



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TÍTULO:

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DIGITALES DE
COMUNICACIONES EN MATLAB/ SIMULINK**

AUTOR:

Jefferson Alexander Carrión Romero

Previa la obtención del Título

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

MsC. Edwin Fernando Palacios Meléndez

Guayaquil, Ecuador

2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **Jefferson Alexander Carrión Romero** como requerimiento parcial para la obtención del título de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES.

TUTOR

MsC. Edwin Fernando Palacios Meléndez

DIRECTOR DE CARRERA

MsC. Miguel A. Heras Sánchez.

Guayaquil, a los 15 del mes de Febrero del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Jefferson Alexander Carrión Romero**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DIGITALES DE COMUNICACIONES EN MATLAB/ SIMULINK” previa a la obtención del Título de Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado 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 Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 15 del mes de Febrero del año 2015

EL AUTOR

JEFFERSON ALEXANDER CARRIÓN ROMERO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

AUTORIZACIÓN

Yo, **Jefferson Alexander Carrión Romero**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DIGITALES DE COMUNICACIONES EN MATLAB/ SIMULINK”, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, a los 15 del mes de Febrero del año 2015

EL AUTOR

JEFFERSON ALEXANDER CARRIÓN ROMERO

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico primero a Dios, por haberme permitido culminar una meta más de mi vida con esfuerzo y dedicación, bendiciéndome cada paso que doy en mi vida profesional.

A mi querida madre, por estar siempre apoyándome, cuidándome y dándome las fuerzas para seguir adelante en mi vida, a mi hermana, a mis abuelitos y tíos por el cariño y apoyo que siempre me han brindado para que siga superándome cada día y cumplir mis metas.

EL AUTOR

JEFFERSON ALEXANDER CARRIÓN ROMERO

AGRADECIMIENTO

Agradecerle a Dios, por brindarme la oportunidad de vivir, por permitirme disfrutar cada momento de mi vida y guiarme por el camino que ha trazado para mí.

A mi madre Lilia Romero Hernández por darme la mejor educación y enseñarme que todas las cosas hay que valorarlas, trabajarlas y luchar para lograr los objetivos de la vida. Siempre brindándome su apoyo y confianza en todo lo necesario para cumplir mis objetivos.

A mi tutor MsC. Edwin Fernando Palacios quien estuvo siempre brindándome ayuda para realizar mi trabajo, a la Universidad Católica Santiago de Guayaquil por permitirme seguir con mis estudios y formarme como un profesional.

EL AUTOR

JEFFERSON ALEXANDER CARRIÓN ROMERO

Índice General

Índice de Figuras	IX
Resumen	XII
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	13
1.1. Antecedentes.	13
1.2. Justificación del Problema.....	14
1.3. Definición del Problema.....	15
1.4. Objetivos del Problema de Investigación.....	15
1.4.1. Objetivo General.....	16
1.4.2. Objetivos Específicos.	16
1.5. Hipótesis.....	16
1.6. Metodología de Investigación.....	16
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE DE MODULACIONES.....	17
2.1. Señalización de modulación binaria o digital.....	17
2.2. Modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK).	18
2.2.1. Generación BPSK.....	18
2.2.2. Detección BPSK por un receptor de correlación.....	27
2.2.3. Sin ruido.	29
2.2.4. Con ruido.	31
2.3. Detección de máxima probabilidad.	34
2.4. Modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK).....	35
2.4.1. Codificación diferencial.....	36
2.5. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).	37
2.5.1. FSK discontinua.....	38
2.5.2. FSK continua.	38
2.5.3. Detección FSK.....	40
2.6. Modulación por cuadratura de fase (QPSK).....	41

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SIMULACIONES EN MATLAB/SIMULINK	44
3.1. Simulaciones de modulaciones digitales en Matlab.	44
3.1.1. Simulación de ASK en Matlab.	44
3.1.2. Simulación de OOK en Matlab.....	47
3.1.3. Simulación de FSK en Matlab.....	49
3.1.4. Simulación de BPSK en Matlab.	51
3.1.5. Simulación de QPSK en Matlab.....	54
3.2. Simulaciones de modulaciones digitales en Simulink.	57
3.2.1. Simulación de ASK en Simulink.....	57
3.2.2. Simulación de OOK en Simulink.....	61
3.2.3. Simulación de FSK en Simulink.....	62
3.2.4. Simulación de BPSK en Simulink.	65
3.2.5. Simulación de QPSK en Simulink.....	68
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	72
4.1. Conclusiones.....	72
4.2. Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Señal de la modulación ASK – OOK.....	17
Figura 2. 2: Señal de la modulación BPSK.	18
Figura 2. 3: Señal de la modulación FSK.....	18
Figura 2. 4: Diagrama de bloques de la modulación en cuadratura.....	19
Figura 2. 5: Envolvente compleja de banda base para BPSK.	21
Figura 2. 6: Señal BPSK.	22
Figura 2. 7: Diagrama de constelación de BPSK.....	23
Figura 2. 8: Gráficas de señales de fase y constelación de BPSK.	23
Figura 2. 9: Señales de banda base digital mediante FFT de Wiener-Khintchine.	24
Figura 2. 10: Señales de magnitud FFT de banda base digital positiva.....	25
Figura 2. 11: Diagrama de bloques del modulados BPSK.	27
Figura 2. 12: Implementación de hardware de la correlación.	28
Figura 2. 13: Receptor de correlación BPSK.	28
Figura 2. 14: Salida de correlación de BPSK.....	30
Figura 2. 15: Salida del integrador de un receptor de correlación: (izquierda) de poco ruido, y (derecha) de alto ruido.	32
Figura 2. 16: Funciones de probabilidad condicional de densidad.....	33
Figura 2. 17: Señal constelación BPSK.	34
Figura 2. 18: Detección coherente parcial de DPSK.....	36
Figura 2. 19: Sistema de codificación diferencial.....	37
Figura 2. 20: Sistema de fase discontinua FSK.	38
Figura 2. 21: Modulador de frecuencia.	39
Figura 2. 22: Sistema de detección coherente en sincronismo.....	41
Figura 2. 23: Sistema de detección incoherente en sincronismo.....	41
Figura 2. 24: Filtro de atenuación de coseno elevado.	42
Figura 2. 25: Filtrado para lóbulos laterales espectrales.....	42
Figura 2. 26: Diagrama de constelación y de vector en la salida del transmisor.	43

Capítulo 3

Figura 3. 1: Señal de la Modulación ASK.	45
Figura 3. 2: Resultado obtenido de ASK en Matlab.	46
Figura 3. 3: Señal de la Modulación OOK.....	47
Figura 3. 4: Resultado obtenido de OOK en Matlab.	48
Figura 3. 5: Señal de la Modulación FSK.....	49
Figura 3. 6: Resultado obtenido de FSK en Matlab.	51
Figura 3. 7: Señal de la Modulación BPSK.	51
Figura 3. 8: Resultado obtenido de BPSK en Matlab.....	53
Figura 3. 9: Señal de la Modulación QPSK.....	54
Figura 3. 10: Resultado obtenido de QPSK en Matlab.	56
Figura 3. 11: Sistema Modulador/Demodulador ASK.	57
Figura 3. 12: Subsistema del modulador ASK.	58
Figura 3. 13: Subsistema ASK MOD.....	58
Figura 3. 14: Señales de Scope 1 del subsistema ASK MOD.....	59
Figura 3. 15: Subsistema del demodulador ASK.	59
Figura 3. 16: Subsistema comparador para el demodulador ASK.	60
Figura 3. 17: Señales de Scope 2 del subsistema demodulador ASK.	60
Figura 3. 18: Señales de datos IN, ASK y OUT.	61
Figura 3. 19: Modulador/Demodulador ASK.	61
Figura 3. 20: Señales de datos IN, ASK-OOK y OUT.	62
Figura 3. 21: Modulador/Demodulador FSK.	62
Figura 3. 22: Subsistema FSK MOD.....	63
Figura 3. 23: Subsistema canal del sistema FSK.....	63
Figura 3. 24: Subsistema FSK DEM.	64
Figura 3. 25: Subsistema regenerador.....	64
Figura 3. 26: Señales de datos IN, FSK y OUT.	64
Figura 3. 27: Modulador/Demodulador BPSK.....	65
Figura 3. 28: Subsistema modulador BPSK.....	65
Figura 3. 29: Señales obtenidas del subsistema modulador BPSK.	66
Figura 3. 30: Subsistema demodulador BPSK.....	67
Figura 3. 31: Señales obtenidas del subsistema demodulador BPSK.	67
Figura 3. 32: Señales de datos IN, BPSK y OUT.....	68
Figura 3. 33: Modulador/Demodulador QPSK.	68

Figura 3. 34: Subsistema modulador QPSK.	69
Figura 3. 35: Señales obtenidas del subsistema modulador QPSK.....	70
Figura 3. 36: Subsistema demodulador QPSK.	70
Figura 3. 37: Señales QPSK, bits pares e impares.....	71

Resumen

El presente trabajo de titulación tiene como finalidad modelar y simular las distintas modulaciones digitales que son utilizados en los sistemas de comunicación como ASK, FSK y PSK mediante programación en Matlab/Simulink como se describe en el capítulo 3. Se obtuvieron buenos resultados de las simulaciones realizadas y se pudo evidenciar el comportamiento que tiene cada tipo de modulación sin necesidad de algún equipo costoso.

Previamente en el capítulo 1, se presentan las generalidades del trabajo de titulación donde describimos los antecedentes, la definición y justificación del problema, los objetivos planteados, hipótesis y la metodología que se utilizara.

En el capítulo 2, se realiza la descripción básica del estado de arte de las modulaciones digitales que serán desarrolladas en el presente trabajo.

En el capítulo 3, se realiza la programación script de MatLab y el diseño en simulink que nos permite evidenciar el proceso de modulación y demodulación digital en los sistemas de comunicaciones.

Finalmente en el capítulo 4, se exponen las conclusiones y recomendaciones del trabajo de titulación.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

1.1. Antecedentes.

Con las modulaciones de frecuencia, amplitud y fase digitales, las señales moduladoras son señales digitales, y se les dio el nombre FSK, ASK y PSK. Por ejemplo, radio FSK ofrece una comunicación estable que es resistente al ruido y que se puede lograr a un costo relativamente bajo, se utiliza a menudo para la radio de baja potencia especificada.

FSK es la modulación digital, pero teóricamente es similar a la modulación de frecuencia analógica y la señal de modulación es digital en lugar de analógica. Además, en un entorno normal, el uso de la radio, la onda de recepción sufre fluctuaciones de amplitud y fase debidas a factores de trayectos múltiples, pero el sistema de modulación de frecuencia es resistente a los errores relacionados.

La modulación y demodulación digital de amplitud, incluye ASK y OOK. ASK es sinónimo de Amplitude Shift Keying y OOK es sinónimo de On-Off Keying. Los circuitos de modulación y demodulación de modulación digital de amplitud son sencillos y relativamente baratos, y se utilizan en los sistemas de coste relativamente bajo, en comunicaciones de largo alcance no es necesario. Métodos de demodulación para señales de modulación ASK incluyen la detección síncrona y asíncrona de detección. Sin embargo,

en la mayoría de los casos, la detección asíncrona se utiliza porque es más barato de implementar.

La modulación de fase analógica se usa con menos frecuencia que la modulación de frecuencia, pero la modulación de fase digital se utiliza en muchas radios. Tipos de modulación digital de fase incluyen BPSK, QPSK y 8PSK. BPSK es sinónimo de *Binary Phase Shift Keying*. QPSK es sinónimo de *Quadrature Phase Shift Keying*. La modulación de fase digital tiene una baja tasa de error, pero su inconveniente es que requiere la detección sincrónica para la demodulación, que implica alta tecnología y coste de hardware significativos. Sin embargo, con los recientes avances en la tecnología digital, los circuitos pueden ser fácilmente incorporados en un chip, por lo que resulta ser relativamente barato.

1.2. Justificación del Problema.

A los efectos de nuestra discusión la modulación OOK es el caso especial de la modulación ASK, en ninguna compañía está presente durante la transmisión de un cero. La modulación FSK, se cree comúnmente para obtener mejores resultados en la presencia de señales de interferencia. Sin embargo, generalmente es más difícil y costoso de implementar. La modulación PSK maneja tres tipos de modulación digital que son BPSK, QPSK y 8PSK (este último es una limitación del trabajo de titulación).

En el presente trabajo de titulación se examinarán los tres tipos de modulación ASK (incluyendo OOK), FSK, PSK (incluyendo BPSK y QPSK) mediante el desarrollo de modelos matemáticos para verificar el comportamiento de cada una de las modulaciones digitales ya mencionadas.

1.3. Definición del Problema.

En el repositorio digital de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, reposan tesis y trabajos de titulación que utilizan la plataforma de simulación Matlab/Simulink, en la mayoría aplicaciones en Matlab, otros con Simulink y ningún trabajo de titulación que aborde ambos Matlab/Simulink.

Por esto surge la necesidad de realizar la modelación y simulación de sistemas digitales de comunicaciones en Matlab/Simulink que permita mejorar el conocimiento de los alumnos de ciclos superiores en el modelado de sistemas de comunicaciones que funcionan con las modulaciones digitales propuestas.

1.4. Objetivos del Problema de Investigación.

Una vez que se explicaron los antecedentes, justificación y definición del problema a investigar, se expondrán el objetivo general y los objetivos específicos.

1.4.1. Objetivo General.

Desarrollar el modelado y simulación de sistemas digitales de comunicaciones mediante la programación Script de Matlab y de bloques en Simulink.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Describir el estado del arte de las modulaciones digitales utilizadas en los modernos sistemas de comunicaciones.
- Realizar la programación script en Matlab para las modulaciones digitales propuestas.
- Realizar la programación en bloques en Simulink para las modulaciones digitales propuestas.

1.5. Hipótesis.

La plataforma de simulación Matlab/Simulink nos permite comprobar a través de programación Script y de bloques (simulink) las modulaciones digitales propuestas y a la vez permitirá que se puedan desarrollar futuros trabajos de titulación mediante la modelación de sistemas de telecomunicaciones tales como las comunicaciones ópticas.

1.6. Metodología de Investigación.

El tipo de metodología empleado en el trabajo de titulación, es descriptivo, explicativo y exploratorio con enfoque cuantitativo.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE DE MODULACIONES

2.1. Señalización de modulación binaria o digital.

Para las señales de modulación digital, la señal de modulación $m(t)$ es una señal digital dada por los códigos de línea binarias o multinivel. Las técnicas de señalización más común de pasa banda binaria son descritas a continuación:

- **Modulación digital de amplitud (*On-Off Keying, OOK*)** también llamado modulación por desplazamiento de amplitud (*Amplitude Shift Keying, ASK*), que consiste en introducir (conmutación) una portadora sinusoidal y desactivarse con una señal binaria unipolar, tal como se muestra en la figura 2.1. El código Morse en la transmisión de radio es un ejemplo de esta técnica.

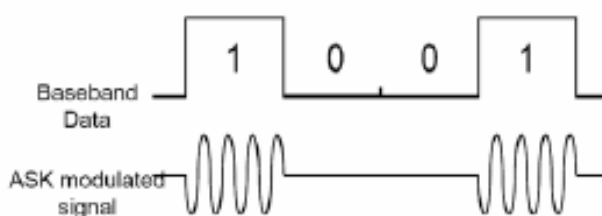


Figura 2. 1: Señal de la modulación ASK – OOK.

Fuente: Carrington, A. (2008).

- **Modulación por desplazamiento de fase binario (*Binary Phase Shift Keying, BPSK*)**, consiste en desplazar la fase de portadora sinusoidal de 0° a 180° con una señal binaria unipolar, tal como se ilustra en la figura 2.2. BPSK es equivalente a la señalización PM con una forma de onda digital.

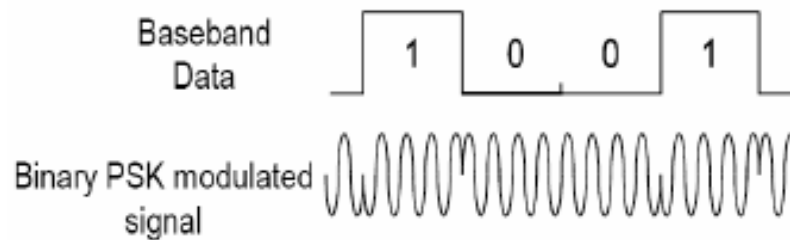


Figura 2. 2: Señal de la modulación BPSK.

Fuente: Carrington, A. (2008).

- **Modulación por desplazamiento de frecuencia (*Frequency Shift Keying, FSK*)** consiste en desplazar la frecuencia de la portadora sinusoidal de una frecuencia (por ejemplo, para enviar un binario 1) a una frecuencia espacial (correspondiente al envío de un 0 binario) de acuerdo con la señal digital de banda base. FSK es idéntica a la modulación de una portadora de FM con una señal digital binaria

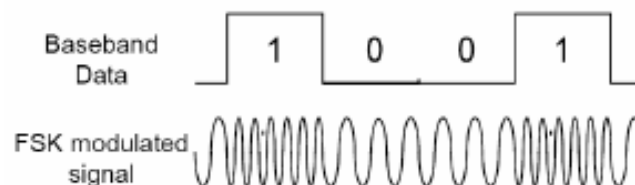


Figura 2. 3: Señal de la modulación FSK.

Fuente: Carrington, A. (2008).

2.2. Modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK).

2.2.1. Generación BPSK.

Una señal de pasa banda PSK modulada es generalmente representado por:

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \text{Re}\{g(t)e^{j\omega_c t}\} = \text{Re}\{A_c e^{j\theta(t)} e^{j\omega_c t}\} = A_c \cos[\omega_c t + \theta(t)] \\
 &= A_c \cos[\omega_c t + D_p m(t)]
 \end{aligned}$$

Donde

$$\theta(t) = D_p m(t)$$

En BPSK $m(t)$ es una señal de datos de banda base polar. Por conveniencia, permitir que $m(t)$ tenga valores de pico de ± 1 y una forma de pulso rectangular. Ahora, se demuestra que BPSK es también una forma de tipo de señalización AM, de hecho de la ecuación anterior obtenemos la expansión:

$$\cos(a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$$

$$s(t) = A_c \cos(\omega_c t) \cos(D_p m(t)) - A_c \sin(\omega_c t) \sin(D_p m(t))$$

$$s(t) = \{A_c \cos[D_p m(t)]\} \cos(\omega_c t) - \{A_c \sin[D_p m(t)]\} \sin(\omega_c t)$$

De la ecuación anterior, podemos ver que corresponde a un esquema de modulación en cuadratura (véase la figura 2.4).

