



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TEMA:

**Implementación de los esquemas de modulación BPSK y QPSK en
Matlab/Simulink: estudio comparativo**

AUTOR:

Chávez Cartagena, David Francisco

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

Philco Asqui, Luis Orlando

Guayaquil, Ecuador

15 de Marzo del 2017



**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.
Chávez Cartagena, David Francisco como requerimiento para la obtención
del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

Philco Asqui, Luis Orlando

DIRECTOR DE CARRERA

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 15 del mes de Marzo del año 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Chávez Cartagena, David Francisco**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “**Implementación de los esquemas de modulación BPSK y QPSK en Matlab/Simulink: estudio comparativo**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 15 del mes de Marzo del año 2017

EL AUTOR

CHÁVEZ CARTAGENA, DAVID FRANCISCO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

AUTORIZACIÓN

Yo, Chávez Cartagena, David Francisco

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Implementación de los esquemas de modulación BPSK y QPSK en Matlab/Simulink: estudio comparativo”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 15 del mes de Marzo del año 2017

EL AUTOR

CHÁVEZ CARTAGENA, DAVID FRANCISCO

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento	Chavez_David_Final_BPSK-QPSK.docx (D26184719)
Presentado	2017-03-06 02:33 (-05:00)
Presentado por	fernandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	Revisión David Chavez Mostrar el mensaje completo 3% de esta aprox. 17 páginas de documentos largos se componen de texto presente en 2 fuentes.

Lista de fuentes		Bloques
	Categoría	Enlace/nombre de archivo
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/33... <input type="checkbox"/>
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/33... <input type="checkbox"/>
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/33... <input type="checkbox"/>
+		https://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3... <input checked="" type="checkbox"/>
+		http://slideplayer.es/slide/7312021/ <input type="checkbox"/>
+		https://www.clubensayos.com/buscar/Mod... <input type="checkbox"/>

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencia

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

DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Implementación de los esquemas de modulación BPSK y QPSK en Matlab/Simulink: estudio comparativo

AUTOR: Chávez Cartagena, David Francisco

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a DIOS quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerza para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad y desfallecer en el intento.

A toda mi familia y amigos, principalmente a mi madre que ha sido un pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

EL AUTOR

CHÁVEZ CARTAGENA, DAVID FRANCISCO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a DIOS por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre , por el valor mostrado para salir adelante, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

Finalmente a mis maestros, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que me ayudaron en asesorías y dudas que tenía presentadas en la elaboración de mi trabajo de titulación.

EL AUTOR

CHÁVEZ CARTAGENA, DAVID FRANCISCO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

PHILCO ASQUI LUIS ORLANDO
TUTOR

f. _____

HERAS SÁNCHEZ MIGUEL ARMANDO
DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

PALACIOS MELÉNDEZ EDWIN FERNANDO
COORDINADOR DE TITULACIÓN

Índice General

Índice de Figuras	XI
Resumen	XIII
CAPÍTULO 1: Descripción general del Trabajo de Titulación	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes del problema a investigar.....	3
1.3. Definición del problema a investigar.....	4
1.4. Justificación del problema a investigar.	4
1.5. Objetivos del problema a investigar.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos específicos:	5
1.6. Hipótesis.	6
1.7. Metodología de Investigación.....	6
CAPÍTULO 2: Fundamentos teóricos de la modulación por desplazamiento de fase binaria.....	7
2.1. Esquema funcional de un sistema de comunicaciones.....	7
2.2. Codificadores Bose-Chaudhuri-Hocquenhem (BCH).....	12
2.3. Fundamentos básicos de la modulación por desplazamiento de fase. ..	14
2.4. Modulación por desplazamiento de fase binaria.....	15
2.5. Diagramas de constelación de BPSK y QPSK	23
2.6. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura.....	25
2.7. Aplicaciones de la modulación PSK.	28
CAPÍTULO 3: Implementación de los esquemas de modulación BPSK y QPSK.....	31
3.1. Sistemas implementados	31
3.2. Comparación del desempeño de los sistemas BPSK y QPSK	39

CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones.	46
4.1. Conclusiones.....	46
4.2. Recomendaciones.....	48
Bibliografía.....	49

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Sistema de comunicaciones.	8
Figura 2. 2: Datos binarios modulados en BPSK	16
Figura 2. 3: Espectro de BPSK	19
Figura 2. 4: Detección de BPSK	20
Figura 2. 5: Lazos de recuperación enganchado por fase de costas de portadora para señales BPSK.....	21
Figura 2. 6: Lazos de recuperación cuadrático de portadora para señales BPSK.....	21
Figura 2. 7: Sistema de codificación diferencial	22
Figura 2. 8: Constelación de BPSK.....	24
Figura 2. 9: Constelación de QPSK con codificación Gray. Cada símbolo adyacente solo difiere en un bit.	25
Figura 2. 10: Estructura del transmisor conceptual para QPSK	27
Figura 2. 11: Estructura del receptor en QPSK.....	28

Capítulo 3

Figura 3. 1: Diseño de bloques para el sistema BPSK.....	32
Figura 3. 2: Diseño de bloques para el sistema QPSK.	32
Figura 3. 3: Diagrama de bloques de Random Integer (entero aleatorio).....	33
Figura 3. 4: Configuración de parámetros del bloque Random Integer.	34
Figura 3. 5: Diagrama de bloques del encoder BCH.....	34
Figura 3. 6: BCH encoder (a) bloque (b) configuración.	35
Figura 3. 7: (a) Bloque modulador BPSK, y (b) bloque modulador QPSK.	35

Figura 3. 8: Diagrama de bloques del canal AWGN.....	36
Figura 3. 9: Configuración de parámetros del diagrama de bloques del canal AWGN.	36
Figura 3. 10: (a) Bloque demodulador BPSK (b) bloque demodulador QPSK.	37
Figura 3. 11: Diagrama de bloque del encoder BCH.....	37
Figura 3. 12: BCH decoder (a) bloque (b) configuración.	38
Figura 3. 13: Diagrama de bloque finalizador.....	38
Figura 3. 14: Diagrama de bloque de la constelación de BPSK.	39
Figura 3. 15: Bloques del cálculo de la tasa de error (ERC) y visualizar la tasa de error de bits (BER).	39
Figura 3. 16: Diagrama de constelación para el diseño del sistema BPSK. .	40
Figura 3. 17: Diagrama de constelación para sistema BPSK con una SNR de 10 dB.	41
Figura 3. 18: Diagrama de constelación para el diseño del sistema QPSK. .	41
Figura 3. 19: Diagrama de constelación para sistema QPSK con una SNR de 10 dB.	42
Figura 3. 20: Comparación de BPSK y QPSK ambas con codificación BCH.	43
Figura 3. 21: Comparación de BPSK con y sin codificación BCH.	43
Figura 3. 22: Comparación de QPSK con y sin codificación BCH.	44
Figura 3. 23: Ventana de simulación del Matlab/Simulink - sistema BPSK, canal con SNR de 7dB.	44
Figura 3. 24: Ventana de simulación del Matlab/Simulink - Sistema QPSK, canal con 7dB de SNR.	45

Resumen

El propósito general de un enlace de comunicaciones es transmitir señales de un lugar a otro. En estos sistemas, la etapa de modulación constituye una etapa fundamental cuyo principal objetivo es generar una señal modulada adecuada a las características del canal de transmisión. Además de cumplir ese propósito ella ofrece múltiples beneficios. Las modulaciones se clasifican en analógicas y digitales. Dentro de la última categoría se encuentran las modulaciones por desplazamiento de fase binaria y cuaternaria, las cuales son ampliamente utilizadas en muchas tecnologías modernas para la transmisión de datos, señalización y sincronización. Entre estas tecnologías podemos mencionar Bluetooth, ZigBee, WLAN, WiMAX y LTE. Por la importancia que tiene el conocimiento de estos esquemas de modulación, en el presente trabajo se implementan en Matlab/Simulink y se comparan dos sistemas de comunicaciones basados en BPSK y QPSK. Los resultados obtenidos comprueban lo establecido tanto en la teoría como en la práctica: BPSK, aunque exhibe una menor eficiencia espectral es más robusta ante el ruido que QPSK por lo que puede cubrir mayores distancias. La ventaja de QPSK es que duplica la tasa de datos de transmisión en relación a BPSK.

Palabras claves: SISTEMA DE COMUNICACIONES, MODULACIONES DIGITALES, MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE, BPSK, QPSK, MATLAB.

CAPÍTULO 1: Descripción general del Trabajo de Titulación

1.1. Introducción.

En los sistemas de comunicación la modulación es una etapa fundamental. Esta puede definirse como la operación mediante la cual ciertas características de una onda denominada portadora, se modifican en función de otra denominada moduladora, que contiene información, para que esta última pueda ser transmitida. La onda en condiciones de ser transmitida se denomina señal modulada. La modificación debe hacerse de tal forma, que la información no se altere en ninguna parte del proceso. El proceso inverso, que consiste en separar de la señal modulada, la onda que contiene solamente la información, se llama demodulación.

El principal objetivo de la modulación en un sistema de comunicaciones es generar una señal modulada adecuada a las características del canal de transmisión (Carlson, Crilly, & Rutledge, 2002). Un ejemplo de la utilizada e importancia de la modulación es lo referente a las dimensiones de las antenas necesarias en un sistema de comunicaciones.

La propagación eficiente de ondas de radio con línea de visión directa requiere antenas cuya dimensión física es de al menos $1/10$ de la longitud de onda de la señal a ser transmitida. Una transmisión de una señal de audio sin modular contiene componentes de frecuencias por debajo de 100 Hz, lo que requeriría antenas de 300 km de longitud. Sin embargo, la transmisión

modulada a 100 MHz, como por ejemplo la radiodifusión de FM (*Frequency Modulated*), permite reducir los tamaños hasta valores prácticos de alrededor de 1 metro.

1.2. Antecedentes del problema a investigar.

Generalmente, el diseño de un sistema de comunicaciones está restringido por el costo y la disponibilidad del *hardware*, el cual, al mismo tiempo depende de la frecuencia involucrada. Otra beneficio de la modulación es que permite que el diseñador de un sistema pueda colocar la señal en algún intervalo de frecuencias deseado, con el objetivo de evitar las limitaciones de hardware que suelen existir.

Al encender una radio o un televisor en una estación determinada, se selecciona una de las muchas señales recibidas en ese momento. Puesto que cada estación tiene una frecuencia portadora asignada diferente, la señal deseada puede ser separada de las otras mediante filtrado. Si no fuera por la modulación, sólo una estación podría emitir en una zona determinada; de lo contrario, dos o más estaciones de radiodifusión se interferirían entre ellas.

La modulación también permite un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos; facilita la propagación de la señal de información por cable o por el aire; protege a la

información de las degradaciones por ruido y evita las interferencias entre canales; ordena el espectro de frecuencias, distribuyendo canales a cada información distinta; optimiza el ancho de banda de cada canal y define la calidad de la información transmitida.

1.3. Definición del problema a investigar.

En el medio académico, resulta de gran importancia el conocimiento profundo del funcionamiento de estos esquemas de modulación, así como también el esclarecimiento de cuáles son las particularidades y diferencias entre BPSK y QPSK. Lo anterior constituye el **problema** de investigación.

1.4. Justificación del problema a investigar.

Existen básicamente dos tipos de modulación: la analógica, que se realiza a partir de señales analógicas de información, por ejemplo la voz humana, audio y video en su forma eléctrica; y la modulación digital, que se lleva a cabo a partir de señales generadas por fuentes digitales, por ejemplo una computadora.

La creciente demanda de los servicios de voz y multimedia en las comunicaciones móviles ha estimulado el avance de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas en las décadas reciente. Las técnicas de modulaciones digitales han contribuido a esta evolución incrementando la capacidad, velocidad y también la calidad de dichas tecnologías

Dentro de las modulaciones digitales podemos citar la modulación digital por desplazamiento de fase (PSK, del inglés *Phase Shift Keying*), la cual es utilizada por sistemas inalámbricos avanzados. La modulación digital por desplazamiento de fase binaria (BPSK, del inglés *Binary Phase Shift Keying*) y la modulación digital por desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK, del inglés *Quaternary Phase Shift Keying*) son usadas en algunos de estos sistemas tales como las redes de área local inalámbricas (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Network*), la tecnología de interoperabilidad mundial para acceso por microondas (WiMAX, del inglés *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) y las redes móviles LTE (*Long Term Evolution*) para la transmisión de datos o de señales de sincronización. Por ejemplo, BPSK es usada para las secuencias que contienen los preámbulos y pilotos mientras que QPSK es usada para transmisión de datos puesto que provee una mayor tasa de envío de datos.

