

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES  
DIGITALES**

**DILI DUARTE DUARTE  
OSCAR DANIEL URIBE PARRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2004**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES  
DIGITALES**

**DILI DUARTE DUARTE  
OSCAR DANIEL URIBE PARRA**

**Proyecto para optar al título de  
Ingenieros Electrónicos**

**Director  
OSCAR MAURICIO REYES TORRES  
Ingeniero**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2004**

A Dios, por permitirme alcanzar esta meta.  
A mi mamá y toda mi familia, por su confianza y apoyo incondicional.  
A mi papá (q.e.p.d), por su paciencia y dedicación.  
A mis amigos, por enseñarme a vivir.

DILI

A Dios, por brindarme esta oportunidad.

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A Sandra, por su comprensión

A mi hija, la razón de mi ser.

OSCAR

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Oscar Mauricio Reyes, Ingeniero electrónico y director del proyecto por su interés, colaboración y asesoría durante la realización de este proyecto de grado.

## CONTENIDO

	pág
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1. PRELIMINARES</b>	6
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	6
<b>1.2 OBJETIVOS</b>	8
1.2.1 Objetivo general	8
1.2.2. Objetivo específico	8
<b>1.3 LOGROS</b>	9
<b>2. DESCRIPCIÓN GENERAL</b>	11
<b>2.1 METODOLOGÍA DEL LABORATORIO</b>	12
2.1.1 Objetivos	12
2.1.2 Marco teórico	12

2.1.3 Procedimiento	13
2.1.4 Preguntas claves	14
2.1.5 Conclusiones	14
2.1.6 Bibliografía	15
<b>2.2 INTERFAZ GRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.2.1 Criterios de Diseño	16
2.2.2 Características	17
<b>2.3 LOS MODELOS</b>	<b>18</b>
2.3.1 Criterios de Diseño	19
2.3.1 Características	20
<b>3 MODELO DE LA MODULACIÓN POR VARIACIÓN DE FRECUENCIA (FSK)</b>	<b>23</b>
<b>3.1 MODULACIÓN FSK</b>	<b>25</b>
3.1.1 Modulador FSK	25
3.1.2 Demodulador FSK	29

<b>3.2 OTROS MÉTODOS DE DEMODULACION</b>	<b>34</b>
3.2.1 Demodulador FSK coherente	34
3.2.2 Demodulador FSK no coherente	36
<b>4. MODELO DE LA MODULACIÓN POR VARIACIÓN DE FASE (PSK)</b>	<b>39</b>
<b>4.1 SUBSISTEMAS DE LA MODULACIÓN M-ARIA PSK</b>	<b>41</b>
4.1.1 Modulación BPSK	41
4.1.2 Modulación QPSK	48
4.1.3 Modulación OQPSK	56
4.1.4 Modulación 8PSK	58
<b>5. MODELO DE LA MODULACIÓN DE AMPLITUD EN CUADRATURA (QAM)</b>	<b>67</b>
<b>5.1 SUBSISTEMAS DE LA MODULACIÓN M-ARIA QAM</b>	<b>69</b>
5.1.1 Modulación 8QAM	69
5.1.2. Modulación 16QAM	80

<b>CONCLUSIONES</b>	88
<b>RECOMENDACIONES</b>	90
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	91
<b>ANEXO. LABORATORIO DE COMUNICACIONES DIGITALES</b>	93

## **LISTA DE FIGURAS**

	pág
Figura 1. Modulación por variación de frecuencia	23
Figura 2. Modulador FSK. a) Bloque. b) Subsistema	26
Figura 3. Diagrama de constelación FSK	27
Figura 4. Estructura interna de VCO	28
Figura 5. Demodulador FSK. a) Bloque. b) Subsistema	29
Figura 6. Estructura general de un PLL	30
Figura 7. Estructura interna del PLL	32
Figura 8. Código del filtro pasabajas para el PLL.	33
Figura 9. Demodulador FSK coherente. a). Bloque. b). Subsistema	35
Figura 10. Código del filtro pasabajas para el demodulador coherente	36
Figura 11. Demodulador FSK no coherente. a) Bloque. b) Subsistema	37