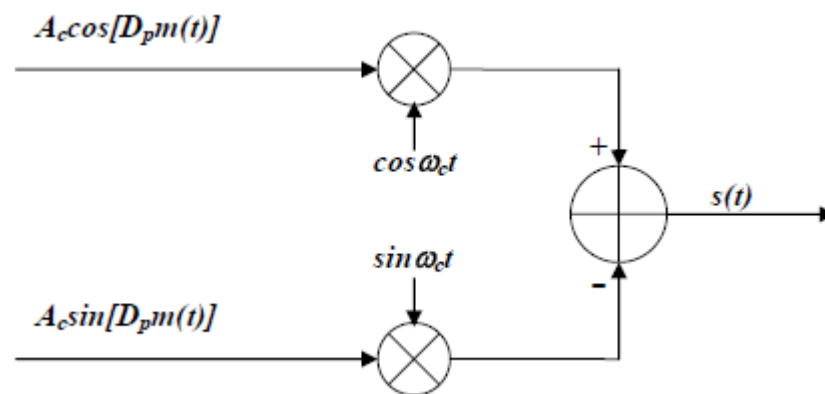


Figura 2. 4: Diagrama de bloques de la modulación en cuadratura.
Fuente: Carrington, A. (2008).

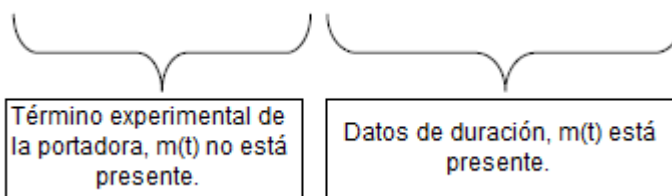
Ahora, recordando que $m(t) = \pm 1$ y que $\cos(x)$ y $\sin(x)$ son funciones par e impar de x obtenemos que:

$$\cos[D_p \cdot (+1)] = \cos[D_p \cdot (-1)] = \cos[D_p]$$

$$\sin[Dp \cdot (+1)] = -\sin[Dp \cdot (-1)]$$

Vemos que la representación de la señal BPSK se reduce a:

$$\begin{aligned} s(t) &= A_c \cos(\omega_c t) \cos(Dp) - A_c \sin(Dp) m(t) \\ &= [A_c \cos(Dp)] \cos(\omega_c t) - [A_c \sin(Dp)] m(t) \sin(\omega_c t) \end{aligned}$$



El nivel de la expresión experimental de la portadora, se establece por el valor de la constante de desviación de fase pico, $\Delta\theta = Dp$.

Para las señales digitales moduladas en ángulo, el índice de modulación digital de h se define por

$$h = \frac{2\Delta\theta}{\pi} = \frac{2D_p}{\pi}$$

Donde $2\Delta\theta = 2D_p$ es la desviación de fase (radianes) máxima de pico a pico durante el tiempo necesario para enviar un símbolo, T_s . Para la señalización binaria, el tiempo de símbolo es igual al tiempo de bit ($T_s = T_b$). El nivel de la portadora experimental, es fijado por el valor de la desviación de pico, que es $\Delta\theta = Dp$ para $m(t) = \pm 1$. El valor de m está determinado por el flujo de bits de datos de entrada convertido en no retorno a cero (NRZ) por ejemplo.

Si D_p es pequeño, el nivel de la portadora experimental tiene una amplitud relativamente grande en comparación con el término de datos; en consecuencia, hay muy poca energía en el plazo de datos (que contiene la información de la fuente). Para maximizar la eficiencia de señalización (de modo que hay una baja probabilidad de error), la potencia en el término de datos necesita ser maximizada.

Esto se logra dejando que $\Delta\theta = Dp = \frac{\pi}{2}$ radianes, lo que corresponde a un índice de modulación digital de $h = 1$. Para este caso óptimo de $h = 1$, la señal BPSK se convierte en:

$$s(t) = -A_c m(t) \sin \omega_c t$$

La envolvente compleja (véase figura 2.5) de banda base para esta señalización BPSK es: $g(t) = A_c m(t)$

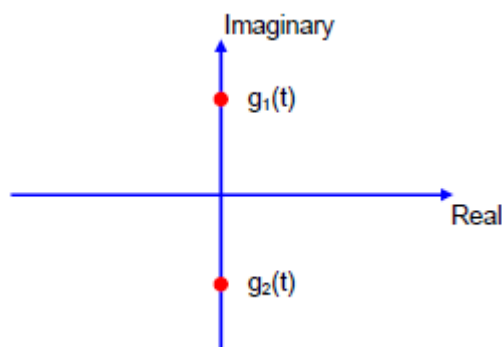


Figura 2. 5: Envolvente compleja de banda base para BPSK.
Fuente: Barnela, M. (2014).

Por lo tanto la señal modulada es:

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \text{Re}[g(t)e^{j\omega_c t}] = \text{Re}[jA_c m(t)e^{j\omega_c t}] \\
 &= \text{Re}[jA_c m(t)\cos\omega_c t - A_c m(t)\sin\omega_c t] \\
 &= -A_c m(t)\sin\omega_c t
 \end{aligned}$$

Para lo cual, si:

$$\begin{aligned}
 s_1(t) &= -A_c \sin\omega_c t & m(t) &= +1 \\
 s_2(t) &= A_c \sin\omega_c t & m(t) &= -1
 \end{aligned}$$

Estas dos últimas expresiones dan como resultado el esquema de modulación BPSK mostrada por la figura 2.6.



Figura 2. 6: Señal BPSK.
Fuente: Carrington, A. (2008).

Para simplificar la explicación, supongamos ahora a 90° gira toda la constelación, entonces podemos obtener la simulación mediante el uso de software WINIQ tal como se muestra en la figura 2.7. A continuación, esto significa que:

$$g(t) = A_c m(t)$$

Consecuentemente,

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \text{Re}[gt(t)e^{j\omega_c t}] = \text{Re}[A_c m(t)e^{j\omega_c t}] \\
 &= \text{Re}[A_c m(t)\cos\omega_c t + jA_c m(t)\sin\omega_c t]
 \end{aligned}$$

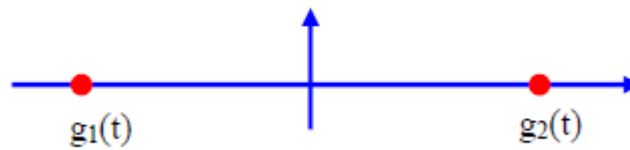


Figura 2. 7: Diagrama de constelación de BPSK.
Fuente: Barnela, M. (2014).

En la figura 2.8 se reportan tanto la fase $i(t) = \pm 1$ y la cuadratura $Q(t)=0$ como componentes de la señal de modulación de banda de base $g(t)$ más el diagrama de constelación.

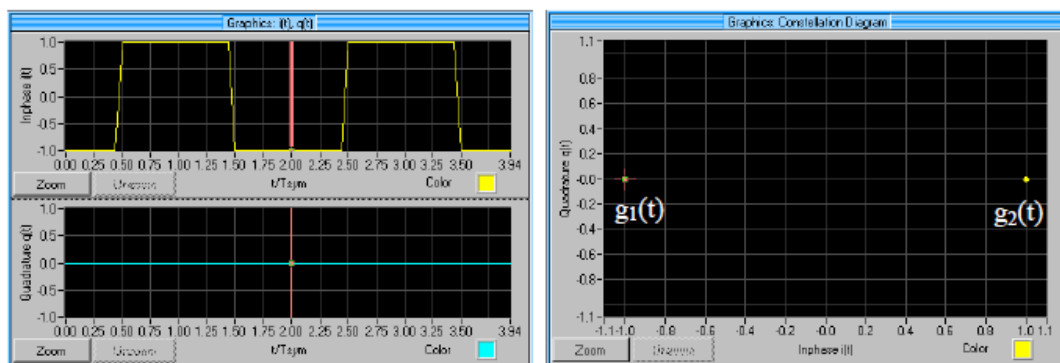


Figura 2. 8: Gráficas de señales de fase y constelación de BPSK.
Fuente: Barnela, M. (2014).

En la figura 2.8, la gráfica de la izquierda representa a $i(t) = \pm 1$ y $q(t) = 0$ y la gráfica de la derecha al diagrama de constelación de banda base de señales $i(t)$ y $q(t)$ de la señal. Cuando la forma de onda de modulación es rectangular y el símbolo de 0,1 son igualmente probables, la densidad espectral de potencia (PSD) de la envolvente compleja de banda base es:

$$P_g(f) = A_c^2 T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2$$

El resultado de la transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform, FFT*) de las señales digitales de pasa banda $s(t)$ se puede obtener mediante el teorema de Wiener-Khintchine:

$$\begin{aligned} PSD[s(t)] &= \frac{1}{4} [P_g(f - f_c) + P_g(f + f_c)] \\ &= \frac{A^2 T_b}{4} \left\{ \left[\frac{\sin(\pi(f - f_c)T_b)}{\pi(f - f_c)T_b} \right]^2 + \left[\frac{\sin(\pi(f + f_c)T_b)}{\pi(f + f_c)T_b} \right]^2 \right\} \\ &= \frac{A^2 T_b}{4} \{ [\sin c(\pi(f - f_c)T_b)]^2 + [\sin c(\pi(f + f_c)T_b)]^2 \} \end{aligned}$$

La figura 2.9 muestra las señales correspondiente al teorema de Wiener-Khintchine.

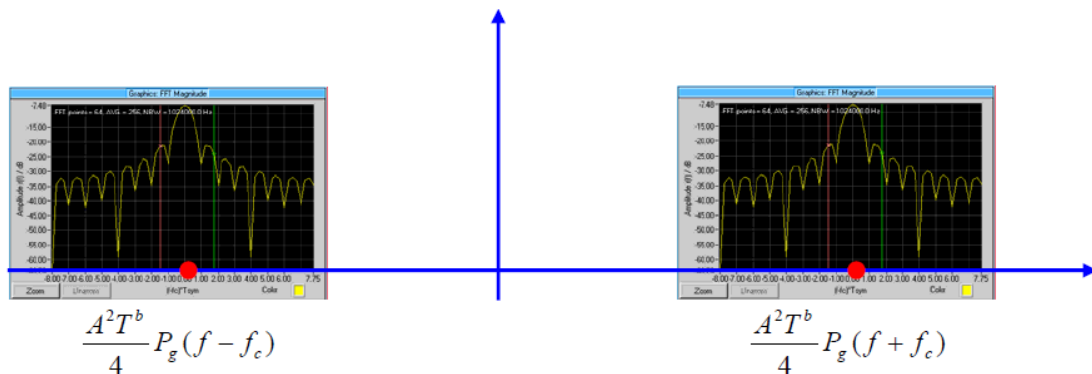


Figura 2. 9: Señales de banda base digital mediante FFT de Wiener-Khintchine.
Fuente: Barnela, M. (2014).

Considerando solamente la frecuencia positiva, podemos tener el reporte de la FFT como se muestra en la figura 2.10. Para tener un modelo BPSK más fácil, podemos eliminar el signo menos por una rotación de 90° a todas las señales $s(t)$:

$$s(t) = -A_c m(t) \sin\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right) = -A_c m(t) [-\cos \omega_c t] = A_c m(t) \cos \omega_c t$$

Los símbolos, $s_1(t)$ y $s_2(t)$ que representa los unos y ceros, respectivamente, son entonces,

$$s_1(t) = +A_c \cos \omega_c t \quad \text{when } m = +1$$

$$s_2(t) = -A_c \cos \omega_c t \quad \text{when } m = -1$$

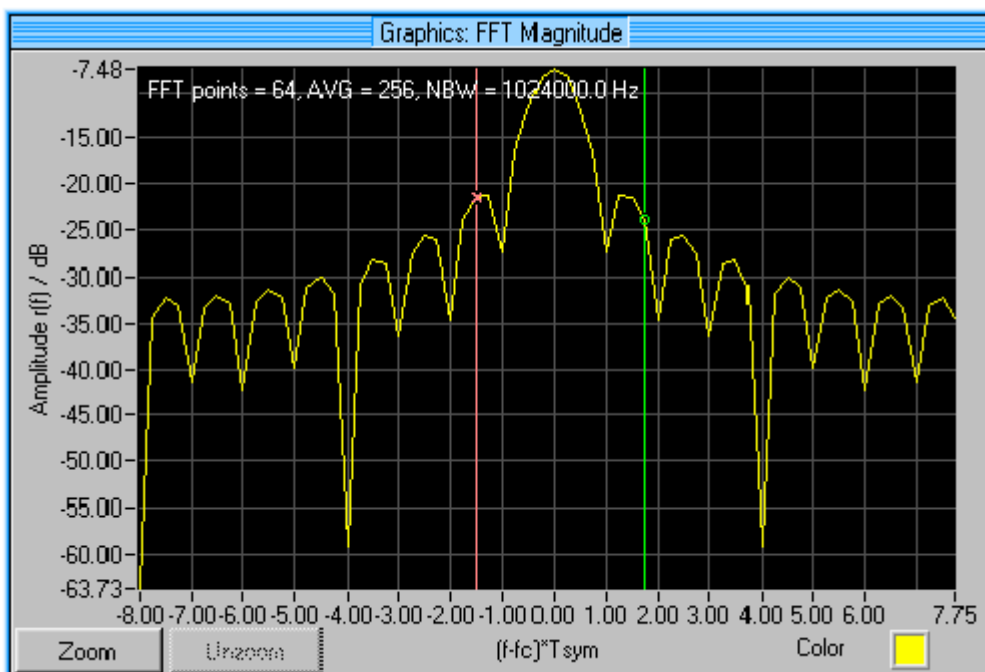


Figura 2. 10: Señales de magnitud FFT de banda base digital positiva.
Fuente: Barnela, M. (2014).

La energía transmitida durante un periodo de bit $T_b = \frac{2\pi}{\omega_b}$ es:

$$\begin{aligned} E_b &\triangleq \int_0^{T_b} |s(t)|^2 dt = \int_0^{T_b} A_c^2 \sin^2(\omega_c t) dt = A_c^2 \int_0^{T_b} \frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega_c t)] dt \\ &= A_c^2 \left[\frac{T_b}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_b}} \cos(2\omega_c t) dt \right] = A_c^2 \frac{T_b}{2} - A_c^2 \frac{1}{2} \left[\frac{\sin(2\omega_c t)}{2\omega_c} \right]_0^{\frac{2\pi}{\omega_b}} \\ &= A_c^2 \frac{T_b}{2} - A_c^2 \frac{1}{2} \left[\frac{\text{sen} \left(2 \omega_c \frac{2\pi}{\omega_b} \right)}{2\omega_c} - 0 \right] \\ &= \frac{A_c^2}{2} T_b \end{aligned}$$

Donde,

$$s(t) = A_c \sin(\omega_c t)$$

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_b}$$

$$\omega_c = n\omega_b \text{ con } n = 1, 2, 3, 4 \dots$$

Por lo tanto la potencia de portadora, C , durante un periodo de T_b es:

$$C = \frac{E_b}{T_b} = \frac{A_c^2}{2} [W]$$

El A_c valor de la portadora está dada por:

$$A_c = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} [V]$$

Sustituyendo este valor de A_c en la ecuación de $s(t)$, obtenemos:

$$s_1(t) = A_c m(t) \cos \omega_c t = +\sqrt{E_b} \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos \omega_c t \text{ cuando } m = +1$$

$$s_2(t) = A_c(t) \cos \omega_c t = -\sqrt{E_b} \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos \omega_c t \text{ cuando } m = -1$$

Esta forma de BPSK se conoce como inversión de fase insertada ya que las dos señales portadoras que representan los unos lógicos y ceros son exactamente 180° fuera de la fase, es decir, el índice de modulación de fase $h = 1$. Una forma más general de BPSK se produce cuando la diferencia de fase entre las dos señales es distinta de 180° . Esto crea un término de

portadora residual que permite el seguimiento de portadora por un bucle de bloqueo de fase (PLL). A menos que se indique lo contrario, BPSK se referirá a modo de 180°.

Un método para generar BPSK se muestra en la figura 2.11. Una secuencia de bits representada por $\pm A_c$ se aplica a un modulador equilibrado, dando lugar a una salida de $\pm A_c \cos(\omega_c t)$ que es un BPSK.

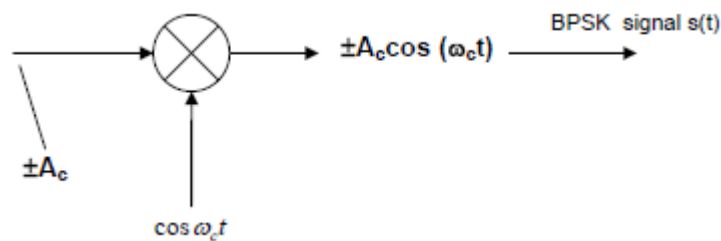


Figura 2. 11: Diagrama de bloques del modulador BPSK.
Fuente: Carrington, A.

2.2.2. Detección BPSK por un receptor de correlación.

Cuando se utiliza la modulación BPSK en el extremo de transmisión, entonces un receptor emplea demodulación coherente, ya que la información está contenida en la fase de la portadora. Un receptor de correlación realiza la demodulación coherente. La correlación, $C(t)$, de dos señales, $r(t)$ y $s(t)$, durante un período, T , se define matemáticamente como:

$$C(t) = \int_0^t r(t)s(t)dt \quad 0 < t < T$$

La correlación se implementa en el hardware por un multiplicador y un integrador, como se muestra en la figura 2.12.

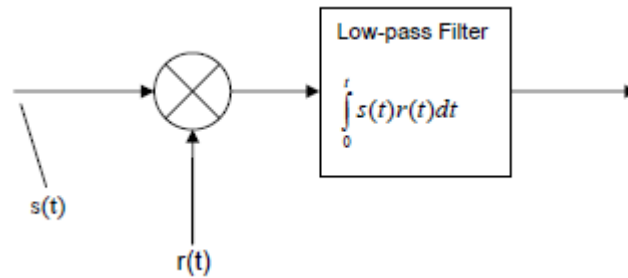


Figura 2. 12: Implementación de hardware de la correlación.
Fuente: Carrington, A. (2008).