1.5. Objetivos del problema a investigar.

1.5.1. Objetivo General.

Implementar en Matlab/Simulink las modulaciones BPSK y QPSK en el marco de un sistema de comunicaciones.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Definir el esquema funcional general de un sistema de comunicaciones.
- Caracterizar la modulación digital por desplazamiento de fase binaria.

- Caracterizar la modulación digital por desplazamiento de fase cuaternaria.
- Implementar un sistema de comunicaciones basado en BPSK.
- Implementar un sistema de comunicaciones basado en QPSK.
- Comparar el desempeño de BPSK y QPSK.

1.6. Hipótesis.

La **hipótesis** formulada es: Si se estudia e implementa cada una de estas modulaciones digitales y se comparan sus comportamientos, se podrá profundizar en el conocimiento de sus particularidades y se podrá realizar un estudio comparativo que permite esclarecer sus características individuales.

1.7. Metodología de Investigación.

De acuerdo a los autores Cortés C. & Iglesias L., (2004) la metodología de investigación permite a los investigadores dotar de una serie de conceptos, principios y leyes que permitan guiar de manera eficiente el proceso de investigación. También, habla de los enfoques metodológicos, que son: cuantitativos y cualitativos. Para el presente trabajo de titulación, se utiliza el enfoque cuantitativo, debido a que se basa en observaciones y evaluaciones de los fenómenos en cuestión, que son los esquemas de modulación BPSK y QPSK.

CAPÍTULO 2: Fundamentos teóricos de la modulación por desplazamiento de fase binaria.

En este Capítulo se exponen los fundamentos teóricos que soportan los sistemas de comunicaciones y modelos de modulaciones digitales implementados. Además, este análisis preliminar de los conceptos básicos permitirá una mejor comprensión del trabajo desarrollado. Inicialmente se aborda el esquema general funcional de los sistemas de comunicaciones explicando la función que cada bloque realiza. Serán explicados los codificadores BCH puesto que serán utilizados en el sistema simulado.

Además, se estudia la modulación digital de fase, con especial atención en la representación de los esquemas BPSK y QPSK, su funcionamiento, diagramas de constelación y por último sus aplicaciones en algunas de las tecnologías utilizadas en la actualidad.

2.1. Esquema funcional de un sistema de comunicaciones.

El propósito general de un enlace de comunicaciones es transmitir señales de un lugar a otro. Según (Proakis & Salehi, 2008), un sistema de comunicaciones está formado por los elementos mostrados en la figura 2.1. La salida de la fuente de datos puede ser una señal analógica, tal como una señal de audio o video, o una señal digital, tal como la salida de un computador, que es discreta en el tiempo y tiene un número finito de caracteres de salida.

En un sistema de comunicaciones digital, los mensajes producidos por la fuente se convierten en una secuencia de dígitos binarios. Idealmente, se desea representar la salida de la fuente (mensaje) con el menor número posible de dígitos binarios. En otras palabras, lograr una representación eficiente de la salida de la fuente que dé lugar a poca o ninguna redundancia. El proceso de convertir eficientemente la salida de una fuente analógica o digital en una secuencia de dígitos binarios se denomina codificación de fuente o compresión de datos.

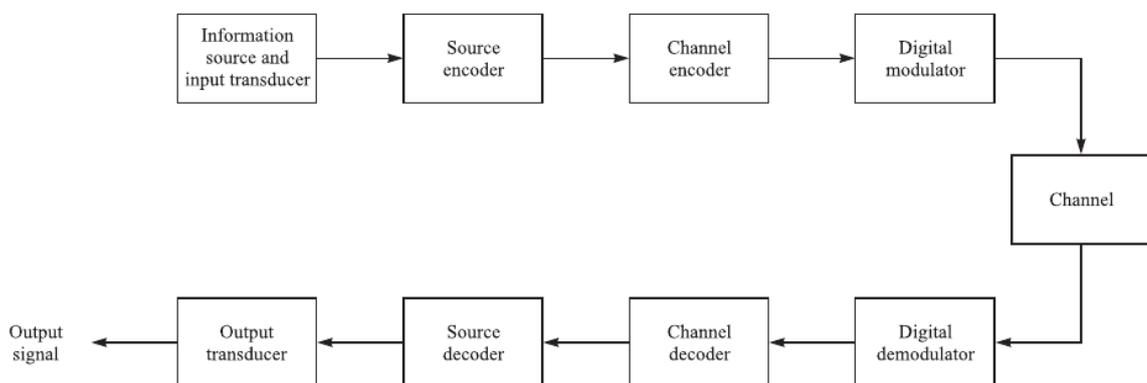


Figura 2. 1: Sistema de comunicaciones.
Fuente: (Proakis & Salehi, 2008)

La secuencia de dígitos binarios del codificador fuente, que llamamos secuencia de información, se pasa al codificador de canal. El propósito del codificador de canal es introducir, de manera controlada, alguna redundancia en la secuencia de información binaria que puede ser utilizada en el receptor para contrarrestar los efectos del ruido y la interferencia encontrados en la transmisión de la señal a través del canal. Por tanto, la redundancia añadida sirve para aumentar la fiabilidad de los datos recibidos y mejorar la fidelidad de la señal recibida.

En efecto, la redundancia en la secuencia de información ayuda al receptor a decodificar la secuencia de información deseada. Por ejemplo, una forma (trivial) de codificación de la secuencia de información binaria es simplemente repetir cada dígito binario m veces, donde m es cierto número entero positivo. Una codificación más sofisticada (no trivial) implica tomar k bits de información a la vez y asignar cada secuencia de k bits en una secuencia única de n bits, llamada palabra de código. La cantidad de redundancia introducida por la codificación de los datos de esta manera se mide por la relación n/k . El recíproco de esta relación, es decir k/n , se denomina tasa de codificación.

La secuencia binaria a la salida del codificador de canal se pasa al modulador digital, el cual sirve como interface al canal de comunicación. Dado que casi todos los canales de comunicación encontrados en la práctica son capaces de transmitir señales eléctricas (formas de onda), el propósito principal del modulador digital es mapear la secuencia de información binaria en formas de onda de señal. Para entender mejor este punto, supongamos que la secuencia de información codificada debe ser transmitida un bit a la vez a una velocidad uniforme R bits por segundo (bits/s).

La moduladora digital puede simplemente mapear el dígito binario 0 en una forma de onda $s_0(t)$ y el dígito binario 1 en una forma de onda $s_1(t)$. De esta manera, cada bit del codificador de canal se transmite por separado. A esto se le denomina modulación binaria. Alternativamente, el modulador

puede transmitir b bits de información codificados a la vez utilizando $M = 2^b$ formas de onda distintas $s_i(t)$, $i = 0, 1, \dots, M - 1$, una forma de onda para cada una de las 2^b posibles secuencias de b bits. Esta modulación se denomina M -aria ($M > 2$).

Es importante aclarar que una nueva secuencia de b bits entra en el modulador cada b/R segundos. Por tanto, cuando la capacidad del canal es fija, la cantidad de tiempo disponible para transmitir una de las M formas de onda correspondientes a una secuencia es b veces el periodo de tiempo de un sistema que usa modulación binaria.

El canal de comunicación es el medio físico que se utiliza para enviar la señal desde el transmisor al receptor. En la transmisión inalámbrica, el canal puede ser la atmósfera, o sea el espacio libre. Por otro lado, los canales telefónicos suelen emplear una variedad de medios físicos, incluyendo líneas de alambre, cables de fibra óptica e inalámbricos, como la radio de microondas. Cualquiera que sea el medio físico utilizado para la transmisión de la información, la característica esencial es que la señal transmitida se corrompe de manera aleatoria por una variedad de factores, tales como el ruido térmico aditivo generado por los dispositivos electrónicos, ruido generados por el hombre, tales como el ruido de ignición del automóvil; el ruido atmosférico, por ejemplo, descargas de rayos eléctricas durante tormentas eléctricas.

En el extremo receptor de un sistema de comunicaciones digital, el demodulador procesa la forma de onda recibida que ha sido corrompida por el canal y reduce las formas de onda a una secuencia de números que representan estimaciones de los símbolos de datos transmitidos (binarios o *M*-arios). Esta secuencia de números se pasa al decodificador de canal, que intenta reconstruir la secuencia de información original a partir del conocimiento del código usado por el codificador de canal y la redundancia contenida en los datos recibidos.

La frecuencia con la que se producen errores en la secuencia decodificada da una medida del desempeño del demodulador y del decodificador. Más precisamente, la probabilidad promedio de un error de bit en la salida del decodificador es una medida del rendimiento de la combinación demodulador - decodificador. En general, la probabilidad de error es una función de las características del código, los tipos de formas de onda utilizadas para transmitir la información sobre el canal, la potencia del transmisor, las características del canal (es decir, la cantidad de ruido, la naturaleza de la interferencia) y el método de demodulación y decodificación.

Como paso final, cuando se desea una salida analógica, el decodificador de fuente acepta la secuencia de salida del decodificador de canal y, a partir del conocimiento del método de codificación de fuente usado, intenta reconstruir la señal original de la fuente. Debido a los errores de decodificación del canal y a la posible distorsión introducida por el

codificador de fuente, y tal vez, el decodificador de fuente, la señal en la salida del decodificador de fuente es una aproximación a la salida de fuente original. La diferencia entre la señal original y la señal reconstruida es una medida de la distorsión introducida por el sistema de comunicación digital.

2.2. Codificadores Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH).

Los códigos BCH fueron propuestos en 1959 por el matemático francés Alexis Hocquenghem y de manera independiente en 1960 por Raj Bose y D. K. Ray-Chaudhuri. El nombre BCH deriva de las iniciales de los 3 creadores de este tipo de código (Bose, Chaudhuri, Hocquenghem) (Blahut, 2003).

Los códigos BCH comprenden una gran clase de códigos cíclicos que incluyen códigos sobre alfabetos binarios y no binarios. Tienen una estructura algebraica rica que hace posible su decodificación utilizando algoritmos de eficientes. Además, estos códigos existen para una amplia gama de parámetros de diseño (velocidades y longitudes de bloques) y están bien tabulados. También resulta que los códigos BCH están entre los más conocidos para las longitudes de bloques de baja a moderada (Proakis & Salehi, 2008).

Una de las ventajas de los codificadores BCH es que durante su diseño es posible controlar con precisión el número de símbolos que pueden ser corregidos. En particular es posible diseñar códigos BCH binarios con la capacidad de corregir varios bits erróneos en la trama. Otra ventaja de este

tipo de códigos es que pueden ser fácilmente decodificados a través de métodos algebraicos llamados *Syndrome decoding*. Estas características ayudan a simplificar el diseño de los decodificadores y permiten su implementación en dispositivos pequeños de bajo consumo y baja capacidad de cómputo (Blahut, 2003).

La codificación con corrección de errores, tal como el caso de la BCH, se utiliza casi de forma rutinaria en la mayoría de los nuevos sistemas de comunicación, no solo para contrarrestar los efectos del ruido, la interferencia de inter-símbolos y la multitrayectoria sino también para aumentar la eficiencia energética de los enlaces de comunicación.

Como fue mencionado anteriormente, los códigos BCH pertenecen a la categoría de códigos cíclicos que a su vez son una subclase de los códigos de bloque. Un código de bloque es un mapeo de k símbolos binarios de entrada a n símbolos binarios de salida. Por consiguiente, el codificador de bloque es un dispositivo sin memoria. Debido a que $n > k$, el código puede seleccionarse para proveer redundancia, tal como los bits de paridad, los cuales son utilizados por el decodificador para proporcionar alguna detección y corrección de errores. Estos códigos están representados por (n, k) , en donde la velocidad de código está definida por $R = k/n$. Los valores prácticos para R varían en el rango de 14 y 78, y los valores de k varían en el rango de 3 a varios cientos (Clark & Cain, 1981).

Una subclase de los códigos de bloque son los códigos cíclicos, que son aquellos en los que se puede obtener otra palabra código tomando cualquier palabra código, desplazando sus bits hacia la derecha y colocando los bits desplazados a la izquierda. Estos tipos de códigos tienen la ventaja de que pueden codificarse fácilmente a partir de la fuente del mensaje utilizando registros de desplazamiento lineal con retroalimentación económicos. Dicha estructura permite su fácil decodificación.

