



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

**CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES CON MENCIÓN
EN GESTIÓN EMPRESARIAL**

TEMA:

**APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA MODULACIÓN DIGITAL A TRAVÉS DE
MATLAB EN LA ASIGNATURA DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE
SEÑALES**

**Previa la obtención del Título
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

ELABORADO POR:

Adrián Alfonso Sig-Tú Toral

Guayaquil, 9 de Mayo del 2014



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

**CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES CON MENCIÓN
EN GESTIÓN EMPRESARIAL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el **Sr. Adrián Alfonso Sig-Tú Toral** como requerimiento parcial para la obtención del título de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL.

Guayaquil, 9 de Mayo del 2014

DIRECTOR

MSc. Celso Bayardo Bohórquez Escobar

REVISADO POR

MSC. Edwin Palacios Meléndez

MsC. Luis Pinzón Barriga

MSC. Armando Heras Sánchez

Director de Carrera



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

**CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES CON MENCIÓN
EN GESTIÓN EMPRESARIAL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

ADRIÁN ALFONSO SIG-TU TORAL

DECLARÓ QUE:

El proyecto de tesis denominado “**Aplicaciones prácticas de la Modulación Digital a través de MatLab en la asignatura de Procesamiento Digital de Señales**” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Guayaquil, 9 de Mayo del 2014

EL AUTOR

ADRIÁN ALFONSO SIG-TÚ TORAL



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

**CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES CON MENCIÓN
EN GESTIÓN EMPRESARIAL**

AUTORIZACIÓN

Yo, ADRIÁN ALFONSO SIG-TÚ TORAL

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del proyecto titulado: “**Aplicaciones prácticas de la Modulación Digital a través de MatLab en la asignatura de Procesamiento Digital de Señales**”, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, 9 de Mayo del 2014

EL AUTOR

ADRIÁN ALFONSO SIG-TÚ TORAL

DEDICATORIA

Ésta tesis se la dedico totalmente a mi Madre, por estar siempre en los momentos importantes de mi vida, por apoyarme incondicionalmente, por ser el ejemplo para salir adelante y por los consejos que han sido de gran ayuda para mi vida y crecimiento. Esta tesis es el resultado de lo que me has enseñado en la vida, ya que siempre has sido una persona honesta, entregada a tu trabajo, y una gran líder, pero más que todo eso, una gran persona que siempre ha podido salir adelante y ser triunfadora. Es por ello que hoy te dedico este trabajo de tesis. Gracias por confiar en mí y darme la oportunidad de culminar con éxito esta etapa de mi vida.

EL AUTOR

ADRIÁN ALFONSO SIG-TÚ TORAL

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, porque en sus aulas, recibimos el conocimiento intelectual y humano de cada uno de los docentes de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo.

A mi madre, por su infinito esfuerzo y sacrificio para brindarme todo el amor, la comprensión, el apoyo incondicional y la confianza en cada momento de mi vida y sobre todo en mis estudios universitarios.

Agradezco a todas las personas que de una u otra forma estuvieron conmigo, porque cada una aportó con un granito de arena; y es por ello que a todos y cada uno de ustedes les dedico todo el esfuerzo, sacrificio y tiempo que entregué a esta tesis.

EL AUTOR

ADRIÁN ALFONSO SIG-TÚ TORAL

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES.	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.	2
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	3
1.5. OBJETIVOS	3
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.	4
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	4
1.6. HIPÓTESIS.	4
1.7. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.	4
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA MODULACIÓN DIGITAL.	6
2.1. INTRODUCCIÓN A MODULACIÓN DIGITAL.	6
2.2. ¿POR QUÉ MODULACIÓN DIGITAL?	9
2.3. SIMPLICIDAD Y ANCHO DE BANDA.	9
2.4. TENDENCIAS INDUSTRIALES.	10
2.5. USO DE LA MODULACIÓN EN FASE (I) Y CUADRATURA (Q) EN LA TRANSMISIÓN DE LA INFORMACIÓN.	11
2.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES QUE PUEDEN MODIFICARSE.	11
2.6. MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA (FSK).	13
2.6.1. SEÑAL BINARIA FSK Y MODULADOR.	14
2.6.2. DENSIDAD DE POTENCIA ESPECTRAL.	19
2.6.3. SEÑAL MFSK Y DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA.	19
2.7. MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE (PSK).	21
2.7.1. SEÑAL BINARIA PSK.	21

2.7.2. DIFERENCIAL BPSK.	24
2.7.3. M-ARIA PSK.	26
2.7.4. CUADRATURA PSK.	30
<i>CAPÍTULO 3: PLATAFORMA SIMULINK.</i>	32
3.1. SIMULINK Y SU RELACIÓN CON MATLAB.	32
3.2. MODELADO DE UN CIRCUITO ELÉCTRICO.	32
3.3. MODELADO DE RETENCIÓN DE ORDEN CERO Y PRIMER ORDEN O COMO RECONSTRUCTOR.	37
<i>CAPÍTULO 4: SIMULACIONES DE MODULACIÓN DIGITAL.</i>	40
4.1. SIMULACIÓN DE UN CANAL MEDIANTE MODULACIÓN BPSK.	40
4.2. SIMULACIÓN DE UN CANAL MEDIANTE MODULACIÓN M-PSK.	41
4.3. SIMULACIÓN DE UN CANAL MEDIANTE MODULACIÓN FSK.	43
<i>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	45
5.1. CONCLUSIONES.	45
5.2. RECOMENDACIONES.	46
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama de árbol de la modulación digital.	8
Figura 2. 2: Compensación fundamental de los Sistemas de Comunicación... ..	10
Figura 2. 3: Compensación fundamental de los Sistemas de Comunicación... ..	11
Figura 2. 4: Transmisión de información Analógica o Digital.....	12
Figura 2. 5: Modificación de señales características AM y FM.....	13
Figura 2. 6: Modulador FSK No coherente.....	14
Figura 2. 7: Modulador FSK coherente.	15
Figura 2. 8: Señal FSK coherente o FSK de Sunde.....	18
Figura 2. 9: Señal FSK con fases discontinuas.....	18
Figura 2. 10: Constelación de Señal FSK.	23
Figura 2. 11: Diagrama de bloques del modulador BFSK.	23
Figura 2. 12: Señal BFSK.....	23
Figura 2. 13: Formas de señal BFSK.	24
Figura 2. 14: Diagrama de bloques del modulador DEBPSK.	24
Figura 2. 15: Diagrama de bloques del demodulador DEBPSK.	25
Figura 2. 16: Constelación 8-PSK mediante código Gray.	28
Figura 2. 17: Diagrama de bloques del modulador MPSK.	29

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Circuito RLC en serie.	32
Figura 3. 2: Programación en MATLAB de la respuesta del circuito RLC.	33
Figura 3. 3: Modelado en Simulink del Circuito RLC.	34
Figura 3. 4: Gráfica V vs t del circuito RLC.....	34
Figura 3. 5: Modelado en Simulink mediante el bloque <i>State-Space</i>	35
Figura 3. 6: Gráfica similar a la figura 3.4.....	35
Figura 3. 7: Modelado del sub-sistema para el circuito RLC	36
Figura 3. 8: Señal del salida de V_{ct}	36
Figura 3. 9: Modelado del Filtro Digital de Orden Cero.	37
Figura 3. 10: Señal de salida del filtro digital Zero-Hol.	37

Figura 3. 11: Modelado del Filtro Digital de 3er Orden.....	38
Figura 3. 12: Señal de salida del filtro digital de 3er orden.....	38
Figura 3. 13: Modelado de un registro Flip-Flop.....	39
Figura 3. 14: Señal de salida del registro Flip-Flop.	39

Capítulo 4:

Figura 4. 1: Simulación de modulación BPSK en Simulink.	40
Figura 4. 2: Señales de “Scope” del modulador BPSK.....	41
Figura 4. 3: Simulación de modulación M-PSK en Simulink.....	42
Figura 4. 4: Señales de “Scope” del modulador M-PSK.....	42
Figura 4. 5: Simulación de modulación FSK en Simulink.	44
Figura 4. 6: Señales de “Scope” del modulador FSK.	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1: Abreviaciones de esquemas de modulaciones digitales.	7
-----------------------------------------------------------------------	---

RESUMEN

TÍTULO

“APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA MODULACIÓN DIGITAL A TRAVÉS DE MATLAB EN LA ASIGNATURA DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES”

DESCRIPCIÓN

En el cual se conoció la problemática a investigar, dando como resultado la aplicación de modulaciones digitales a través de MATLAB en la asignatura de Procesamiento Digital de Señales.

En el Capítulo 1, se detalla las Generalidades del Trabajo de Titulación entre los más destacados son: definición del problema, objetivos tanto el general como los específicos, y la metodología empleada.

En el Capítulo 2, se describe la Fundamentación Teórica de la Modulación Digital, lo cual ayudó para el desarrollo de las simulaciones de modulaciones digitales a través de MATLAB/SIMULINK.

En el Capítulo 3, se dio una breve introducción a la Plataforma SIMULINK, y mediante un ejemplo se explicó las diferentes maneras de utilizar esta herramienta de trabajo.

En el Capítulo 4, se realiza el desarrollo de las Simulaciones de Modulación Digital, en las cuales se muestran los pasos para trabajar en MATLAB/SIMULINK y también cómo construir, configurar los parámetros y simular los diferentes tipos de modulación.

En el Capítulo 5, se presenta las Conclusiones y Recomendaciones.

ABSTRACT

TITLE

“PRACTIC APPLICATION OF DIGITAL MODULATION THROUGH MATLAB AT THE DIGITAL PROCESSMENT OF SIGNAL SUBJECT”

DESCRIPTION

Here shows the problem to investigate, getting as result the digital modulation applications through MATLAB at the Digital Signal Process subject.

Chapter 1, details the General Labor Certification, between the most important: problem definition, general and specific objectives, and applied methodology.

Chapter 2, describes the Theoretical Fundament of Digital Modulation, which helped to the development of the Digital Modulation Simulations by MATLAB/SIMULINK.

Chapter 3, describes a brief introduction to the SIMULINK Platform, and by an example it explained the different ways to use the work tool.

Chapters 4, Digital Modulation Simulations are developed, where the steps to work on MATLAB/SIMULINK and how to build, configure the parameters and simulate the different modulation types are shown.

Chapter 5, presents the conclusions and recommendations.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Una señal digital es aquella que es originada por cualquier tipo de fenómeno electromagnético y cuyo análisis puede ser dado en términos de magnitudes discretas (a diferencia de las señales analógicas que pueden adoptar variables continuas). Gracias a esto es más fácil su diseño, implementación y almacenamiento.

Al momento de representar una señal digital ésta sólo puede tomar ciertos valores discretos que generalmente están dados por dos posibles estados, cuando se da este caso se las llama binarias; si toman tres estados se dice que son ternarias y así sucesivamente.

La transmisión digital de datos tiene la ventaja de ser menos susceptible al ruido, ya que en vez de amplificarse la señal se la regenera por lo que ofrece mayor resistencia frente a una señal analógica.

El objetivo del siguiente trabajo es brindar a los profesores y estudiantes de la asignatura de Procesamiento de Señales Digitales de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones una herramienta eficaz que les permita realizar prácticas para así tener un mejor entendimiento en la materia aprovechando las ventajas que ofrecen el procesamiento y simulación de señales digitales.

El proyecto presentado servirá como una herramienta para reforzar los conocimientos impartidos en la materia de Procesamiento de Señales Digitales por medio de simulaciones que se realizarán en el programa, su fácil manejo ayudará al estudiantado a desarrollarse mejor ya que tendrá una visión más práctica de los problemas que se presenten al momento de formarse en la asignatura escogida.

1.2. Antecedentes.

MATLAB es un programa utilizado frecuentemente en ingeniería que tiene varias aplicaciones que se detallan a continuación:

- Desarrollo de algoritmos.
- Simulación y modelado matemático.
- Cálculo matricial y análisis numérico.
- Análisis de datos con su respectiva visualización gráfica.

MATLAB fue desarrollado con el propósito de resolver problemas que tengan relación con complejos cálculos matemáticos y permite un mejor análisis y entendimiento gracias a que se lo puede visualizar gráficamente.

Para extender el entorno del programa se han incorporado un sin número de aplicaciones específicas llamadas ToolBoxes, las cuales ayudan a incrementar las funciones que posee el programa principal. En el presente trabajo se tratará adicionalmente la aplicación Simulink, la cual permite manejar un entorno de simulación visual, permitiendo al usuario especificar el proceso a realizarse en forma de diagramas de bloques.

SIMULINK es empleado en el procesamiento de señales digitales por lo que sería una gran herramienta para estudiantes y profesores de la asignatura PSD teniendo presente que el desarrollo de aplicaciones prácticas con dicho programa ayudaría al mejor entendimiento de la asignatura y aportaría a su desarrollo profesional.

1.3. Justificación.

Hoy en día las universidades aplican varios métodos con los cuales logren afianzar los conocimientos por parte del estudiantado disponiendo de herramientas que les permitan tener un pensum más acorde a las necesidades actuales.

La justificación de la tesis propone mejorar el tratamiento y comprensión de la materia de Procesamiento de Señales Digitales a través del programa MATLAB con su plataforma Simulink el cual permitiría tanto a estudiantes como profesores complementar la parte teórica con la práctica para así lograr la excelencia académica.

MATLAB con su plataforma Simulink es un programa que nos permite simular, analizar y procesar digitalmente una señal con lo que ayudaría a tener un mejor entendimiento en la materia dictada.

Con el desarrollo de esta investigación los alumnos podrán obtener una visión diferente que les permita solucionar de una manera práctica cualquier problema que se presente en la aplicación de la teoría estudiada, esto servirá para formarlos profesionalmente ya que habrán basado su experiencia en ejemplos verificables y auténticos.

1.4. Planteamiento del Problema.

En la actualidad todo sistema de comunicación trabaja con el procesamiento de señales digitales a través de plataformas de simulación como lo es el caso de MATLAB / Simulink, debido a aquello surge la necesidad de adaptar herramientas de simulación en la asignatura de PSD de la UCSG en la FETD para mejorar el proceso de aprendizaje en los alumnos de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.

1.5. Objetivos

De acuerdo a lo expuesto, se plantean el objetivo general y objetivos específicos del proyecto de titulación.

1.5.1. Objetivo general.

Elaborar aplicaciones prácticas de la Modulación Digital a través de MATLAB / Simulink para la asignatura de Procesamiento de Señales Digitales en la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones perteneciente a la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil .

1.5.2. Objetivos Específicos:

- Revisar la fundamentación teórica del procesamiento de señales digitales y de las herramientas que permiten modelar y/o simular una señal digital como ayuda académica.
- Diagnosticar la situación actual de la asignatura de procesamiento de señales digitales en relación al empleo de ayudas para la instrucción.
- Desarrollar prácticas en MATLAB/Simulink de modulación digital para el procesamiento de señales digitales.