Un receptor de correlación BPSK se muestra en la siguiente figura, con cada bloque de hardware de marca con su propósito funcional.

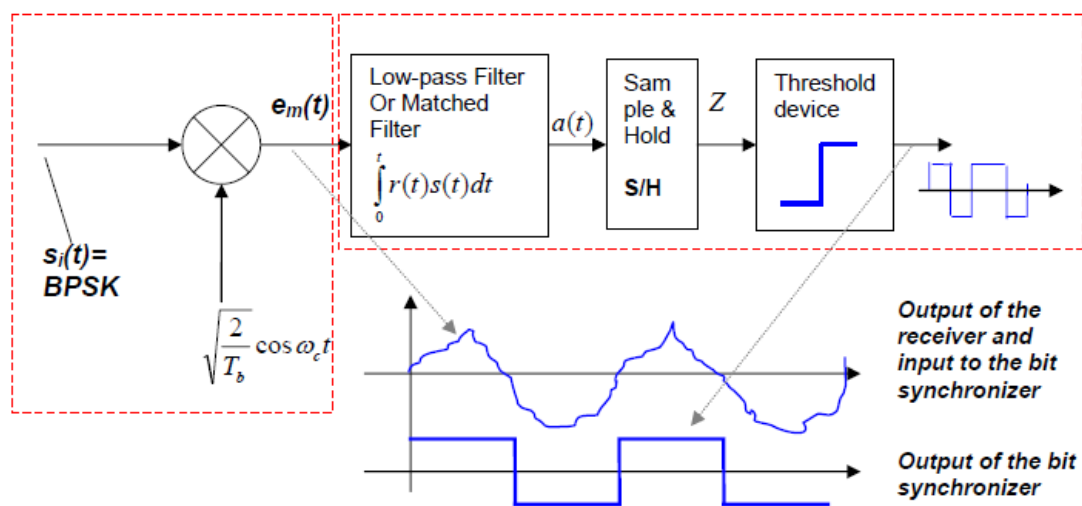


Figura 2. 13: Receptor de correlación BPSK.
Fuente: Barnela, M. (2014).

El receptor de correlación se llama así porque se correlaciona la señal recibida, compuesto por la señal más el ruido, con una réplica de la señal. Para lograr la correlación, es necesario que el receptor sea de fase de enganche de la portadora, como ya se discutió anteriormente. El propósito del receptor de correlación, es reducir el símbolo recibido a un solo punto o estadísticamente será utilizado por el dispositivo de decisión para determinar qué símbolo ha sido transmitido.

En la práctica, el único punto es una tensión fija obtenida por un dispositivo S/H . El dispositivo de decisión, es un comparador de tensión que se ajusta de tal manera que si el punto de tensión está por encima de un cierto nivel, el comparador indica que un "1" es recibido; si el voltaje está por debajo de este nivel, un "0" recibido es indicado, en el caso de que no hay ruido, será tratada primero.

Funcional y conceptualmente, el receptor de correlación se compone de receptor y sincronizador de bits. El receptor de correlación y el filtro adaptativo son equivalentes. Específicamente, el integrador y el dispositivo S/H , en $t = T_b$, son equivalentes al filtro adaptativo, muestreado en la salida.

Puesto que no hay término portador discreta en la señal ideal BPSK, un PLL puede ser utilizado para extraer la referencia de portadora sólo si una portadora experimental de nivel bajo se transmite junto con la señal BPSK de lo contrario, se necesita una detección coherente. Sin embargo, la fase de ambigüedad 180° debe ser resuelta, esto se puede lograr mediante el uso de codificación diferencial en la entrada del transmisor y decodificación diferencial a la salida del receptor.

2.2.3. Sin ruido.

Una réplica exacta de la portadora multiplica los conjuntos de símbolos recibidos, y la salida del multiplicador es aplicada a un integrador. La salida del multiplicador está dada por:

$$\begin{aligned}
 e_m(t) &= \pm\sqrt{E_b} \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos \omega_c t \times \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos \omega_c t \\
 &= \pm\sqrt{E_b} \frac{2}{T_b} \cos^2 \omega_c t = \pm\sqrt{E_b} \frac{2}{T_b} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_c t \right] \\
 &= \pm\sqrt{E_b} \frac{2}{T_b} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_c t \right)
 \end{aligned}$$

La salida del multiplicador, $e_m(t)$ se aplica al integrador. El integrador integrará la expresión de doble frecuencia sobre un número entero de ciclos y por tanto eliminar la expresión. En la práctica, un filtro pasa bajo sigue el integrador para asegurar que la expresión se suprima a la salida. La salida $a(t)$ es:

$$a(t) = \pm\sqrt{E_b} \frac{2}{T_b} \int_0^t \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_c t \right) dt = \pm\sqrt{E_b} \frac{1}{T_b} t$$

La figura 2.13 muestra la salida de la correlación o bien una función de rampa positiva o negativa, conocida como función triangular.

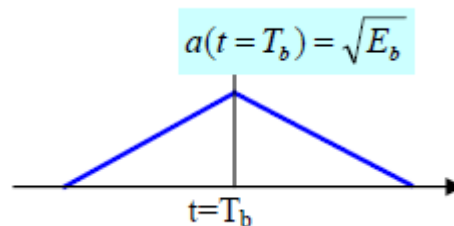


Figura 2. 14: Salida de correlación de BPSK.
Fuente: Barnela, M. (2014).

El dispositivo de S/H se fija generalmente para probar la rampa cada vez que alcanza un valor máximo, que idealmente se produce siempre que

$t = T_b$. El límite superior del integrador también se fija para T_b . Para el caso sin ruido, la salida del integrador $t = T_b$ es:

$$a(t = T_b) = \pm\sqrt{E_b} \frac{2}{T_b} \int_0^t \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_c t \right) dt = \pm\sqrt{E_b} \frac{1}{T_b} T_b = \pm\sqrt{E_b}$$

El dispositivo S/H es sincronizado para muestrear la salida del integrador cada vez que se espera que la tensión sea máxima. Para este caso, la S/H en las muestras de $t = T_b$ y la tensión de salida $\pm\sqrt{E_b}$ se aplica al dispositivo de umbral, que normalmente provoca una forma de onda de patata a la inglesa que representa un “1” si el voltaje es mayor que cero o un “0” si el voltaje es menor que cero.

2.2.4. Con ruido.

El caso en el que la señal recibida está contaminada, se considera ahora con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN). El ruido blanco tiene una densidad espectral de potencia (PSD) dada por $N_0/2$. La señal de banda base modulada recibida en la entrada al receptor correlacional ahora está dada por:

$$s(t) = \pm\sqrt{E_b} \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos \omega_c t + n(t)$$

Donde $n(t)$ es ruido gaussiano blanco. La salida del integrador en $t = T_b$ debido a la parte de señal de $s(t)$ será el mismo que antes, $\pm a$. Para el caso de bajo ruido, la salida del integrador puede tener un aspecto similar

a la rampa se muestra en la figura de abajo a la izquierda; y para el caso de alto ruido, el ramal de la figura de la derecha es indicativo de lo que la salida podría ser similar.

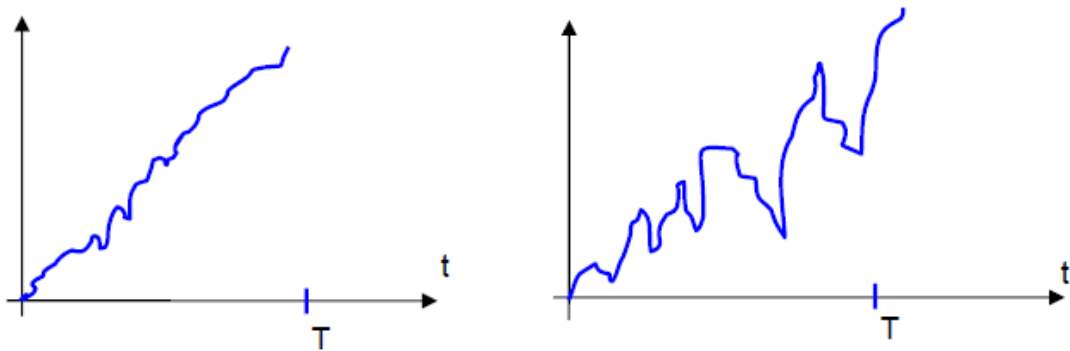


Figura 2. 15: Salida del integrador de un receptor de correlación: (izquierda) de poco ruido, y (derecha) de alto ruido.

Fuente: Carrington, A. (2008).

Tenemos que la tensión muestreada de banda base de salida por el integrador en $t = T$, puede ser representada por z , entonces:

$$z = \pm\sqrt{E_b + N}$$

Se puede demostrar que N es una variable aleatoria gaussiana con cero μ medias y la varianza σ^2 dada por:

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$$

Por lo tanto, la salida de voltaje variable aleatoria, z , saliente del integrador, es también una variable aleatoria gaussiana. Entonces z tendrá una varianza de $\frac{N_0}{2}$ y una media de $a = \pm\sqrt{E_b}$, dependiendo de que se ha recibido el símbolo. Dejando, $a = \sqrt{E_b}$

La función de densidad de probabilidad condicional para z , da una información sobre la correspondencia del símbolo con $\pm a$. Precisamente da una indicación de si un “1” o un “0” han sido transmitidos:

$$p(z|+a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\sqrt{E_b}}{\sigma}\right)^2}$$

$$p(z|-a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+\sqrt{E_b}}{\sigma}\right)^2}$$

El máximo valor para la función $p(z|a)$ es alcanzada para cuando $z = a$. La gráfica de estas dos funciones se muestra en la figura 2.16, esta cifra muestra que la tensión de salida z muestreada caerá en algún lugar a lo largo del eje x . Los puntos $\pm a$ representan el lugar más probable de la densidad para z

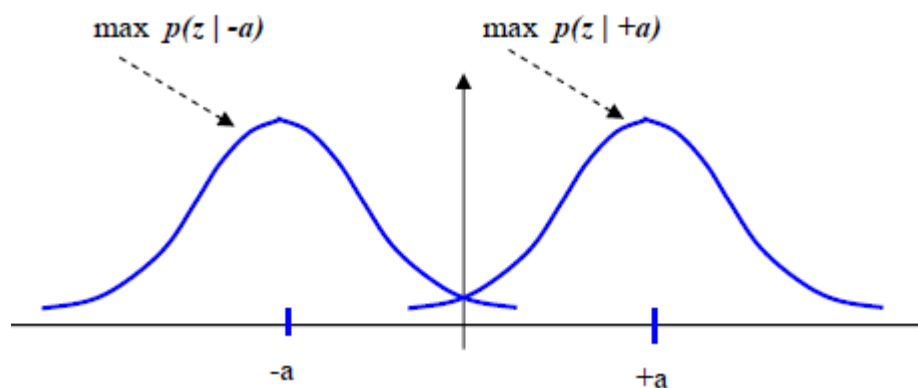


Figura 2. 16: Funciones de probabilidad condicional de densidad.
Fuente: Carrington, A. (2008).

La constelación de la señal de banda base para una BPSK se muestra en la figura 2.17, podemos observar la fluctuación en torno de $\pm a$ puntos debido a la presencia de ruido.

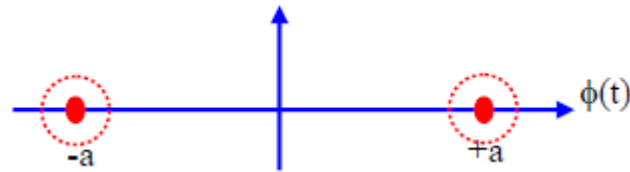


Figura 2. 17: Señal constelación BPSK.
Fuente: Carrington, A. (2008).

2.3. Detección de máxima probabilidad.

Al final de cada periodo de símbolo cuando se muestrea la tensión de salida del integrador, el receptor debe decidir qué símbolo fue enviado en base a la tensión muestreada z . Para la detección de máxima probabilidad o verosimilitud, conceptualmente, la estadística z está sustituida en la función de densidad de probabilidad condicional, que ya se ha visto, y la función con el valor más alto indica que el símbolo tiene la máxima posibilidad de haber sido transmitido. La prueba se lleva a cabo mediante la formación de una relación entre dos densidades, tales como:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{p(+a)}{p(z|\pm a)} = \frac{p(z|\sqrt{E_b})}{p(z|-\sqrt{E_b})} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\sqrt{E_b}}{\sigma}\right)^2}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+\sqrt{E_b}}{\sigma}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left[\frac{1}{2}\left(\frac{z+\sqrt{E_b}}{\sigma}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{z-\sqrt{E_b}}{\sigma}\right)^2\right]} \end{aligned}$$

Suponiendo que cada símbolo tiene la misma probabilidad y el costo de todos los errores es la misma, el punto z recibido es sustituido como variable aleatoria gaussiana. Por lo tanto un valor para:

$\lambda > 1$, se elige el símbolo correspondiente a $+a$;

$\lambda < 1$, se elige el símbolo correspondiente a $-a$.

Fundamentalmente, esta prueba calcula el valor para cada función de densidad de probabilidad condicional en el instante y selecciona la densidad con el valor más grande en ese instante de tiempo.

2.4. Modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK).

Las señales PSK no pueden detectar incoherencias. Sin embargo, una técnica de detección parcialmente coherente puede ser utilizada para extraer la referencia de fase para el intervalo de señalización presente. Este es proporcionado por una versión retardada de la señal producida durante el intervalo de señalización anterior. Esto se ilustra a continuación, donde la codificación diferencial es proporcionada por un bit de retardo y el multiplicador.

Si una señal BPSK (sin ruido) se aplica a la entrada del receptor, la salida del circuito de muestreo y retención, decimos que, $r_o(t_o)$ sería positivo (1 binario) si el bit de datos actual y el bit de datos anterior eran del mismo sentido; mientras que $r_o(t_o)$ sería negativo (0 binario) si los dos bits de datos son diferentes. En consecuencia, si los datos en la señal BPSK se codifican diferencialmente, la secuencia de datos decodificada será recuperada en la salida del receptor.

Esta técnica consiste en transmitir una señal BPSK codificada diferencialmente, conocida como DPSK. En la práctica, DPSK se utiliza a menudo en lugar de BPSK, ya que el receptor DPSK no requiere un circuito

sincronizador de portadora (ver figura 2.18). Un ejemplo es el módem Bell212 (1200 bits/s).

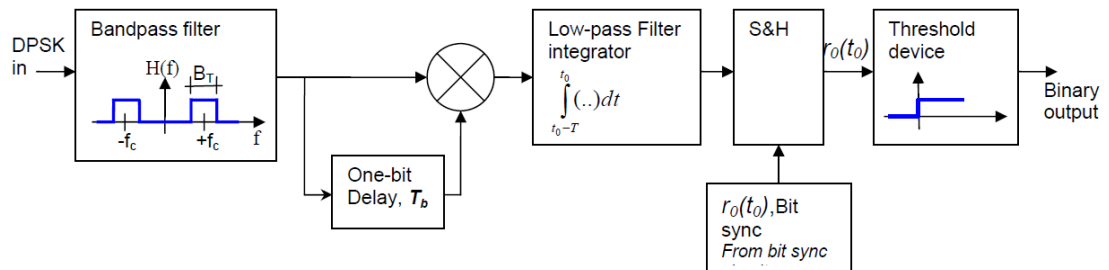


Figura 2. 18: Detección coherente parcial de DPSK.

Fuente: Barnela, M. (2014).

El BER de un receptor DPSK óptimo, es:

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{E_b}{N_0}\right)}$$

2.4.1. Codificación diferencial.

Cuando los datos seriales se pasan a través de muchos circuitos a lo largo de un canal de comunicación, la forma de onda a menudo se invierte involuntariamente (datos complementados). Este resultado puede ocurrir en canales de línea de transmisión de par trenzado simplemente cambiando dos cables a un punto de conexión, cuando se utilice un código de línea polar. (Tener en cuenta que dicha conversión no afecta los datos en una señal bipolar). Para mejorar el problema, a menudo se emplea codificación diferencial. Los datos diferenciales codificados se generan por:

$$e_n = d_n \oplus e_{n-1}$$

La figura 2.19 muestra el diagrama de bloques de un sistema de codificación diferencial.

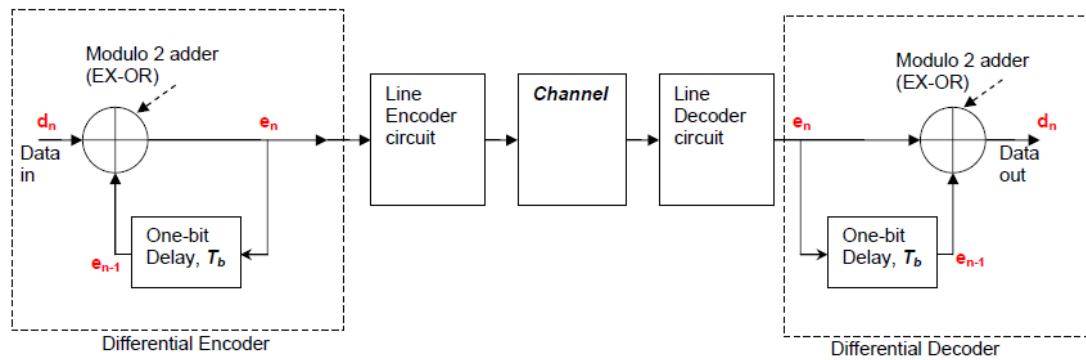


Figura 2. 19: Sistema de codificación diferencial
Fuente: Carrington, A. (2008).

Los datos codificados recibidos se decodifican por:

$$d_n = e_n \oplus e_{n-1}$$

Donde \oplus es una compuerta XOR (OR exclusiva) o una operación de un sumador de módulo 2. Cada dígito en la secuencia codificada se obtiene mediante la comparación del presente bit de entrada con los bits codificados ya pasados. Un "1" binario se codifica si el actual bit de entrada y el pasado codificado son de estado opuesto, y un "0" binario se codifica si el estado es el mismo (operación XOR).

