestra el resultado de la demodulación. Es casi lo mismo con la información original que se muestra en la figura 3.28. El preámbulo funciona muy bien, pero también hay algún retardo que hace que la señal demodulada tenga menos señales que la señal original.

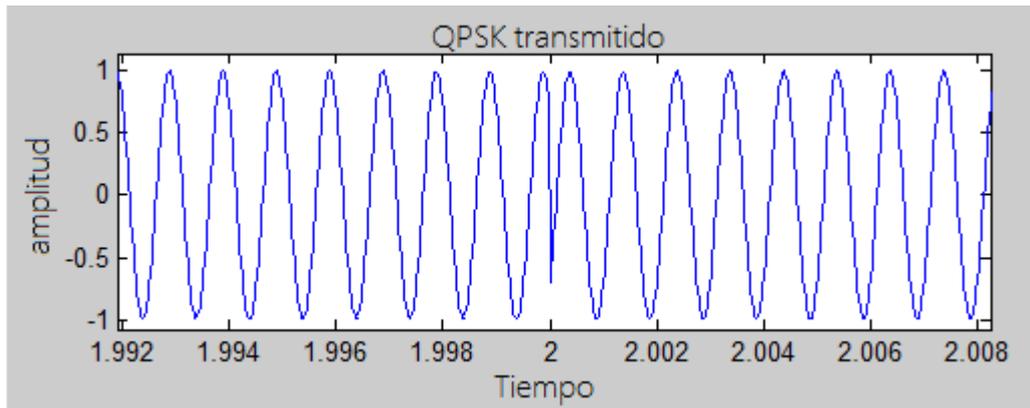


Figura 3. 29: Parte de la señal QPSK recibida.
Elaborado por: Autor

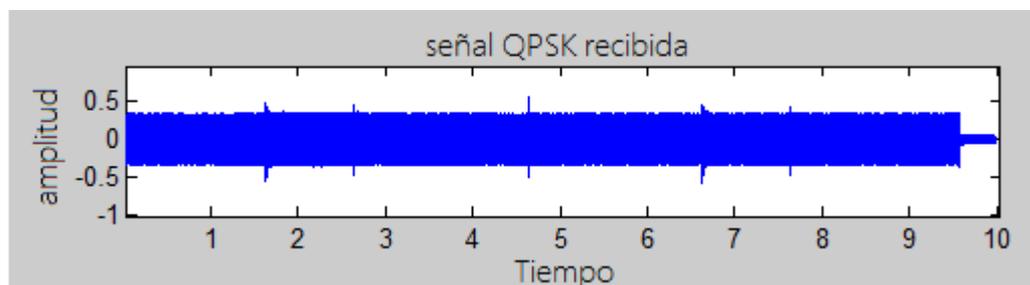


Figura 3. 30: Gráfica de la señal QPSK recibida.
Elaborado por: Autor

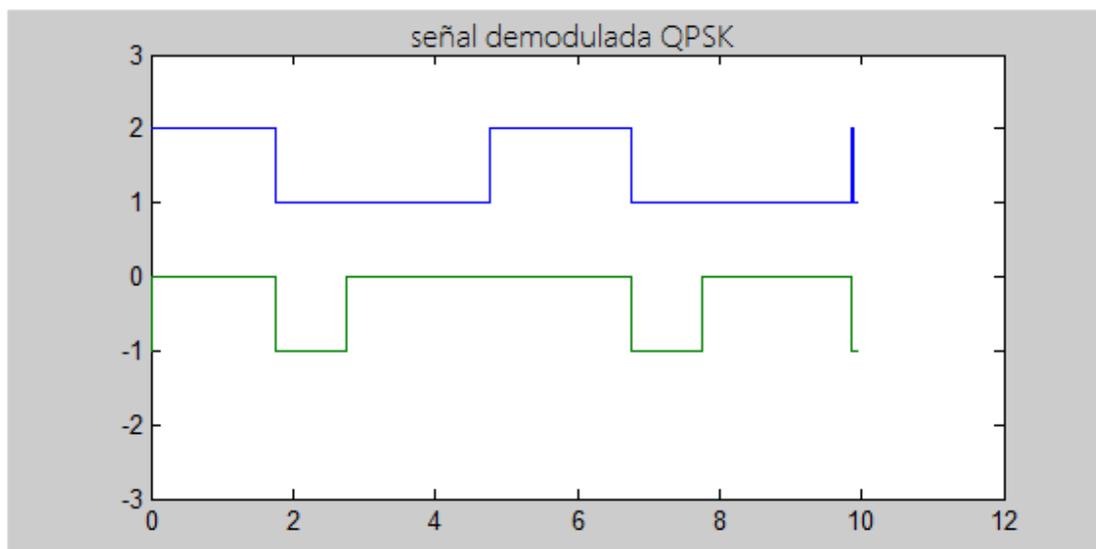


Figura 3. 31: Gráfica de la señal demodulada QPSK.
Elaborado por: Autor