1.6. Hipótesis.

La parte teórica impartida por los docentes de la asignatura de Procesamiento de Señales Digitales sería fortalecida con la inclusión de prácticas a través de un software que les permita tanto a estudiantes como a profesores diseñar, poner en funcionamiento y simular los diferentes tipos de modulación digital, para así poder discernir mejor los conocimientos adquiridos.

1.7. Metodología de Investigación.

El presente trabajo de titulación tiene como alcances de investigación o metodologías apropiadas, pero sin confundir con los tipos de investigación. El alcance del trabajo de titulación es de carácter Exploratorio, Descriptivo y Explicativo.

Es exploratorio, porque pretende explorar la modulación digital en el procesamiento digital de señales, mediante MatLab-Simulink que dan a lugar el fenómeno en cuestión.

Es descriptivo, porque es una herramienta tecnológica muy empleada en el procesamiento digital de señales y es explicativo, ya que pretende explicar el porqué del fenómeno, a través de una herramienta de simulación.

Finalmente, se puede decir que para el presente trabajo de titulación el paradigma es del tipo Empírico-Analítico, cuyo enfoque es Cuantitativo, ya que se desea evidenciar la causa-efecto, también conocido como Ex post facto.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA MODULACIÓN DIGITAL.

2.1. Introducción a Modulación Digital.

Para dar al lector una visión general, enumeramos las abreviaturas y los nombres descriptivos de diferentes modulaciones digitales que existen (véase la tabla 2.1) y también se muestra en la figura 2.1 un diagrama de árbol de relaciones de modulaciones digitales. Algunos de los esquemas se pueden derivar de más de un esquema familiar, en los que la codificación diferencial se puede utilizar son etiquetados por la letra D y los que pueden ser demodulados de manera no coherente se etiquetan con una letra N. Todos los esquemas se pueden demodular coherentemente.

Los esquemas de modulación que figuran en la tabla y el árbol se clasifican en dos grandes categorías: la envolvente constante y envolvente no constante. Bajo la clase envolvente constante, hay tres subclases: FSK, PSK, y CPM. Bajo la clase envolvente no constante, hay tres subclases: ASK, QAM y otras modulaciones de envolvente no constante.

Entre los esquemas que se muestran están ASK, PSK, FSK que son modulaciones básicas y MSK, GMSK, CPM, MHPM y QAM, etc., son esquemas avanzados. Los esquemas avanzados son variaciones y combinaciones de los esquemas básicos.

La clase de envolvente constante es generalmente adecuada para sistemas de comunicación cuyos amplificadores de potencia debe operar en la región no lineal de la característica de entrada - salida con el fin de lograr la máxima eficiencia del amplificador. Un ejemplo es el TWTA (amplificador de tubo de ondas progresivas) en las comunicaciones por satélite.

Tabla 2. 1: Abreviaciones de esquemas de modulaciones digitales.

Abreviatura	Abreviatura Alternativa	Descripción
Modulación por desplazamiento de Frecuencia (FSK, Frequency-Shift Keying)		
BFSK	FSK	Binary Frequency Shift Keying.
MFSK		M-ary Frequency Shift Keying.
Modulación por desplazamiento de Fase (PSK, Phase Shift Keying)		
BPSK	PSK	Binary Phase Shift Keying.
QPSK	4PSK	Quadrature Phase Shift Keying.
OQPSK	SQPSK	Offset QPSK, Staggered QPSK.
$\pi/4$ -QPSK		$\pi/4$ Quadrature Phase Shift Keying.
MPSK		M-ary Phase Shift Keying.
Modulación de Fase Continua (CPM, Continuous Phase Modulations)		
SHPM		Single-h (Modulation index) Phase Modulation.
MHPM		Multi-h Phase Modulation.
LREC		Rectangular Pulse of Length L.
CPFSK		Continuous Phase Frequency Shift Keying.
MSK	FFSK	Minimum Shift Keying, Fast FSK.
SMSK		Serial Minimum Shift Keying.
LRC		Raised Cosine Pulse of Length L.
LSRC		Spectrally Raised Cosine Pulse of Length L.
GMSK		Gaussian Minimum Shift Keying.
TFM		Tamed Frequency Modulation.
Modulaciones en Amplitud y Amplitud/Fase.		
ASK		Amplitude Shift Keying (nombre genérico).
OOK	ASK	Binary On-Off Keying.
MASK	MAM	M-ary ASK, M-ary Amplitude Modulation.
QAM		Quadrature Amplitude Modulation.
Modulación de Envolvente no constante.		
QORC		Quadrature Overlapped Raised Cosine Modulation.
SQORC		Staggered QORC.
QOSRC		Quadrature Overlapped Squared Raised Cosine Modulation.

Fuente: Xiong, F. (2006)

Sin embargo, los esquemas de FSK genéricas de esta clase no son adecuados para su aplicación por satélite, ya que tienen muy baja eficiencia de ancho de banda en comparación con los esquemas de PSK.

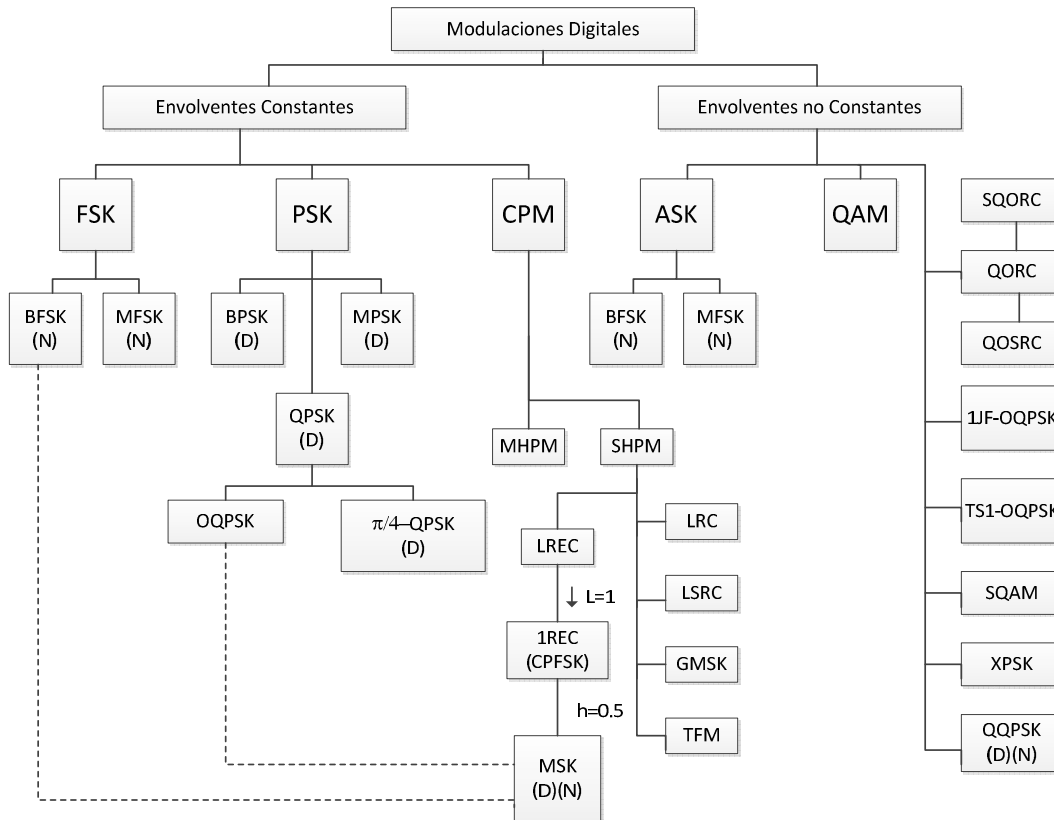


Figura 2. 1: Diagrama de árbol de la modulación digital.
Fuente: Autor.

El FSK binario se utiliza en los canales de control de baja velocidad de los sistemas celulares de primera generación, AMPS (servicios avanzados de telefonía móvil de EE.UU) y ETACS (sistema de comunicaciones de acceso total europeo). Los tipos de datos son 10 Kbps para AMPS y 8 Kbps para ETACS. Los esquemas de PSK, incluyendo BPSK, QPSK, OQPSK, y MSK se han utilizado en sistemas de comunicación vía satélite.

El $\pi/4 - \text{QPSK}$ valdría la pena poner una especial atención debido a su capacidad para evitar 180° desplazamiento de fase a bruto y para permitir la demodulación diferencial. Se ha utilizado en los sistemas celulares móviles digitales, tales como el sistema celular digital de Estados Unidos (USDC).

2.2. ¿Por qué Modulación Digital?

Alvarado S., J. A. (2005) manifiesta que el paso a la modulación digital brinda más capacidad de información, compatibilidad de los servicios de datos digitales, mejor protección de los datos, calidad en las comunicaciones y rapidez en la disponibilidad del sistema.

Los desarrolladores de sistemas de comunicación se enfrentan a estas limitaciones:

- Banda ancha disponible.
- Potencia admisible.
- El nivel de ruido inherente del sistema.

El espectro de RF debe ser compartido, sin embargo, cada día hay más usuarios de ese espectro que aumenta la demanda de servicios de comunicaciones. Esquemas de modulación digitales tienen mayor capacidad de transmitir grandes cantidades de información de esquemas de modulación analógicos.

2.3. Simplicidad y ancho de banda.

Hay una compensación fundamental en los sistemas de comunicación, tal como se muestra en la figura 2.2. El hardware simple, se puede utilizar en los transmisores y receptores para comunicar la información. Sin embargo, este utiliza una gran cantidad de espectro que limita el número de usuarios.

Alternativamente, los transmisores y receptores más complejos se pueden utilizar para transmitir la misma información a través de menos ancho de banda. La transición hacia más y más técnicas eficientes de transmisión espectral, requiere de un hardware complejo, que sería difícil de diseñar, probar y construir. Existe esta compensación si la comunicación es a través de aire o cable, analógico o digital.

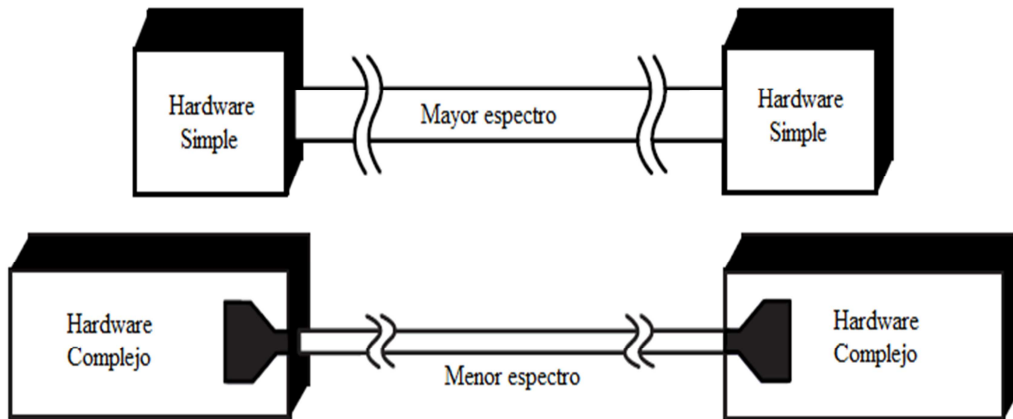


Figura 2. 2: Compensación fundamental de los Sistemas de Comunicación.
Fuente: Autor.

2.4. Tendencias industriales.

En los últimos años una importante transición se ha producido desde la simple Amplitud Modulada (AM) y Frecuencia/Fase Modulada (FM/AM) analógica, hacia las nuevas técnicas de modulación digital, tal como se puede observar en la figura 2.3. A continuación se mencionan algunos ejemplos de:

- a. Modulación digital QPSK.
- b. Modulación digital FSK.
- c. Modulación digital MSK.
- d. Modulación digital QAM.

Otra capa de complejidad en muchos sistemas de comunicaciones modernos es la multiplexación. Existen dos tipos principales de multiplexación (Acceso múltiple), que son:

- a. Multiplexación por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*).
- b. Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*).

Estos son dos maneras diferentes de añadir diversidades de señales que permitan diferentes señales separados el uno del otro.

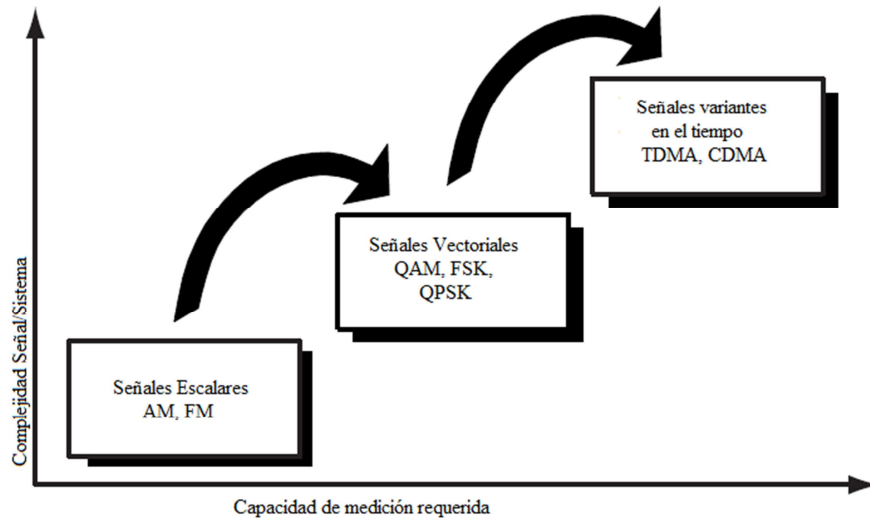


Figura 2. 3: Compensación fundamental de los Sistemas de Comunicación.
Fuente: Autor.

2.5. Uso de la modulación en fase (I) y cuadratura (Q) en la transmisión de la información.

Para transmitir una señal a través del aire, hay tres pasos principales:

- a. Una portadora pura generada en el transmisor.
- b. La portadora es modulada con la información a transmitir. Cualquier forma fiable de cambio detectable de las características de la señal para transmitir información.
- c. En el receptor las modificaciones de la señal o cambios se detectan y son demoduladas.

2.5.1. Características de las señales que pueden modificarse.

Sólo hay tres características de una señal que se puede cambiar con el tiempo: la amplitud, fase o frecuencia. Sin embargo, la fase y la frecuencia son sólo formas diferentes de ver o medir el mismo cambio de señal. En la figura 2.4 se muestra el diagrama de bloque de modificación y detección de señales moduladas y demoduladas.