La codificación diferencial presenta una gran ventaja cuando la forma de onda se pasa a través de miles de circuitos en un sistema de comunicación y el sentido positivo de la salida se pierde o cambia de vez en cuando como los cambios en la red.

2.5. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).

La señal FSK puede ser caracterizada como uno de dos tipos diferentes, dependiendo de la generación a utilizarse.

2.5.1. FSK discontinua.

Un solo tipo de FSK se genera mediante la conmutación de la línea de salida del transmisor entre dos osciladores deferentes. Este tipo genera una forma de onda de salida que es discontinua en los tiempos de conmutación, denominado fase discontinua FSK, porque $\theta(t)$ es discontinua en los tiempos de conmutación. Estos pueden ser representado por:

$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \theta(t)] = \begin{cases} A_c \cos[\omega_1 t + \theta_1] & \text{cuando binario 1 se envia} \\ A_c \cos[\omega_2 t + \theta_2] & \text{cuando binario 0 se envia} \end{cases}$$

Y donde θ_1 y θ_2 son las fases de puesta en marcha de los dos osciladores.

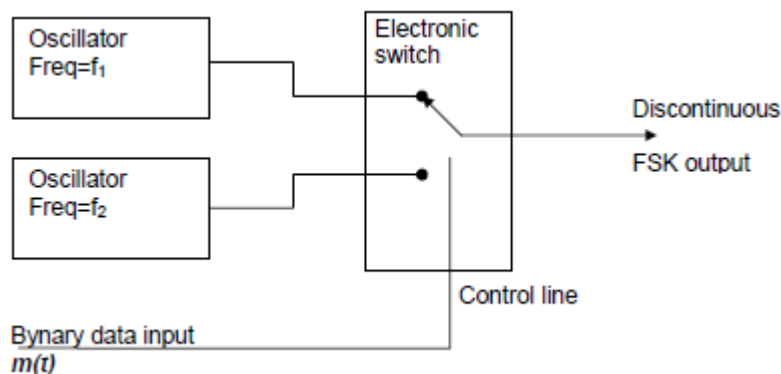


Figura 2. 20: Sistema de fase discontinua FSK.

Fuente: Barnela, M. (2014).

2.5.2. FSK continua.

La señal FSK continua es generada por la alimentación de señales de datos en un modulador de frecuencia, tal como se muestra en la figura 2.21.

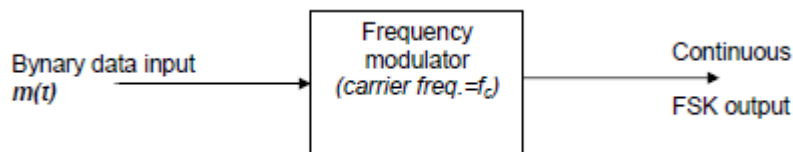


Figura 2. 21: Modulador de frecuencia.
Fuente: Barnela, M. (2014).

La señal FSK es representado por:

$$s(t) = A_c [\omega_c t + \theta(t)] = A_c \cos \left[\omega_c t + D_f \int_{-\infty}^t m(\lambda) d\lambda \right] = \text{Re} [g(t) e^{j\omega_c t}]$$

Donde $m(t)$ es una señal de modulación digital de banda base. Aunque $m(t)$ es discontinua en el tiempo de conmutación, la función de fase $\theta(t)$ es proporcional a la integral de $m(t)$. Utilizando el índice de modulación digital de $h = 2 * \frac{\Delta f}{f_b}$ entonces podemos reescribir la ecuación anterior, como:

$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \theta(t)] = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi h \int_{-\infty}^t m(\lambda) d\lambda \right] = \text{Re} [g(t) e^{j\omega_c t}]$$

Si la forma de onda de entrada de datos en serie es binario, como señal de banda base polar, $m(t) = \pm 1$, la señal FSK resultante se denomina una señal FSK binaria (BFSK). En este caso la fase general, es:

$$\begin{aligned}
 & 2\pi f_c t + 2\pi h \int_{-\infty}^t m(\lambda) d\lambda \\
 y &= 2\pi f_c t + 2\pi h \int_{-\infty}^t m(\lambda) d\lambda = 2\pi f_c t + 2\pi h \int_{-\infty}^t 1 d\lambda = 2\pi f_c t + 2\pi h t \\
 &= 2\pi(f_c + h)t
 \end{aligned}$$

Que es la ecuación de la línea recta, donde el coeficiente angular es $2\pi(f_c + h)$. Por supuesto, una señal de entrada multinivel produciría una señal FSK multinivel. En general, los espectros de señales FSK son difíciles de evaluar ya que la envolvente compleja $g(t)$, es una función no lineal de $m(t)$. El ancho de banda de transmisión B_T aproximado para la señal FSK, está dada por la regla de Carson:

$$B_r = 2(\beta + 1)B = 2 \left[\frac{\Delta f}{B} + 1 \right] B = 2\Delta f + 2B$$

Donde B es el ancho de banda de la señal (por ejemplo onda cuadrada) de modulación de onda. Si el ancho de banda B es igual a la velocidad de bits es decir, $B = R$ a continuación, se convirtió en B_T :

$$B_r = 2(\beta + 1)B = 2 \left[\frac{\Delta f}{B} + 1 \right] B = 2\Delta f + 2B = 2\Delta f + 2R = 2(\Delta f + R)$$

Utilizando un filtro de premodulación de atenuación elevada progresiva, dado que en una de señalización D binario $D = R$ entonces el ancho de banda de transmisión de la señal FSK se convirtió en:

$$B_r = 2(\beta + 1)B = 2\Delta f + 2 \frac{D(1+r)}{2} = 2\Delta f + 2 \frac{R(1+r)}{2} = 2\Delta f + R(1+r)$$

2.5.3. Detección FSK.

FSK se puede detectar mediante el uso de ya sea una frecuencia (no coherente) detectora o detectores de dos productos (detección coherente). Con el fin de obtener el BER más bajo cuando la señal FSK es corrompido

por AWGN, se requiere una detección coherente con el procesamiento de filtro adaptado y el dispositivo de umbral (comparador).

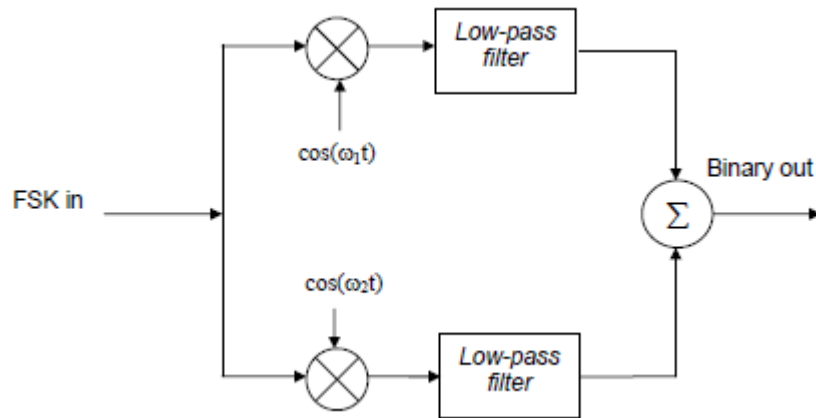


Figura 2. 22: Sistema de detección coherente en sincronismo.
Fuente: Carrington, A. (2008).

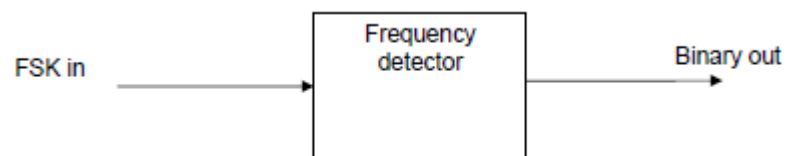


Figura 2. 23: Sistema de detección incoherente en sincronismo.
Fuente: Carrington, A. (2008).

2.6. Modulación por cuadratura de fase (QPSK).

Para pulsos de datos de forma rectangular, la envolvente de la señal QPSK es constante. Es decir, no hay modulación de amplitud (AM) de la señal, incluso durante los tiempos de transmisión cuando hay un cambio de fase de 180° , ya que el valor de datos cambia (por ejemplo, +1 a -1) instantáneamente. A modo de ejemplo, el simulador *winiq*, genera una entrada binaria aleatoria donde podemos observar el diagrama de señal de banda base (I, Q) y el diagrama de impulsos de la salida modulada $(s(t), \varphi(t))$.

Desafortunadamente esto produce AM en la señal resultante QPSK, debido a que la forma de onda de datos filtrados no puede cambiar instantáneamente de un pico a otro cuando se produce una transición de fase de 180° . La figura 2.24 muestra el cambio del espectro, cuando se utiliza un filtro de atenuación de coseno elevado.

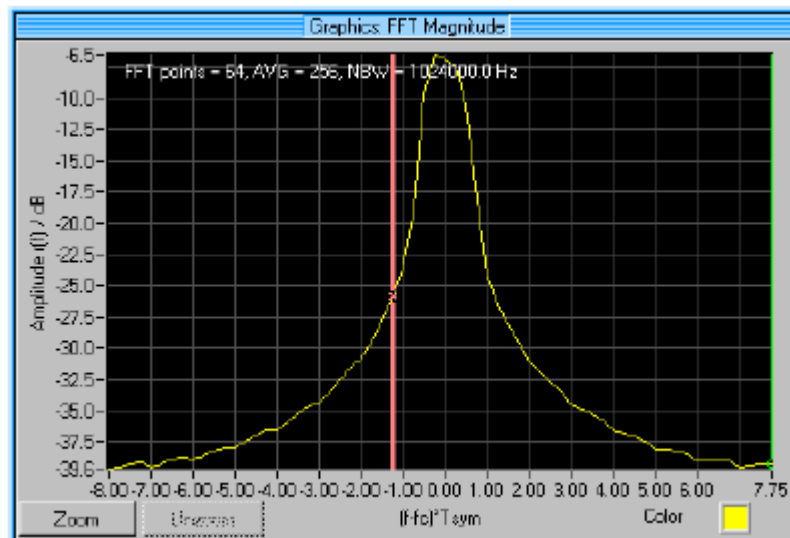


Figura 2. 24: Filtro de atenuación de coseno elevado.
Fuente: Barnela, M. (2014).

Aunque el filtrado resuelve el problema de pobres lóbulos laterales espectrales, se crea otro: AM en la señal QPSK tal como se muestra en la figura 2.25.

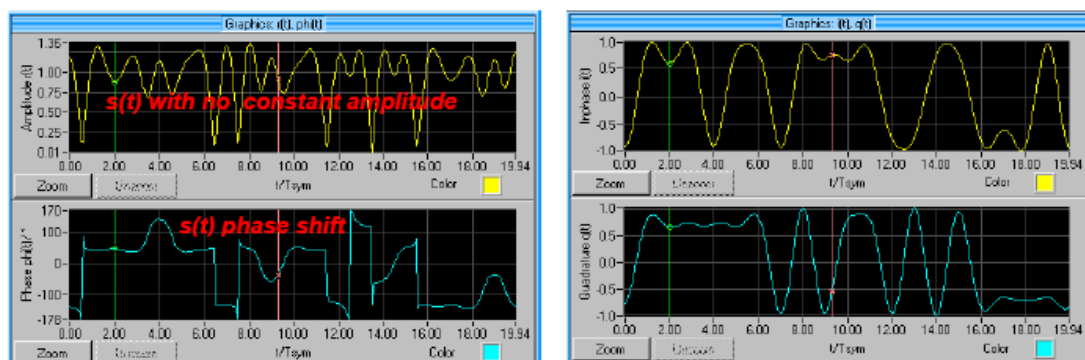


Figura 2. 25: Filtrado para lóbulos laterales espectrales.
Fuente: Barnela, M. (2014).

La figura 2.26 muestra el diagrama de constelación y el diagrama de vector en la salida del transmisor. Podemos observar como la forma del filtrado provoca una dispersión en la posición del punto de constelación alrededor del símbolo de posición esperada.

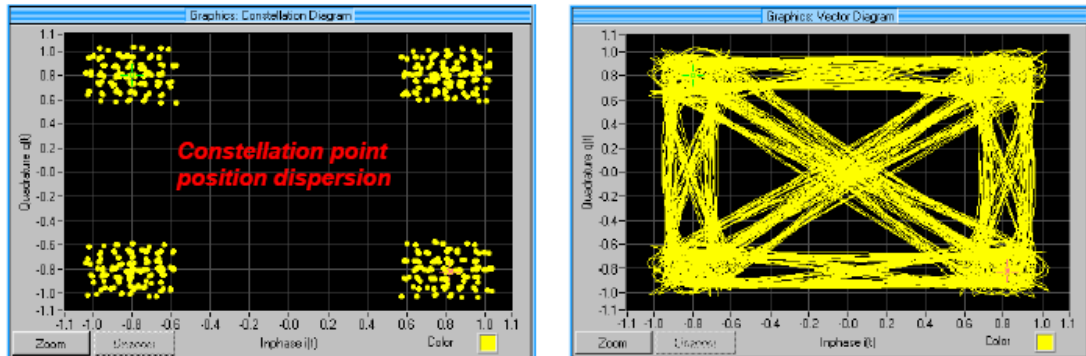


Figura 2. 26: Diagrama de constelación y de vector en la salida del transmisor.

Fuente: Barnela, M. (2014).

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SIMULACIONES EN MATLAB/SIMULINK

En el presente capítulo se desarrolla la programación en Matlab y el modelado sobre Simulink de algunas modulaciones utilizadas en los sistemas digitales de comunicaciones avanzados. El propósito de este capítulo, es demostrar que la herramienta de simulación Matlab/Simulink permite modelar sistemas complejos y difíciles de visualizar sin que se disponga de equipos sofisticados y de alto coste.

3.1. Simulaciones de modulaciones digitales en Matlab.

En esta sección se desarrolla la programación en script de Matlab de modulaciones digitales tales como: modulación digital por desplazamiento de amplitud (ASK), modulación digital por amplitud (OOK), modulación digital de frecuencia (FSK), modulación binaria de fase (BPSK), modulación digital por desplazamiento cuaternario de fase (QPSK).

3.1.1. Simulación de ASK en Matlab.

En la modulación ASK, dos valores binarios están representados por dos amplitudes diferentes de la frecuencia de portadora dependiendo si es un "1" o un "0" tal como se muestra en la figura 3.1.

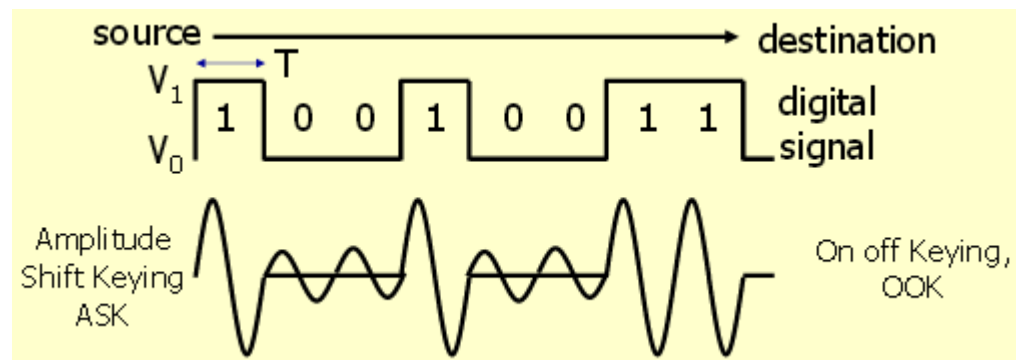


Figura 3. 1: Señal de la Modulación ASK.

Fuente: Carrington, A. (2008).

A continuación se muestran las líneas de programación en script de Matlab que permite simular la modulación digital ASK y demostrar que la gráfica de la figura 3.1 tiene que ser similar a la que se va a obtener después de ejecutar la simulación.

```
function askd(g,f)
%Modulación ASK
%Example:
%Autor: Jefferson Carrión
if nargin > 2
    error('Demasiados argumentos de entrada')
elseif nargin==1
    f=1;
end

if f<1;
    error('La frecuencia debe ser mayor que 1');
end

t=0:2*pi/99:2*pi;
cp=[];sp=[];
mod=[];modl=[];bit=[];

for n=1:length(g);
    if g(n)==0;
        die=ones(1,100);
        se=zeros(1,100);
    else g(n)==1;
        die=2*ones(1,100);
        se=ones(1,100);
    end
end
```

```

end
c=sin(f*t);
cp=[cp die];
mod=[mod c];
bit=[bit se];
end

ask=cp.*mod;
subplot(2,1,1);plot(bit,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Señal Binaria');
axis([0 100*length(g) -2.5 2.5]);

subplot(2,1,2);plot(ask,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Modulación ASK');
axis([0 100*length(g) -2.5 2.5]);

```

Una vez finalizada la programación se procede a ejecutar, y posteriormente se ingresa en Command Window de Matlab una serie de datos binarios. La figura 3.2 muestra la señal binaria ingresada y la modulación ASK.

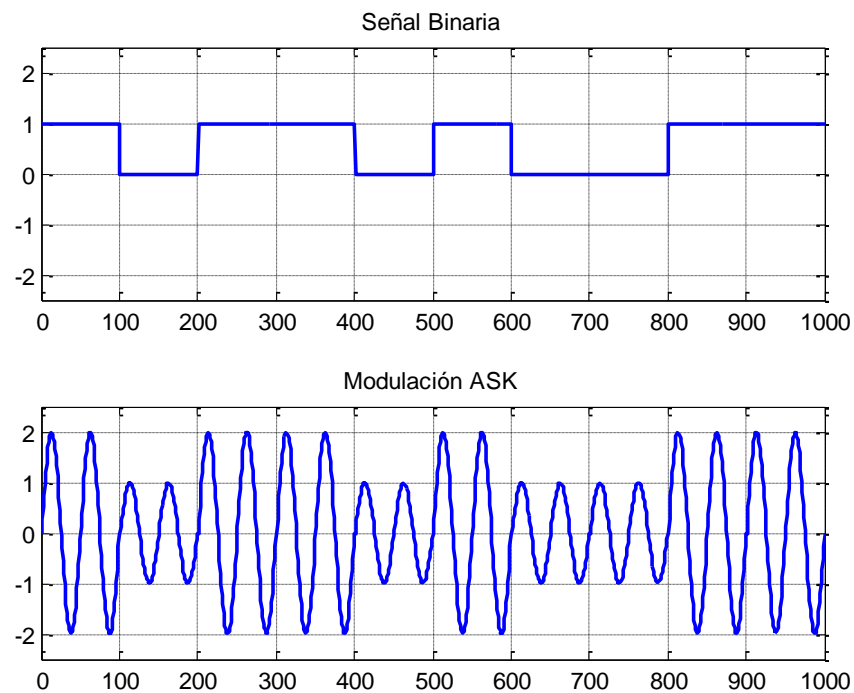


Figura 3. 2: Resultado obtenido de ASK en Matlab.
Elaborado por: El Autor.