Por último, se trata de señal BFSK; dos portadoras son necesarias para hacer eso. Las dos frecuencias, 3500 Hz y 1000 Hz, se utilizan para realizar la demostración. La figura 3.32 muestra la gráfica de la señal original.

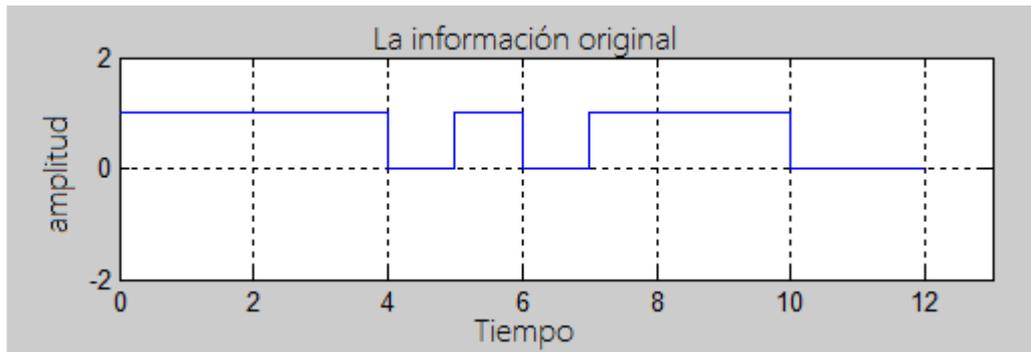


Figura 3. 32: Información original.
Elaborado por: Autor

La figura 3.33 muestra que cuando el bit de señal cambia de 1 a 0, la frecuencia de la señal varía a un valor inferior, obviamente es la variación de frecuencia. Mientras, que la figura 3.34 muestra la señal BFSK recibida. Tiene una gran diferencia con la señal BFSK transmitida. El valor de la amplitud varía según la frecuencia; es decir, que la señal con una frecuencia más baja tiene una amplitud más baja.