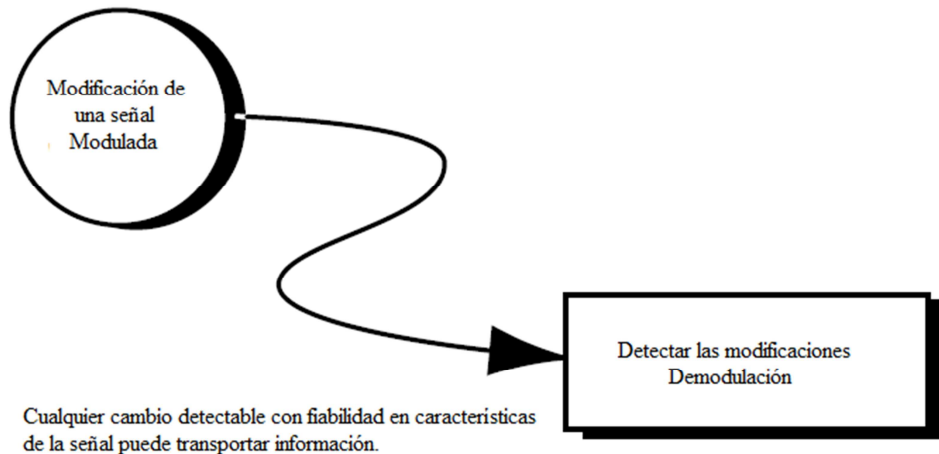


Figura 2. 4: Transmisión de información Analógica o Digital.
Fuente: Autor.

En la modulación de amplitud (AM), la amplitud de una señal portadora de alta frecuencia se varía en proporción a la amplitud instantánea de la señal de mensaje de modulación.

La Modulación de Frecuencia (FM), es la técnica de modulación analógica más popular utilizado en los sistemas de comunicaciones móviles. En FM, la amplitud de la portadora de modulación se mantiene constante mientras que su frecuencia es variada por la señal de mensaje de modulación.

La amplitud y la fase se pueden modular de forma simultánea y por separado, pero esto es difícil de generar, y especialmente difícil de detectar. En lugar de ello, en los sistemas prácticos, la señal son separados en otro conjunto de componentes independientes: I (en fase) y Q (cuadratura). Estos componentes son ortogonales y no interfieren entre sí.

En la figura 2.5 se muestran las envolventes de AM y FM de manera individual, y la última envolvente es la combinación de AM/FM.

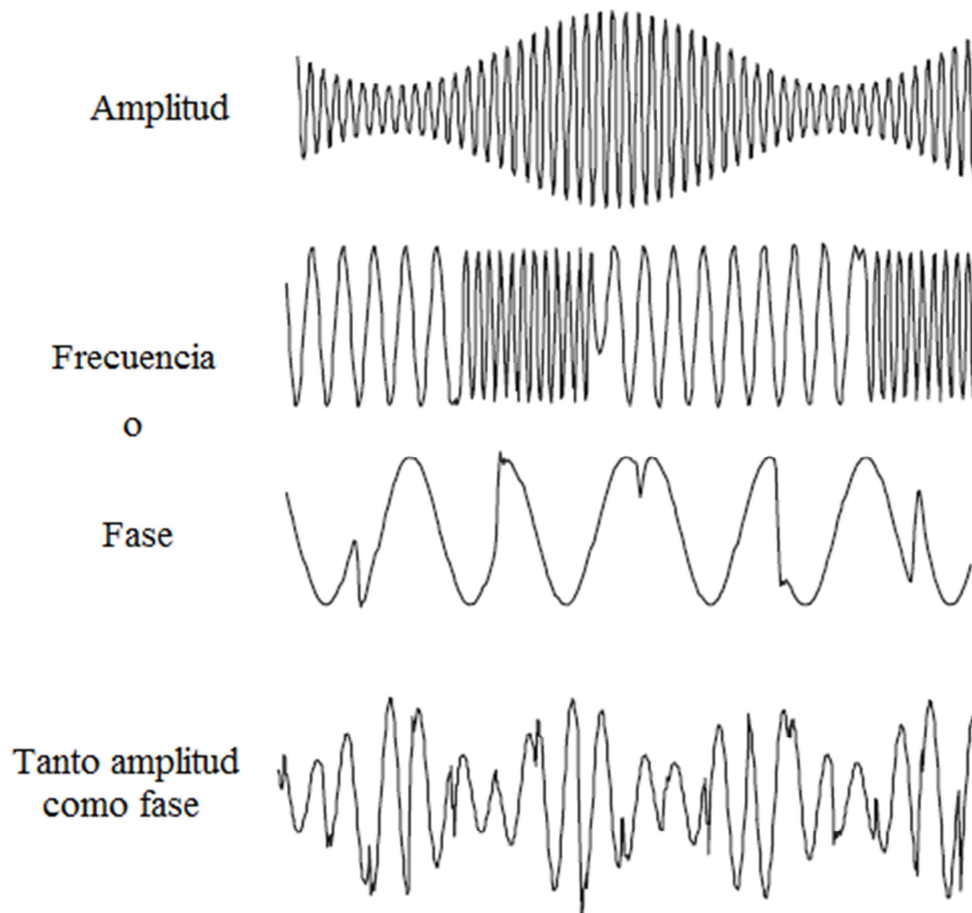


Figura 2. 5: Modificación de señales características AM y FM.

Fuente: Autor.

2.6. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).

Como se describió en el inciso anterior, existen tres formas básicas de modulación digital paso banda: desplazamiento de amplitud (ASK), desplazamiento de frecuencia (FSK) y de desplazamiento de fase (PSK).

FSK es probablemente el primer tipo de modulación digital utilizado en la industria de la comunicación, para lo cual se describe primero a la señal binaria FSK, al modulador y su densidad espectral de potencia. Posterior se presenta el demodulador y probabilidad de error de coherencia y finalmente se discute la demodulación no coherente y probabilidad de error FSK M-aria (MFSK).

2.6.1. Señal Binaria FSK y Modulador.

En su forma más general, el esquema de FSK binario utiliza dos señales con diferentes frecuencias para representar binario 1 y 0, dichas señales son representadas como:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= A \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), & kT \leq t \leq (k+1)T \text{ para } 1 \\ s_2(t) &= A \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2), & kT \leq t \leq (k+1)T \text{ para } 0 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

De donde φ_1 y φ_2 son las fases iniciales en $t=0$, y T es el período de bits de los datos binarios. Estas dos señales no son coherentes desde φ_1 y φ_2 no son los mismos en general. La forma de onda no es continua en transiciones de bit.

Por tanto, esta forma de FSK se llama no coherente o discontinua FSK. La misma puede ser generada por el cambio de la línea de salida del modulador entre dos osciladores diferentes como se muestra en la figura 2.6. Esta puede ser no coherente demodulada.

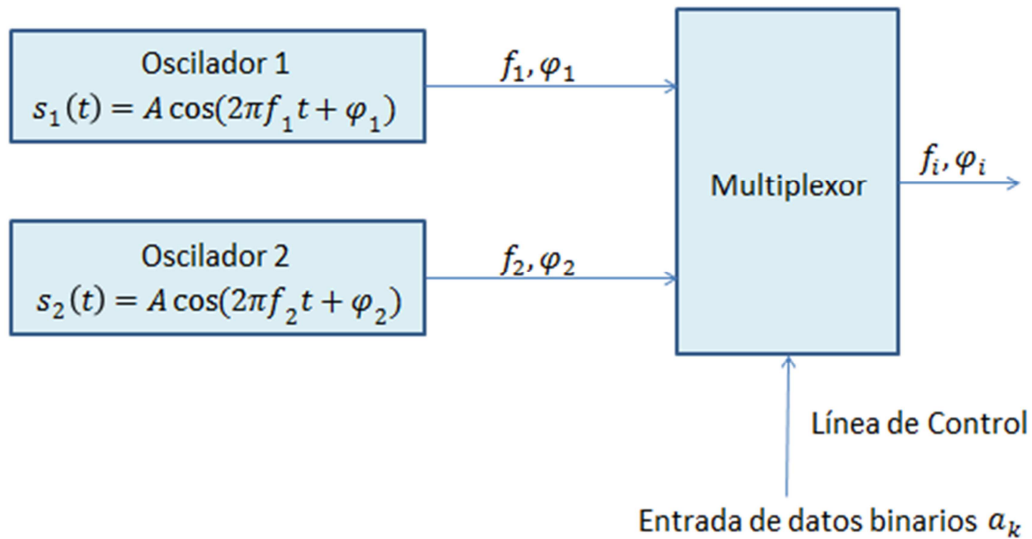


Figura 2. 6: Modulador FSK No coherente.

Fuente: Autor.

El segundo tipo de FSK es el coherente donde dos señales tienen la misma fase inicial en $t = 0$:

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \varphi), \quad kT \leq t \leq (k+1)T \text{ para } 1$$

$$s_2(t) = A \cos(2\pi f_2 t + \varphi), \quad kT \leq t \leq (k+1)T \text{ para } 0 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Este tipo de FSK puede ser generado por el modulador como se muestra en la figura 2.7. El sintetizador de frecuencia genera dos frecuencias, f_1 y f_2 , que se sincronizan. Los datos de entrada binaria controla el multiplexor. La temporización de bit debe estar sincronizada con las frecuencias portadoras.

El detalle se discutirá en breve. Si un "1" está presente pasará $s_1(t)$ y si un "0" está presente pasará $s_2(t)$. Hay que tener en cuenta que $s_1(t)$ y $s_2(t)$ están ahí siempre, independientemente de los datos de entrada. Así que cuando se considera la fase en cualquier intervalo de bit $kT \leq t \leq (k+1)T$, el punto de partida de tiempo es 0 y no kT .

Para la demodulación coherente de la señal FSK coherente, las dos frecuencias son elegidas, de tal manera que las dos señales son ortogonales:

$$\int_{kT}^{(k+1)T} s_1(t)s_2(t)dt = 0$$

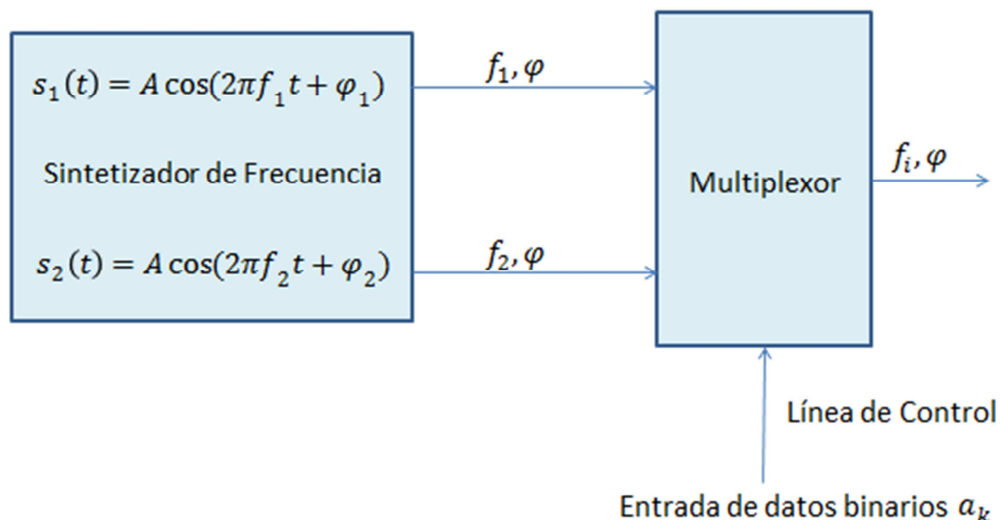


Figura 2. 7: Modulador FSK coherente.

Fuente: Autor.

Es decir:

$$\int_{kT}^{(k+1)T} s_1(t)s_2(t)dt = \int_{kT}^{(k+1)T} \cos(2\pi f_1 t + \varphi) \cos(2\pi f_2 t + \varphi) dt$$

$$\int_{kT}^{(k+1)T} s_1(t)s_2(t)dt = \frac{1}{2} \int_{kT}^{(k+1)T} \{\cos[2\pi(f_1 + f_2)t + 2\varphi] + \cos 2\pi(f_1 - f_2)t\} dt$$

$$\begin{aligned} \int_{kT}^{(k+1)T} s_1(t)s_2(t)dt &= \frac{1}{4\pi(f_1 + f_2)} [\cos 2\varphi \sin 2\pi(f_1 + f_2)t + \sin 2\varphi \cos 2\pi(f_1 + f_2)t] \\ &+ \frac{1}{4\pi(f_1 - f_2)} \sin 2\pi(f_1 - f_2)t \Big|_{kT}^{(k+1)T} \end{aligned}$$

$$\int_{kT}^{(k+1)T} s_1(t)s_2(t)dt = 0$$

Esto requiere que $2\pi(f_1 + f_2)T = 2n\pi$ y $2\pi(f_1 - f_2)T = m\pi$, donde n y m son números enteros. Esto conduce a:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{2n + m}{4T} \\ f_2 &= \frac{2n - m}{4T} \\ 2\Delta f &= f_1 - f_2 = \frac{m}{2T} \end{aligned}$$

Así llegamos a la conclusión de que sean ortogonales f_1 y f_2 deben ser un número entero múltiplo de $\frac{1}{4}T$ y su diferencia debe ser un número entero múltiplo de $\frac{1}{2}T$. Usando Δf podemos reescribir las dos frecuencias como:

$$f_1 = f_c + \Delta f$$

$$f_2 = f_c - \Delta f$$

$$f_c = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{n}{2T}$$

Donde f_c es la frecuencia de portadora nominal (o aparente) que debe ser un número entero múltiplo de $\frac{1}{2}T$ de ortogonalidad.

Cuando se elige la separación como $\frac{1}{T}$, entonces la continuidad de fase se mantiene a las transiciones de bits, la FSK se llama FSK de Sunde. Es una forma importante de FSK, de hecho, si la separación es k/T , donde k es un número entero, la fase de la señal FSK coherente descrita ya anteriormente por la ecuación 2.2, es siempre continua.

Prueba: en $t = nT$, la fase de $s_1(t)$ es:

$$\begin{aligned} 2\pi f_1 nT + \varphi &= 2\pi \left(f_2 + \frac{k}{T} \right) nT + \varphi = 2\pi f_2 nT + 2\pi k n + \varphi \\ &= 2\pi f_2 nT + \varphi (\text{Módulo} - 2\pi) \end{aligned}$$

Lo que exactamente es la fase de $s_2(t)$. Así, en $t = nT$, si los interruptores de bits de entrada de 1 a 0, la nueva señal $s_2(t)$ se iniciará exactamente cuando la misma amplitud, donde $s_1(t)$ ha terminado. La separación mínima de ortogonalidad entre f_1 y f_2 es $\frac{1}{2}T$. Como acabamos de ver más arriba, esta separación no puede garantizar una fase continua. Una forma particular de FSK llamada modulación por desplazamiento mínimo (MSK), ni sólo tiene la separación mínima, pero también tiene fase continua.

Sin embargo, MSK es mucho más que una FSK ordinaria, tiene propiedades que un FSK ordinaria no tiene. Debe ser generado por otros métodos que se describió en la figura 2.7.