Figura 12. Filtros acoplados para el demodulador no coherente	37
Figura 13. Código del filtro pasabandas para el demodulador no coherente	38
Figura 14. Modulación por variación de fase	39
Figura 15. Modulador BPSK. a) Bloque. b) Subsistema	42
Figura 16. Código del filtro pasabajas para el modulador M-PSK	44
Figura 17. Diagrama de constelación BPSK	45
Figura 18. Demodulador BPSK. a) Bloque. b) Subsistema	46
Figura 19. Código del filtro pasabajas para el demodulador M-PSK	47
Figura 20. Regiones de decisión BPSK	48
Figura 21. Modulador QPSK. a) Bloque. b) Subsistema	50
Figura 22. Diagrama de constelación QPSK. a). En fase. b). En cuadratura	52
Figura 23. Demodulador QPSK. a) Bloque. b) Subsistema	54
Figura 24. Regiones de decisión QPSK. a). En fase. b). En cuadratura	55

Figura 25. Modulador OQPSK. a) Bloque. b) Subsistema	56
Figura 26. Demodulador OQPSK. a) Bloque. b) Subsistema	57
Figura 27. Modulador 8PSK. a) Bloque. b) Subsistema	58
Figura 28. Diagrama de constelación 8PSK. a). En fase. b). En cuadratura	62
Figura 29. Demodulador 8PSK. a) Bloque. b) Subsistema	63
Figura 30. Regiones de decisión 8PSK. a). En fase. b). En cuadratura	64
Figura 31. Modulación por amplitud en cuadratura	67
Figura 32. Modulador 8QAM. a) Bloque. b) Subsistema	70
Figura 33. Código del filtro pasabajas para el modulador M-QAM	73
Figura 34. Diagrama de constelación 8QAM. a). En fase. b). En cuadratura	74
Figura 35. Demodulador 8QAM. a) Bloque. b) Subsistema	77
Figura 36. Código del filtro pasabajas para el demodulador M-QAM	78
Figura 37. Regiones de decisión 8QAM. a). En fase. b). En cuadratura	79

Figura 38. Modulador 16QAM. a) Bloque. b) Subsistema	81
Figura 39. Diagrama de constelación 16QAM. a). En fase. b). En cuadratura	84
Figura 40. Demodulador 16QAM. a) Bloque. b) Subsistema	86
Figura 41. Regiones de decisión 16QAM. a). En fase. b). En cuadratura	87

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Tabla de verdad FSK	25
Tabla 2. Tabla de verdad PSK	42
Tabla 3. Tabla de verdad QPSK	50
Tabla 4. Tabla de verdad para cada canal QPSK	53
Tabla 5. Tabla de verdad 8PSK	59
Tabla 6. Tabla de verdad para cada canal 8PSK	60
Tabla 7. Índice para cada valor esperado	65
Tabla 8. Tabla de verdad 8QAM	70
Tabla 9. Tabla de verdad para cada canal 8QAM	72
Tabla 10. Índice para cada valor esperado	80
Tabla 11. Tabla de verdad 16QAM	82
Tabla 12. Tabla de verdad para cada canal 16QAM	83

^TITULO: MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES DIGITALES

**AUTORES:**

**DILI DUARTE DUARTE**  
**OSCAR DANIEL URIBE\*\***

PALABRAS CLAVES: Modulación, FSK, PSK, QAM, Simulink, Pasa banda, Digital.

**DESCRIPCIÓN:**

El laboratorio de comunicaciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, posee un número limitado de equipos para la realización de prácticas concernientes a la modulación digital. Teniendo en cuenta el costo que acarrea la adquisición de un número adicional de éstos y el historial de uso de software para la implementación de laboratorios en otras áreas del programa académico, se propone como solución alterna crear una herramienta para el estudio y análisis de sistemas de modulación digital pasabanda empleando el software Matlab-Simulink, que pueda ser utilizada en el desarrollo de prácticas de laboratorio.

Esta herramienta esta compuesta por un conjunto de guías, y tres modelos con sus respectivas interfaces. Las guías conducen al estudiante en la exploración detallada del proceso involucrado en el sistema de comunicación de una manera autónoma. La interfaz tiene como función asignar los parámetros correspondientes a cada uno de los bloques del modelo, de una manera rápida. El modelo contiene la estructura general del sistema de comunicación. Estos modelos poseen una jerarquía de capas, en la primera capa se tiene una visión global, y en las subsiguientes una visión específica de cada una de las etapas.