Los códigos BCH son ampliamente utilizados en sistemas de comunicaciones y en dispositivos electrónicos que utilizamos a diario como por ejemplo satélites de comunicaciones, lectores de discos compactos, lectores de DVD, dispositivos de estado sólido, lectores de códigos de barras bidimensionales, entre otros.

2.3. Fundamentos básicos de la modulación por desplazamiento de fase.

La modulación por desplazamiento de fase es un esquema de modulación digital que transmite datos cambiando (modulando) la fase de una señal de referencia (la onda portadora). Los esquemas de modulación digital utilizan un número finito de señales distintas para representar los datos digitales. PSK utiliza un número finito de fases, cada uno asignado un patrón único de dígitos binarios. Normalmente, cada fase codifica un número igual de bits. Cada patrón de bits forma el símbolo representado por la fase particular.

El demodulador, que está diseñado específicamente para el conjunto de símbolos utilizado por el modulador, determina la fase de la señal recibida y mapea el símbolo que representa, recuperando así los datos originales. Esto requiere que el receptor pueda comparar la fase de la señal recibida con una señal de referencia, tal sistema se denomina coherente y es referido en la literatura como CPSK (del inglés *Coherent* - PSK).

2.4. Modulación por desplazamiento de fase binaria.

La modulación por desplazamiento de fase binaria, al igual que otras modulaciones digitales, consiste en la modulación de una señal de banda base digital dentro de una portadora. De forma general, la señal pasabanda modulada se puede describir mediante la ecuación 1:

$$s(t) = \text{Re}\{g(t)e^{j\omega_c t}\} \quad (1)$$

donde $s(t)$ es la señal modulada, $g(t)$ es la función de mapeo de la modulación, $\omega_c = 2\pi f_c$ y f_c es la frecuencia de la portadora.

El espectro de voltaje (o de corriente) de la señal pasabanda es:

$$S(f) = \frac{1}{2}[G(f - f_c) + G^*(-f - f_c)] \quad (2-a)$$

y la densidad espectral de potencia es:

$$\mathcal{P}_s(f) = \frac{1}{4}[\mathcal{P}_g(f - f_c) + \mathcal{P}_g(-f - f_c)] \quad (2-b)$$

donde $\mathcal{G}(f) = \mathcal{F}[g(t)]$ y $\mathcal{P}_g(f)$ es la densidad espectral de potencia de la envolvente compleja $g(t)$.

BPSK consiste en el corrimiento de la fase de una portadora senoidal a 0° o 180° con una señal binaria unipolar, tal como se muestra en la figura 2.2. T_b es el período de bit de la señal de datos, o sea, la duración del bit. La información está contenida en la fase instantánea de la portadora modulada.

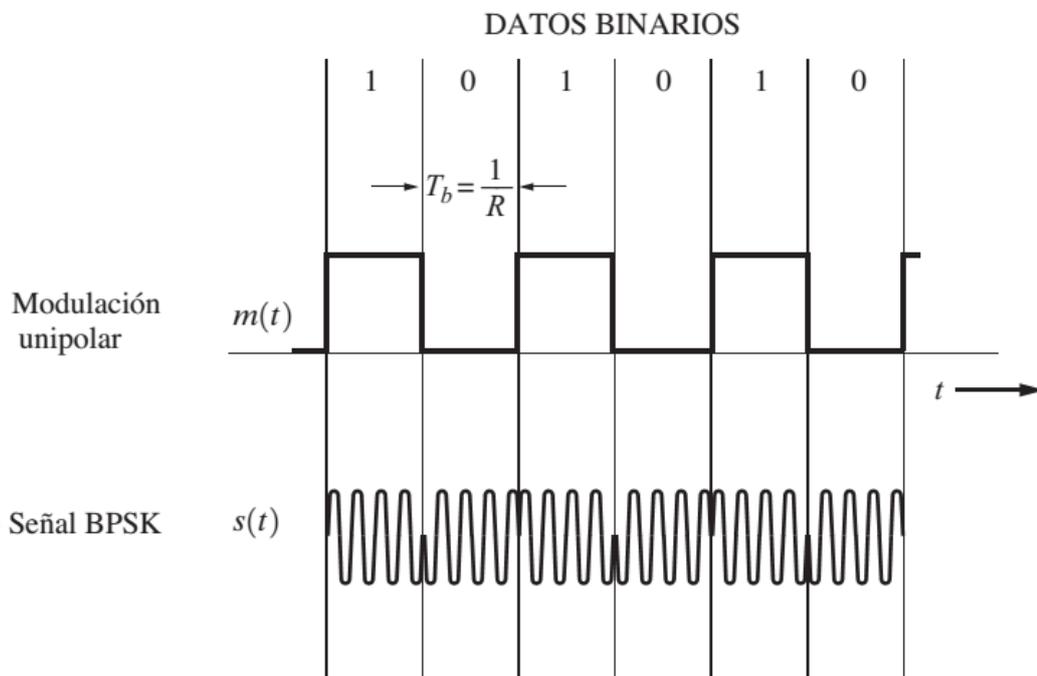


Figura 2. 2: Datos binarios modulados en BPSK
Fuente: (Couch, 2008)

BPSK es equivalente a la señalización de la modulación de fase (analógica) con una forma de onda digital y a la modulación de una señal de doble banda lateral con portadora suprimida (DSB-SC, del inglés *Double SideBand – Suppressed Carrier*) con una forma de onda digital polar (Couch, 2008).

La señal de BPSK se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$s_n(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi ft + \pi(1 - n)), n = 0, 1 \quad (3)$$

Esto produce dos fases, 0 y π . Los datos binarios generalmente se transmiten con las siguientes señales:

$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi ft + \pi) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi ft) \text{ para el "0" binario (4-a)}$$

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi ft) \text{ para el "1" binario (4-b)}$$

donde f es la frecuencia de banda base.

El espacio de señal puede ser representado por la función base:

$$\phi(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi ft) \quad (5)$$

donde arbitrariamente el 1 se puede representar por $\sqrt{E_b} \phi(t)$ y el 0 por $-\sqrt{E_b} \phi(t)$.

Para señales moduladas por fase, el índice de modulación digital h se define como:

$$h = \frac{2\Delta\theta}{\pi} \quad (6)$$

donde $2\Delta\theta$ es la máxima desviación pico a pico de fase (radianes) durante el tiempo requerido para enviar un símbolo, T_s . Para la señalización binaria, la duración del símbolo es igual a la duración del bit ($T_s = T_b$).

El nivel del término de portadora piloto se establece por el valor de la desviación pico, la cual es de $\Delta\theta$ para $m(t) = \pm 1$. Si D_p es pequeña, entonces el término de portadora piloto tiene una amplitud relativamente grande en comparación con el término de datos, y en consecuencia existe muy poca potencia en éste, el cual contiene la información fuente.

Para maximizar la eficiencia de señalización y que haya una baja probabilidad de error, debe intensificarse la potencia en el término de datos. Esto se logra dejando que $\Delta\theta = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$ radianes, lo cual corresponde al índice de modulación digital de $h = 1$. Para este caso óptimo donde $h = 1$, la señal BPSK se convierte en:

$$s(t) = -A_c m(t) \sin 2\pi f_c t \quad (7)$$

Se asume que $\Delta\theta = 90^\circ$ y $h = 1$ para la señalización por BPSK. La ecuación 5 muestra que la BPSK es equivalente a la señalización de DSB-SC con una forma de onda de datos de banda base polar. La envolvente compleja para esta señal BPSK es:

$$g(t) = jA_c m(t) \quad (8)$$

En BPSK, la densidad espectral de potencia para la envolvente compleja está dada por la ecuación 8:

$$\mathcal{P}_g(f) = A_c^2 T_b \left(\frac{\text{sen} \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \quad (9)$$

donde $m(t)$ tiene valores de ± 1 , así que $s(t)$ tiene una potencia promedio normalizada de $\frac{A_c^2}{2}$. La densidad espectral de potencia para la señal BPSK correspondiente se evalúa trasladando el espectro de banda base a la frecuencia de la portadora, como se comprueba sustituyendo la ecuación 9 dentro de la ecuación 2-b.

El espectro de la modulación BPSK resultante se observa en la figura 2.3. Podemos visualizar, que el ancho de banda de nulo a nulo para la modulación BPSK es de $2R$, donde R es la velocidad de datos (bits/s).

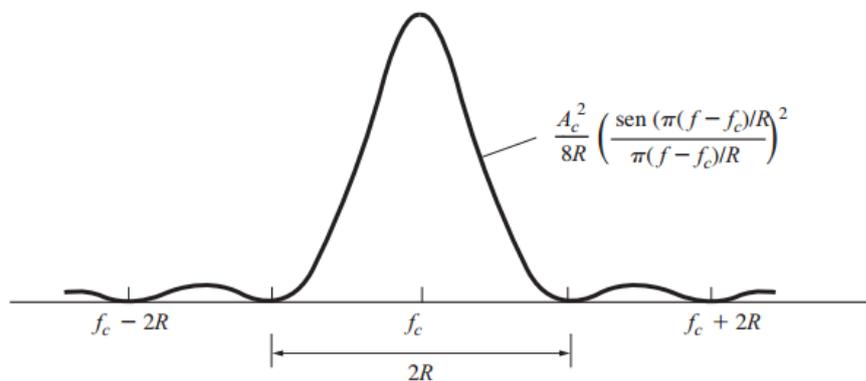


Figura 2. 3: Espectro de BPSK
Fuente: (Couch, 2008)

Probabilidad de error de BPSK: la tasa de bits erróneos en BPSK en un canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN, del inglés *Additive White Gaussian Noise*) puede calcularse por:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \text{ o } P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (10)$$

donde *erfc* es la función de error complementaria.

Debido a que existe solo un bit por símbolo, esto es también la tasa de error de símbolo. Se debe emplear la detección síncrona para identificar la BPSK, como se ilustra en la figura 2.4.

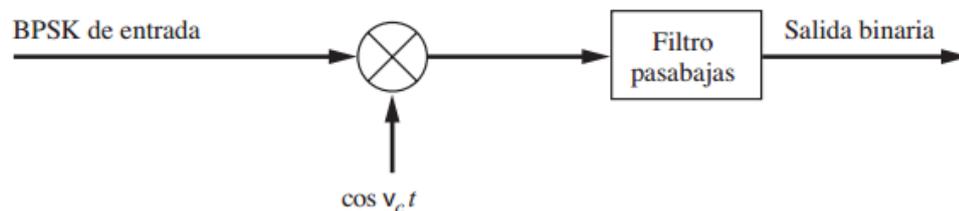


Figura 2. 4: Detección de BPSK
Fuente: (Couch, 2008)

Ya que no existe un término de portadora discreta en la señal BPSK se puede utilizar un PLL para extraer la referencia de portadora solo si una portadora piloto de bajo nivel se transmite junto con la señal de BPSK.

De otra manera, se puede recurrir a un lazo de Costas (véase la figura 2.5) o a un lazo cuadrático (véase la figura 2.6) para sintetizar la referencia de portadora a partir de esta señal BPSK y para proveer una detección coherente.