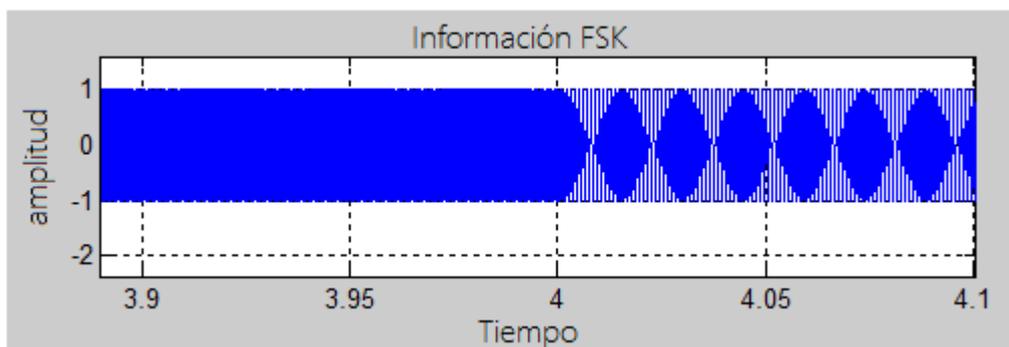


Figura 3. 33: Parte de la señal BFSK.
Elaborado por: Autor

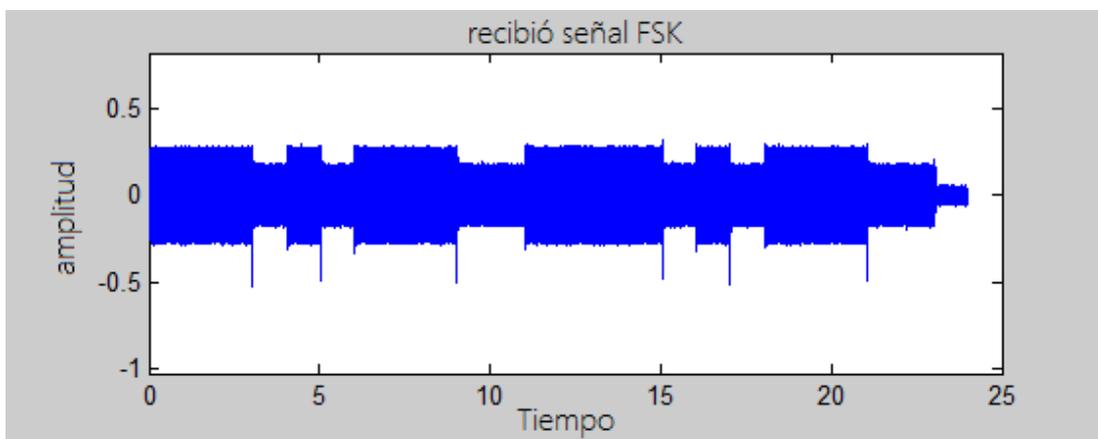


Figura 3. 34: Gráfica de la señal BFSK recibida.
Elaborado por: Autor

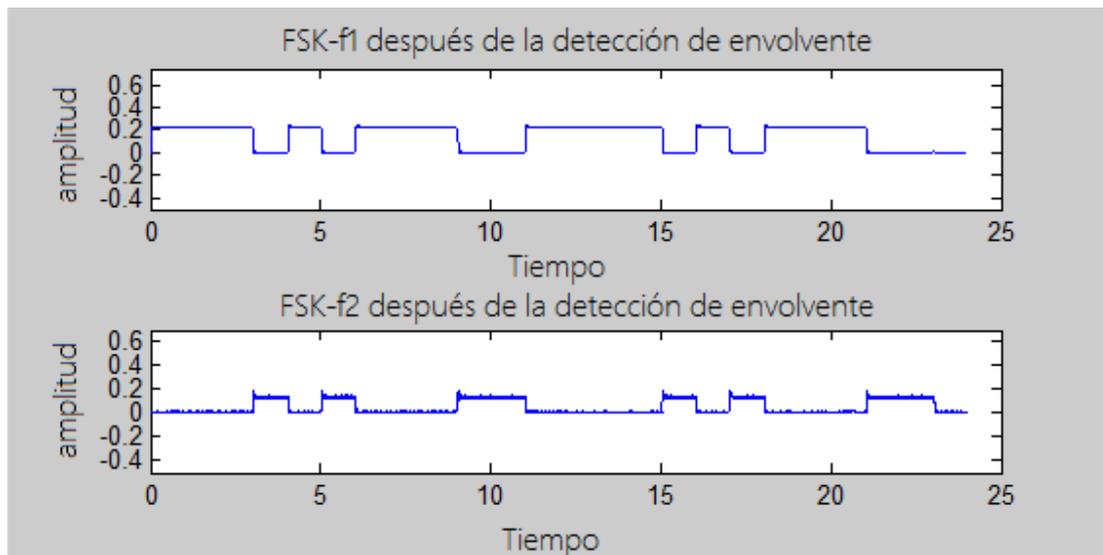


Figura 3. 35: Señal después de la detección de envoltura.
Elaborado por: Autor

Similar con el método de modulación FM, este fenómeno tiene poco efecto sobre la demodulación, pero no debería aparecer en el sistema normal. Esto también debe ser causado por los filtros internos o amplificadores en el altavoz del portátil y el micrófono. La figura 3.36 muestra el resultado de la señal BFSK demodulada. Los bits de señal originales se han obtenido, excepto los primeros varios bits.