Este ambiente abarca los tipos de modulación: modulación por variación de fase (PSK), modulación por variación de frecuencia (FSK), modulación de amplitud en cuadratura (QAM) base de las modulaciones usadas en la actualidad.

La realización de este trabajo deja ver el potencial que ofrece Matlab y Simulink en el modelado de sistemas. Como un resultado agregado se recopila información, general del uso de Simulink y específica de la utilización de ésta en el área de comunicaciones. La realización de este trabajo deja ver el potencial que ofrece Matlab y Simulink en el modelado de sistemas. Como un resultado agregado se recopila información, general del uso de Simulink y específica de la utilización de ésta en el área de comunicaciones.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Ingeniería Electrónica.

Director: Ingeniero Oscar Mauricio Reyes.

<sup>^</sup>TITLE: DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS SIMULATION AND MODELLING

**AUTHOR:**

**DILI DUARTE DUARTE**  
**OSCAR DANIEL URIBE\*\***

KEY WORDS: Modulation, FSK, PSK, QAM, Simulink, passband, Digital.

DESCRIPTION:

The communication laboratory of the Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School possesses a finite number of equipment to develop practices about digital modulation: The cost of equipment acquisition and considering the software used in other laboratories must be bear in mind, therefore, we proposes an alternative solution to make a tool for the passband modulation digital system research and analysis using Matlab-Simulink, It could be used in laboratory practices.

This tool is composed for a guide packet, and three models with its own interface. The guides drive students across detailed exploration about communications systems; the student can do it for himself. The interface has one main task; it is assign the parameters for each block in the model. It works quickly. The model contains a communication system general structure. It has layer hierarchy, in the first layer we can look a global vision, and the following layers has a specific vision in each level.

This environment includes every modulation types like: (PSK) phase shift keying, (FSK) frequency shift keying, and (QAM) quadrature amplitude modulation, each one is the support to the current modulations.

The performance about this material lets see the Matlab and Simulink potential that it offers, finally an aggregate product is the Simulink information summary and specifically the employment in communication's field.

---

\* Project of Grade

\*\* Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School

Electronic Engineering

Director: Engineer Oscar Mauricio Reyes

## INTRODUCCIÓN

La Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones cuenta con el software LVSIM-ACOM 1.2 enfocado hacia el análisis de sistemas de modulación/demodulación analógicos. También cuenta con el software Matlab<sup>1</sup>-Simulink que contiene los elementos necesarios para simular distintas clases de sistemas reales, incluidos los relacionados con el área de comunicaciones. Aunque se dispone de otros equipos y material de laboratorio (WinFACET, LabCOM, tarjetas de entrenamiento), su uso está limitado a grupos pequeños que no permiten cubrir la totalidad de estudiantes que cursan la asignatura Teoría de Comunicaciones, de manera que actualmente son estos paquetes de software (LVSIM y Matlab) la plataforma del conjunto de prácticas del laboratorio de comunicaciones.

En el presente trabajo, buscando complementar el laboratorio de comunicaciones, se diseñó un conjunto de prácticas de simulación sobre transmisión de información digital, que permite al estudiante mediante el escrutinio de los distintos elementos involucrados en la generación, transmisión y recepción de las señales presentes en la modulación digital, fortalecer los conceptos relacionados con el tema. Las modulaciones digitales pasa banda FSK, PSK y QAM son base de las diferentes variantes existentes en la actualidad; el estudio de sus características ante el ruido, propiedades espectrales, ventajas y limitaciones, puede ser extrapolado al análisis de casi cualquier tipo de modulación digital.

---

<sup>1</sup> Actualmente la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones cuenta con la licencia de Matlab 6.1

El software Matlab disponible en el laboratorio puede ser ampliamente explotado en la creación de entornos para la simulación de variados sistemas, razón para la elección de éste como base de las prácticas. Cada sección del laboratorio tiene una estructura conformada por tres elementos esenciales para el adecuado desarrollo por parte del estudiante. Básicamente, el diseño y la implementación de las prácticas de acuerdo a su estructura se puede resumir en:

### **Modelado de los sistemas mediante la herramienta Simulink de Matlab.**

En los modelos se establecen los componentes que conforman el sistema, se emulan las etapas de generación, transmisión, análisis y recepción de datos para las modulaciones digitales: FSK modulación por variación de frecuencia, PSK modulación por variación de fase y QAM modulación por amplitud en cuadratura.