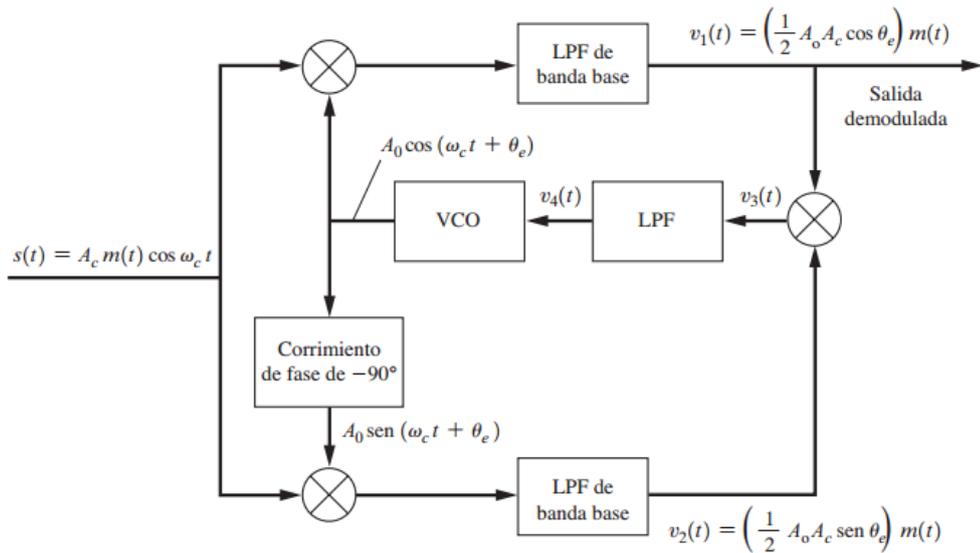


Figura 2. 5: Lazos de recuperación enganchado por fase de costas de portadora para señales BPSK.
Fuente: (Couch, 2008)

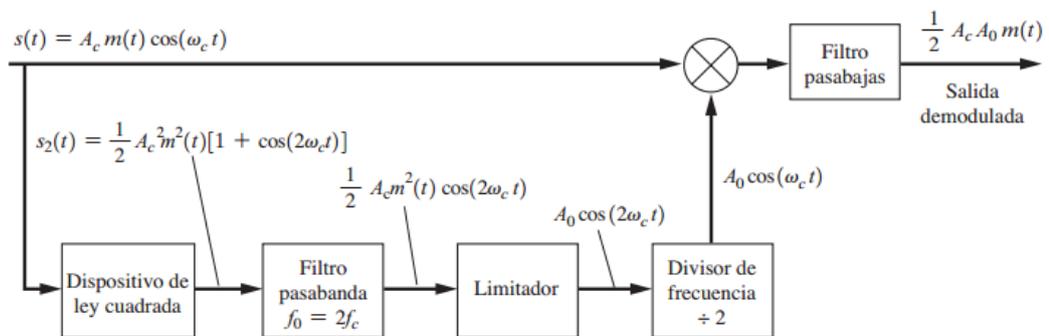


Figura 2. 6: Lazos de recuperación cuadrático de portadora para señales BPSK.
Fuente: (Couch, 2008)

Para resolver la ambigüedad de 180° de fase se emplea una codificación diferencial a la entrada del transmisor y decodificación diferencial a la salida del receptor, como se muestra en la figura 2.7. Cada dígito en la secuencia codificada se obtiene al comparar al bit de entrada en el presente con el bit codificado en el pasado. Un 1 binario se codifica si el bit de entrada en el presente y el bit codificado en el pasado son de un estado opuesto, y un 0 binario se codifica si los estados son iguales. Esto es

equivalente a la tabla de verdad de una compuerta XOR o un sumador de módulo 2.

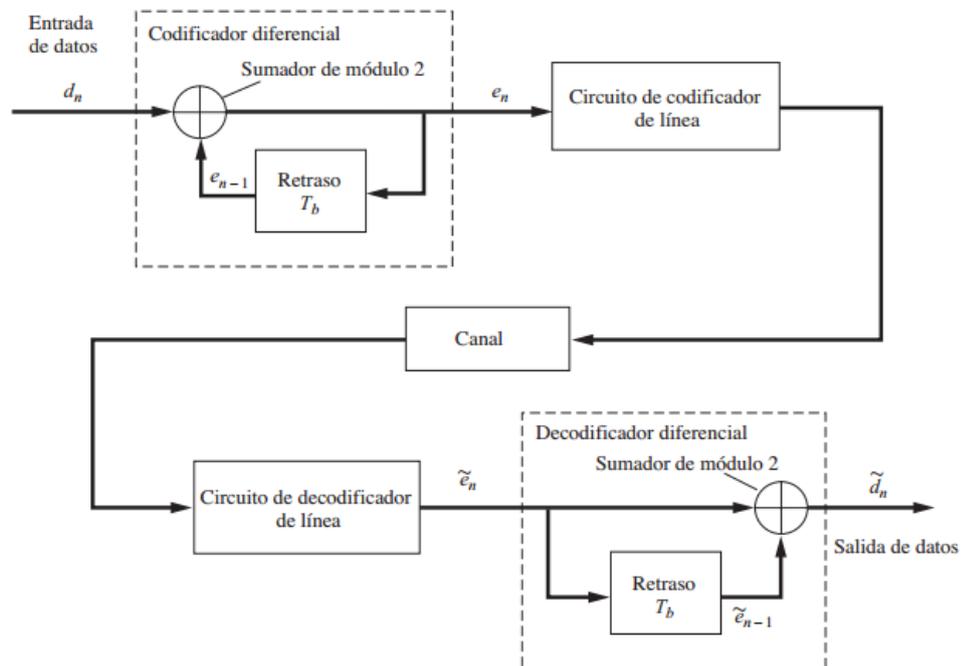


Figura 2. 7: Sistema de codificación diferencial
Fuente: (Couch, 2008)

En el receptor, la señal codificada se decodifica al comparar el estado de los bits adyacentes. Si el bit codificado recibido en el presente tiene el mismo estado que el bit codificado en el pasado, entonces se decodifica un 0 binario a la salida. De manera similar, se decodifica un 1 binario para el caso de estados opuestos.

La polaridad de la forma de onda codificada diferencialmente puede invertirse sin afectar los datos decodificados, lo que proporciona una gran ventaja cuando la forma de onda se pasa a través de miles de circuitos en un sistema de comunicaciones y el sentido positivo de la salida se pierde o

cambia ocasionalmente conforme lo hace la red. Esto ocurre a veces durante la conmutación entre varias trayectorias de datos.

Para una óptima detección de BPSK, es decir, para la tasa de bits erróneos (BER, del inglés *Bit Error Rate*) más baja posible en el caso de ruido blanco gaussiano aditivo, el filtro pasa bajas mostrado en la figura 2.4 es reemplazado por un procesamiento con filtro acoplado de integra y deshecha.

2.5. Diagramas de constelación de BPSK y QPSK

Las modulaciones BPSK y QPSK son óptimas desde el punto de vista de protección frente a errores debido a que la diferencia entre distintos símbolos asociados a cada fase es máxima para la potencia y ancho de banda utilizados. La gran ventaja de las modulaciones PSK es que la potencia de todos los símbolos es la misma, por lo que se simplifica el diseño de los amplificadores y etapas receptoras lo que significa reducción de costos, dado que la potencia de la fuente es constante.

Un método conveniente para representar los esquemas de PSK es el diagrama de constelación. Esta muestra los puntos en el plano complejo donde, en este contexto, los ejes real e imaginario son nombrados de “en fase” y “cuadratura” respectivamente debido a su separación de 90° . La amplitud de cada punto a lo largo del eje en fase se utiliza para modular una onda de coseno (o seno) y la amplitud a lo largo del eje de cuadratura para

modular una onda seno (o coseno). Por convención, en fase modula el coseno y la cuadratura modula el seno.

En PSK, los puntos de la constelación se colocan usualmente con un espaciado angular uniforme alrededor de un círculo. Esto da una separación máxima de fase entre puntos adyacentes y por lo tanto la mejor inmunidad ante las interferencias. Se colocan en un círculo para que todos puedan ser transmitidos con la misma energía. De esta forma, los módulos de los números complejos que ellos representan serán los mismos y así lo harán las amplitudes de las ondas coseno y seno.

En la figura 2.8 y en la figura 2.9 se muestran los diagramas de constelación de BPSK que utiliza dos fases y de QPSK que utiliza cuatro fases para representar los símbolos, respectivamente. En BPSK la señalización es antipodal, es decir, los símbolos son iguales en amplitud pero opuestos en fase.

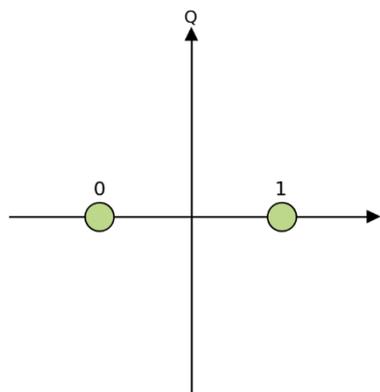


Figura 2. 8: Constelación de BPSK
Fuente:: (Proakis, 2001)

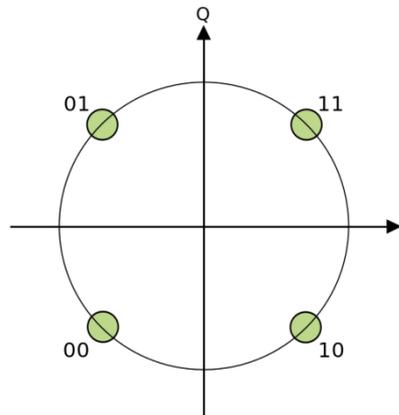


Figura 2. 9: Constelación de QPSK con codificación Gray. Cada símbolo adyacente solo difiere en un bit.

Fuente: (Proakis, 2001)

2.6. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura

La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura también es llamada como PSK cuadrifásica, 4-PSK o 4-QAM (aunque los conceptos originales de QPSK y 4-QAM son diferentes, las ondas de radio moduladas resultantes son exactamente las mismas).

Como fue mostrado en la figura 2.9, QPSK utiliza cuatro puntos en el diagrama de la constelación, con igual espaciado alrededor de un círculo. Mediante el uso de cuatro fases, QPSK puede codificar dos bits por símbolo. En el diagrama anterior se usa codificación Gray para minimizar la tasa de bits erróneo.

QPSK puede utilizarse para duplicar la tasa de transmisión de datos en comparación con un sistema BPSK mientras se mantiene el mismo ancho de banda de la señal o para mantener la tasa de datos de BPSK, pero reducir a la mitad el ancho de banda necesario. En este último caso, la tasa de bits

erróneos de QPSK es exactamente la misma que la de BPSK. La portadora transmitida puede someterse a varios cambios de fase.

Teniendo en cuenta que los canales de comunicación de radio son asignados por agencias tales como la Comisión Federal de Comunicación (FCC, del inglés *Federal Communication Commission*) dando un ancho de banda prescrito (máximo), la ventaja de QPSK sobre BPSK se hace evidente: QPSK duplica la tasa de datos en un determinado ancho de banda en comparación con BPSK. El inconveniente ingenieril que trae como consecuencias es que los transmisores y receptores QPSK son más complicados que los de BPSK. Sin embargo, con la tecnología electrónica moderna, la penalización en el costo es muy moderada.

La implementación de QPSK es más general que la de BPSK. Escribiendo los símbolos del diagrama de constelación en términos de ondas senos y cosenos tenemos:

$$s_n(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + (2n - 1)\frac{\pi}{4}\right), \quad n = 1, 2, 3, 4. \quad (11)$$

Esto produce cuatro fases $\frac{\pi}{4}$, $\frac{3\pi}{4}$, $\frac{5\pi}{4}$ y $\frac{7\pi}{4}$.

El espacio de señal de dos dimensiones tiene las siguientes funciones bases:

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \quad (12)$$

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sen(2\pi f_c t) \quad (13)$$

La primera función base se usa como la componente en fase y la segunda como la componente en cuadratura de la señal. Por tanto, la constelación de la señal consiste de 4 puntos en el espacio de señal: $\left(\pm\sqrt{\frac{E_s}{2}}, \pm\sqrt{\frac{E_s}{2}}\right)$. Los factores de 1/2 indican que la potencia total se divide por igual entre dos portadoras. La comparación de estas funciones de base con la de BPSK muestra claramente como QPSK puede verse como dos señales BPSK independientes.

Los sistemas QPSK pueden implementarse de varias maneras. A continuación, se muestra una ilustración (véase las figuras 2.10 y 2.11) de los principales componentes de la estructura de un transmisor y de un receptor.