En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de forma de onda de FSK de Sunde donde el bit 1 corresponde a una mayor frecuencia f_1 y el bit 0 a una f_2 menor. Desde f_1 y f_2 son múltiplos de $\frac{1}{T}$, la fase final de la portadora es la misma que la fase de arranque, por lo tanto, la forma de onda tiene fase continua en los límites del bit. FSK de Sunde es un FSK de fase continua.



Figura 2. 8: Señal FSK coherente o FSK de Sunde.
Fuente: Autor.

Una forma de onda FSK coherente podría tener fase discontinua en los límites de bits. Mientras que en la figura 2.9 muestra el ejemplo de una señal FSK con fases discontinuas, donde:

$$f_1 = \frac{9}{4}T, \quad f_2 = \frac{6}{4}T$$

y la separación es:

$$2\Delta f = \frac{3}{4}T$$

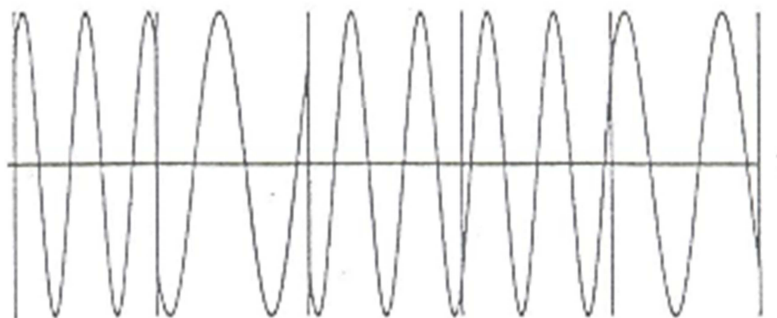


Figura 2. 9: Señal FSK con fases discontinuas.
Fuente: Autor.

2.6.2. Densidad de Potencia Espectral.

Ahora procederemos a encontrar la potencia espectral de la señal FSK de Sunde, para lo cual se expande la ecuación FSK de Sunde:

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos 2\pi \left(f_c + a_k \frac{1}{2T} \right) t \\ &= A \cos \left(a_k \frac{\pi t}{T} \right) \cos(2\pi f_c t) - A \sin \left(a_k \frac{\pi t}{T} \right) \sin(2\pi f_c t) \\ &= A \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right) \cos(2\pi f_c t) - A a_k \sin \left(\frac{\pi t}{T} \right) \sin(2\pi f_c t) \end{aligned}$$

$$kT \leq t \leq (k + 1)T$$

Donde esta última expresión se deriva utilizando el factor $a_k = \pm 1$. La componente en fase $A \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right)$ es independiente de los datos. La componente en cuadratura $A a_k \sin \left(\frac{\pi t}{T} \right)$ se relaciona directamente con los datos. Las componentes en fase y en cuadratura son independientes el uno del otro.

2.6.3. Señal MFSK y densidad espectral de potencia.

En una modulación MFSK o M-aria FSK, el flujo de datos binarios se divide en n-tuplas de $n = \log_2 M$ bits. Denotamos que todas las posibles n-tuplas M como mensajes de $M: m_i, i = 1, 2, \dots, M$. Hay señales de M con diferentes frecuencias para representar los mensajes M . La expresión de la señal i-ésimo es:

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_i t + \varphi_i), \quad kT \leq t \leq (k + 1)T \text{ para } m_i$$

Donde T es el período de símbolo que es n veces el bit periodo.

Si las fases iniciales son las mismas para toda i, el conjunto de la señal es coherente. Al igual que en el caso binario siempre podemos asumir $\varphi_i = 0$ para MFSK coherente. La demodulación puede ser coherente o no coherente. De lo contrario, el conjunto de la señal es no coherente y la demodulación debe ser

no coherente. A partir de la discusión de FSK binario, sabemos que para que las señales sean ortogonales, las separaciones de frecuencia entre cualesquiera dos de ellos deben ser $\frac{m}{2T}$ para el caso coherente y $\frac{m}{T}$ para el caso de no coherente. Por lo tanto la separación mínima entre dos frecuencias adyacentes es $\frac{1}{2T}$ para el caso ortogonal; y $\frac{1}{T}$ para el caso de no coherente.

Estos son los mismos que los del caso binario. Por lo general, una separación de frecuencia uniforme entre dos frecuencias adyacentes se elige para MFSK.

La derivación de la densidad espectral de potencia de los regímenes de MFSK es mucho más complicada que para el caso binario. Ahora citamos la expresión de PSD de la envolvente compleja de la MFSK con los siguientes parámetros:

1. Las separaciones de frecuencia son uniformes pero arbitraria, que se denota como $2DF$. Expresamos la separación en cuanto a la modulación de índice $h = 2DFT$.
2. Los mensajes M-aria son:

$$m_i = 2i - (M + 1), \quad i = 1, 2, \dots, M = \pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M - 1)$$

Y las señales M-arias son:

$$s_1(t) = A \cos \left[2\pi f_c t + m_i h \frac{\pi}{T} (t - kT) + \varphi_i \right], \quad kT \leq t \leq (k + 1)T, \quad \text{para } m_i$$

Donde A es la amplitud de la señal y todas las señales deben tener energías iguales. Para los mensajes equiprobables, la expresión PSD se da en:

$$\Psi_s(f) = \frac{A^2 T}{M} \sum_{i=1}^M \left[\frac{1}{2} \frac{\sin^2 \gamma_i}{\gamma_i^2} + \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M A_{ij} \frac{\sin \gamma_i}{\gamma_i} \frac{\sin \gamma_j}{\gamma_j} \right]$$

Otros parámetros se definen como:

$$A_{ij} = \frac{\cos(\gamma_i + \gamma_j) - C_a \cos(\gamma_i + \gamma_j - 2\pi fT)}{1 + C_a^2 - 2C_a \cos 2\pi fT}$$

$$\gamma_i = \left(fT - m_i \frac{h}{2} \right) \pi, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

$$C_a = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M/2} \cos[h\pi(2i - 1)]$$

2.7. Modulación por desplazamiento de fase (PSK).

La Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK), es una gran clase de esquemas de modulación digital. La modulación PSK se utiliza ampliamente en la industria de la comunicación. En el presente acápite se estudia cada esquema de modulación PSK en una sola sección en la descripción de la señal, la densidad espectral de potencia, diagramas de bloques del modulador/demodulador, y la característica de error del receptor están todos incluidos. A continuación se muestran cada una de las diferentes técnicas de modulación PSK:

- a. Binario PSK (BPSK) coherente y su contraparte la no coherente.
- b. Diferencial BPSK (DBPSK).
- c. M-aria PSK (MPSK).
- d. Diferencial MPSK (DMPSK) no coherentes.
- e. PSK en cuadratura (QPSK).
- f. Diferencial QPSK (DQPSK).
- g. QPSK offset (OQPSK).
- h. El $\pi/4$ -DQPSK.

2.7.1. Señal Binaria PSK.

Los datos binarios se representan mediante dos señales con diferentes fases en BPSK. Típicamente estas dos fases son 0 y T , las señales son:

$$\begin{aligned}
s_1(t) &= A \cos 2\pi f_c t, & 0 \leq t \leq T, & \text{ para } 1 \\
s_2(t) &= -A \cos 2\pi f_c t, & 0 \leq t \leq T, & \text{ para } 0 \quad (\text{Ecuación 2.3})
\end{aligned}$$

Estas señales se llaman antípodas. La razón de que son elegidos es que tienen un coeficiente de correlación de -1, lo que conduce a la probabilidad de error mínima para la misma relación E_φ/N_o , como se verá en breve. Estas dos señales tienen la misma frecuencia y energía. Todas las señales PSK se pueden representar gráficamente por una constelación de señales en un sistema de coordenadas bidimensional con:

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T$$

Y

$$\varphi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T}} \sin 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T$$

Se comportan como su eje horizontal y vertical, respectivamente. Hay que tener en cuenta que añadimos deliberadamente un signo menos en $\varphi_2(t)$, de modo que las expresiones de la señal PSK será una suma en lugar de una diferencia. Muchas otras señales, especialmente las señales QAM, también pueden ser representados de la misma manera. Por lo tanto, se introduce la constelación de la señal de BPSK, tal como se muestra en la Figura 2.10, donde $s_1(t)$ y $s_2(t)$ se representan mediante dos puntos en el eje horizontal, respectivamente, donde:

$$E = \frac{A^2 T}{2}$$

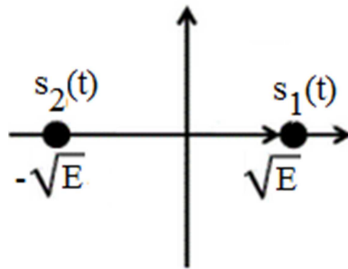


Figura 2. 10: Constelación de Señal FSK.
Fuente: Autor.

La forma de onda de una señal BPSK generada por el modulador en la figura 2.11 para un flujo de datos {10010110} se muestra en la Figura 2.12. La forma de onda tiene una envolvente constante FSK. Su frecuencia es constante también. En general, la fase no es continua en los límites del bit.

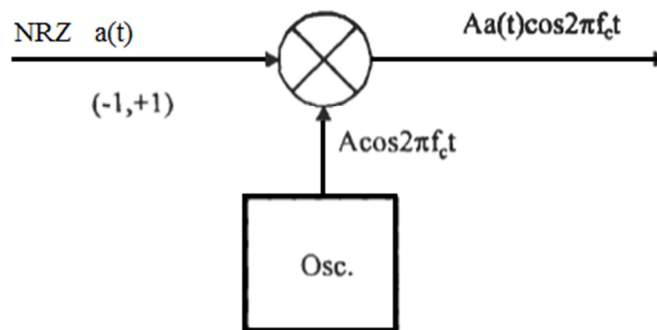


Figura 2. 11: Diagrama de bloques del modulador BFSK.
Fuente: Autor.

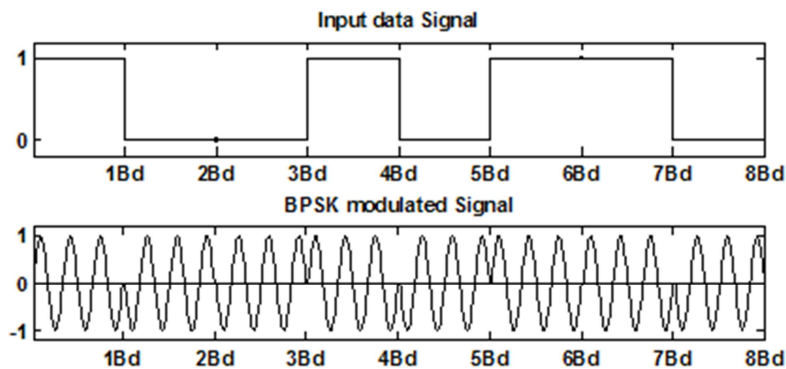


Figura 2. 12: Señal BFSK.
Fuente: Autor.

Si la $f_c = mR_b = M/T$, donde m es un número entero y R_b es la velocidad de bits de datos, y la temporización de bit es sincrónico con el portador, a continuación, la fase inicial en un poco límite es entre 0 o π (véase la figura 2.13 (a)), correspondiente al bit de datos de 1 o 0. Sin embargo, si la f_c , no es un múltiplo entero de R_b , la fase inicial en un bit de límite no está entre 0 o π (véase la figura 2.13 (b)). En otras palabras, las señales moduladas no son las dadas en la ecuación 2.3.

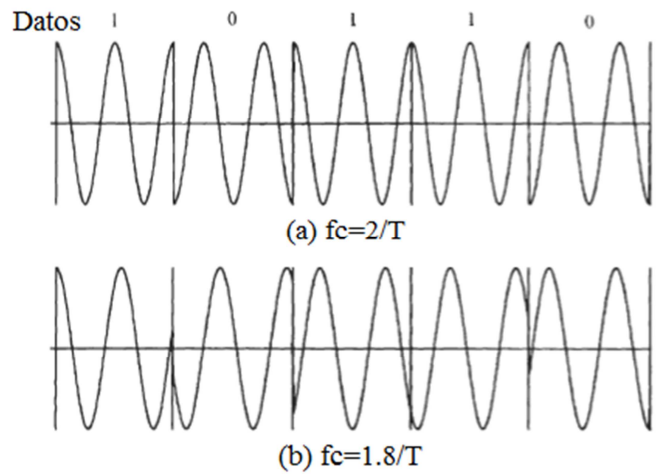


Figura 2. 13: Formas de señal BFSK.
Fuente: Autor.

2.7.2. Diferencial BPSK.

Esta técnica de codificación diferencia se puede utilizar en la modulación PSK, de esta manera se denomina codificada diferencialmente como DEBPSK, tal como se muestra en la figura 2.14. La señal de un DEBPSK puede ser demodulada coherente o diferencialmente.

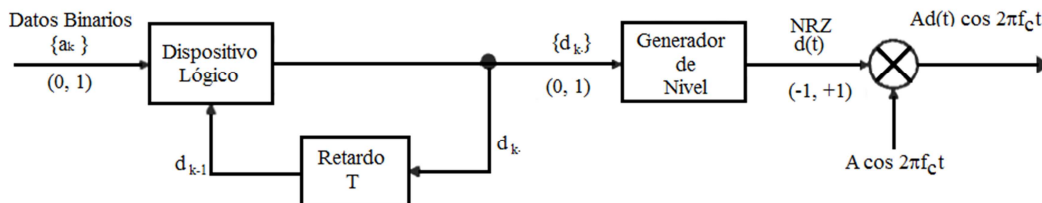


Figura 2. 14: Diagrama de bloques del modulador DEBPSK.
Fuente: Autor.

La figura 2.14 y 2.15 nos muestra el esquema de modulación que utiliza codificación diferencial y demodulación diferenciada como DBPSK respectivamente, que a veces se llama simplemente DPSK. DBPSK no requiere una señal de referencia coherente.

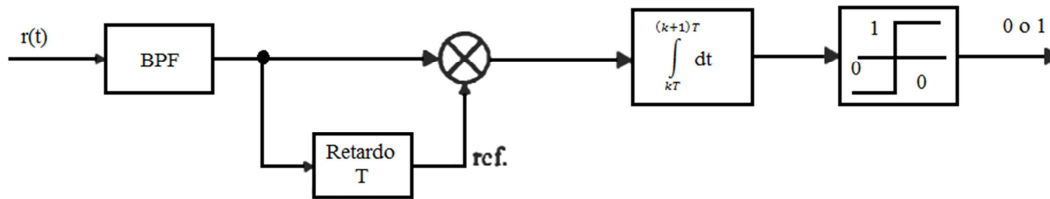


Figura 2. 15: Diagrama de bloques del demodulador DEBPSK.
Fuente: Autor.