El proceso aplicado a los datos de entrada por cada componente para conseguir uno de estos tipos de modulación se simula mediante bloques básicos (cada uno de ellos contiene información específica acerca de su función). En el modelo existen dos clases de bloques generales: aquellos cuyos parámetros definen características del sistema de modulación y se pueden variar para observar casos de posible interés y, los que realizan funciones específicas dentro del sistema.

Los datos de entrada se obtienen de algunos bloques de Simulink denominados fuentes; éstos pueden ser una señal cuadrada, una señal aleatoria binaria, un mensaje importado desde el **workspace** de Matlab o

desde un archivo de extensión *.mat* ubicado en el directorio de trabajo (por defecto `\work`) de Matlab.

El análisis del sistema se realiza mediante la visualización de las señales en tiempo y en frecuencia, el cálculo de tasas de error de bit y, la obtención de diagramas de ojo y de dispersión; para cada una de estas tareas hay bloques especiales.

**Diseño de la interfaz en la herramienta GUIDE de Matlab.** En la interfaz gráfica se establecen objetos gráficos como botones de pulsar, cajas de texto y menús pop-up para desempeñar funciones sobre el modelo en Simulink tales como: abrir el modelo, introducir los parámetros de cada bloque según las características del sistema y realizar la selección de procesos particulares a simular donde sea necesario.

La interfaz está compuesta por dos archivos: uno con extensión *.fig* y otro con extensión *.m*; en este último se adiciona código de Matlab que se requiere ejecutar para la simulación adecuada del sistema de modulación.

**Elaboración de la guía.** La guía se orienta hacia el fortalecimiento de las nociones sobre la modulación a través de una serie de tareas para asegurar un alto y variado número de acciones y de respuestas de parte del estudiante. Se busca que el estudiante desarrolle competencias que le permitan actuar, reflexionar, comparar, describir, analizar y sintetizar a partir de las tareas y problemas propuestos (aprendizaje basado en resolución de problemas). La resolución de cada tarea implica una puesta a prueba de

conceptos, y de acciones dirigidas hacia la consecución de los objetivos de la experiencia.

Es importante que el estudiante confirme sus conocimientos y pueda corregir durante el proceso las fallas u omisiones relacionadas con conceptos básicos. Con este propósito en la guía se establece un conjunto de preguntas; éstas no pretenden tanto averiguar lo que el alumno ha descubierto, como el proponerle, para su análisis, las cuestiones más importantes que necesita tener en cuenta.

Una recopilación sobre el trabajo realizado en el proyecto de grado MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES DIGITALES se realiza en este texto. El capítulo 1 detalla los preliminares tenidos en cuenta al empezar el proyecto y los logros específicos obtenidos. El capítulo 2 presenta una breve introducción del trabajo desarrollado sobre las modulaciones digitales: modulación por variación de frecuencia, modulación por variación de fase y modulación por amplitud en cuadratura, y explica la metodología utilizada en la elaboración de las guías y las interfaces; también define los criterios de diseño y las características generales de los modelos implementados. En el capítulo 3, se realiza una descripción detallada de la modulación digital FSK, se presenta la interfaz y el modelo de ésta, se explican los criterios de diseño específicos y por último se detallan las cualidades y limitaciones del modelo. En los capítulos 4 y 5 se desarrollan los mismos puntos del capítulo 3, para las modulaciones PSK y QAM respectivamente. En las conclusiones, se recopilan los logros del proyecto, los resultados más sobresalientes y las recomendaciones para próximos trabajos relacionados con el tema tratado. En las referencias bibliográficas se recopila las referencias de los libros, archivos digitales y

páginas web que contienen información relevante en el desarrollo del proyecto. En la parte final de este texto se anexa el conjunto de prácticas elaboradas. Adicionalmente, junto a las herramientas requeridas para la implementación del laboratorio se entrega un manual de Simulink que incluye información general para el modelado de sistemas y la descripción detallada de los bloques utilizados.

La finalidad de este proyecto, es desarrollar una herramienta para explorar las características de las modulaciones digitales pasa banda básicas, y se logró estableciendo una metodología alternativa para la implementación de sistemas de simulación. Los modelos se plantearon guardando similitud al diagrama de bloques de las modulaciones permitiendo el reconocimiento de cada etapa y el fácil seguimiento de la señal a través de éstos; además los bloques poseen una estructura abierta, es decir, los parámetros específicos del sistema de modulación pueden ser modificados de acuerdo a los intereses de quien desarrolle las prácticas.