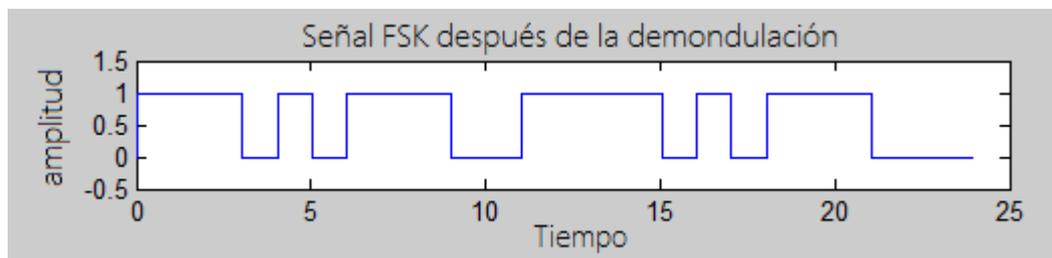


Figura 3. 36: Gráfica de la señal FSK demodulada.
Elaborado por: El Autor

Conclusiones

1. De acuerdo con los resultados obtenidos, el sistema funciona correctamente. En este sistema se han estudiado cinco métodos de modulación en total, dos métodos de modulación analógica y tres digitales. A partir de este proyecto, se puede saber que el método de modulación de fase es más difícil que el método de modulación de frecuencia para que el receptor tenga que conocer la fase que debe recibir. Mientras está en el receptor, el método de demodulación no coherente generalmente se usa para que no le importe cuál es la señal portadora adecuada. Y la demodulación no coherente también es más fácil de implementar con los circuitos.
2. A través del proceso de construcción de este sistema, los métodos de modulación pueden estudiarse más que la clase en la que solo se conoce la parte de la teoría. Lo que, es más, el equipo es simple y sencillo para realizar esta práctica, solo una computadora portátil instalada con MatLab R2017a es suficiente. Por lo tanto, este sistema es adecuado para que los estudiantes estudien radiocomunicación por sí mismos. También, se puede utilizar en un laboratorio para que los estudiantes mejoren la comprensión del concepto de modulación y demodulación.

Recomendaciones

1. Para un estudio posterior en este sistema, se pueden agregar otros métodos de modulación en este sistema. Además de los métodos de modulación, se pueden mejorar muchos otros aspectos. Por ejemplo, para agregar un preámbulo en la señal del transmisor y luego el receptor puede modificarse para verificar primero el preámbulo. Si el preámbulo es correcto, sigue recibiendo la señal o puede rechazar la transmisión.
2. También se puede agregar una suma de comprobación en el receptor para verificar si la señal es correcta.

Bibliografía

- Amin, A. (2011). Computation of Bit-Error Rate of Coherent and Non-Coherent Detection M-Ary PSK With Gray Code in BFWA Systems. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 3(1), 118–126. <https://doi.org/10.4156/ijact.vol3.issue1.13>
- AtlantaRF. (2018). Link Budget Analysis: Digital Modulation, Part 1. Recuperado el 5 de mayo de 2018, de www.atlantarf.com/ASK_Modulation.php
- Baldini, G., Sturman, T., Dalode, A., Kropp, A., & Sacchi, C. (2014). An emergency communication system based on software-defined radio. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014(1). <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2014-169>
- Enagi, B. M., & Ahmed, A. (2014). Implementation of amplitude modulated software defined radio. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(7), 409–412.
- Farrell, R., Sanchez, M., & Corley, G. (2009). Software-Defined Radio Demonstrators: An Example and Future Trends. *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, 2009, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2009/547650>
- Iancu, D., Glossner, J., Nacer, G., Stanley, S., Kolashnikov, V., & Hoane, J. (2015). Software defined radio platform with wideband tunable front end. *International Journal of Engineering & Technology*, 4(1), 97. <https://doi.org/10.14419/ijet.v4i1.4160>
- Islam, M., Hannan, M. A., Samad, S. A., & Hussain, A. (2009). Modulation technique for software defined radio application. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3), 1780–1785.