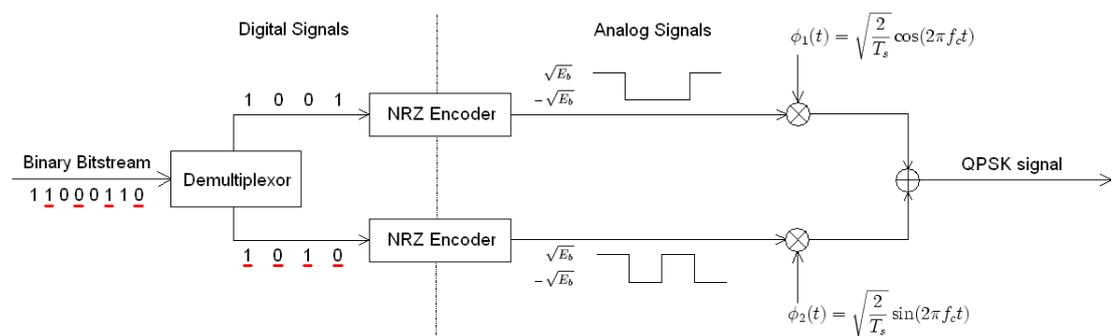


Figura 2. 10: Estructura del transmisor conceptual para QPSK
Fuente: (Proakis, 2001)

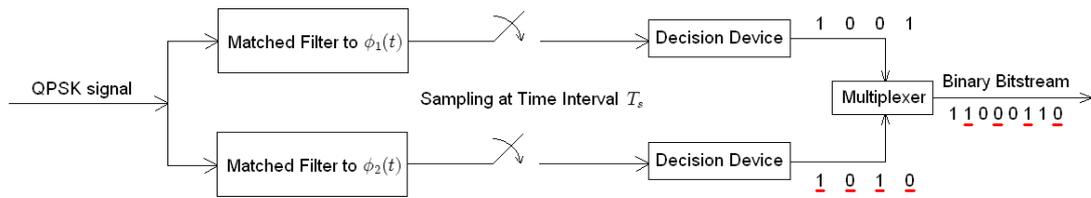


Figura 2. 11: Estructura del receptor en QPSK.
Fuente: (Proakis, 2001)

El flujo de datos binarios se divide en las componentes en fase y en cuadratura. A continuación, se modulan por separado sobre dos funciones bases ortogonales. En el esquema mostrado en la figura 2.10 se usan dos sinusoides. Posteriormente, se superponen las dos señales, y la señal resultante es la señal QPSK. Los codificadores polares no retorno a cero pueden situarse antes de la fuente de datos binaria, sin embargo han sido colocados después para ilustrar la diferencia conceptual entre las señales digitales y analógicas implicadas con la modulación digital.

En el receptor, mostrado en la figura 2.11, los filtros acoplados pueden ser reemplazados con correlacionadores. Cada dispositivo de detección utiliza un valor umbral de referencia para determinar si se detecta un 1 o un 0 (Haykin, 2001).

2.7. Aplicaciones de la modulación PSK.

Debido a la simplicidad de PSK, particularmente cuando se compara con su competencia, la modulación de amplitud en cuadratura, es ampliamente utilizada en las tecnologías existentes actualmente. A continuación son mencionadas algunas de ellas.

El estándar inalámbrico para redes de área local (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Network*) es IEEE 802.11b, que utiliza diferentes variantes de PSK dependiendo de la velocidad de datos requerida. Por ejemplo, para velocidades básicas de 1 Mbit/s se utiliza DBPSK (diferencial BPSK). Para proporcionar velocidades extendidas de 2 Mbit/s, DQPSK es utilizada. Para llegar alcanzar 5.5 Mbit/s y la tasa total de 11 Mbit/s, QPSK es utilizada, sino que tiene que ir acompañada de la modulación por código complementario.

El estándar de WLAN de alta velocidad, IEEE 802.11g tiene ocho velocidades de datos: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbit/s. Los modos de 6 y 9 Mbit/s utilizan la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) donde cada subportadora es modulada en BPSK. Los modos de 12 y 18 Mbit/s utilizan OFDM con QPSK. Los cuatro modos más rápidos utilizan OFDM con formas de modulación de amplitud en cuadratura.

La simplicidad de BPSK hace que sea adecuado para transmisores pasivos de bajo costo, y se utiliza en las normas de identificación de radio frecuencias (RFID, del inglés *Radio-frequency Identification*) como ISO/IEC 14443 que ha sido adoptada para pasaportes biométricos, tarjetas de crédito y muchas otras aplicaciones.

La modulación originalmente escogida para la versión 1 del Bluetooth fue la modulación por desplazamiento de fase gaussiana (GFSK, del inglés *Gaussian Frequency Shift Keying*), sin embargo, con las mayores velocidades de transmisión requeridas por Bluetooth 2 se adoptó la modulación por desplazamiento de fase para habilitar las velocidades de datos más altas que pueden obtenerse con la tasa de datos mejorada (EDR, del inglés *Enhanced Data Rate*).

Una tecnología similar, el estándar inalámbrico IEEE 802.15.4 usado por ZigBee también confía en PSK usando dos bandas de frecuencias: 868 – 915 MHz con BPSK y en 2.4 GHz con OQPSK.

QPSK es ampliamente utilizado en la transmisión de canales por satélite y algunos canales de alta definición (HD, del inglés *High Definition*). No obstante, solo son algunos canales HD pues la mayoría de la programación de alta definición se entrega en 8-PSK debido a los mayores débitos de vídeo en alta definición y el alto costo del ancho de banda de los satélites.

CAPÍTULO 3: Implementación de los esquemas de modulación

BPSK y QPSK.

A lo largo de este capítulo serán explicadas las simulaciones realizadas en Simulink la cual es un entorno de programación visual de la herramienta Matlab que usa la interconexión de bloques para la creación de sistemas complejos. Durante el presente trabajo realizamos 2 simulaciones, una utilizando el sistema de modulación BPSK y otro usando el sistema de modulación QPSK. Ambos sistemas son similares cambiando solamente los moduladores/demoduladores para así realizar una comparación de la velocidad de transmisión y de la tasa de bit erróneo que se alcanza con cada uno de ellos. También podrá ser evaluada la importancia de los codificadores/decodificadores en los sistemas de comunicaciones y como ayudan en la corrección de errores. En el presente trabajo será utilizada la codificación BCH la cual es muy utilizada y fue descrita en el capítulo anterior.

3.1. Sistemas implementados.

En la figura 3.1 se muestra el sistema BPSK implementado y en la figura 3.2 se muestra el sistema QPSK. En cada uno de los sistemas implementados el transmisor está compuesto por un bloque generador de información, el codificador BCH y el modulador (BPSK o QPSK según el caso).

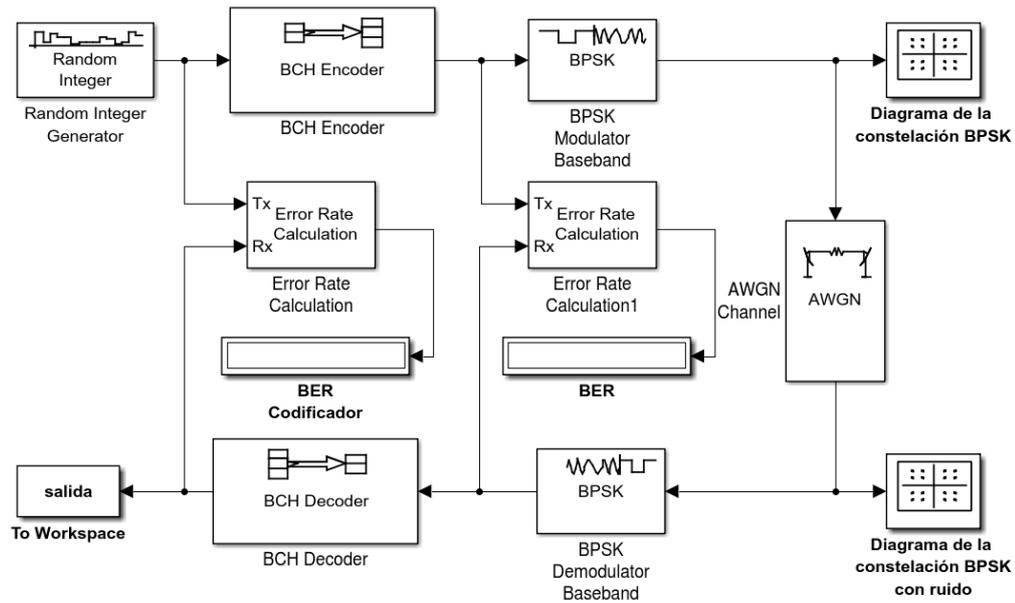
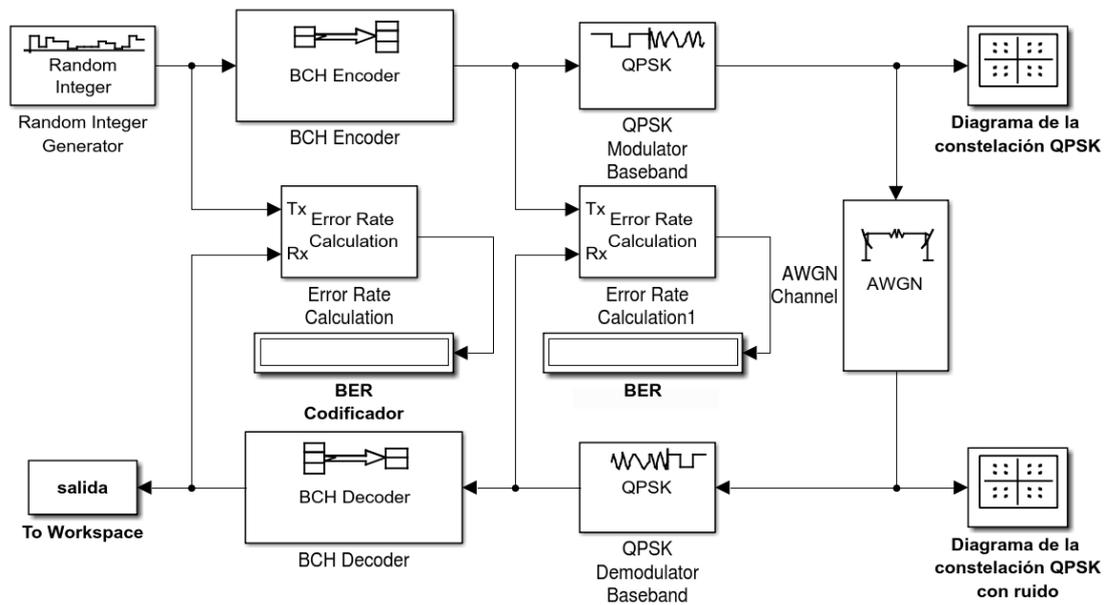


Figura 3. 1: Diseño de bloques para el sistema BPSK.
Elaborado por: Autor



(b)

Figura 3. 2: Diseño de bloques para el sistema QPSK.
Elaborado por: Autor

Los receptores están compuestos por el demodulador (BPSK o QPSK según el caso) el decodificador BCH y un bloque finalizador que envía el

resultado al espacio de trabajo del Matlab. El canal de transmisión lo simularemos usando un bloque que genera ruido blanco gaussiano y lo adiciona a la señal pudiendo ser ajustado el nivel de ruido a través de la relación señal a ruido (SNR, del inglés *Signal to Noise Ratio*).

Para la simulación también colocamos varias herramientas como el diagrama de constelación y el calculador de tasa de bits erróneos. A continuación se describen los bloques y la configuración usada en cada uno.

En la figura 3.3 se muestra el bloque que genera los números aleatorios llamado *Random Integer*. Mientras que en la figura 3.4 se muestra la configuración del bloque en mención, que se fijó para que la salida fuera '0' ó '1', en tramas de 64 bits y con un tiempo de muestreo 1/1000 s, lo que quiere decir que se enviarán tramas de 64 bits con una frecuencia de 1000 Hz.

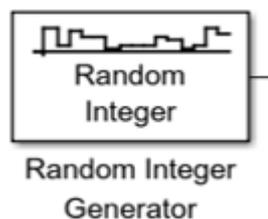


Figura 3. 3: Diagrama de bloques de Random Integer (entero aleatorio).
Elaborado por: Autor

El codificador BCH es representado por el bloque mostrado en la figura 3.5. Su configuración es relativamente simple, K es el tamaño del mensaje, en nuestro caso 64 ya que fue fijado así en el bloque anterior. El parámetro

K es el tamaño de la palabra codificada. En nuestro caso lo fijamos en 128, este valor combinado con un polinomio generador con forma matricial $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ es la configuración utilizada por defecto en el bloque Simulink, esto permite recuperar hasta 7 bits erróneos en cada trama.