## **1. PRELIMINARES**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las señales banda base producidas por las diferentes fuentes de información digital debido a su naturaleza, no son siempre adecuadas para la transmisión directa a través de un canal dado, dificultando su propagación; además la necesidad de: distribuir canales para transmitir señales de información distinta a través del radio-espectro, disminuir las dimensiones de antenas de recepción, optimizar el ancho de banda de cada canal, evitar interferencia entre canales y proteger a la información de las degradaciones por ruido son factores influyentes en la gran acogida de la modulación digital.

Actualmente las prácticas de laboratorio de comunicaciones carecen de guías programadas sobre transmisión digital que brinden algunas bases y herramientas que permitan al estudiante fortalecer los conceptos de la modulación digital mediante el estudio de los distintos elementos involucrados en la transmisión, recepción y análisis de señales presentes en modulaciones digitales básicas como FSK, PSK y QAM explorando al máximo las características de estos tipos de modulación.

La implementación de los ambientes apropiados para la comprobación de conceptos requiere dispositivos y ciertas condiciones complejas; en algunos casos la cantidad de equipo disponible (debido a su elevado costo), es

insuficiente. Hoy en día, la tecnología permite la creación de entornos virtuales, que emulan el ambiente propicio, con la ventaja de un menor costo y la facilidad para instalarlos en varios equipos de cómputo, ampliando la posibilidad de interactuar durante la simulación de las prácticas en un ámbito más flexible.

*Matlab* es actualmente una de las herramientas más usadas en la simulación de sistemas, tanto por su versatilidad y sencillez como por su enorme potencialidad y difusión. Éste permite la elaboración de prácticas flexibles y dinámicas; su entorno Simulink se basa en modelos desarrollados a partir de estructuras de bloques interconectados, con los que se pueden diseñar desde sistemas sencillos hasta los más complejos. Señales digitales, analógicas, y muchos otros elementos están disponibles para construir y visualizar todo un sistema de comunicación desde la generación del mensaje hasta la recepción del mismo. Además brinda la posibilidad de modificar los parámetros que definen el sistema y detallar las señales en cada etapa permitiendo emular gran variedad de situaciones.

Así, el principal aporte de este trabajo es la elaboración de prácticas relacionadas con las modulaciones digitales pasa banda FSK, PSK y QAM con este software, ofreciendo la posibilidad de analizar el comportamiento y funcionamiento interno del proceso de modulación de una señal. Además, permitir una retroalimentación inmediata al experimentar una y otra vez, dando la oportunidad al estudiante de satisfacer sus dudas con respecto a los resultados obtenidos. De esta manera, el interés es contribuir con nuevos elementos que complementen el pénsum de ingeniería electrónica en la rama de las telecomunicaciones.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general.**

Estudiar e implementar modelos de comunicaciones digitales empleando Simulink, para ser utilizados en el desarrollo de prácticas de laboratorio.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

- Fortalecer la línea de investigación en comunicaciones digitales mediante la recopilación de información sobre sistemas de modulación digital, Simulink y su aplicación en el modelado de estos sistemas.
- Modelar sistemas de transmisión digital pasa banda FSK, PSK y QAM usando las herramientas existentes en Simulink de Matlab.
- Diseñar los modelos de sistemas de comunicaciones usando una jerarquía de capas que faciliten el reconocimiento y análisis de cada etapa involucrada en el proceso de modulación digital FSK, PSK y QAM.
- Complementar el laboratorio de comunicaciones mediante la elaboración de guías de laboratorio para prácticas de comunicación digital FSK, PSK y QAM.
- Diseñar un entorno gráfico amigable para cada una de las prácticas desarrolladas.

### 1.3 LOGROS

Con la realización de este proyecto se cumplieron los objetivos propuestos y se alcanzaron otros que estaban fuera de los inicialmente previstos.

Entre los objetivos alcanzados se tienen:

- La implementación de los modelos de modulación digital pasa banda FSK, PSK y QAM mediante la herramienta Simulink de Matlab. Se creó una librería denominada LabMoDig que contiene a su vez cuatro librerías denominadas: sistemas, moduladores, demoduladores y adicionales.