El filtro de paso de banda frontal reduce la potencia del ruido, pero conserva la fase de la señal. El integrador puede ser sustituido por un LPF. La salida del integrador es:

$$l = \int_{kT}^{(k+1)T} r(t)r(t-T)dt$$

En ausencia de ruido y otros impedimentos de canal,

$$l = \int_{kT}^{(k+1)T} s_k(t)s_{k-1}(t)dt = \begin{cases} E_b, & \text{si } s_k(t) = s_{k-1}(t) \\ -E_b, & \text{si } s_k(t) = -s_{k-1}(t) \end{cases}$$

Donde $s_k(t)$ y $s_{k-1}(t)$ son la corriente y los símbolos anteriores. La salida del integrador es positiva si la señal de corriente es la misma que la anterior, de lo contrario la salida es negativa. Esto es para decir que el demodulador toma decisiones basándose en la diferencia entre las dos señales.

Así, los datos de información deben ser codificados como la diferencia entre señales adyacentes, que es exactamente lo que la codificación diferencial puede lograr. La regla de codificación es:

$$d_k = \overline{a_k \oplus d_{k-1}}$$

2.7.3. M-aria PSK.

La motivación detrás de MPSK es aumentar la eficiencia de ancho de banda de los esquemas de modulación PSK. En BPSK, un bit de datos está representado por un símbolo. En la modulación MPSK, $n = \log(M)$ bits de datos, son representados por un símbolo, por tanto, la eficiencia de ancho de banda se incrementa a n veces.

Entre todos los regímenes de MPSK, QPSK es el esquema más utilizado a menudo ya que no sufre de la degradación del BER, mientras se incrementa la eficiencia de ancho de banda. Otros esquemas MPSK aumentar la eficiencia del ancho de banda en los gastos de BER.

Conjunto de señales PSK M-aria se define como

$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_i), \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Dónde:

$$\theta_i = \frac{(2i - 1)\pi}{M}$$

La frecuencia de la portadora es elegido como número entero múltiplo de la velocidad de símbolo, por lo tanto, en cualquier intervalo de símbolos, la fase inicial de la señal es también una de las M fases.

Por lo general, M se elige como una potencia de 2, es decir, $M = 2^n$ y $n = \log M$. Por lo tanto, el flujo de datos binarios se divide en n-tuplas. Cada uno de ellos está representado por un símbolo con una fase inicial en particular.

La expresión anterior se puede escribir como:

$$s_i(t) = A \cos \theta_i \cos 2\pi f_c t - A \sin \theta_i \sin 2\pi f_c t = s_{i1}\varphi_1(t) + s_{i2}\varphi_2(t)$$

Dónde, $\varphi_1(t)$ y $\varphi_2(t)$ son funciones ortogonales básicas, y

$$s_{i1} = \int_0^T s_i \varphi_1(t) dt = \sqrt{E} \cos \theta_i$$

$$s_{i2} = \int_0^T s_i \varphi_2(t) dt = \sqrt{E} \sin \theta_i$$

Donde

$$E = \frac{1}{2} A^2 T$$

es la energía de símbolo de la señal. La fase está relacionada con s_{i1} y s_{i2} como:

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{s_{i2}}{s_{i1}}$$

Por consiguiente, la constelación de señales MPSK es de dos dimensiones. Cada señal $s_i(t)$ está representada por un punto (s_{i1}, s_{i2}) en las coordenadas abarcado por $n_1(t)$ y $n_2(t)$. Las coordenadas polares de la señal son (\sqrt{E}, θ_i) . Es decir, su magnitud es \sqrt{E} y su ángulo con respecto al eje horizontal es θ_i . Los puntos de señal están igualmente espaciados sobre un círculo de radio de \sqrt{E} y centrados en el origen.

La asignación de bits de la señal podría ser arbitraria a condición de que el mapeo sea uno-a-uno. Sin embargo, un método llamado codificación de Gray, se utiliza por lo general en la asignación de señales en MPSK. La Codificación Gray asigna n-tuples con única diferencia de un bit a dos señales adyacentes en la constelación.

Cuando se produce un error de símbolo M-aria, es más probable que la señal se detecte como la señal adyacente en la constelación, por lo tanto sólo uno de los bits de entrada n es por error.

En la figura 2.16 se muestra la constelación de 8-PSK, donde se utiliza codificación Gray para asignación de bits. Tenga en cuenta que BPSK y QPSK son casos especiales de MPSK con $M = 2$ y 4 respectivamente. En el eje de tiempo entero, podemos escribir la señal MPSK como:

$$s(t) = s_1(t) \cos 2\pi f_c t - s_2(t) \sin 2\pi f_c t, \quad -\infty < t < \infty \quad \text{Ecuación 2.4}$$

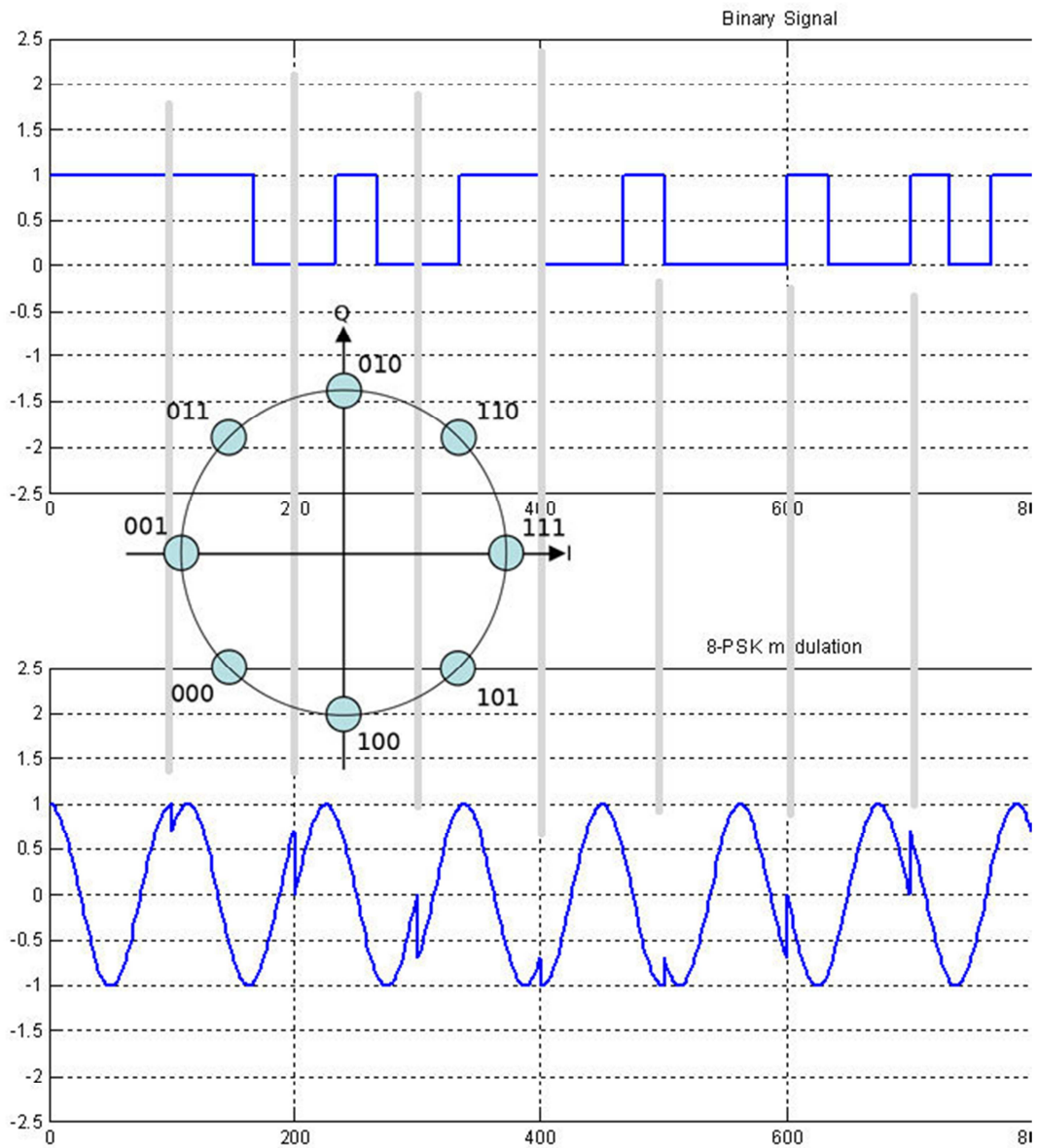


Figura 2. 16: Constelación 8-PSK mediante código Gray.
Fuente: Autor.

Donde

$$s_1(t) = A \sum_{k=-\infty}^{\infty} \cos(\theta_k) p(t - kT)$$

$$s_2(t) = A \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sin(\theta_k) p(t - kT)$$

Donde θ_k es una de las fases M determinados por la entrada binaria de n-tupla, $p(t)$ es el impulso rectangular con la unidad de amplitud definida en $[0, T]$. La ecuación 2.4 implica que la frecuencia de la portadora es un múltiplo entero de la temporización de símbolos de manera que la fase inicial de la señal en cualquier periodo de símbolo es θ_k .

Dado que las señales MPSK son de dos dimensiones, para $M \geq 4$, el modulador puede ser implementado por un modulador de cuadratura. El modulador MPSK se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2.17.

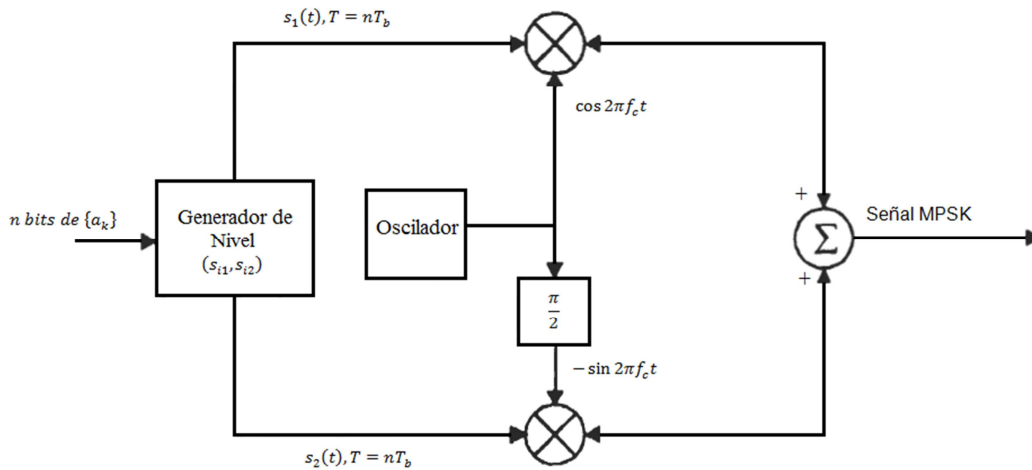


Figura 2. 17: Diagrama de bloques del modulador MPSK.
Fuente: Autor.

La única diferencia para diferentes valores de M es el generador de nivel. Cada n-tupla de los bits de entrada se utiliza para controlar el generador de nivel. Proporciona los canales I y Q del signo particular y el nivel para las coordenadas horizontales y verticales de una señal, respectivamente.

Para QPSK, el generador de nivel es particularmente simple, se trata simplemente de un convertidor de serie a paralelo. La tecnología de módem tiene la intención de utilizar los dispositivos completamente digitales. En tal ambiente, las señales de MPSK se sintetizan y se alimentan a un convertidor D/A cuya salida es la fase de la señal modulada digitalmente deseada.

La demodulación coherente de MPSK podría ser aplicado por uno de los detectores coherentes para señales M-arias. Dado que el conjunto de señales MPSK tiene sólo dos funciones de base, el receptor más simple es la que utiliza dos correladores. Para MPSK la estadística suficiente es:

$$\begin{aligned}
 l_i &= \int_0^T r(t)s_i(t)dt = \int_0^T r(t)[s_{i1}\varphi_1(t) + s_{i2}\varphi_2(t)]dt \\
 &= \int_0^T r(t)[\sqrt{E} \cos \theta_i \varphi_1(t) + \sqrt{E} \sin \theta_i \varphi_2(t)]dt \\
 &= \sqrt{E}[r_1 \cos \theta_i + r_2 \sin \theta_i]
 \end{aligned}$$

Donde

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \int_0^T r(t)\varphi_1(t)dt = \int_0^T [s(t) + n(t)]\varphi_1(t)dt = s_{i1} + n_1 \\
 r_2 &= \int_0^T r(t)\varphi_2(t)dt = \int_0^T [s(t) + n(t)]\varphi_2(t)dt = s_{i2} + n_2
 \end{aligned}$$

Son variables aleatorias gaussianas independientes con valores medios s_{i1} y s_{i2} , respectivamente. Su varianza es $N_o/2$.

2.7.4. Cuadratura PSK.

Entre todos los esquemas de MPSK, QPSK es el esquema utilizado con mayor frecuencia, ya que no sufre de la degradación del BER, mientras que se aumenta la eficiencia de ancho de banda. Otros esquemas MPSK aumentan la

eficiencia del ancho de banda en los gastos de BER. En este apartado vamos a estudiar QPSK con gran detalle.

Como se dijo, QPSK es un caso especial de MPSK, sus señales se definen como:

$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_i), \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Donde

$$\theta_i = \frac{(2i - 1)\pi}{4}$$

Las fases de señal iniciales son $\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}$. La frecuencia de la portadora se elige como número entero múltiplo de la velocidad de símbolo, por lo tanto, en cualquier intervalo de símbolo $[kT, (k + 1)T]$, la fase inicial de la señal es también una de las cuatro fases.

La expresión anterior se puede escribir como

$$s_i(t) = A \cos \theta_i \cos 2\pi f_c t - A \sin \theta_i \sin 2\pi f_c t = s_{i1}\varphi_1(t) + s_{i2}\varphi_2(t)$$

CAPÍTULO 3: PLATAFORMA SIMULINK.

3.1. Simulink y su relación con MATLAB.

Los entornos MATLAB® y Simulink® se integran en una sola entidad, y por lo tanto podemos analizar, simular y revisar nuestros modelos en cualquier entorno en cualquier punto. Se llama o ejecuta Simulink desde el Command Window de MATLAB. Para este capítulo se mostrará unos ejemplos diferentes a las aplicaciones de modulaciones digitales que se discutirá en el capítulo 4.

3.2. Modelado de un Circuito Eléctrico.

Para el circuito eléctrico de la figura 3.1, $u_0(t)$ es la entrada y las condiciones iniciales son $i_L(0^-) = 0$ y $v_C(0^-) = 0.5 V$. Calcularemos $v_C(t)$.

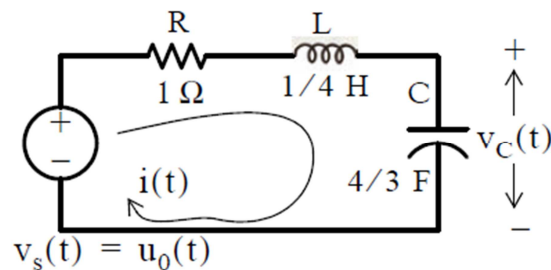


Figura 3. 1: Circuito RLC en serie.
Fuente: Karris, Steven T. (2008).