3.1.2. Simulación de OOK en Matlab.

La modulación OOK (*On-Off Keying*) es la misma que ASK, con la diferencia que ASK es susceptible a los cambios bruscos de ganancia, mientras que OOK se utiliza comúnmente para transmitir los datos digitales a través de fibras ópticas.

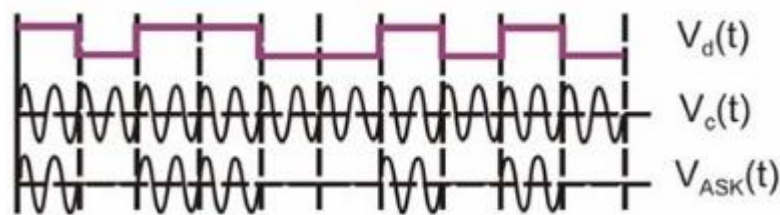


Figura 3. 3: Señal de la Modulación OOK.
Fuente: Carrington, A. (2008).

A continuación mostramos la programación en Matlab para la modulación digital ASK, que permita comprobar que la señal obtenida sea la misma de la figura 3.3. Desde Matlab ingresamos una serie de datos binarios. La figura 3.4 muestra las señales de datos binarios y OOK.

```
function ookd(g, f)
%Modulación OOK
%Autor: Jefferson Carrión
if nargin > 2
    error('Demasiados argumentos de entrada');
elseif nargin==1
    f=1;
end

if f<1;
    error('La frecuencia debe ser mayor que 1');
end

t=0:2*pi/99:2*pi;
cp=[];sp=[];
mod=[];mod1=[];bit=[];
```

```

for n=1:length(g);
    if g(n)==0;
        die=zeros(1,100);    %Modulante
        se=zeros(1,100);    %Señal
    else g(n)==1;
        die=ones(1,100);    %Modulante
        se=ones(1,100);    %Señal
    end
    c=sin(f*t);
    cp=[cp die];
    mod=[mod c];
    bit=[bit se];
end

ook=cp.*mod;
subplot(2,1,1);plot(bit,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Señal Binaria');
axis([0 100*length(g) -2.5 2.5]);

subplot(2,1,2);plot(ook,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Modulación OOK');
axis([0 100*length(g) -2.5 2.5]);

```

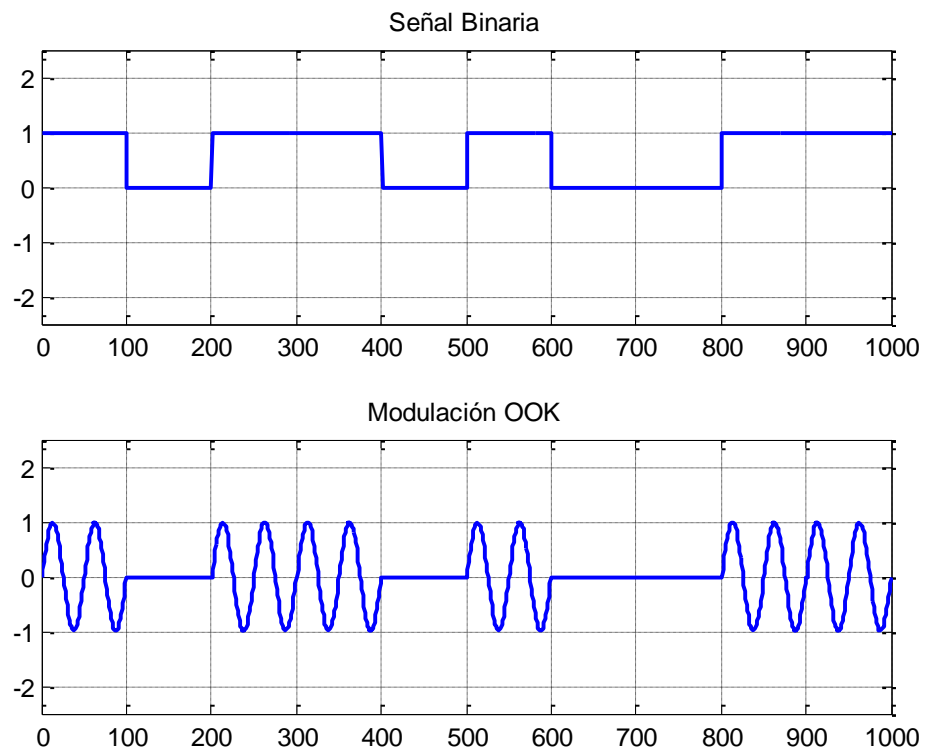


Figura 3. 4: Resultado obtenido de OOK en Matlab.

Elaborado por: El Autor.

3.1.3. Simulación de FSK en Matlab.

La modulación FSK asigna diferentes frecuencias a cada estado de la señal de información. FSK utiliza un modulador para desplazar la frecuencia de la onda portadora proporcionalmente al nivel de la señal digital, que es la señal de información. Sin embargo, una señal digital tiene solamente dos estados, 0 y 1 (véase la figura 3.5) y así una frecuencia alta se le asigna un "1" y una frecuencia baja se le asigna un "0" en relación con el F_c frecuencia central de la portadora.

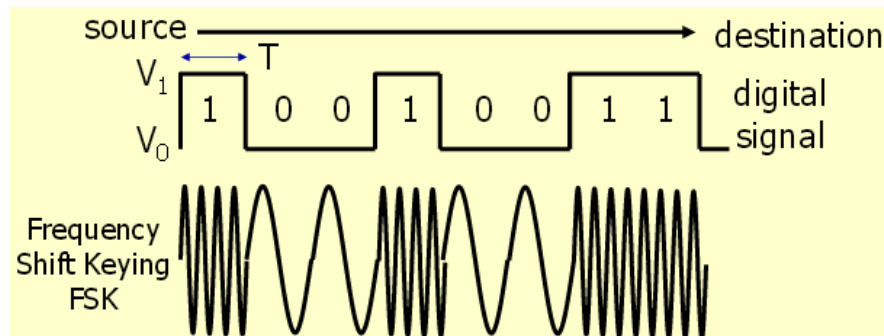


Figura 3. 5: Señal de la Modulación FSK.

Fuente: Carrington, A. (2008).

A continuación mostramos la programación en Matlab para la modulación digital FSK, que permita comprobar que la señal obtenida sea la misma de la figura 3.5.

```
function fskd(g, f0, f1)
%Modulación FSK
%Autor: Jefferson Carrión
if nargin > 3
    error('Demasiados argumentos de entrada')
elseif nargin==1
    f0=1;f1=2;
elseif nargin==2
    f1=2;
end
```

```

val0=ceil(f0)-f0;
val1=ceil(f1)-f1;
if val0 ~=0 || val1 ~=0;
    error('La frecuencia debe ser un número entero');
end

if f0<1 || f1<1;
    error('La frecuencia debe ser mayor que 1');
end

t=0:2*pi/99:2*pi;
cp=[];sp=[];
mod=[];mod1=[];bit=[];

for n=1:length(g);
    if g(n)==0;
        die=ones(1,100);
        c=sin(f0*t);
        se=zeros(1,100);
    else g(n)==1;
        die=ones(1,100);
        c=sin(f1*t);
        se=ones(1,100);
    end
    cp=[cp die];
    mod=[mod c];
    bit=[bit se];
end
ask=cp.*mod;
subplot(2,1,1);plot(bit,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Señal Binaria');
axis([0 100*length(g) -2.5 2.5]);

subplot(2,1,2);plot(ask,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Modulación FSK');
axis([0 100*length(g) -2.5 2.5]);

```

Desde Matlab ingresamos una serie de datos binarios. La figura 3.6 muestra las señales de datos binarios y FSK.

A continuación mostramos la programación en Matlab para la modulación digital BPSK, que permita comprobar que la señal obtenida sea la misma de la figura 3.7.

```
function bpskd(g,f)
%Modulación BPSK
%Autor: Jefferson Carrión
if nargin > 2
    error('Demasiados argumentos de entrada');
elseif nargin==1
    f=1;
end

if f<1;
    error('La frecuencia debe ser mayor que 1');
end

t=0:2*pi/99:2*pi;
cp=[];sp=[];
mod=[];modl=[];bit=[];

for n=1:length(g);
    if g(n)==0;
        die=-ones(1,100); %Modulante
        se=zeros(1,100); %Señal
    else g(n)==1;
        die=ones(1,100); %Modulante
        se=ones(1,100); %Señal
    end
    c=sin(f*t);
    cp=[cp die];
    mod=[mod c];
    bit=[bit se];
end
```

```

bpsk=cp.*mod;
subplot(2,1,1);plot(bit,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Señal Binaria');
axis([0 100*length(g) -2.5 2.5]);

subplot(2,1,2);plot(bpsk,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Modulación BPSK');
axis([0 100*length(g) -2.5 2.5]);

```

Desde Matlab ingresamos una serie de datos binarios. La figura 3.6 muestra las señales de datos binarios y BPSK. Las dos fases que están separados por 180° y también puede ser denominado como 2-PSK. En BPSK, una sola portadora se modula mediante el control de su polaridad de acuerdo con la señal de datos binaria a transmitir.

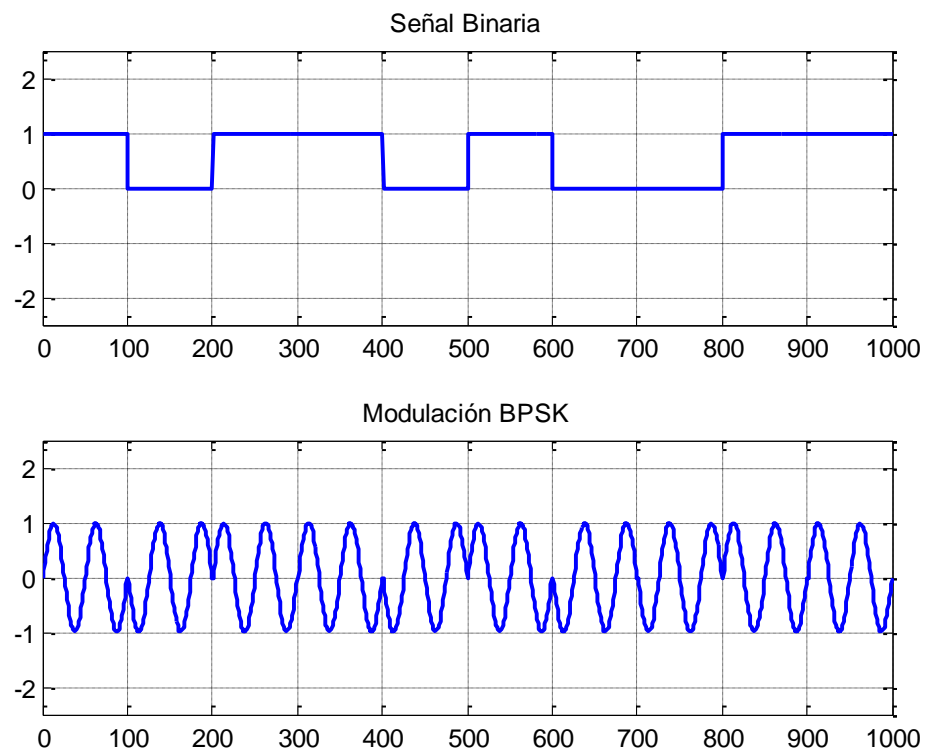


Figura 3. 8: Resultado obtenido de BPSK en Matlab.

Elaborado por: El Autor.

3.1.5. Simulación de QPSK en Matlab.

En el esquema de modulación digital QPSK de la figura 3.9, la división de la fase de la señal portadora diseñada por la atribución de cuatro valores igualmente espaciados para ángulos de fase de 0° , $+90^\circ$, $+180^\circ$ y 270° . QPSK se convierte en una técnica de modulación digital de ancho de banda altamente eficiente. En QPSK los bits de datos a transmitir se combinan en símbolo, cada uno con dos bits de cada símbolo puede tomar uno de los cuatro posibles valores.

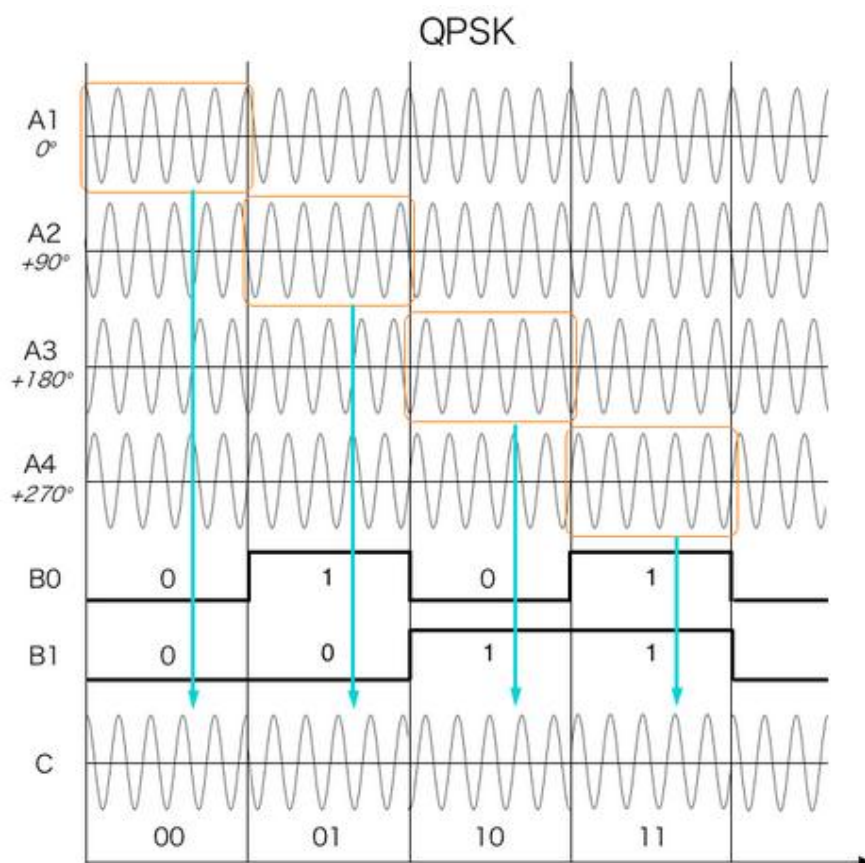


Figura 3. 9: Señal de la Modulación QPSK.

Fuente: Barnela, M. (2014).

Las siguientes líneas de programación permiten modelar la modulación QPSK.

```

function qpskd(g, f)
%Modulación QPSK
%Autor: Jefferson Carrión
if nargin > 2
    error('Demasiados argumentos de entrada');
elseif nargin==1
    f=1;
end

if f<1;
    error('La frecuencia debe ser mayor que 1');
end
%*-*-*-*-*
l=length(g);
r=l/2;
re=ceil(r);
val=re-r;

if val~=0;
    error('Por favor introducir un vector divisible para 2');
end
%*-*-*-*-*

t=0:2*pi/99:2*pi;
cp=[];sp=[];
mod=[];mod1=[];bit=[];
for n=1:2:length(g);
    if g(n)==0 && g(n+1)==1;
        die=sqrt(2)/2*ones(1,100);
        diel=-sqrt(2)/2*ones(1,100);
        se=[zeros(1,50) ones(1,50)];
    elseif g(n)==0 && g(n+1)==0;
        die=-sqrt(2)/2*ones(1,100);
        diel=-sqrt(2)/2*ones(1,100);
        se=[zeros(1,50) zeros(1,50)];
    elseif g(n)==1 && g(n+1)==0;
        die=-sqrt(2)/2*ones(1,100);
        diel=sqrt(2)/2*ones(1,100);
        se=[ones(1,50) zeros(1,50)];
    elseif g(n)==1 && g(n+1)==1;
        die=sqrt(2)/2*ones(1,100);
        diel=sqrt(2)/2*ones(1,100);
        se=[ones(1,50) ones(1,50)];
    end
    c=cos(f*t);
    s=sin(f*t);

```

```

    cp=[cp die];      %Amplitud coseno
    sp=[sp die1];    %Amplitud seno
    mod=[mod c];     %coseno carrier (Q)
    mod1=[mod1 s];  %seno carrier (I)
    bit=[bit se];
end
bpsk=cp.*mod+sp.*mod1;
subplot(2,1,1);plot(bit,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Señal Binaria')
axis([0 50*length(g) -1.5 1.5]);

subplot(2,1,2);plot(bpsk,'LineWidth',1.5);grid on;
title('Modulación QPSK')
axis([0 50*length(g) -1.5 1.5]);

```

Posteriormente, ingresamos una serie de datos binarios que serán modulados digitalmente (véase la figura 3.10) en QPSK.