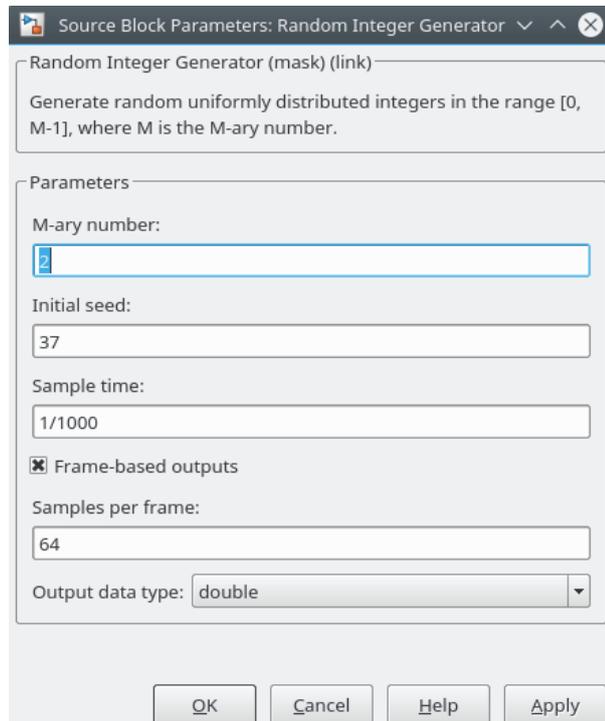


Figura 3. 4: Configuración de parámetros del bloque Random Integer.
Elaborado por: Autor

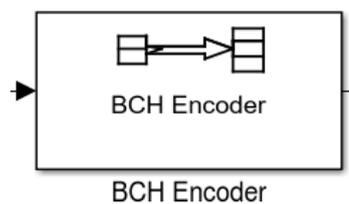


Figura 3. 5: Diagrama de bloques del encoder BCH.
Elaborado por: Autor

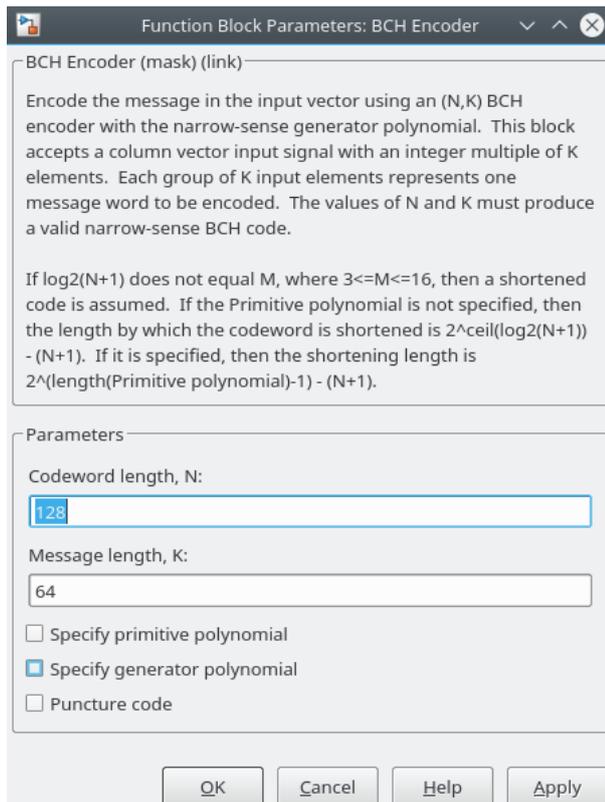


Figura 3. 6: BCH encoder (a) bloque (b) configuración.
Elaborado por: Autor

La figura 3.7 muestra los bloques de moduladores usados en cada una de las simulaciones (a) usado en el sistema BPSK y (b) usado en el sistema QPSK. La configuración usada en esos bloques es la que aparece por defecto.

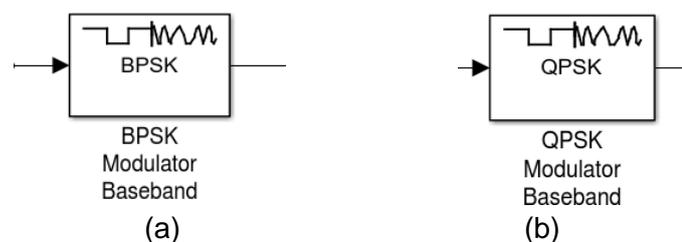


Figura 3. 7: (a) Bloque modulador BPSK, y (b) bloque modulador QPSK.
Elaborado por: Autor

El canal fue modelado a través del bloque *AWGN Channel* el cual permite la introducción controlada de ruido gaussiano a través del parámetro SNR. En la figura 3.8 se muestra el bloque utilizado para la simulación y la configuración utilizada.

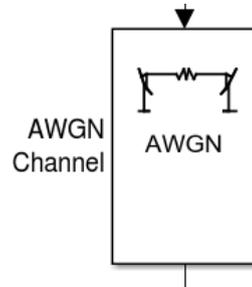


Figura 3. 8: Diagrama de bloques del canal AWGN.
Elaborado por: Autor

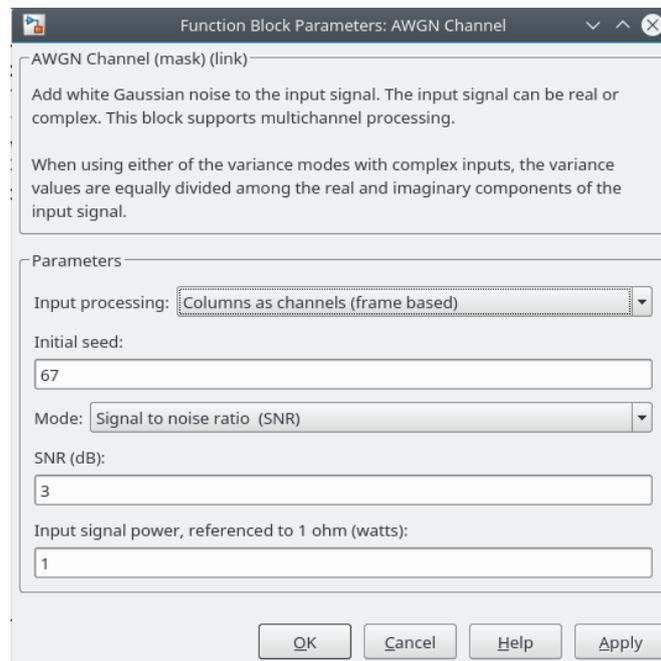


Figura 3. 9: Configuración de parámetros del diagrama de bloques del canal AWGN.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.10 se muestran los bloques usados para la demodulación en cada uno de los sistemas implementados. Al igual que con los bloques

moduladores, en estos bloques se utilizaron los parámetros que están por defecto.

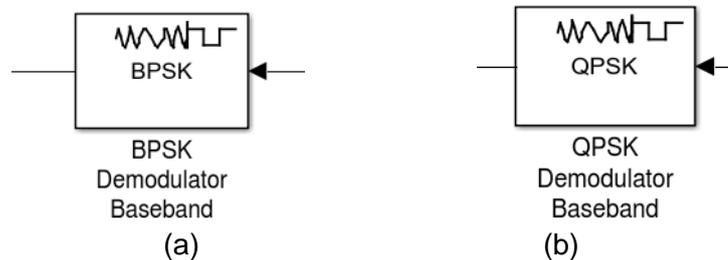


Figura 3. 10: (a) Bloque demodulador BPSK (b) bloque demodulador QPSK.
Elaborado por: Autor

El decodificador BCH es simulado a través del bloque que aparece en la figura 3.11. Se debe insistir en el hecho de que la configuración (véase la figura 3.12) tiene que estar en concordancia con la configuración del bloque codificador, en cuanto al tamaño de palabra codificada, tamaño del mensaje y al polinomio generador, el cual, si fuera manualmente insertado en el codificador, también debería ser insertado en el decodificador.

Si alguno de estos parámetros no estuviera configurado de manera correcta, la decodificación no sería correcta y el mensaje no podría ser recuperado.

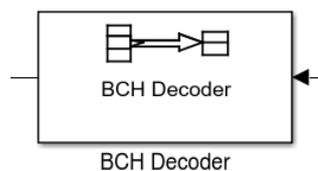


Figura 3. 11: Diagrama de bloque del encoder BCH.
Elaborado por: Autor

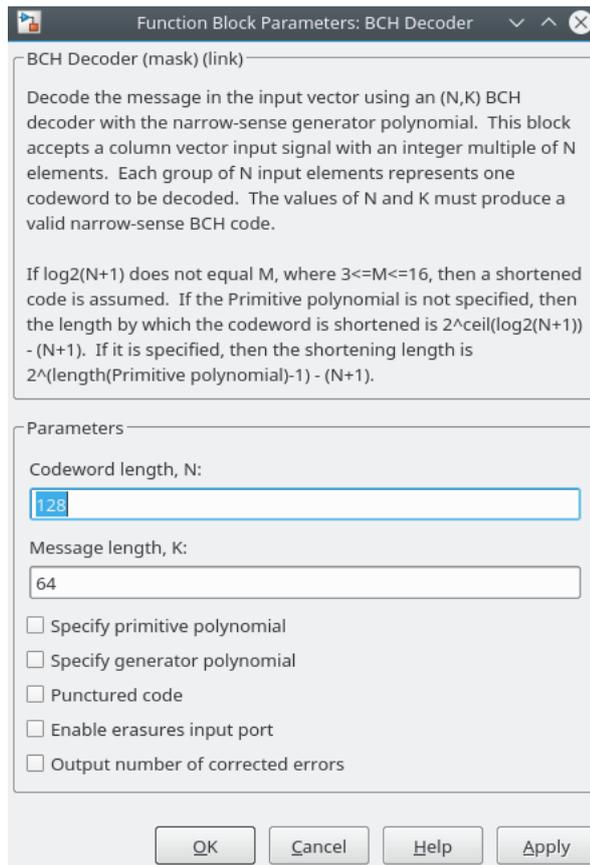


Figura 3. 12: BCH decoder (a) bloque (b) configuración.
Elaborado por: Autor

El bloque finalizador se muestra en la figura 3.13. Su función es enviar el mensaje decodificado al espacio de trabajo del Matlab y almacenarlo en una variable llamada salida.



Figura 3. 13: Diagrama de bloque finalizador.
Elaborado por: Autor

La figura 3.14 muestra el diagrama de bloque de la constelación que es una de las herramientas virtuales utilizadas y que permite observar la constelación de la modulación y que tanto esta es afectada por el ruido.

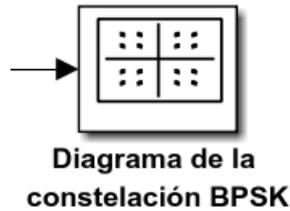


Figura 3. 14: Diagrama de bloque de la constelación de BPSK.
Elaborado por: Autor

Otra herramienta usada para evaluar nuestro sistema es el calculador de tasa de bits erróneo (BER) a través del bloque *Error Rate Calculation* (véase la figura 3.15) el cual se conecta a un bloque *Display* para poder observar el valor calculado.

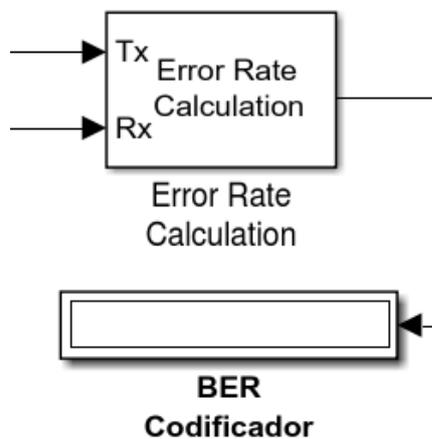


Figura 3. 15: Bloques del cálculo de la tasa de error (ERC) y visualizar la tasa de error de bits (BER).
Elaborado por: Autor

3.2. Comparación del desempeño de los sistemas BPSK y QPSK

En este sub-epígrafe serán expuestos los valores medidos en cada uno de los sistemas implementados. Será graficada la BER de cada uno de los sistemas contra diferentes niveles de ruido. El tiempo de simulación fue fijado en 10000 segundos.

Utilizando los diagramas de constelación podemos observar la influencia del ruido en los sistemas de comunicaciones de este tipo. En la figura 3.16 y la figura 3.18 se muestran las constelaciones de las señales al salir del transmisor.

Mientras, que en la figura 3.17 y la figura 3.19 se muestran las constelaciones de las señales en la entrada del receptor con 10 dB de SNR después de pasar por el canal. Como puede observarse el ruido dispersa los puntos de la constelación lo que hace que aumente los errores durante la recuperación del mensaje.