Para este ejemplo:

$$i = i_L = i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Y por la ley de voltaje de Kirchhoff (LKV),

$$Ri_L + L \frac{di_L}{dt} + v_C = u_0(t) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Y sustituyendo la ecuación 3.1 en la 3.2, queda:

$$RC \frac{dv_C}{dt} + LC \frac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = u_0(t)$$

Posteriormente, con los valores del circuito de la figura 3.1, quedaría:

$$\frac{1}{3} \frac{dv_c}{dt} + \frac{4}{3} \frac{d^2v_c}{dt^2} + v_c = u_0(t)$$
$$\frac{dv_c}{dt} + 4 \frac{d^2v_c}{dt^2} + 3v_c = 3u_0(t)$$

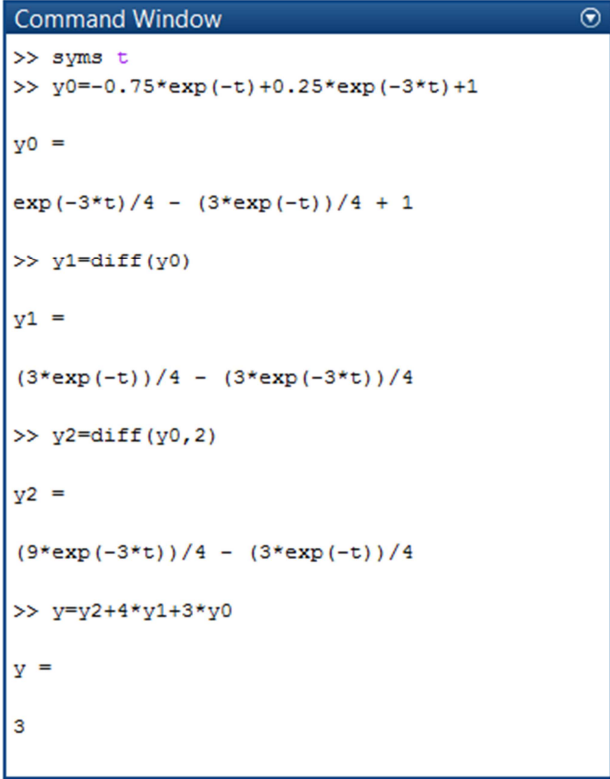
Como $u_0(t)$ es una función escalón unitario, queda la ecuación:

$$\frac{dv_c}{dt} + 4 \frac{d^2v_c}{dt^2} + 3v_c = 3 \quad t > 0 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

El desarrollo de la ecuación diferencial de segundo orden sería:

$$v_c(t) = \left(-\frac{3}{4}e^{-t} + \frac{1}{4}e^{-3t} + 1 \right) u_0(t) = (-0.75e^{-t} + 0.25e^{-3t} + 1)u_0(t)$$

Ahora se procede a comprobar mediante MATLAB que esta solución es válida para la ecuación diferencial, tal como se muestra en la figura 3.2.



```
Command Window
>> syms t
>> y0=-0.75*exp(-t)+0.25*exp(-3*t)+1
y0 =
exp(-3*t)/4 - (3*exp(-t))/4 + 1
>> y1=diff(y0)
y1 =
(3*exp(-t))/4 - (3*exp(-3*t))/4
>> y2=diff(y0,2)
y2 =
(9*exp(-3*t))/4 - (3*exp(-t))/4
>> y=y2+4*y1+3*y0
y =
3
```

Figura 3. 2: Programación en MATLAB de la respuesta del circuito RLC.
Fuente: Autor - MATLAB.

La solución general de la ecuación diferencial (ec. 3.3) de segundo Orden, es $v_c(t)$, que ya se mostro anteriormente. En la figura 3.3 se muestra el diagrama de bloques en simulink del circuito RLC.

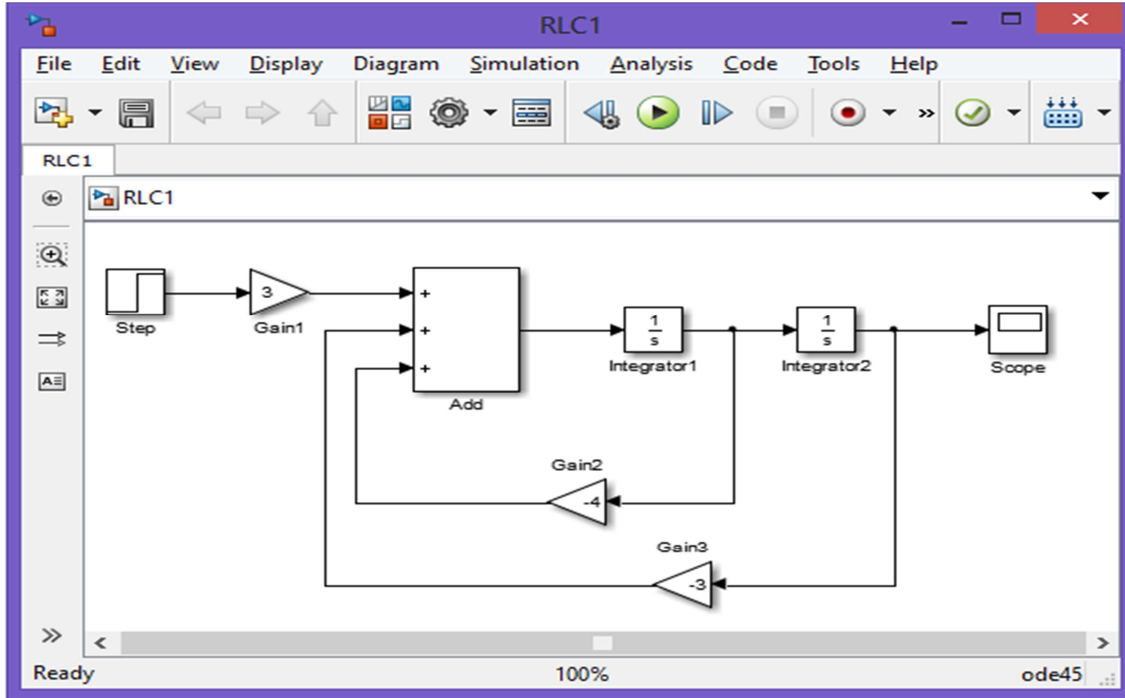


Figura 3. 3: Modelado en Simulink del Circuito RLC.
Fuente: Autor - MATLAB.

En la figura 3.4 se muestra la señal de salida del bloque scope.

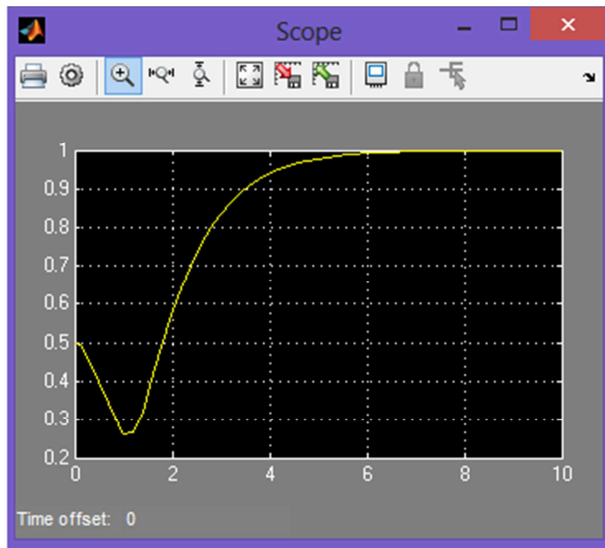


Figura 3. 4: Gráfica V vs t del circuito RLC.
Fuente: Autor - MATLAB.

El bloque de la figura 3.3, también se lo puede realizar a través del bloque *State-Space*, en la figura 3.5 se muestra el sistema completo para ser modelado y a lado se encuentra como de establecerse los parametros del bloque *State-Space*.

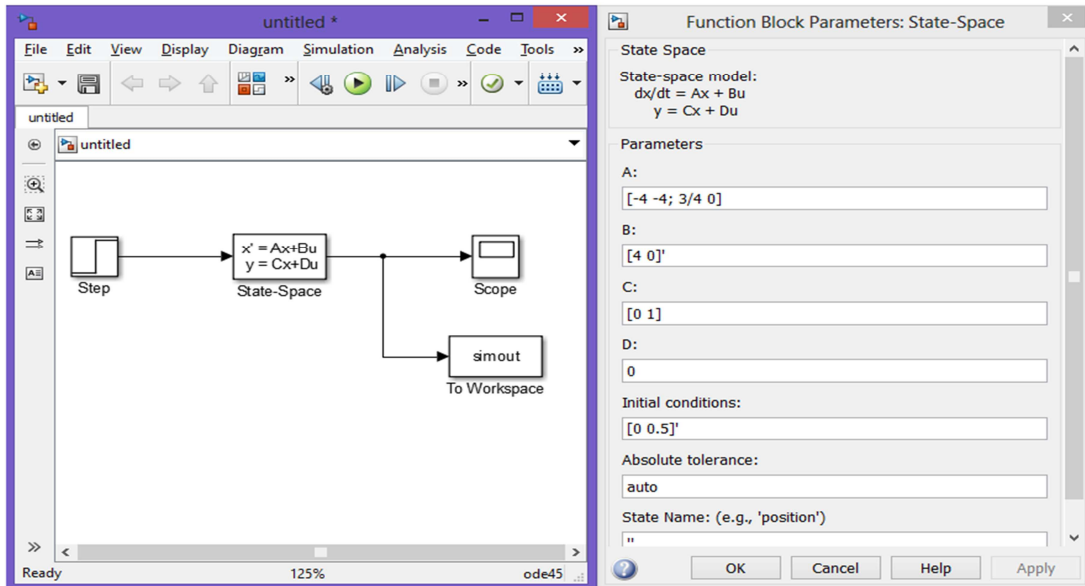


Figura 3. 5: Modelado en Simulink mediante el bloque *State-Space*.

Fuente: Autor - MATLAB.

En la figura 3.6 se muestra la misma señal de $v_c(t)$ de la figura 3.4, que al final vemos que son idénticas.

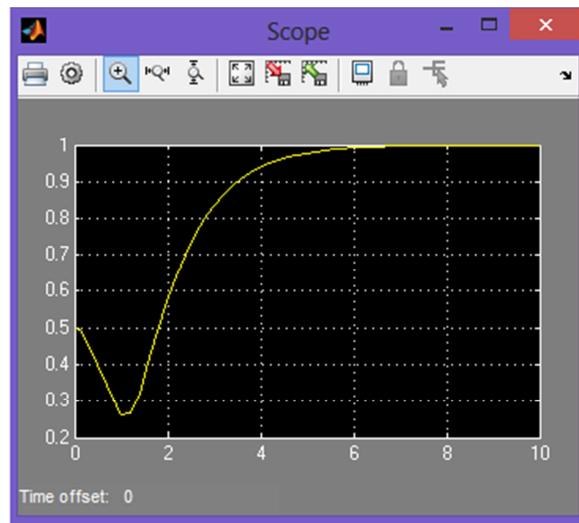


Figura 3. 6: Gráfica similar a la figura 3.4

Fuente: Autor - MATLAB.

Otra manera de resolver y comprobar que la solución es la correcta, procedemos a crear un sub-sistema (*Subsystem*)

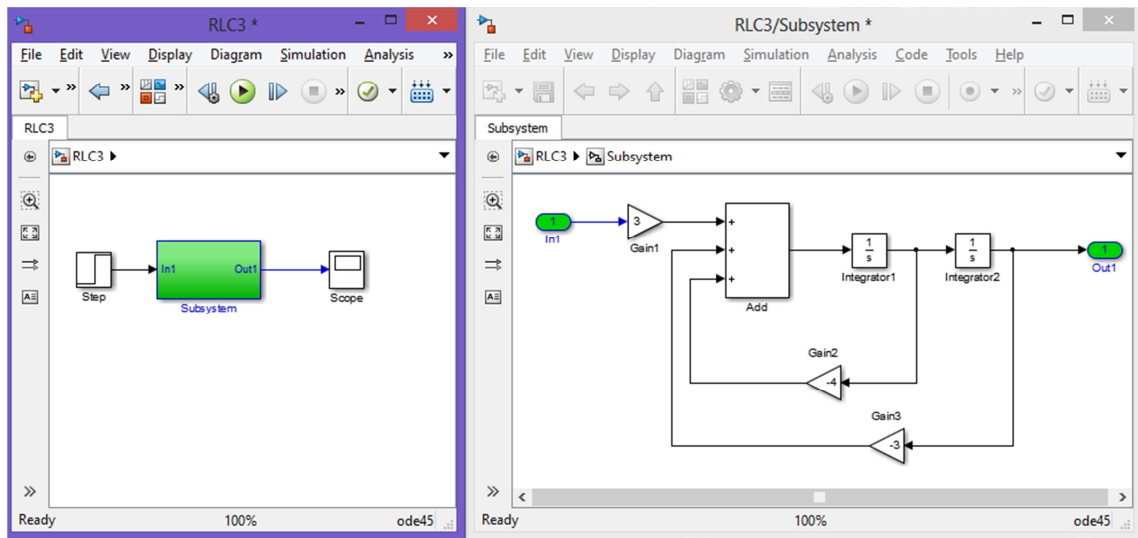


Figura 3. 7: Modelado del sub-sistema para el circuito RLC
Fuente: Autor - MATLAB.

En figura 3.8 se puede observar que sigue siendo la misma salida que las generadas en las figuras 3.4 y 3.6 respectivamente.

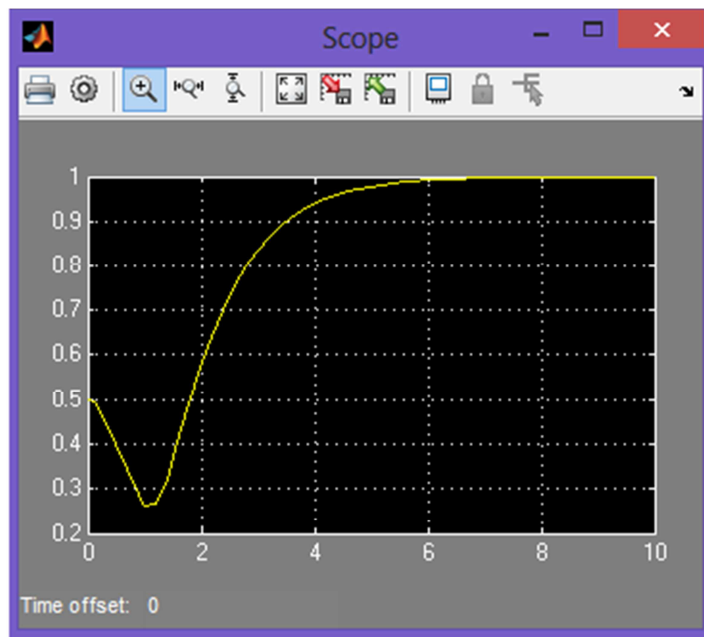


Figura 3. 8: Señal del salida de $V_c(t)$
Fuente: Autor - MATLAB.