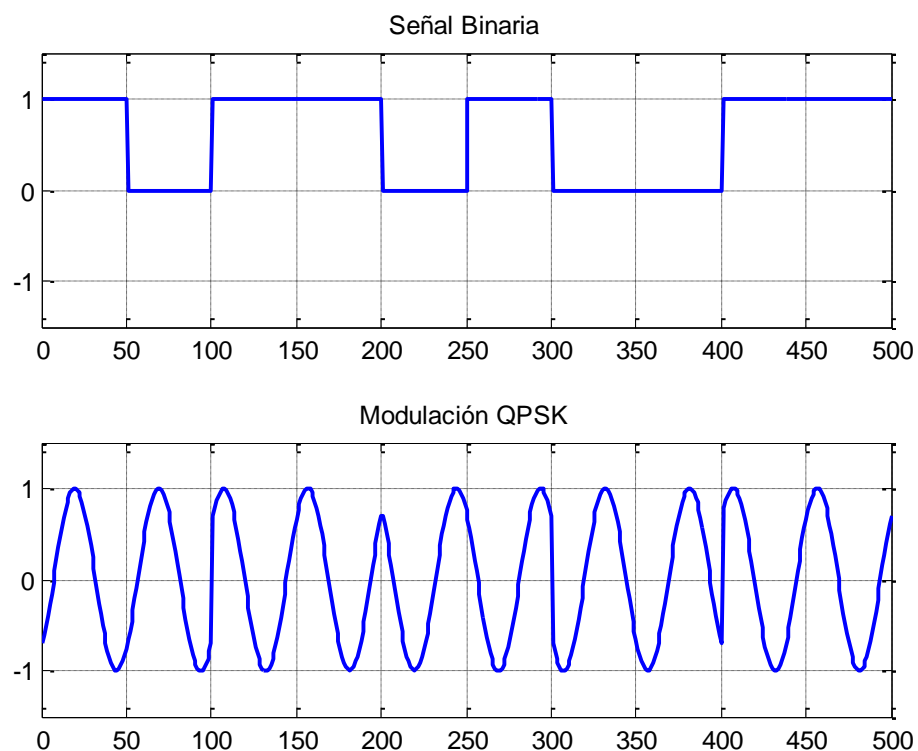


Figura 3. 10: Resultado obtenido de QPSK en Matlab.
Elaborado por: El Autor.

En general se pudo comprobar a través de programación script de Matlab los cinco tipos de modulaciones digitales explicadas teóricamente, y en la siguiente sección estas modulaciones serán realizada en Simulink, que es una programación en diagramas de bloques.

3.2. Simulaciones de modulaciones digitales en Simulink.

En esta sección se desarrolla la programación en bloques sobre Simulink de modulaciones digitales tales como: ASK, OOK, FSK, BPSK, y QPSK. La diferencia entre programación script y diagramas de bloques, es que los diagramas de bloques disponen de librerías y modelos que se utilizan al momento de simular la modulación y demodulación digital.

3.2.1. Simulación de ASK en Simulink.

En la sección 3.1.1 se desarrolló la programación script de la modulación ASK, aquí se muestra la programación en bloques del sistema de modulación y demodulación (como valor agregado) ASK. La figura 3.11 se muestra el diseño del sistema de modulación y demodulación ASK. Consiste en un generador binario de Bernoulli, que posteriormente pasa por la etapa de modulación y demodulación.

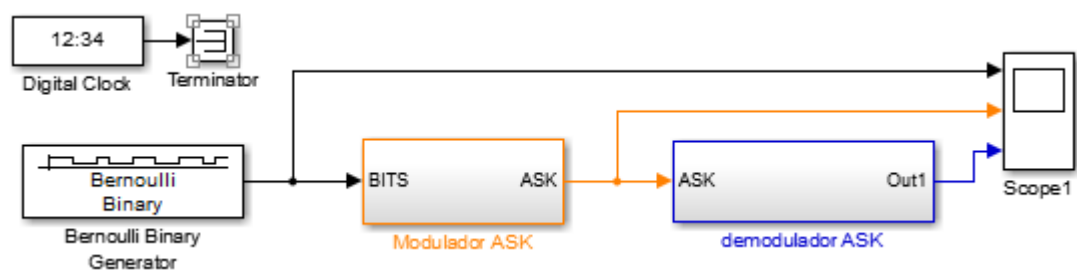


Figura 3. 11: Sistema Modulador/Demodulador ASK.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.12 muestra la estructura interna del modulador ASK (véase figura 3.11), que tiene otro bloque llamado ASK MOD que recibe tres señales que son: bits, y dos señales sinusoidales. En la salida del bloque ASK MOD, la señal es enviada a Scope1 y ASK1 (señal modulada ASK que ingresa al demodulador ASK).

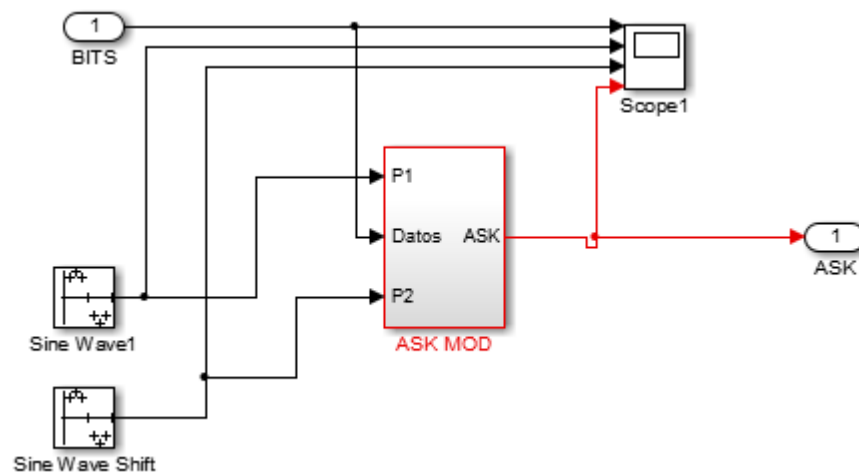


Figura 3. 12: Subsistema del modulador ASK.

Elaborado por: El Autor.

La figura 3.13 muestra el subsistema ASK MOD, que consiste en un switch para seleccionar señales de datos binarios o de las dos portadoras.

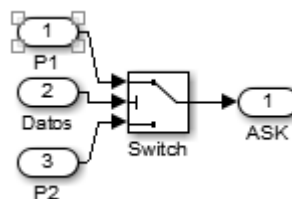


Figura 3. 13: Subsistema ASK MOD.

Elaborado por: El Autor.

La figura 3.14 muestra las señales de Scope1 correspondientes a la señal binaria, señales sinusoidales de las dos portadoras y la señal de modulación ASK.

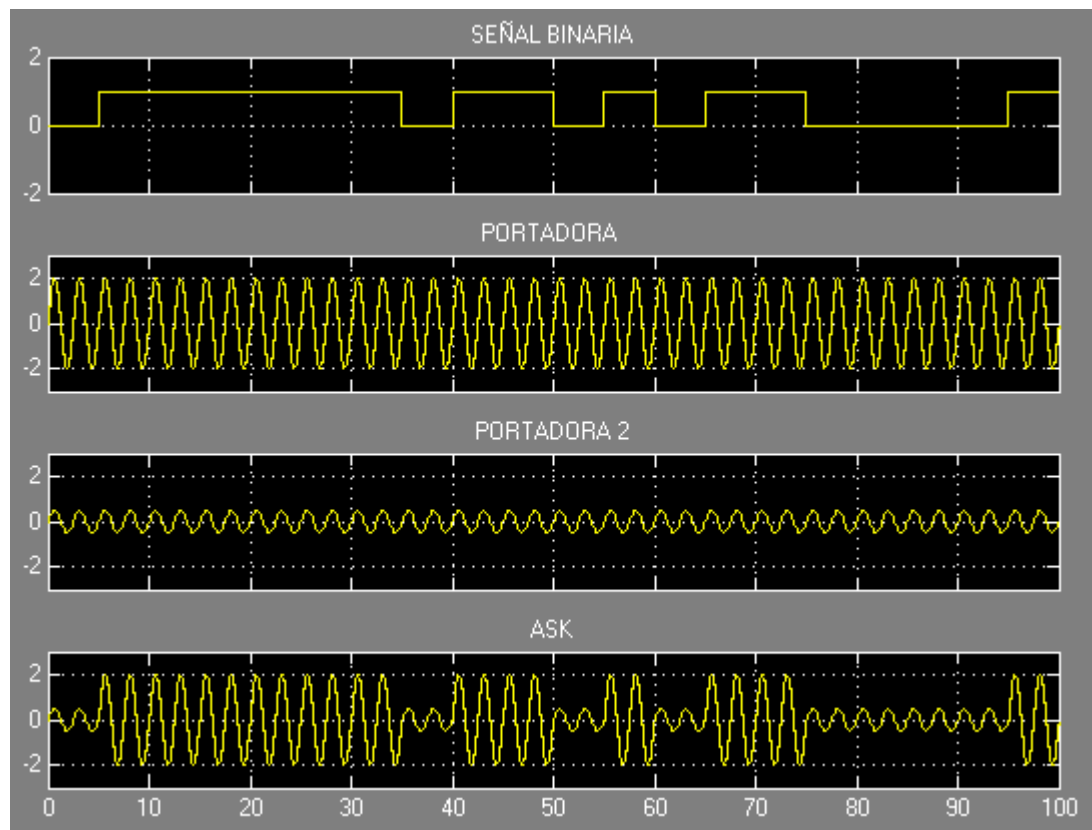


Figura 3. 14: Señales de Scope 1del subsistema ASK MOD.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.15 muestra el subsistema demodulador ASK, que consiste es demodular la señal modulada ASK multiplicándola con la segunda portadora y estas dos pasan por un filtro FIR pasa bajo, finalmente pasa por el subsistema comparador (véase figura 3.16) para enviar la señal de salida “out1”.

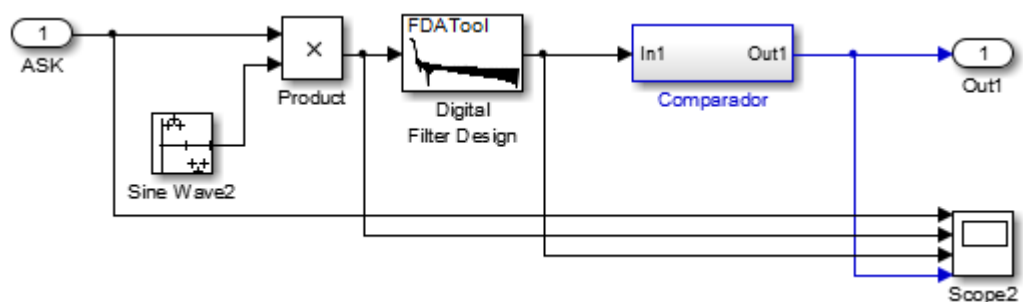


Figura 3. 15: Subsistema del demodulador ASK.
Elaborado por: El Autor.

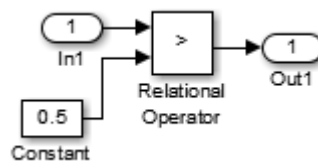


Figura 3. 16: Subsistema comparador para el demodulador ASK.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.17 muestra las señales de Scope2, tales como la señales: modulada ASK, del producto (ASK modulada y portadora 2), del filtro pasa bajo y la señal del comparador.

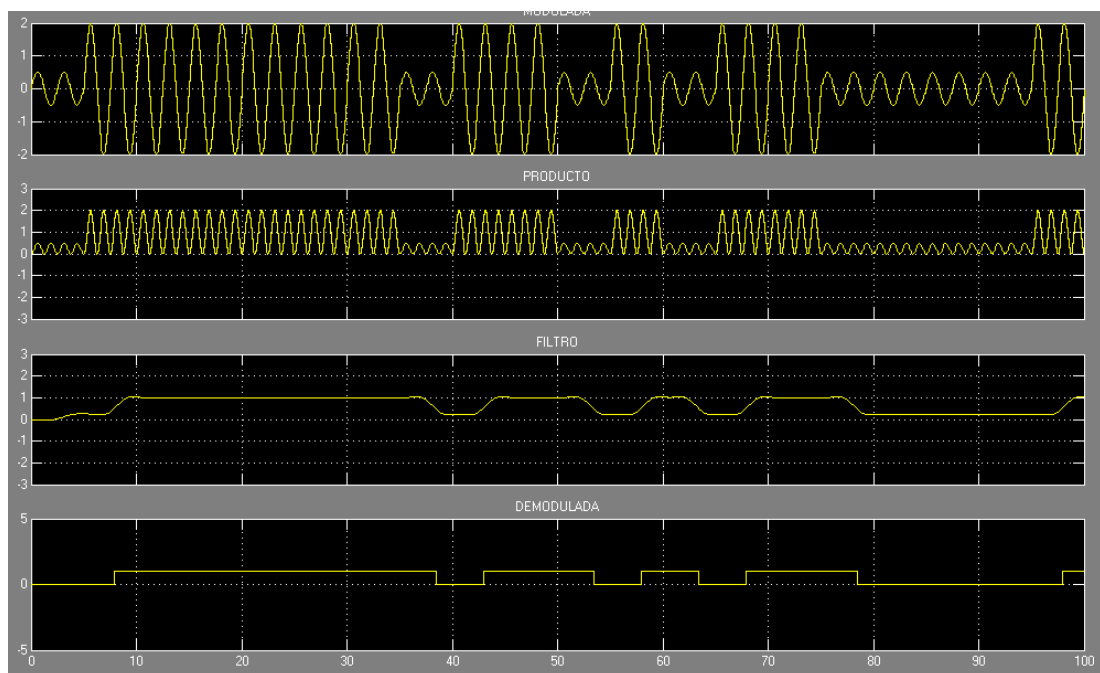


Figura 3. 17: Señales de Scope 2 del subsistema demodulador ASK.
Elaborado por: El Autor.

Finalmente, la figura 3.18 muestra la señal del proceso de modulación/demodulación ASK.

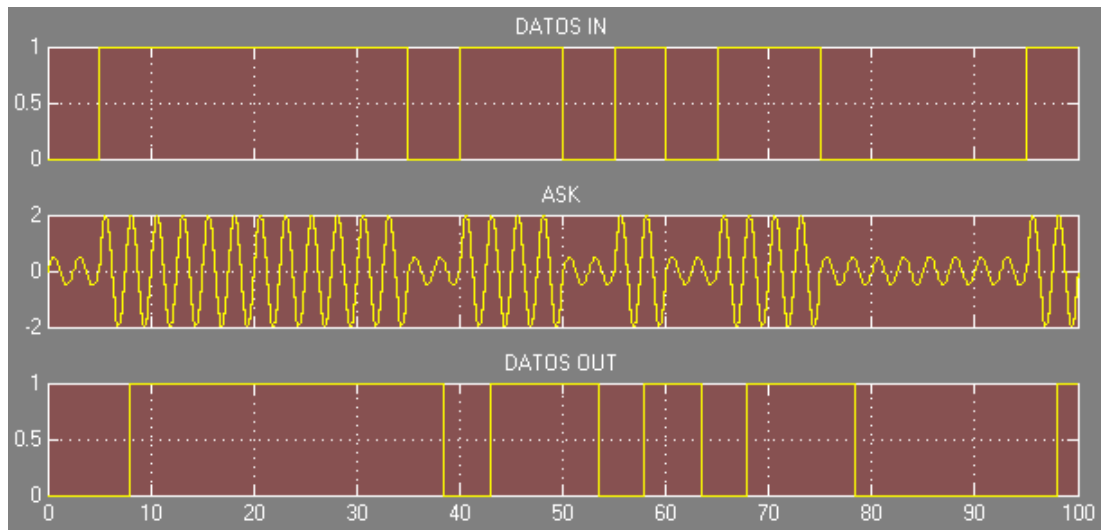


Figura 3. 18: Señales de datos IN, ASK y OUT.
Elaborado por: El Autor.

3.2.2. Simulación de OOK en Simulink.

En la sección 3.1.2 se desarrolló la programación script de la modulación OOK, similar a la ASK. La diferencia es que un “1” binario muestra la señal OOK-ASK, mientras que un “0” binario no muestra nada. La explicación del proceso del sistema de modulación/demodulación de OOK (véase la figura 3.19) también es similar al ya descrito en la modulación/demodulación de ASK. La figura 3.20 muestra las señales de los BITS de entrada, modulación/demodulación ASK y BITS de salida.

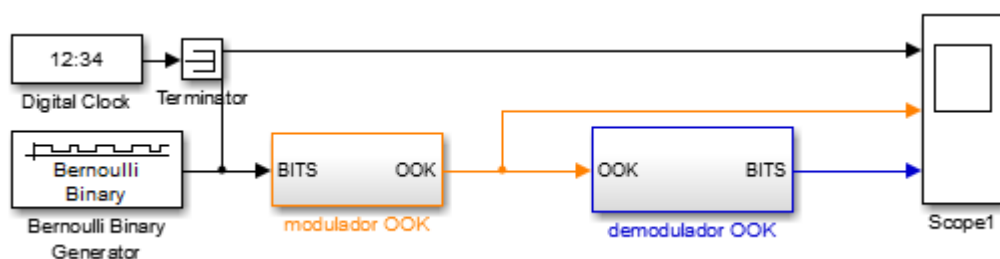


Figura 3. 19: Modulador/Demodulador ASK.
Elaborado por: El Autor.

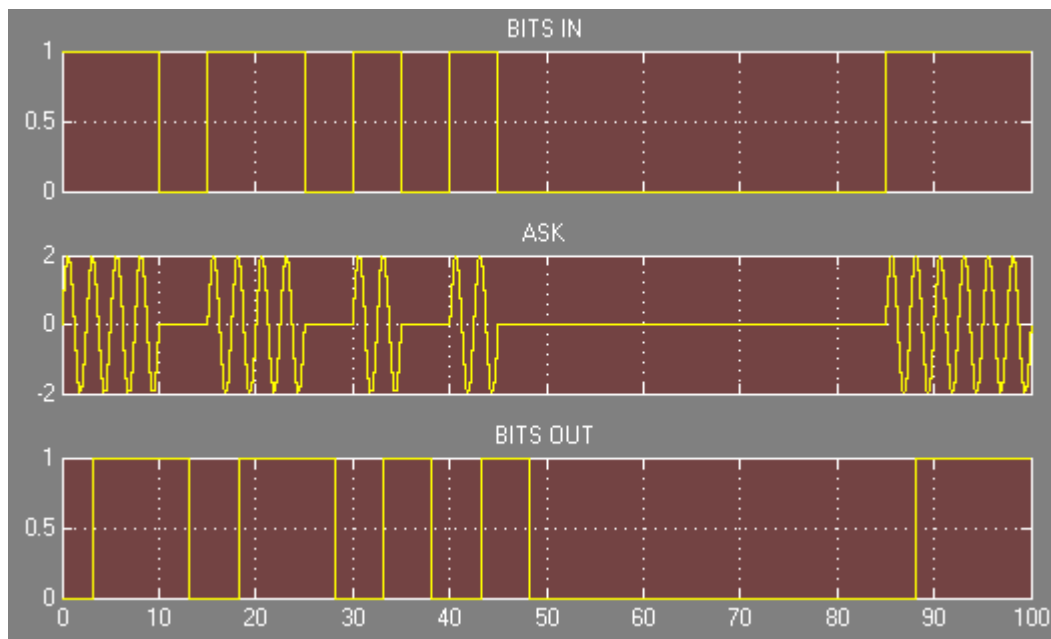


Figura 3. 20: Señales de datos IN, ASK-OOK y OUT.
Elaborado por: El Autor.