- Jin, M., & Pu, Y. (2013). Sound Card Based ASK Communication System for Teaching Communication Principle Course. *Communications and Network*, 5(1), 78–80. <https://doi.org/10.4236/cn.2013.51B018>
- Kulkarni, V., Arya, P. N., & Gaikar, P. V. (2011). A Multilevel NRZ Line Coding Technique (pp. 17–22). Presentado en International Conference on Technology Systems and Management (ICTSM), *International Journal of Computer Applications (IJCA)*.
- Meluk Orozco, F. (2012). Digital System for Serial FSK Modulated Data Reception. *International Journal of Embedded Systems and Applications*, 2(3), 11–21. <https://doi.org/10.5121/ijesa.2012.2302>
- Odianonsen Omijeh, B. (2015). Modeling and Simulation of Phase Noise Effect on 256-QAM. *International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*, 3(6), 72. <https://doi.org/10.11648/j.wcmc.20150306.13>
- Pataca, D. M., Oliveira, J. C. R. F., Juriollo, A. A., Herbster, A. F., & Rocha, M. de L. (2011). Transmission of a 20 Gb/s NRZ OOK signal throughout a 390 km fiber link and a cascade of 11 x 50 GHz filters and 9 x EDFAs. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 10(1), 143–154. <https://doi.org/10.1590/S2179-10742011000100015>
- Patil, H. N., & Ohatkar, S. N. (2014). Modulation Techniques for Software Defined Radio. *International Journal Of Scientific Research And Education*, 2(9), 1949–1957.
- SDR Forum. (2018). Introduction to SDR - Wireless Innovation Forum. Recuperado el 10 de mayo de 2018, de http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-01-P-0006-V2_0_0_BaseStation_Systems.pdf)

Sharma, A., Majumdar, S., Naugarhiya, A., Acharya, B., Majumder, S., & Verma, S. (2017). VERILOG based simulation of ASK, FSK, PSK, QPSK digital modulation techniques (pp. 403–408). IEEE. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC.2017.8058380>

Sharma, N., & Yadav, Y. (2012). Simulation of Digital Modulation Techniques Using MATLAB. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering*, 1(10), 72–76.

Thuneibat, S. (2016). Development of MATLAB Code for m-ary PSK Constellation Diagram. *International Organization of Scientific Research Journal of Engineering*, 6(7), 22–25.

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Vacacela Morales, Jaime Angel** con C.C: 0916675127 autor del trabajo de titulación: Implementación de un sistema SDR para modulación analógica y digital de señales AM, FM y M-PSK utilizando MatLab, previo a la obtención del título de **Magister 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, 9 de agosto del 2018

f. _____

Nombre: **Vacacela Morales, Jaime Angel**

C.C: 0916675127

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Implementación de un sistema SDR para modulación analógica y digital de señales AM, FM y M-PSK utilizando MatLab	
AUTOR(ES)	Ing. Vacacela Morales, Jaime Angel	
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	MSc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; MSc. Zamora Cedeño, Néstor / MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Sistema de Posgrado	
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones	
TITULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	9 de agosto del 2018	No. DE PÁGINAS: 78
ÁREAS TEMÁTICAS:	Fundamentos de comunicaciones, Comunicaciones Inalámbricas, Instrumentación Virtual	
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	COMUNICACIONES, MODULACIÓN, FASE, FRECUENCIA, AMPLITUD, SDR	
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):		
<p>El trabajo de grado consiste en implementar un sistema SDR para modulación analógico y digital de señales AM, FM, BPSK, QPSK y como valor agregado BFSK utilizando la plataforma de simulación MatLab y GUIDE. En la primera parte, se realiza la introducción del sistema de radio definido por software (SDR), así como trabajos relacionados con el uso de herramientas de simulación en la parte de antecedentes del trabajo de titulación. También, se define el problema, y los objetivos de la investigación. En la segunda parte, se realiza la descripción fundamental de las modulaciones digitales con sus respectivas características y funcionalidades. En la tercera parte, que es la más importante del trabajo, se realizó el diseño de una interfaz gráfica de usuario (GUIDE) y de los códigos de programación tanto para la modulación y demodulación análoga y digital utilizando MatLab. También, se evaluaron los resultados obtenidos del sistema SDR, cuyos resultados fueron aceptables y cumplieron las normativas de las comunicaciones inalámbricas.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0992848519	E-mail: jvacacela@gmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz	
	Teléfono: 0994606932	
	E-mail: mromeropaz@yahoo.com	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		