3.3. Modelado de Retención de Orden Cero o como reconstructor.

Un circuito de retención de orden cero se comporta como un filtro de paso bajo y por lo tanto puede ser utilizado como un circuito de retención para recuperar la señal de tiempo continuo de la señal muestreada.

En el modelo de la figura 3.9 se muestra la salida de un bloque de retención de orden cero especificada a una baja frecuencia de muestreo, y en la figura 3.10 muestra las formas de onda de entrada y salida.

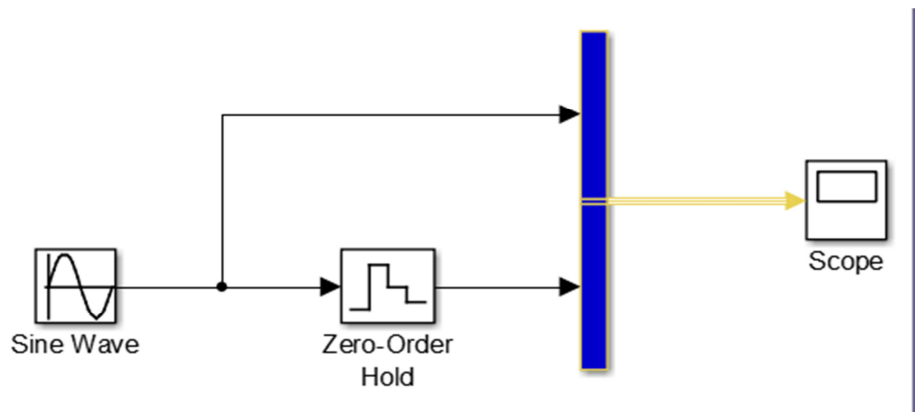


Figura 3. 9: Modelado del Filtro Digital de Orden Cero.
Fuente: Autor - MATLAB.

En la figura 3.10 se muestra la señal de salida de la retención de orden cero, el bloque *Zero-Order Hold* y la salida del bloque *Sine Wave* se conectan mediante un bus de datos (color azul, véase la figura 3.9).

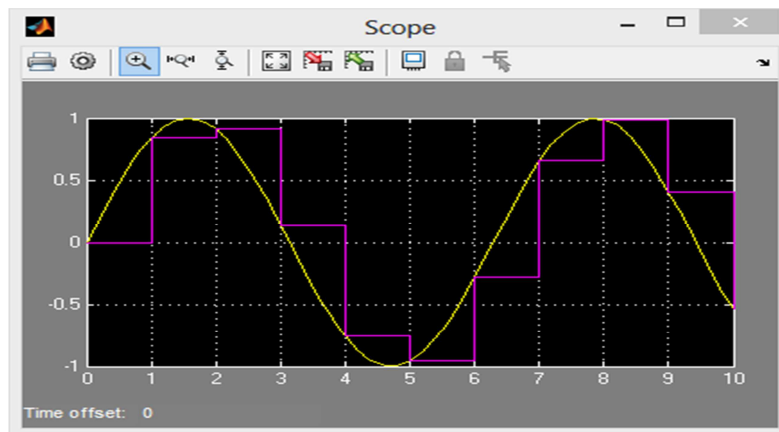


Figura 3. 10: Señal de salida del filtro digital Zero-Hol.
Fuente: Autor - MATLAB.

3.4. Modelado de un Filtro Digital de Tercer Orden.

En esta sección modelamos a un filtro digital de segundo orden mediante simulink, basta con tener la función de transferencia, sin entrar mucho en detalles de como fue el proceso de obtención de dicha función. En la figura 3.11 se muestra el diagrama de bloques modelado del filtro digital y en la figura 3.12 la gráfica o representación de salida. La función de transferencia ha modelar es la siguiente:

$$H(z) = \frac{1 + 2.2z^{-1} + 1.85z^{-2} + 0.5z^{-3}}{1 - 0.5z^{-1} + 0.84z^{-2} + 0.09z^{-3}}$$

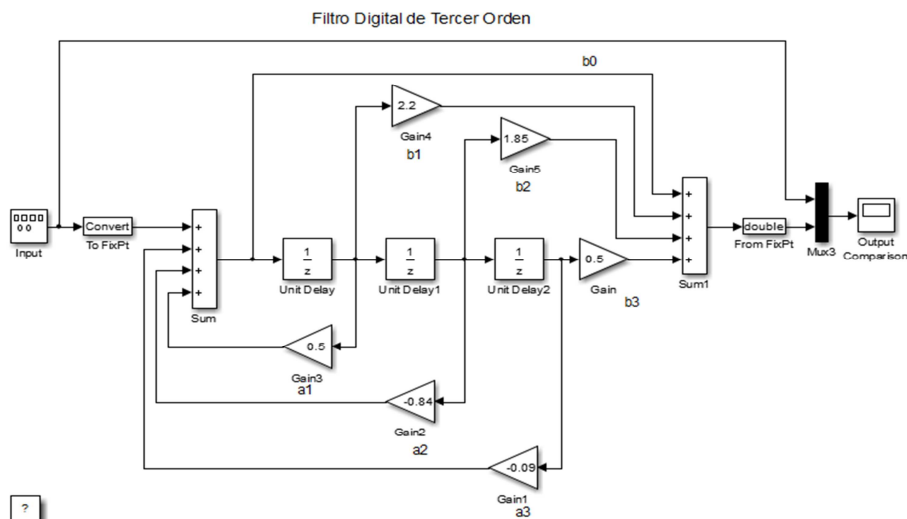


Figura 3. 11: Modelado del Filtro Digital de 3er Orden.
Fuente: Autor - MATLAB.

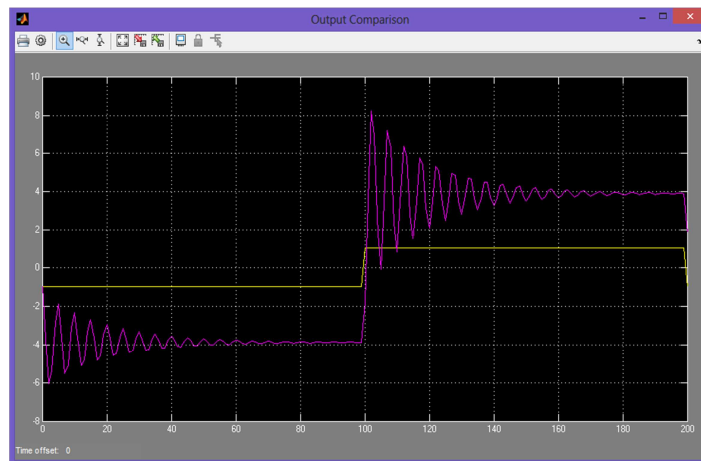


Figura 3. 12: Señal de salida del filtro digital de 3er orden.
Fuente: Autor - MATLAB.

3.5. Modelado de un Contador Binario.

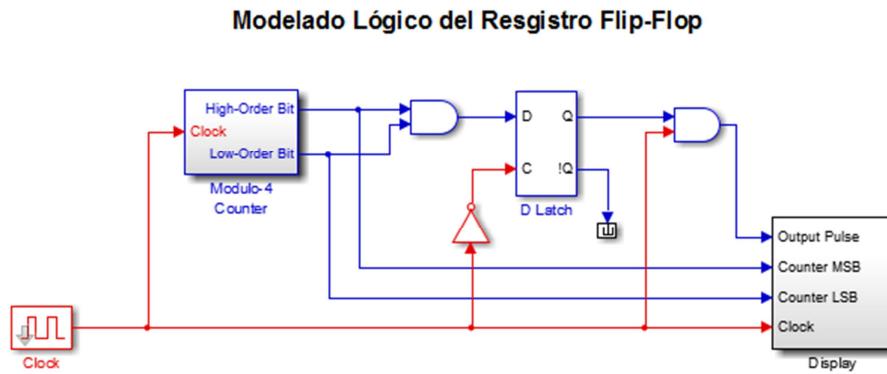


Figura 3. 13: Modelado de un registro Flip-Flop.
Fuente: Autor - MATLAB.

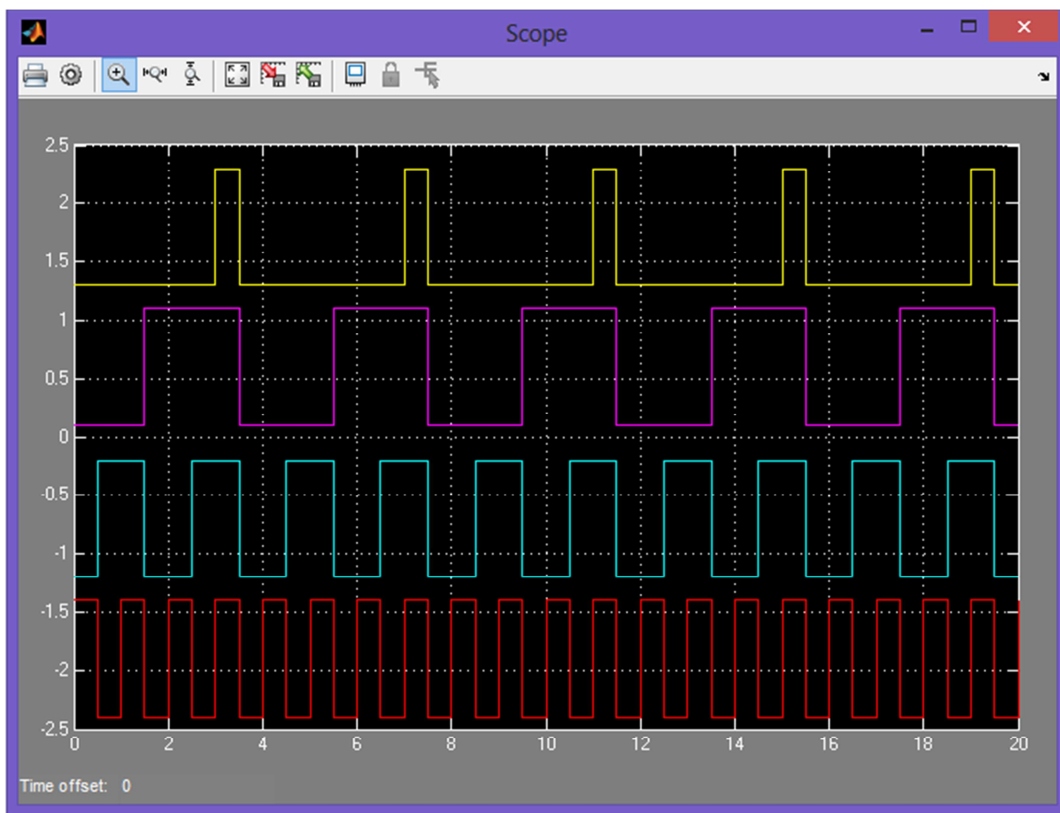


Figura 3. 14: Señal de salida del registro Flip-Flop.
Fuente: Autor - MATLAB.

CAPÍTULO 4: SIMULACIONES DE MODULACIÓN DIGITAL.

4.1. Simulación de un Canal mediante Modulación BPSK.

Se procederá a crear en Simulink un Canal Simétrico Binario, que simulará un canal con ruido, siendo esto muy útil para la construcción de modelos de codificación de canal. Para otros tipos de aplicaciones, es posible construir un modelo más realista de un canal, es decir, que se agregamos la modulación BPSK y demodulación BPSK.

Construcción del Modelo BPSK.

Desde Command Window de MATLAB, escriba Simulink, posteriormente abrir el Navegador *Simulink Library* e insertar lo siguiente:

- Bloque *Bernoulli Binary Generator*.
- Bloque BPSK modulador de banda base.
- Bloque Canal AWGN.
- Bloque BPSK demodulador de banda base.
- Bloque Error Rate Calculation

El modelo se debe parecer como se muestra en la figura 4.1, que sería la modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK).

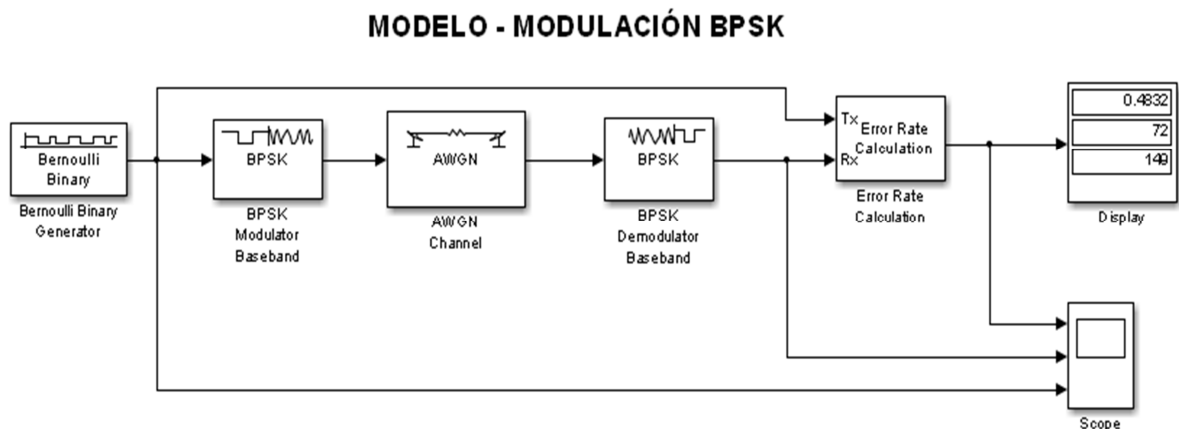


Figura 4. 1: Simulación de modulación BPSK en Simulink.

Fuente: Autor - Simulink.

Configuración de los parámetros del modelo BPSK

Para configurar los parámetros del bloque en el modelo BPSK, haga lo siguiente:

1. Hacer doble clic en el bloque AWGN Channel y establecer $\frac{E_s}{N_0} = 4.2$.
2. Hacer doble clic en el bloque de cálculo de tasa de error y cambiar los parámetros por defecto en el diálogo del bloque:
 - Establecer los datos de salida (*output data*) a Port.
 - Marcar la casilla para simulación (*Stop Simulation*).

En la figura 4.2 se muestra las señales del Generador de Bernoulli, la señal BPSK demodulada y la tasa de error a través del bloque scope.