3.2.3. Simulación de FSK en Simulink.

Las señales de modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) consisten en que si hay la presencia de un “1” o “0” binario genera una frecuencia más baja y una más alta respectivamente. La figura 3.21 muestra la programación en simulink de un sistema modulador/demodulador FSK.

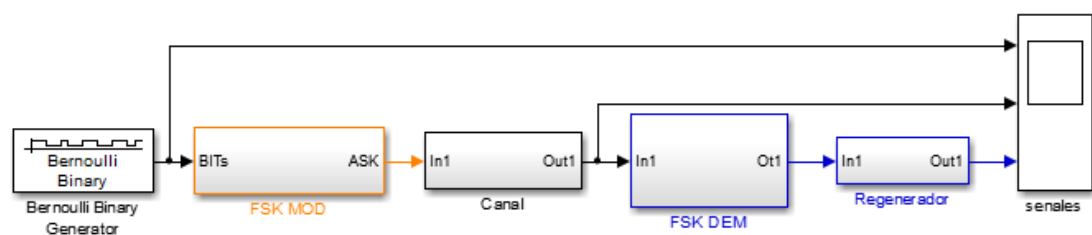


Figura 3. 21: Modulador/Demodulador FSK.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.22 muestra el bloque FSK MOD que consiste en multiplexar las señales de portadoras (Sine Wave y Sine Wave1) y de bits, para ser ingresados al subsistema canal.

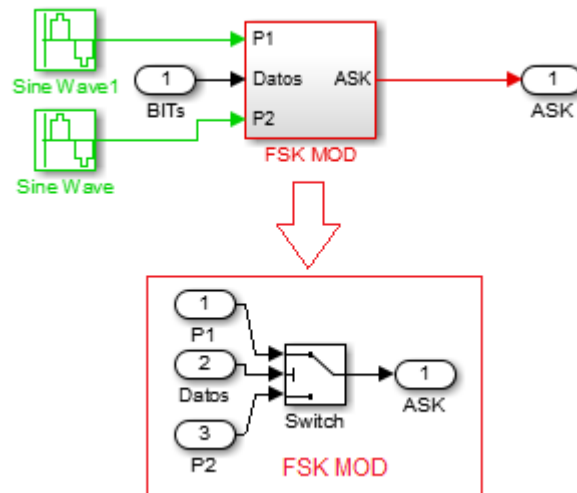


Figura 3. 22: Subsistema FSK MOD.
Elaborado por: El Autor.

Posteriormente, la figura 3.23 muestra el subsistema canal del sistema FSK. El canal permite sumar la función de transferencia de FSK MOD y el ruido blanco de banda limitada, para ser ingresados al subsistema FSK DEM.

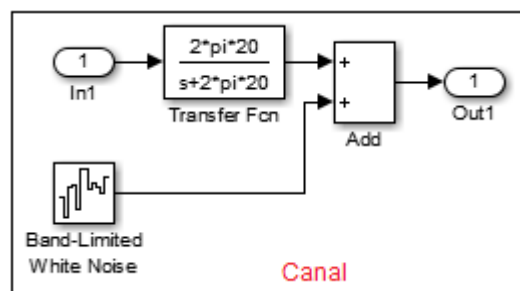


Figura 3. 23: Subsistema canal del sistema FSK.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.24 muestra el bloque FSK DEM, que consiste en limitar la amplitud de la señal de entrada (bloque Saturation) y posteriormente establecer que frecuencia entró al modulador FSK (bloque Charge Pump PLL).

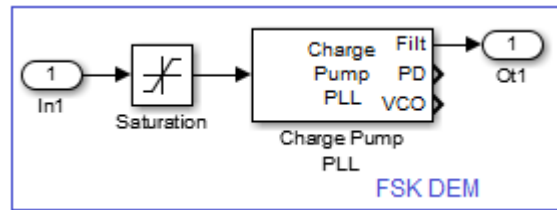


Figura 3. 24: Subsistema FSK DEM.
Elaborado por: El Autor.

Antes de mostrar el proceso de modulación/demodulación de FSK se requiere del subsistema “regenerador” (véase figura 3.25), el mismo que consiste en comparar si la entrada es menor a 0, entonces la salida es un “1”. La figura 3.26 muestra las señales del sistema de modulación/demodulación de FSK.

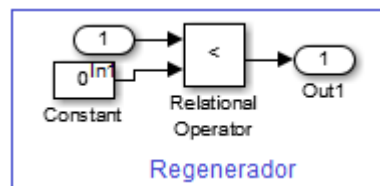


Figura 3. 25: Subsistema regenerador.
Elaborado por: El Autor.

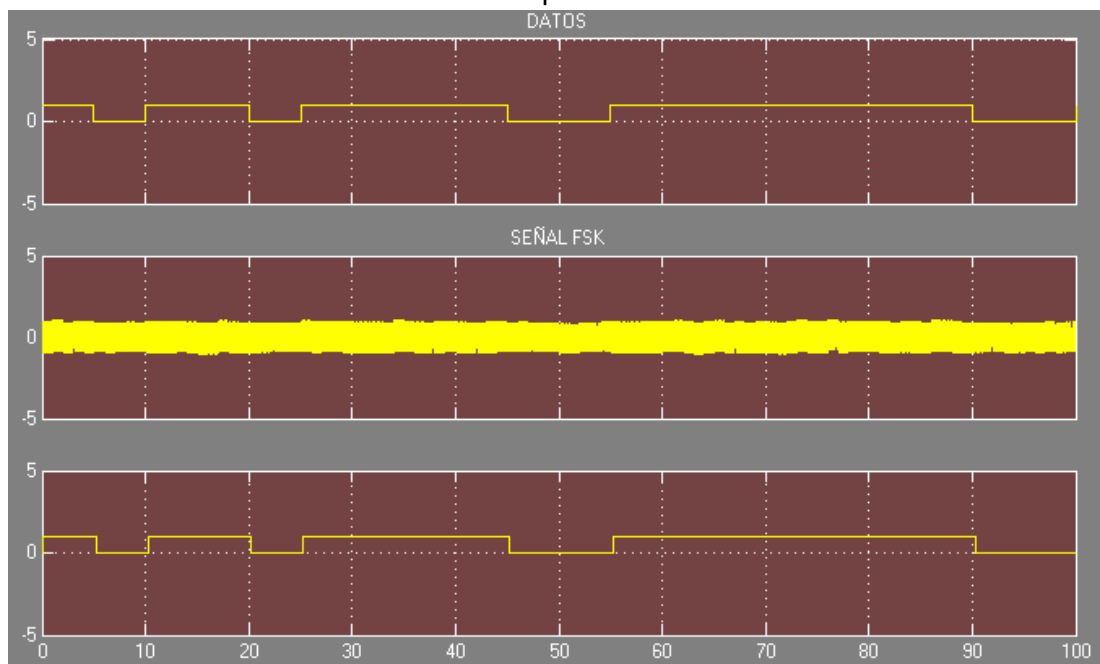


Figura 3. 26: Señales de datos IN, FSK y OUT.
Elaborado por: El Autor.

3.2.4. Simulación de BPSK en Simulink.

A continuación se muestra la programación en simulink del sistema de modulación/demodulación BPSK tal como la figura 3.27, en la cual se muestran los bloques modulador y demodulador BPSK.

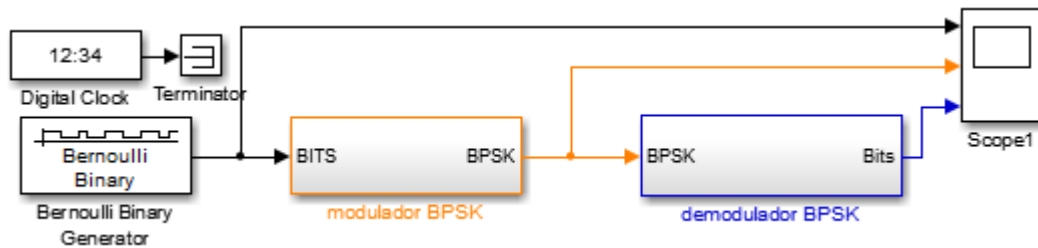


Figura 3. 27: Modulador/Demodulador BPSK.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.28 muestra el subsistema modulador BPSK, cuyo proceso es prácticamente similar a los explicados en anteriores secciones. La figura 3.29 muestra las señales (Scope1) del subsistema BPSK MOD

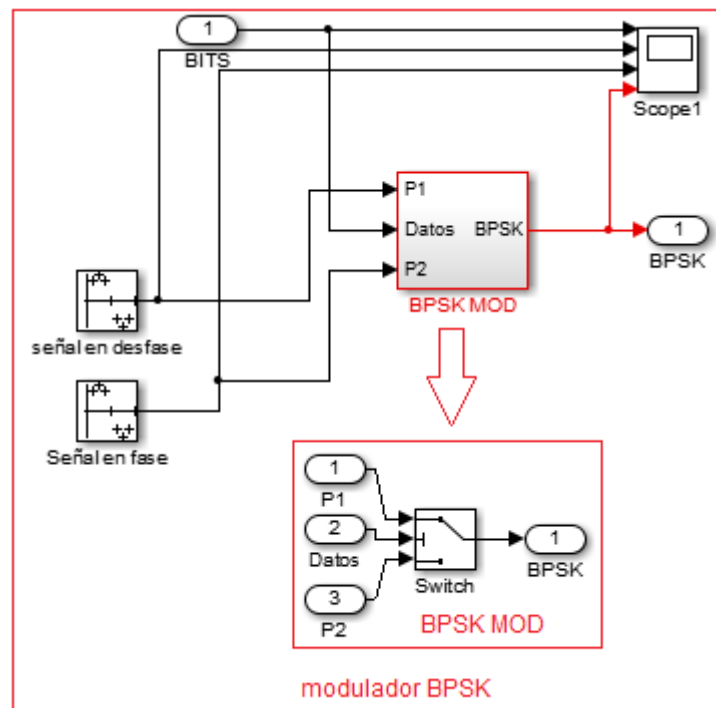


Figura 3. 28: Subsistema modulador BPSK.
Elaborado por: El Autor.

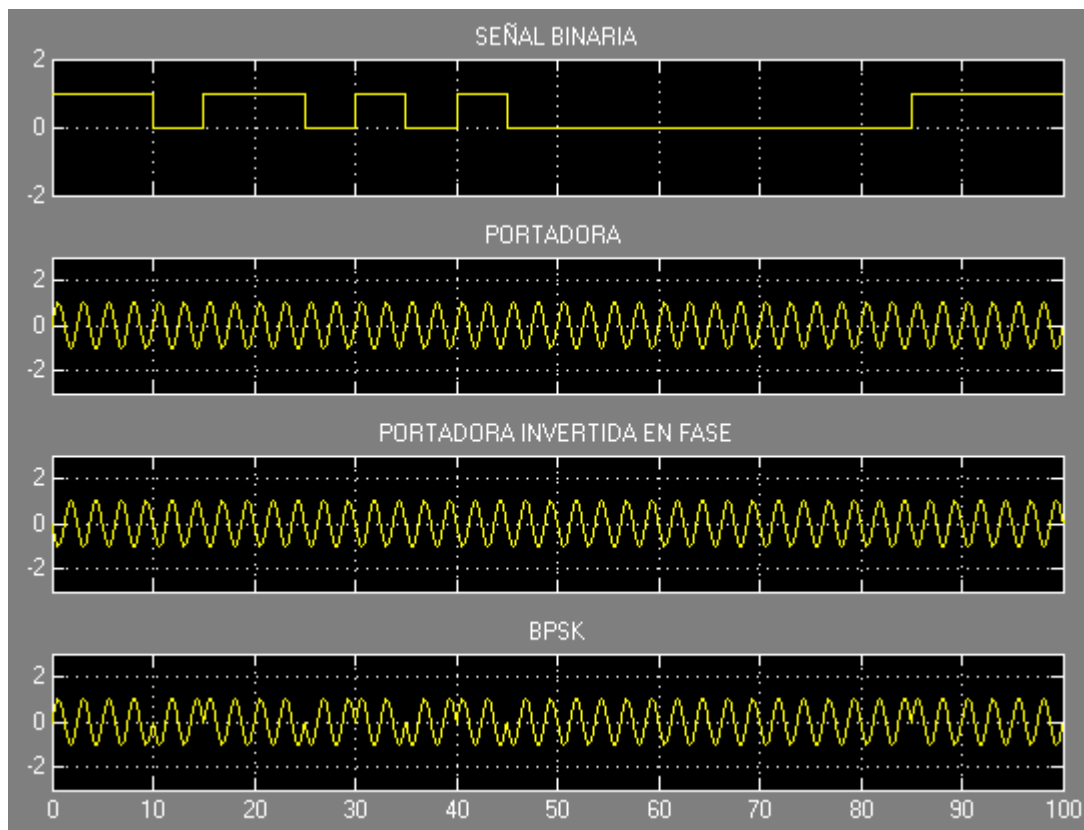


Figura 3. 29: Señales obtenidas del subsistema modulador BPSK.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.30 muestra el bloque demodulador BPSK, en la que la señal del modulador BPSK es multiplicada por una señal portadora, para ser ingresada al filtro FIR pasa bajo y posteriormente ser comparada. Este comparador permite tomar la decisión de que se trata de un “1” o “0” binario. Es decir, que él comparador es un operador relacional.

La figura 3.31 muestra la señal del modulador BPSK, la señal del producto entre portadora y BPSK, la señal del filtro pasa bajo y la señal de salida del comparador.

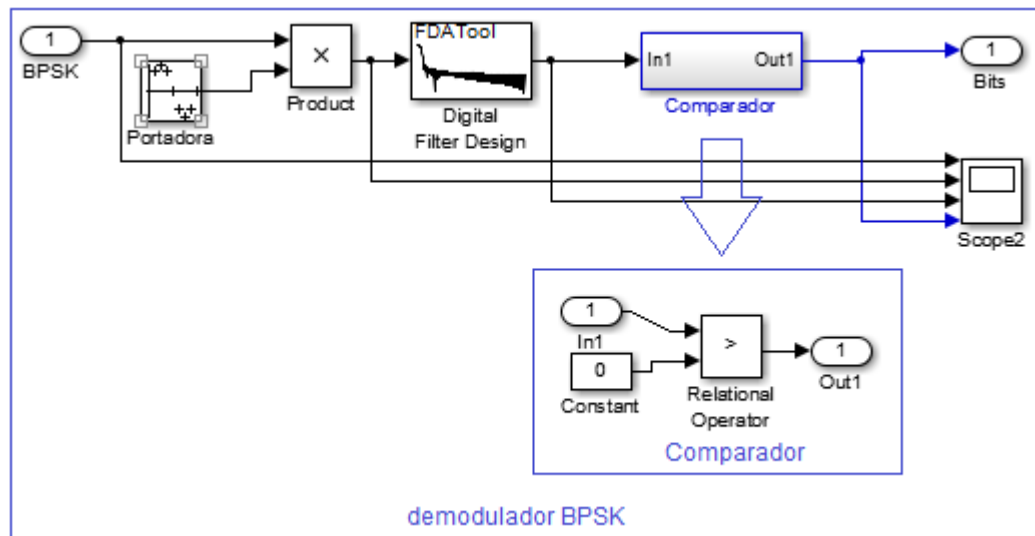


Figura 3. 30: Subsistema demodulador BPSK.
Elaborado por: El Autor.

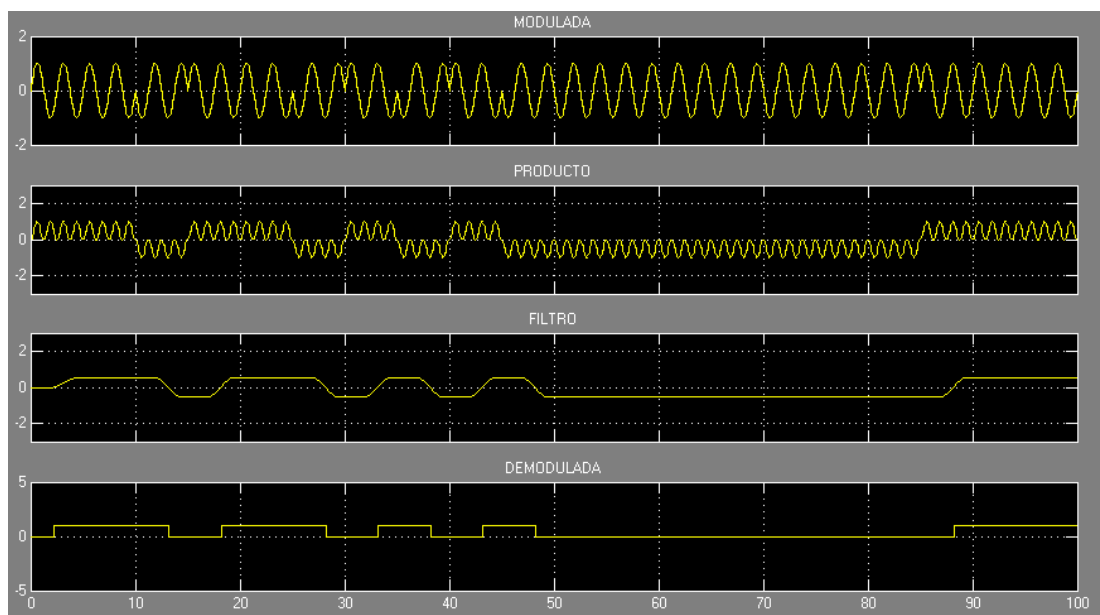


Figura 3. 31: Señales obtenidas del subsistema demodulador BPSK.
Elaborado por: El Autor.

Finalmente la figura 3.32 muestra las señales de datos IN, BPSK y OUT del sistema modulador/demodulador BPSK.