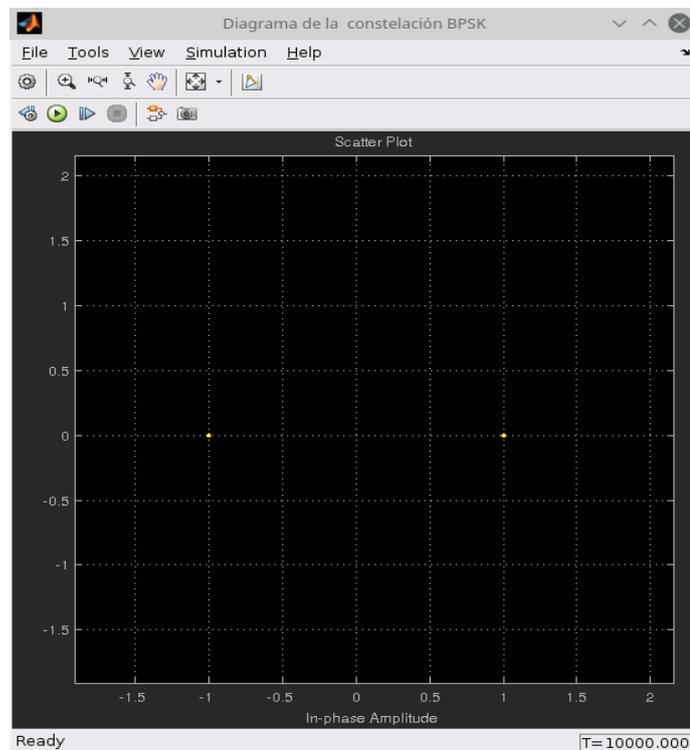


Figura 3. 16: Diagrama de constelación para el diseño del sistema BPSK.
Elaborado por: Autor

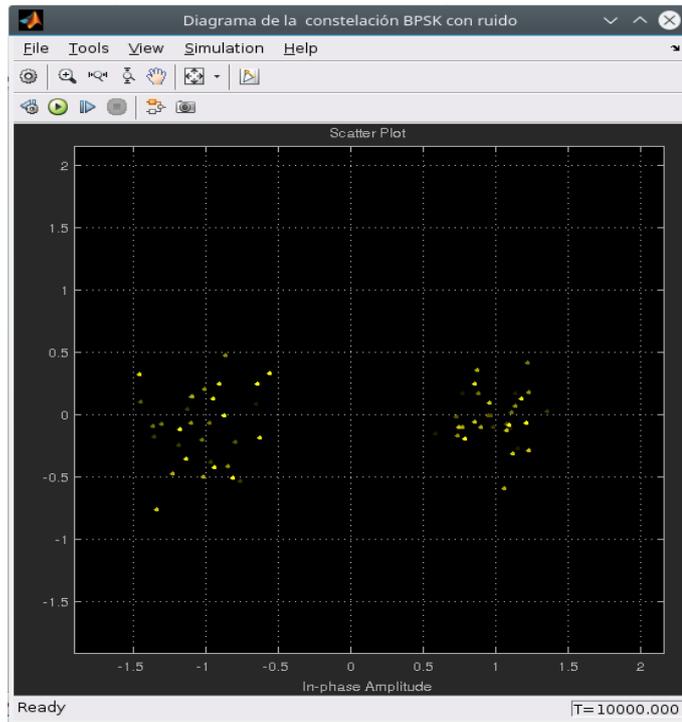


Figura 3. 17: Diagrama de constelación para sistema BPSK con una SNR de 10 dB.
Elaborado por: Autor

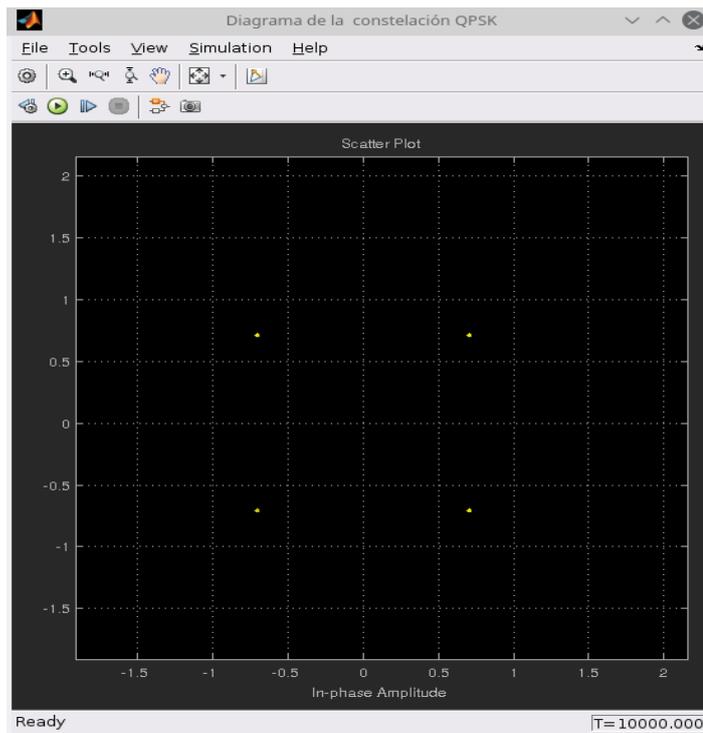


Figura 3. 18: Diagrama de constelación para el diseño del sistema QPSK.
Elaborado por: Autor

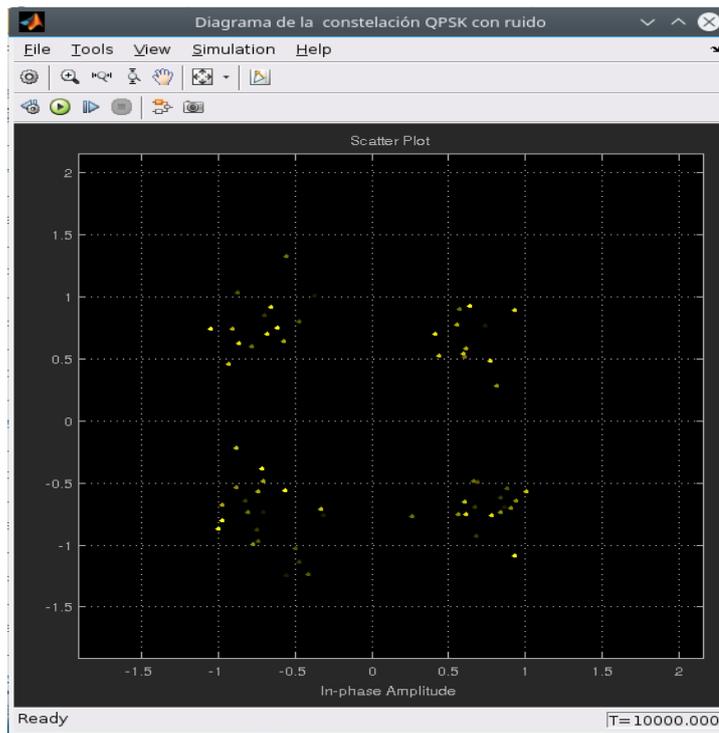


Figura 3. 19: Diagrama de constelación para sistema QPSK con una SNR de 10 dB.
Elaborado por: Autor

La modulación QPSK, como ya fue estudiado, duplica la tasa de transmisión de información que puede ser enviada usando BPSK, pero esto acarrea una disminución en la inmunidad al ruido.

Para comparar el desempeño del sistema frente a diferentes niveles de ruido se anotaron los valores de BER en BPSK y QPSK con y sin corrección de errores mientras se hacía variar la SNR de 0 a 10 dB. La figura 3.20 muestra las curvas de desempeño de BPSK y QPSK, ambas con codificación. Mientras, que en las figuras 3.21 y 3.22 se realiza la comparación entre la tasa de error de bits (BER), tanto para, BPSK como QPSK con y sin codificación BCH, respectivamente.

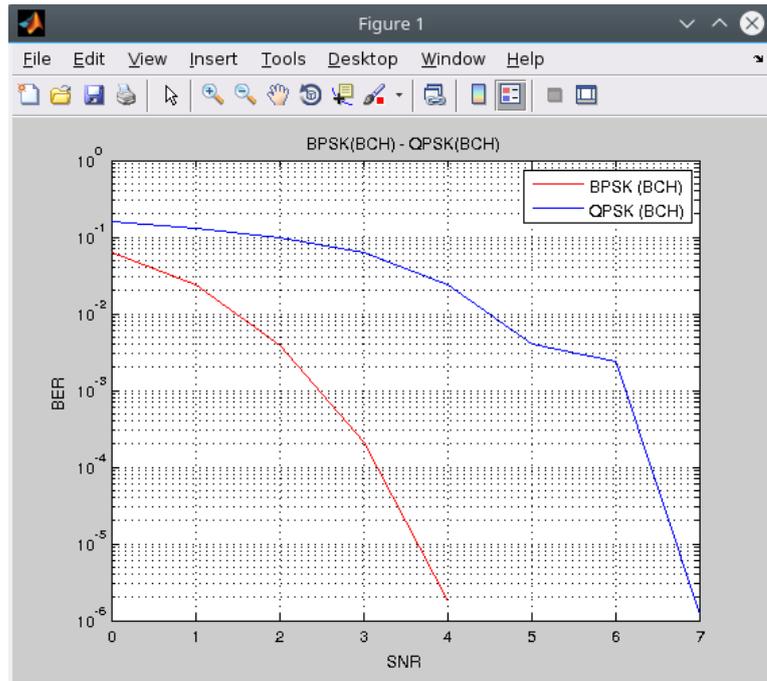


Figura 3. 20: Comparación de BPSK y QPSK ambas con codificación BCH.
Elaborado por: Autor

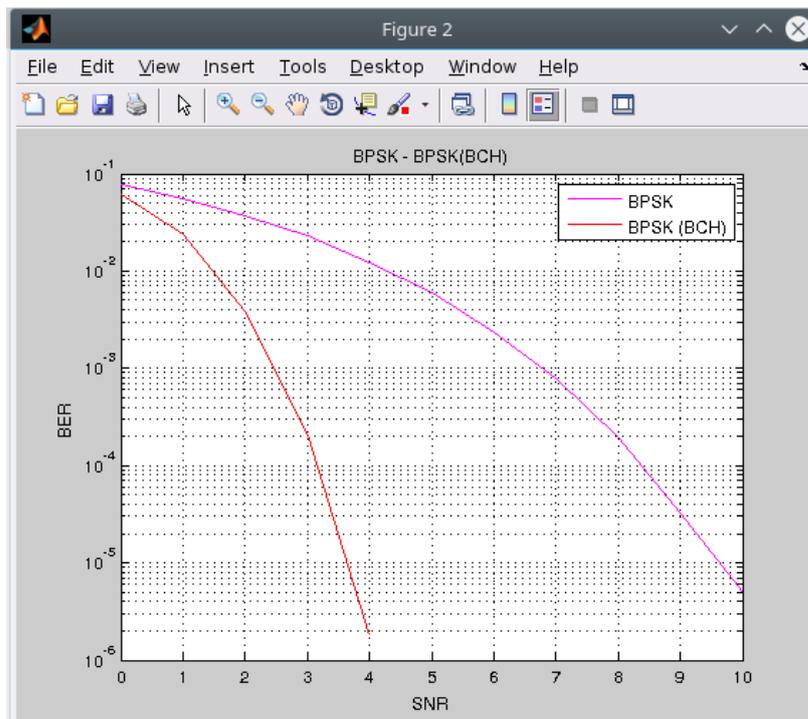


Figura 3. 21: Comparación de BPSK con y sin codificación BCH.
Elaborado por: Autor

Como puede observarse, resulta muy provechoso incluir la codificación ya que reduce drásticamente la tasa de error de bits (BER).