La librería **sistemas** contiene tres (3) bloques; cada uno de los cuales contiene un sistema de modulación digital completo, FSK, PSK y QAM. La librería **moduladores** contiene siete (7) bloques; éstos son los moduladores creados para cada sistema de modulación. La librería **demoduladores** contiene siete bloques; éstos son los demoduladores creados para cada sistema de modulación. Y la librería **adicionales** contiene siete (7) bloques, creados para modelar etapas específicas en los moduladores-demoduladores y bloques acondicionados para el buen funcionamiento dentro del sistema.

- La elaboración de cuatro guías de laboratorio para las prácticas de comunicación digital. Modulación por variación de frecuencia (FSK), modulación por variación de fase (PSK), modulación de amplitud en cuadratura (QAM) y paralelo entre PSK y QAM; éstas tienen un tiempo de ejecución promedio de seis horas.

- La construcción de los modelos con una estructura de capas. La capa superior presenta el sistema de modulación total. La capa intermedia presenta los diagramas de bloques de cada proceso de modulación. Y la capa inferior presenta bloques básicos.
- El diseño de un interfaz gráfica para establecer las condiciones iniciales para el desarrollo de cada una de las prácticas elaboradas.
- El suministro de un entorno adecuado para la profundización en temas de comunicaciones digitales buscando el fortalecimiento de esta línea de investigación.
- La recopilación de información sobre Simulink y su aplicación en el modelado de los sistemas de modulación digital.

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL

El ambiente de simulación para el laboratorio de comunicaciones sobre modulaciones digitales, resultado del presente proyecto de grado, permite abordar fácilmente la teoría de los diferentes procesos de transmisión digital, la comprensión de la dinámica de modulación y demodulación, y la acción de los canales sobre la señales transmitidas, imprescindible para sentar las bases de las modernas redes digitales de telecomunicación. Su puesta en marcha es sencilla y está diseñado para hacer prácticas muy didácticas basadas en elementos de simulación básicos.

El conjunto de prácticas de modulación digital FSK, PSK y QAM conformada, cada una, por una guía de usuario, una interfaz gráfica y un modelo del sistema de modulación, conlleva al análisis detallado del circuito modulador y demodulador, después de un análisis preliminar de modulación, ruido, ancho de banda, y factores similares del sistema.

Ayudas acerca del entorno y de los modelos están disponibles en la interfaz, complementadas con una demostración (“*demo*”) donde se puede observar la ejecución de un ejemplo a través del cual se describen las herramientas básicas para el análisis de las señales.

## **2.1 METODOLOGÍA DEL LABORATORIO**

La guía es la herramienta a disposición del estudiante para el desarrollo de la práctica de una manera autónoma, su organización pretende independizar el laboratorio de la presencia continua del profesor para el avance en la realización de cada uno de los pasos del procedimiento, evitando el estancamiento de la experiencia en ausencia de un profesor. A continuación se describe la estructura de las guías de laboratorio desarrolladas.

### **2.1.1 Objetivos.**

Los objetivos, son aquellos que ordenan la red de conceptos fundamentales implicados en el proceso de modulación. Estos constituyen el hilo conductor, de modo que su aprehensión pasa a ser la tarea indispensable del estudiante para comprender la modulación. Los objetivos implican la totalidad de las acciones por realizar, tipo de información a obtener, conceptos por comprender y aplicar que se ponen a prueba, y cuyo desarrollo se promueve para el análisis apropiado y profundo de cada sistema de modulación.

### **2.1.2 Marco Teórico.**

La ubicación de los diferentes tipos de modulación dentro de un contexto teórico y práctico es fundamental para la rápida apropiación de conceptos y la ampliación de la perspectiva en la utilización a futuro de la experiencia adquirida en el desarrollo del laboratorio. El marco teórico contiene una visión general del tipo de modulación digital a simular, y la aplicación de éste en sistemas y técnicas más complejas importantes para el estudiante como futuro profesional.