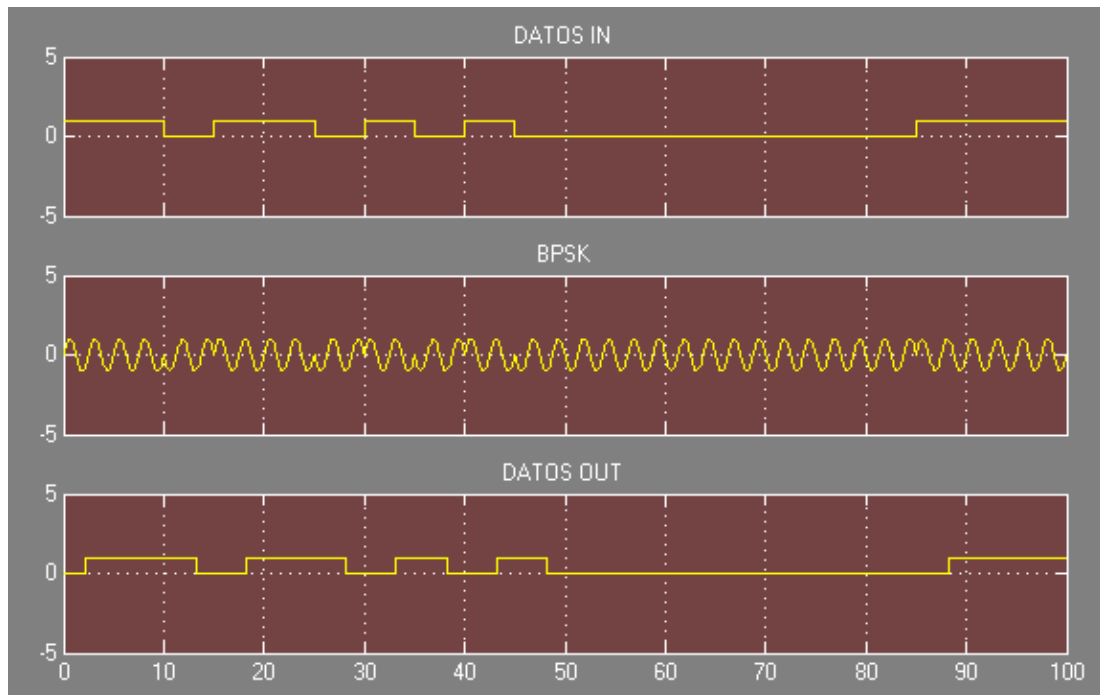


Figura 3. 32: Señales de datos IN, BPSK y OUT.

Elaborado por: El Autor.

3.2.5. Simulación de QPSK en Simulink.

Finalmente, la figura 3.33 muestra el diseño del sistema modulador/demodulador de QPSK sobre Simulink. Consiste de subsistemas importantes como el modulador QPSK y demodulador QPSK, que serán explicados brevemente en las figuras 3.34 y 3.36.

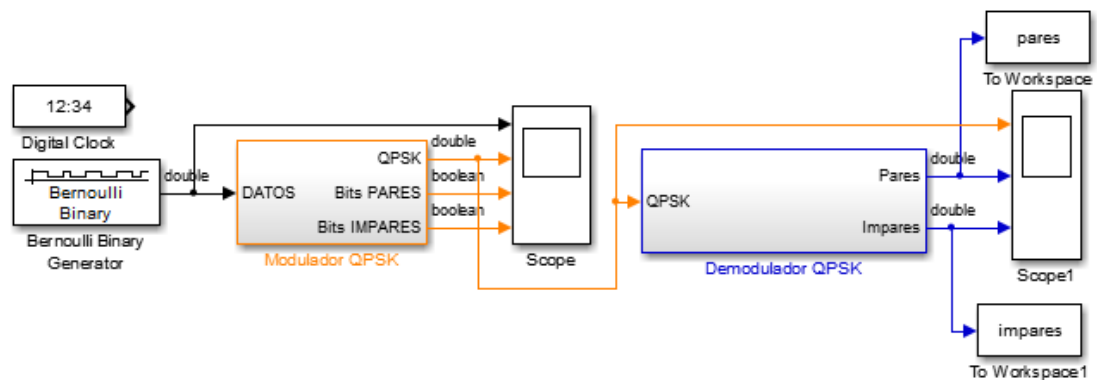


Figura 3. 33: Modulador/Demodulador QPSK.

Elaborado por: El Autor.

La figura 3.34 muestra el bloque Modulador QPSK. Primero ingresamos datos binarios (generador de bits de Bernoulli y señal de reloj) en la cual son separados en los bits pares e impares. Después esta separación de bits, ingresan al bloque “paso a polar” que permite convertir los bits unipolares a bipolar, para ser multiplicados con señales de cuadratura y de fase y finalmente sumar las señales de bits par e impar bipolares.

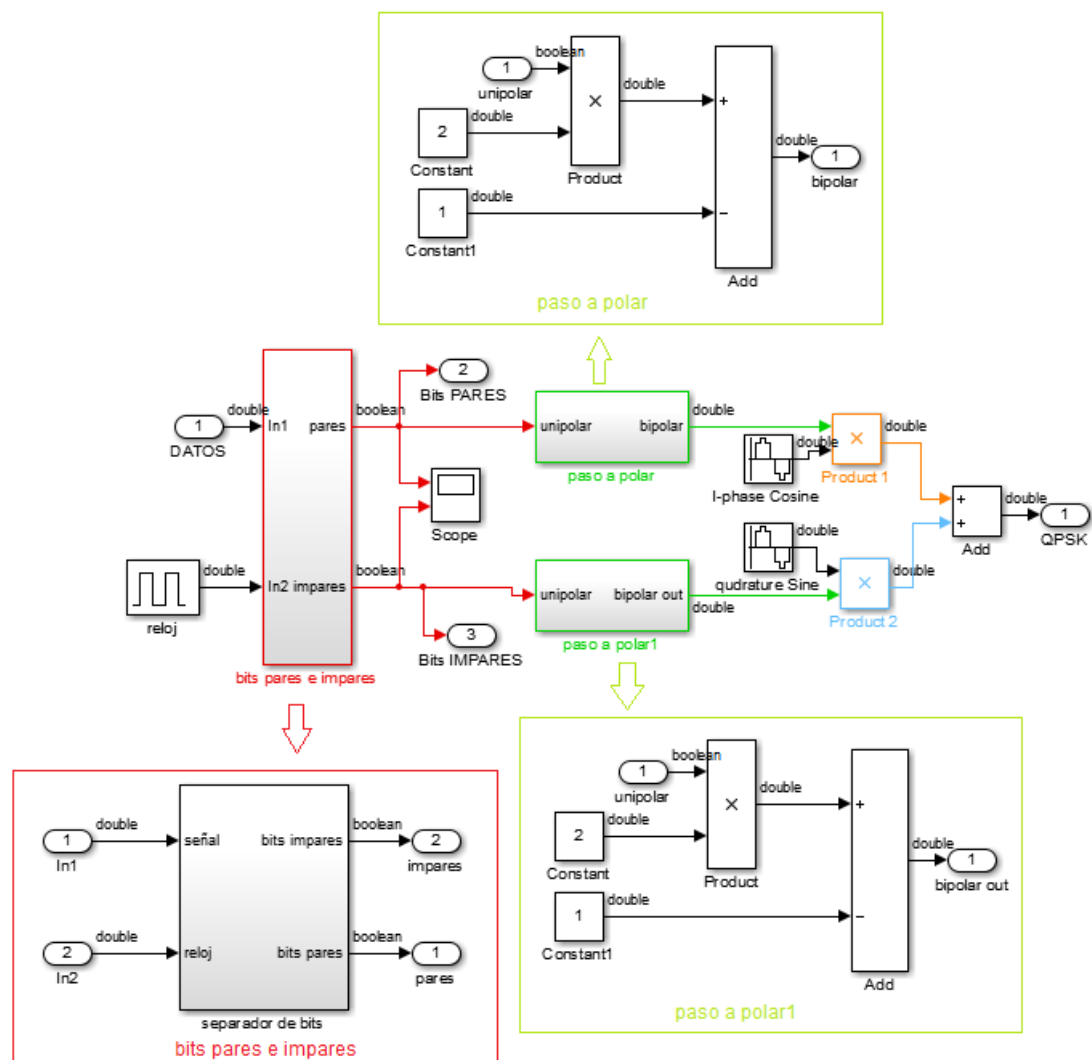


Figura 3. 34: Subsistema modulador QPSK.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.35 muestra la señales de datos binarios de Bernoulli, la señal modulada QPSK y señales de bits pares e impares.

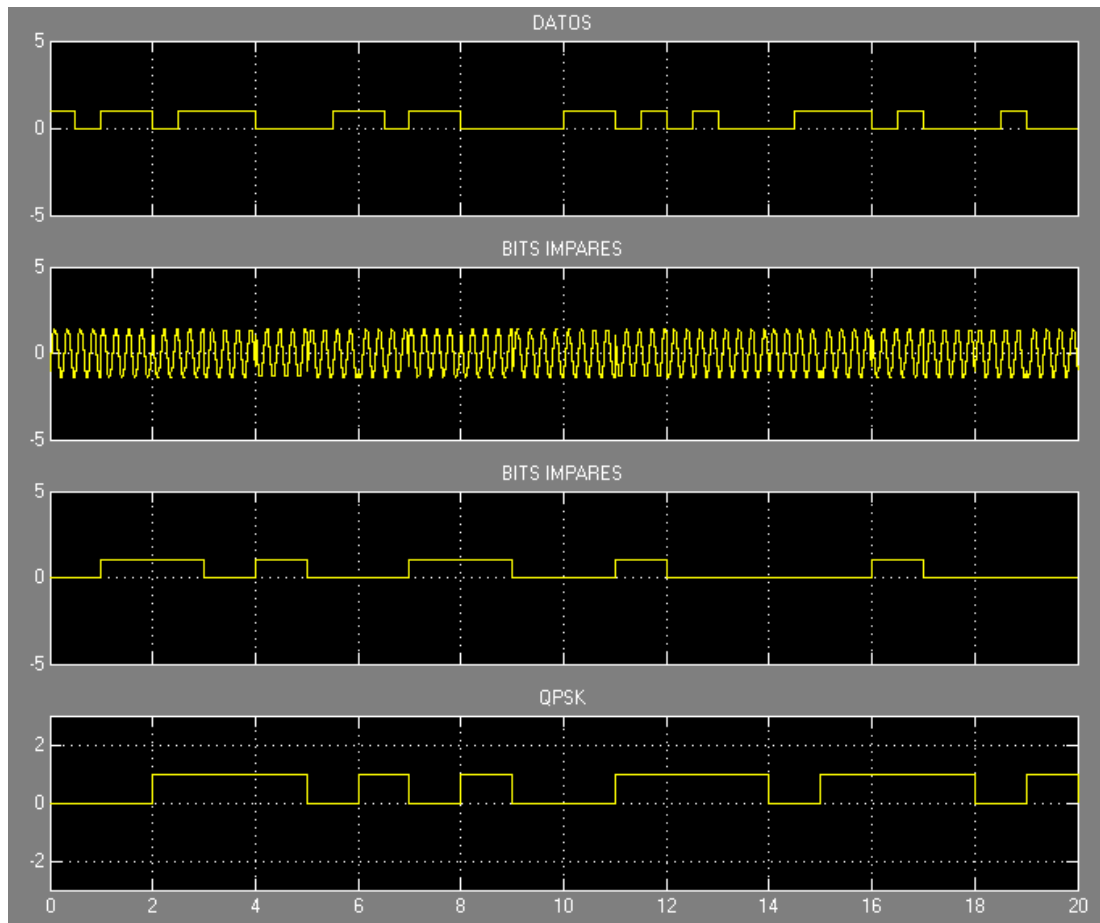


Figura 3. 35: Señales obtenidas del subsistema modulador QPSK.
Elaborado por: El Autor.

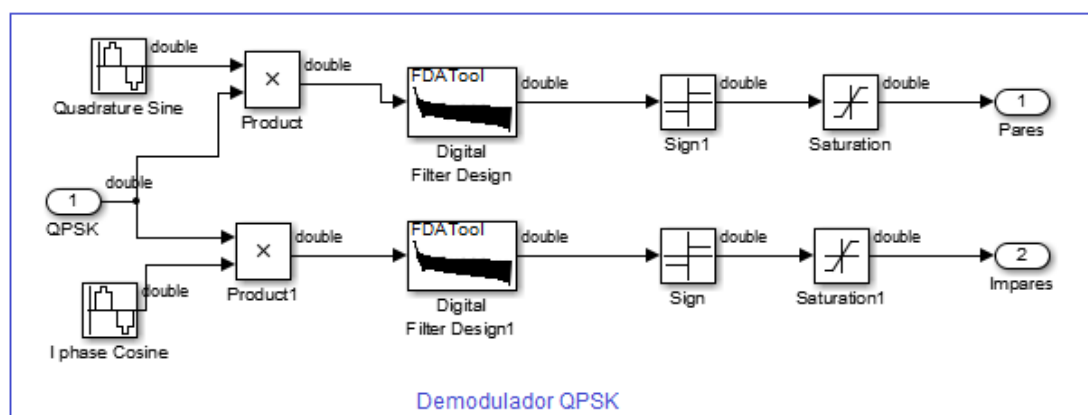


Figura 3. 36: Subsistema demodulador QPSK.
Elaborado por: El Autor.

La figura 3.36 muestra el bloque del subsistema demodulador QPSK que realiza el proceso inverso del modulador QPSK y mediante un filtro pasa bajo muestra los bits pares e impares. La figura 3.37 muestra las señales obtenidas del modulador QPSK y los bits pares e impares del demodulador QPSK.

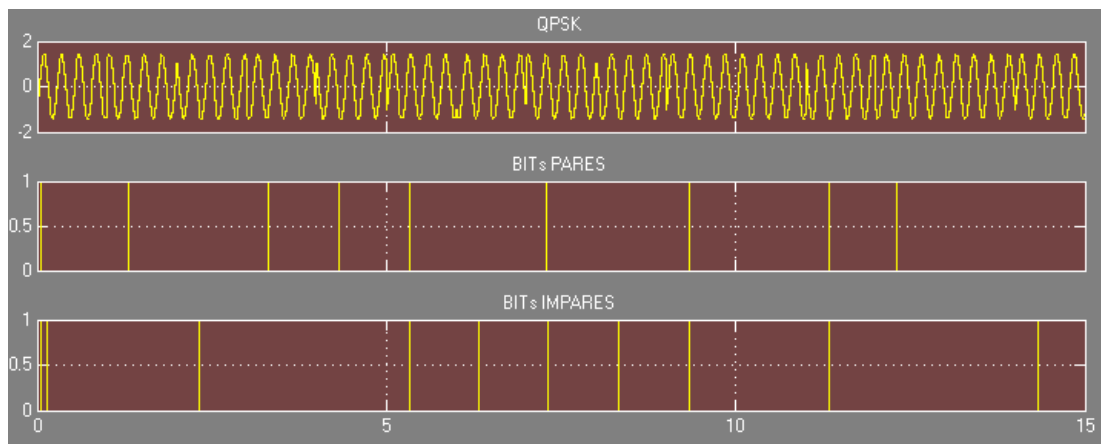


Figura 3. 37: Señales QPSK, bits pares e impares.
Elaborado por: El Autor.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. Conclusiones.

- En el estado del arte de las modulaciones digitales se describió los fundamentos básicos y esenciales de las modulaciones en desplazamiento de amplitud, fase y frecuencia. Estas modulaciones son muy utilizadas en los sistemas de telecomunicaciones, tal es así que la modulación OOK funcionan en sistemas de comunicaciones ópticos.
- Mediante la programación script en Matlab se pudieron evidenciar y comprobar las modulaciones digitales descritas en el capítulo 2 y en detalle en cada sección de los apartados 3.1.1 hasta 3.1.5, estos programas fueron ejecutados desde el Command Windows de Matlab, mediante un vector de bits binarios y una frecuencia determinada. No fue una tarea fácil, pero se logró cumplir el objetivo del trabajo de titulación.
- Otra herramienta para simular modulaciones digitales fue Simulink, en la cual se utilizó librerías de bloques preestablecidos. Se diseñaron sistemas de modulación/demodulación digital mediante programación en bloques, la misma demostró la funcionalidad de cada sistema con respecto a la sección 3.1 y sus fundamentos teóricos o estado del arte de modulaciones ASK, OOK, FSK, BPSK y QPSK.

4.2. Recomendaciones.

- Incluir en las materias de la malla curricular de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones plataformas de modelación o programas de simulación, por ejemplo Matlab/Simulink, desde el área básica hasta de área de las telecomunicaciones y así promover el interés por investigar y profundizar en temas nunca antes tratados.

- Desarrollar futuros trabajos de titulación mediante la simulación o modelación de diversos protocolos, topologías y estándares utilizados en los sistemas de telecomunicaciones, por ejemplo, el modelado de una red GPON con modulación digital OOK-ASK.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barnela, M. (2014). *Digital Modulation Schemes Employed in Wireless Communication: A Literature review*. International Journal of Wired and Wireless Communications. Volume 2, Issue 2.

Carrington, A. (2008). *Digital Modulation: ASK, FSK, PSK*. Apuntes de clases de Sistemas de Comunicaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad Staffordshire.

Montserrat Del Río, J. (2010). *Modulaciones Digitales de Fase (BPSK, QPSK, M-PSK, DPSK, OQPSK, DQPSK)*. Laboratorios Virtuales de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

Montero, J. P. (2014). *Implementación de un Sistema de Comunicaciones basado en Software Radio*. Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Politécnica Superior en la Universidad Autónoma de Madrid.

Pixgood (2014). *QPSK Waveform*.

Popescu, S., Gontean A., & Budura, G. (2012). *BPSK System on Spartan 3E FPGA*. International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics.

Popescu, S., & Gontean, A. (2011). *Performance comparison of the BPSK and QPSK Modulation Techniques on FPGA*. International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging.

Tharakanatha, G., Mahaboob, S., Bhaskar, V., & Hemalatha, I. (2013). *Implementation and Bit Error Rate analysis of BPSK Modulation and Demodulation Technique using MATLAB*. International Journal of Engineering Trends and Technology.