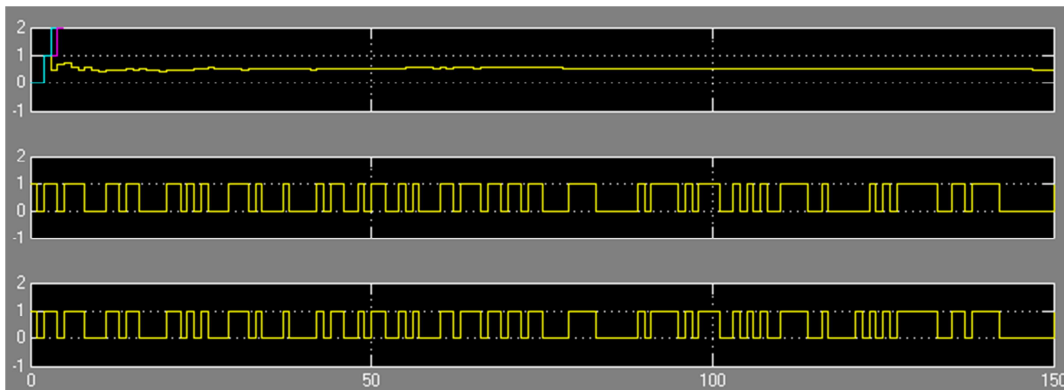


Figura 4. 2: Señales de “Scope” del modulador BPSK.

Fuente: Autor – Simulink.

4.2. Simulación de un Canal mediante Modulación M-PSK.

Similar a la modelación de la sección 4.1, lo que haremos es cambiar el bloque BPSK por el bloque M-PSK.

Construcción del Modelo M-PSK.

Desde Command Window de MATLAB, escriba Simulink, posteriormente abrir el Navegador *Simulink Library* e insertar lo siguiente:

- a. Bloque *Bernoulli Binary Generator*.
- b. Bloque M-PSK modulador por desplazamiento de fase de orden M.
- c. Bloque Canal AWGN.

- d. Bloque M-PSK demodulador por desplazamiento de fase de orden M.
- e. Bloque Error Rate Calculation

El modelo se muestra en la figura 4.3, que sería la modulación por desplazamiento de fase de orden M (M-PSK).

MODELO - MODULACIÓN M-PSK

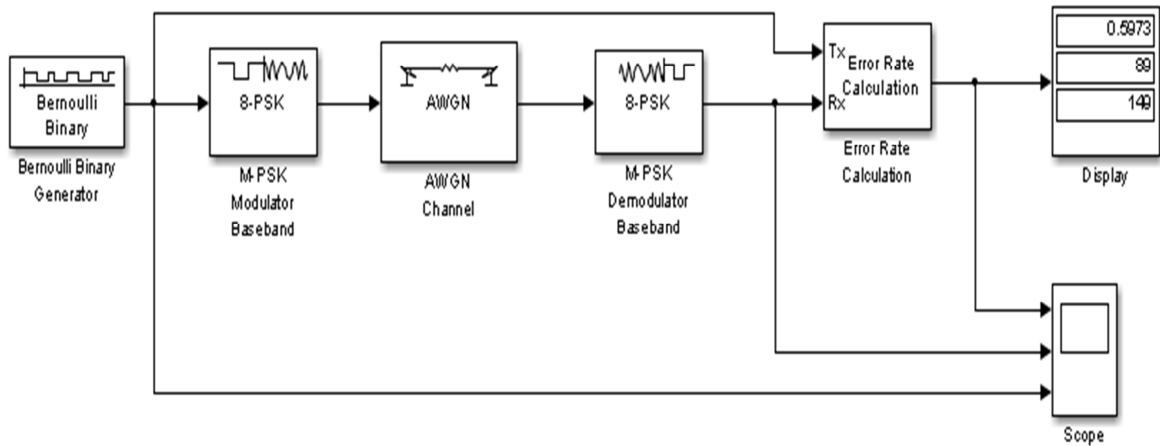


Figura 4. 3: Simulación de modulación M-PSK en Simulink.
Fuente: Autor - Simulink.

En la figura 4.4 se muestra las señales del Generador de Bernoulli, la señal BPSK demodulada y la tasa de error a través del bloque scope.

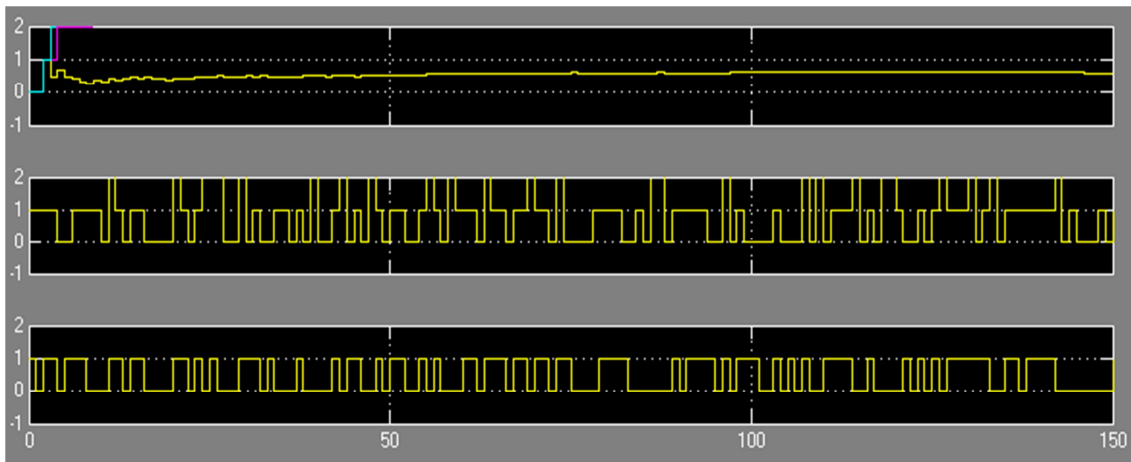


Figura 4. 4: Señales de “Scope” del modulador M-PSK.
Fuente: Autor – Simulink.

4.3. Simulación de un Canal mediante Modulación FSK.

La Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK), es una técnica de modulación estándar en el que una señal digital se modula sobre una portadora sinusoidal cuya frecuencia de cambios entre diferentes valores. El sistema telefónico Bell, utilizó por primera vez esta técnica en su módem Modelo 103. El modelo que se muestra en figura 4.5 es un ejemplo de la representación de banda base de FSK.

Construyendo el Modelo FSK

Siguiendo el mismo proceso realizado en las dos secciones anteriores (4.1 y 4.2), se modificará los bloques necesarios para construir el modelo de FSK. Para esta simulación, es necesario añadir los siguientes bloques al modelo.

1. Bloques M-FSK modulador y M-FSK demodulador de banda base.
2. Bloque AWGN Channel.
3. Bloque *Relational Operator*, este bloque emite un 0 cuando las dos señales están de acuerdo, y un 1 cuando difieren.
4. Bloque *Scope*, permite mostrar la señal transmitida, la señal recibida y la salida del bloque *Relational Operator*. Para poder visualizar estas tres señales, es necesario configurar tres puertos de entrada en el bloque *Scope*, a través de los siguientes pasos:
 - a. Hacer doble clic en el bloque *Scope* para abrir el ámbito de aplicación.
 - b. Haga clic en el botón Parámetros en la barra de herramientas de *Scope*.
 - c. Establecer el Número de ejes en 3.
 - d. Ajustar el intervalo de tiempo en 150.
 - e. Hacer clic en Aceptar.
5. Realizar los siguientes ajustes en los límites de los ejes verticales:
 - a. Hacer clic en el eje vertical en el lado izquierdo superior de *scope*.
 - b. Seleccione propiedades de los ejes, y modifique lo siguiente: en la Y-min el tipo de campo es -1; e Y-max el tipo de campo es 2.
 - c. Haga clic en Aceptar.

6. Bloque de retardo (*Delay*), retrasa la señal transmitida de manera que se puede comparar con precisión con la señal recibida.

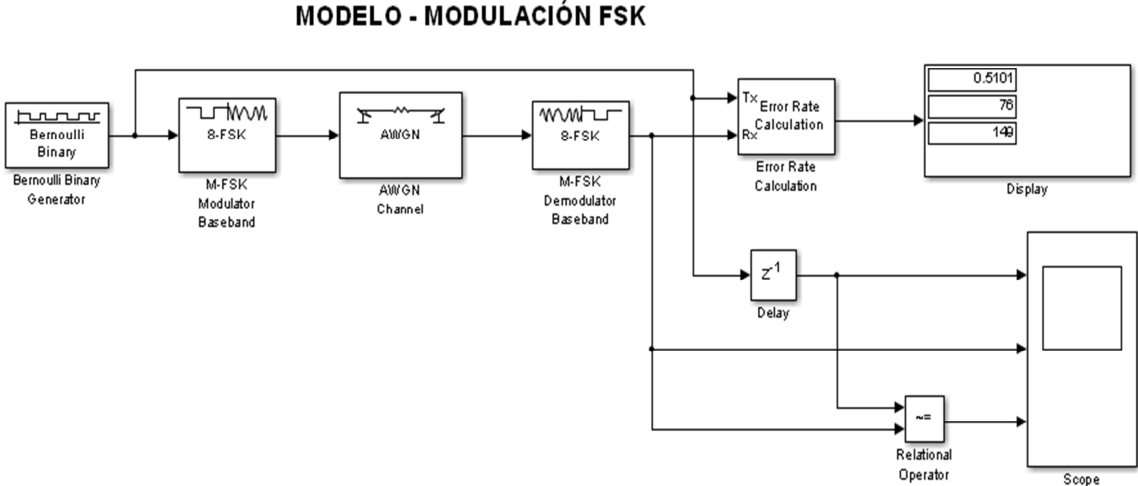


Figura 4. 5: Simulación de modulación FSK en Simulink.
Fuente: Autor - Simulink.

En la figura 4.6 se muestra las señales del Generador de Bernoulli, la señal FSK demodulada y la tasa de error a través del bloque scope.

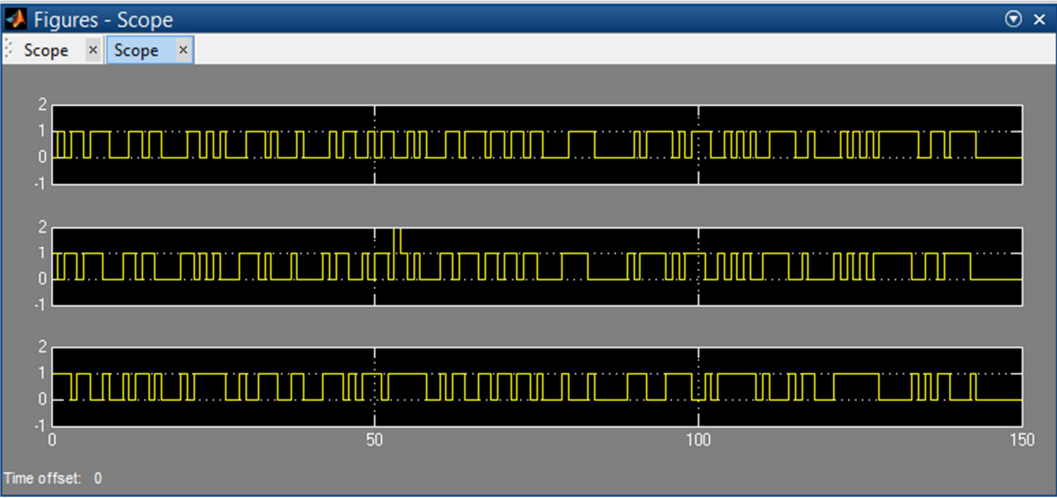


Figura 4. 6: Señales de “Scope” del modulador FSK.
Fuente: Autor – Simulink.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

- La fundamentación teórica de modulaciones digitales descrita en el capítulo 2, fue de gran ayuda durante la revisión de las técnicas de modulación existentes en las comunicaciones electrónicas y que son aplicables también en el procesamiento digital de señales. Aunque muy abstracto el estudio por las diferentes ecuaciones que se plantearon, sería casi imposible de realizar una modulación de manera manual, solo queda como teoría más no como un modelado.
- Mediante el análisis de la plataforma MATLAB se encontró la librería de Simulink, en la cual se pueden desarrollar modelados o simulaciones mediante bloques. MATLAB es programa muy utilizado a nivel de formación Universitaria, Profesional e Investigadores, la misma tiene un sin número de aplicaciones de la vida real, entre ellas las modulaciones digitales. A través de pequeños ejemplos se pudo comprobar su efectividad a la hora de demostrar que lo que se resuelve teóricamente es lo mismo si lo simulamos, aunque con pequeños márgenes de error.
- Debido a los resultados obtenidos a través de las modulaciones digitales, se pudo comprobar que la mejor herramienta para modelar un sistema es Simulink, se puede diseñar o modelar un Sistema de Transmisión y Recepción mediante algún tipo de modulación o para sistemas 4G (LTE+). En fin, es solo cuestión de que existan propuestas de trabajos de titulación para que los alumnos adopten a MATLAB como una herramienta poderosa a la hora de modelar o simular cualquier aplicación o sistema.

5.2. Recomendaciones.

- Gestionar la compra de licencia profesional de MATLAB R2013a, ya que en las versiones estudiantiles no disponen de toda la librería de Simulink, y eso complicaría a los estudiantes y docentes, para el desarrollo de futuros trabajos de titulación y trabajos de proyectos de investigación respectivamente.
- Incluir la enseñanza de MATLAB/SIMULINK como una asignatura en la formación de Ingenieros en Telecomunicaciones, y que sean utilizadas en materias de la profesión, tales como Señales y Sistemas, Procesamiento Digital de Señales, Sistemas de Comunicaciones, Sistemas de Fibra Óptica, Sistemas Satelitales, etc., para esto es recomendable que los docentes sean capacitados en el uso de esta herramienta.
- Colocar las simulaciones de mi trabajo de titulación como ayuda al aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería en Telecomunicaciones, para que entiendan que no es difícil programar mediante bloques en Simulink.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado S., J. A. (2005). *Estudio de las principales técnicas de modulación para el canal de radio*. Tesis de Grado de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. Universidad de las Américas Puebla.

Karris, Steven T. (2008). *Introduction to Simulink with Engineering Applications*. 3era Edición. Orchard Publications.

Xiong, F. (2006). *Digital Modulation Techniques*. Artech House Telecommunications library, Norwood.

Haykin, S. *Sistemas de Comunicaciones*. 3era Edición, John Wiley & Sons.

Sklar, B., Ray, P. K. (2001). *Comunicaciones Digitales, Fundamentos y Aplicaciones*. 2da Edición. Pearson Education.

Schilling, T. (2003). *Principios de Sistemas de Comunicaciones*. 2da Edición. Tata McGraw-Hill, New Delhi.

Proakis, J. G & Salehi, M. (2005). *Contemporary Communication Systems using Matlab*. PWS publishing Company.

Tao, M. (2004). *Principios de Comunicaciones, Capítulo 8: Técnicas de Modulación Digital*. Shanghai Jiao Tong University.