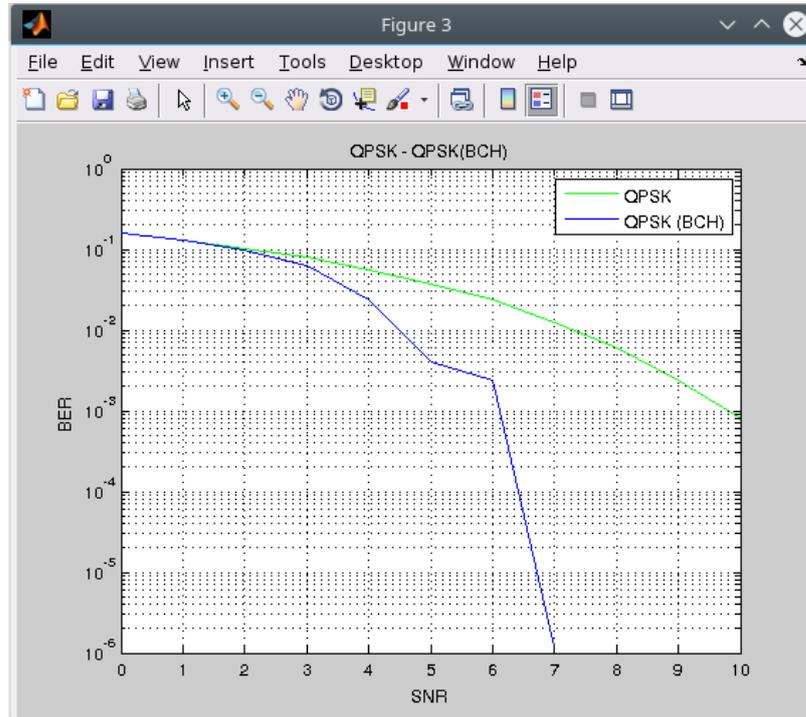


Figura 3. 22: Comparación de QPSK con y sin codificación BCH.
Elaborado por: Autor

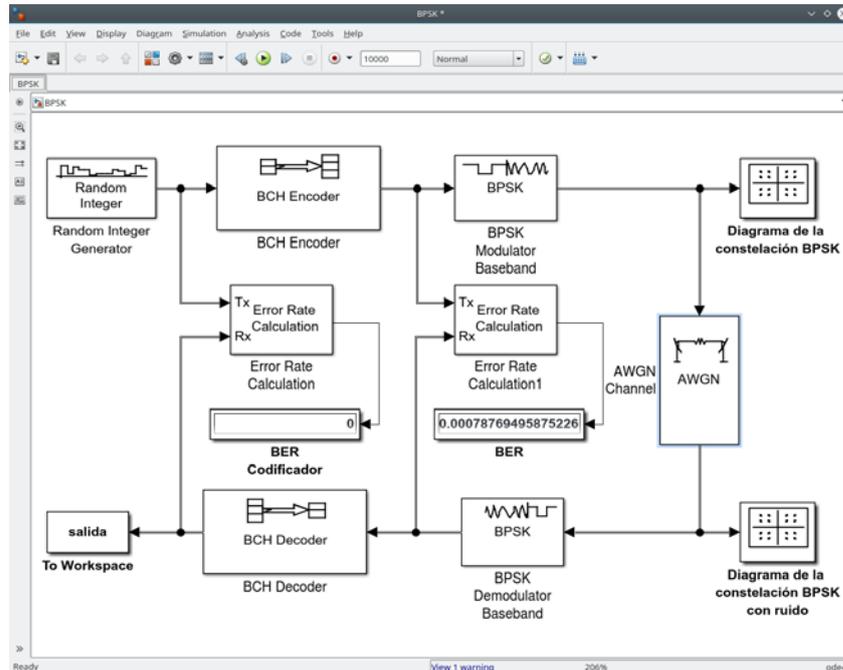


Figura 3. 23: Ventana de simulación del Matlab/Simulink - sistema BPSK, canal con SNR de 7dB.
Elaborado por: Autor

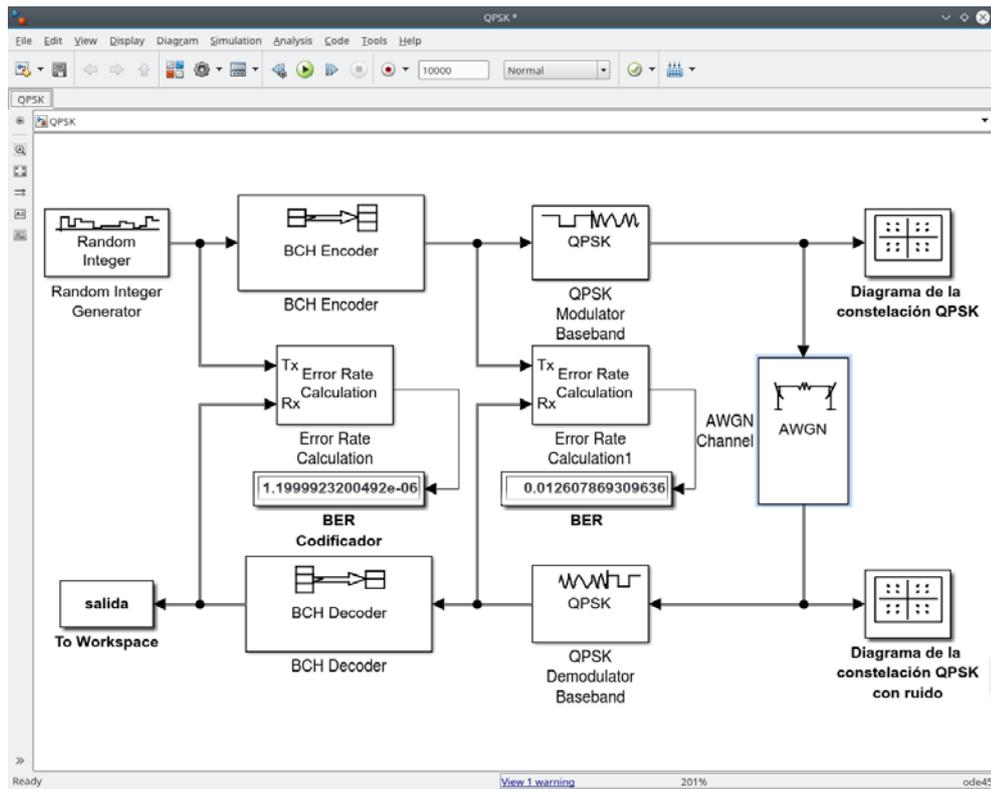


Figura 3. 24: Ventana de simulación del Matlab/Simulink - Sistema QPSK, canal con 7dB de SNR.

Elaborado por: Autor

CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones.

4.1. Conclusiones

El estudio realizado en este trabajo acerca del esquema funcional general de un sistema de comunicaciones facilitó la comprensión de la función que desempeña cada uno de sus bloques componentes. Quedó demostrada la importancia de la modulación, los beneficios que ofrece, tales como la reducción drástica de las dimensiones de las antenas, el mejor aprovechamiento del canal de comunicaciones, el ordenamiento del espectro, la optimización del ancho de banda, facilita la propagación de la señal de información por cable o por aire y muchos otros. Fueron caracterizadas las modulaciones digitales por desplazamiento de fase binaria y cuaternaria. Se analizaron sus representaciones, sus basamentos en relación al desplazamiento de la fase, los diagramas de constelación y las características de la generación y detección de las señales.

El estudio de todo lo mencionado anteriormente permitió la implementación en Matlab/Simulink de dos sistemas de comunicaciones, cada uno basado en BPSK y QPSK, respectivamente. Se utilizaron varias herramientas para evaluar sus comportamientos individuales. Por ejemplo, los diagramas de constelación colocados antes y después del canal muestran el mapeo de las señales en cada caso y la dispersión provocada cuando la relación señal a ruido es baja. También se utilizó la tasa de bits

erróneos como medida cuantitativa para analizar los desempeños de cada uno de los sistemas.

Quedó demostrada la importancia de la etapa de codificación. En este caso fue utilizado un codificador BCH. La comparación de la BER con y sin el uso de la codificación muestra una diferencia significativa, lo cual evidencia que ella es indispensable para lograr mejores desempeños. Lo anterior es válido tanto para BPSK como para QPSK.

En relación a la comparación entre los dos sistemas se pudo comprobar la mayor robustez de BPSK. Esto se debe a que, después de pasar tanto BPSK como QPSK a través de un canal ruidoso, en el demodulador BPSK sólo se requieren dos puntos de decisión para recuperar la información binaria original. Sin embargo, en el demodulador QPSK se necesitan cuatro puntos de decisión, con lo cual aumenta la probabilidad de error. Esto se traduce en la práctica a que con BPSK se puede lograr una mayor cobertura de distancia que con QPSK, por ejemplo, desde una celda celular a la estación base o desde la estación fija hasta los abonados móviles.

La ventaja de QPSK es que duplica la tasa de datos de envío lograda con BPSK. Esto se debe a que cada símbolo puede representar dos bits, a diferencia de BPSK que solo representa un bit por símbolo. Por tanto, el uso

de cada una depende de la aplicación específica que se le dé y de las condiciones de transmisión/recepción.

4.2. Recomendaciones.

Desarrollar modelos de simulación de sistemas de comunicaciones digitales a través de las siguientes plataformas: MatLab/Simulink, LabView, Opnet Modeler, entre otras.

Realizar el análisis de la tasa de error de bits (BER) en la simulación de sistemas de comunicaciones digitales con diferentes esquemas de modulación.

Bibliografía

- Blahut, R. E. (2003). Algebraic Codes for Data Transmission (second edi). Cambridge University Press.
- Bohra, D. D., & Bora, A. (2014). Bit Error Rate Analysis in Simulation of Digital Communication Systems with Different Modulation Schemes. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 1(3), 406–413.
- Carlson, A. B., Crilly, P. B., & Rutledge, J. C. (2002). Communication Systems. An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication (FOURTH EDI). McGraw-Hill.
- Clark, G. C., & Cain, J. B. (1981). Error-Correction Coding for Digital Communications. Springer US. <http://doi.org/10.1007/978-1-4899-2174-1>
- Cortés C., M., & Iglesias L., M. (2004). Generalidades sobre Metodología de la Investigación (Colección Material Didactico). Campeche, México: Universidad Autónoma del Carmen. Recuperado a partir de http://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf
- Couch, L. W. (2008). Sistemas de comunicación digitales y analógicos (Séptima ed, Vol. 1). Pearson Prentice Hall.
- Hassan, A., Elameen, F., & Osman, M. (2015). An Overview and Tutorials on Modeling and Simulation. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 2(9), 71–78.

Haykin, S. (2001). *Communication Systems* (fourth edition). John Wiley & Sons, Inc.

Kumar, M. P., Prasad, K., & Kumar, M. V. (2013). Implementation of Digital Communication Laboratory on FPGA. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2(11), 4318–4322.

Landqvist, R. (2005). *Signal processing techniques in mobile communication systems: signal separation, channel estimation and equalization*. Blekinge Institute of Technology, Karlskrona.

Malhotra, J., Kumar, M., & Sharma, A. (2013). *Performance Comparison of PS-QPSK and PM-QPSK Modulation Schemes in High Capacity Long Haul DWDM Optical Communication Link*. *International Journal of Engineering Sciences*, 2(5), 154–159.

Proakis, J. G. (2001). *Digital Communications* (Fourth edition). McGraw-Hill.

Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital Communication* (5th edition). McGraw-Hill.

Rong, L., & Shanji, L. (2013). *Design of the QPSK modulation and demodulation experimental system based on LabVIEW*. *Electronic Test*, (2). Recuperado a partir de http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-WDZC2013Z2016.htm



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **CHÁVEZ CARTAGENA, DAVID FRANCISCO** con C.C: # 0927204875 autor del Trabajo de Titulación: **Implementación de los esquemas de modulación BPSK y QPSK en Matlab/Simulink: estudio comparativo** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, 15 de Marzo de 2017

f. _____
Nombre: **CHÁVEZ CARTAGENA, DAVID FRANCISCO**
C.C: 0927204875

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN BPSK Y QPSK EN MATLAB/SIMULINK: ESTUDIO COMPARATIVO		
AUTOR(ES)	CHÁVEZ CARTAGENA, DAVID FRANCISCO		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. LUIS ORLANDO PHILCO ASQUI		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	15 de Marzo de 2017	No. DE PÁGINAS:	62
ÁREAS TEMÁTICAS:	Sistemas de Transmisiones, Sistemas de Comunicaciones.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Sistema de Comunicaciones, Modulaciones Digitales, Modulación por Desplazamiento de Fase, BPSK, QPSK, MatLab.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>El propósito general de un enlace de comunicaciones es transmitir señales de un lugar a otro. En estos sistemas, la etapa de modulación constituye una etapa fundamental cuyo principal objetivo es generar una señal modulada adecuada a las características del canal de transmisión. Además de cumplir ese propósito ella ofrece múltiples beneficios. Las modulaciones se clasifican en analógicas y digitales. Dentro de la última categoría se encuentran las modulaciones por desplazamiento de fase binaria y cuaternaria, las cuales son ampliamente utilizadas en muchas tecnologías modernas para la transmisión de datos, señalización y sincronización. Entre estas tecnologías podemos mencionar Bluetooth, ZigBee, WLAN, WiMAX y LTE. Por la importancia que tiene el conocimiento de estos esquemas de modulación, en el presente trabajo se implementan en Matlab/Simulink y se comparan dos sistemas de comunicaciones basados en BPSK y QPSK. Los resultados obtenidos comprueban lo establecido tanto en la teoría como en la práctica: BPSK, aunque exhibe una menor eficiencia espectral es más robusta ante el ruido que QPSK por lo que puede cubrir mayores distancias. La ventaja de QPSK es que duplica la tasa de datos de transmisión en relación a BPSK.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-39078149	E-mail: dchavez_09@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-68366762		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
No. DE REGISTRO (en base a datos):			
No. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			