La introducción resalta las características más relevantes de la modulación en estudio, las ventajas y desventajas por las cuales es usada o no en los diferentes sistemas de transmisión. Para cada modulación se dibuja el diagrama de bloques del modulador y el demodulador, estos diagramas mantienen una relación estrecha con la estructura de los modelos a simular de modo que el estudiante no desconozca ninguna etapa en el momento de la simulación. Además de los diagramas de bloques de los tipos básicos de modulación, algunas variantes se adicionaron, ofreciendo al estudiante las posibles configuraciones donde puede aprovechar los conocimientos adquiridos. Una vez definidos los aspectos teóricos, se listan algunas de las existencias de hardware disponibles en el mercado, circuitos integrados moduladores, transmisores, receptores, demoduladores y transceivers, y algunas de sus aplicaciones. Por último se propone como trabajo previo un ejercicio a desarrollar analíticamente para reforzar la comprensión del tema permitiendo confrontar datos teóricos con simulados.

### **2.1.3 Procedimiento.**

El desarrollo de la práctica se desenvuelve en torno a una situación aproximadamente real, la cual es detallada inicialmente; sus características se definen en intervalos de posibles valores dando la oportunidad al estudiante de escoger aquellos que definen características de su interés.

El cuerpo del procedimiento es seccionado, con el fin de ir explorando las características del sistema de modulación desde los aspectos generales hasta aquellos específicos. Inicialmente se conduce paso a paso al estudiante en la apertura del modelo y la asignación de los parámetros al sistema, dando libertad para escoger valores específicos y a la vez advirtiendo las limitaciones inherentes al sistema. El análisis del sistema se

realiza en las siguientes secciones del procedimiento. En la segunda sección, las tareas definidas son situaciones no limitadas y de enunciado abierto, y permiten al estudiante analizar el comportamiento general del sistema de modulación mediante los datos ofrecidos por las herramientas de medida propuestas; estas tareas son directas (se indican las actividades requeridas) e indirectas (un interrogante es planteado originando actividades necesarias para obtener una solución). Las dos secciones siguientes orientan al estudiante para realizar un análisis más profundo de los elementos que componen el modulador y demodulador. Una sección complementaria propone actividades adicionales cuya ejecución es elección del estudiante. Las secciones subsecuentes dependen del número de M-arias existentes en el sistema de modulación.

#### **2.1.4 Preguntas Claves.**

La asimilación de la información entregada previamente y durante la práctica puede diferir de estudiante a estudiante en aspectos globales o aspectos puntuales. Para llenar los vacíos presentes en los conceptos se plantean preguntas que extractan las características generales y aquellos detalles importantes de cada tipo de modulación. El estudiante, al concluir con la práctica, se enfrentará a un conjunto de preguntas, cuya solución lo obligue a revisar, confrontar y confirmar la interpretación de resultados obtenidos, las deducciones y explicaciones con respecto a lo observado y a los resultados teóricos revisados previamente para corregir o fortalecer los conceptos.

#### **2.1.5 Conclusiones.**

Este espacio es reservado exclusivamente para el estudiante. Las conclusiones deben reflejar lo aprendido; se espera una integración breve de lo indicado en los objetivos enunciados con el análisis de los resultados obtenidos, una redacción breve de las comprobaciones o demostraciones,

una síntesis de lo aprendido en la actividad, una expresión corta de los resultados determinantes en la actividad, y la opinión acerca de las proyecciones para las futuras prácticas.

#### **2.1.6 Bibliografía.**

Ésta ayuda al estudiante a encontrar información rápida y precisa de los temas vinculados a la modulación digital; las referencias mencionadas incluyen el material bibliográfico de apoyo tanto en medios impresos como digitales. Dentro de los medios impresos se listan los textos que contienen información a cerca del tipo de modulación específico y los anexos de la guía. Y en los medios digitales, las direcciones URL de empresas y sitios de internet que, ofrecen hardware y algunas de sus aplicaciones y, describen proyectos en los que se ha empleado algún tipo de modulación.

## **2.2 INTERFAZ GRÁFICA**

La interfaz gráfica permite utilizar los modelos con más comodidad e interactuar con ellos proporcionando datos y controlando eventos de manera rápida y eficiente. Los modelos están implementados en Simulink, heredando grandes ventajas ofrecidas por éste entorno, por lo tanto, la interfaz brinda solución a las necesidades emergentes durante las simulaciones de los modelos pero no limita, ni suprime la características propias de Simulink. La interfaz se desarrolló mediante la herramienta ofrecida por Matlab para la creación de interfaces gráficas denominada GUIDE.

El esquema de la interfaz gráfica para cada sistema de modulación es similar, se presentan los elementos gráficos en un orden determinado por los

pasos a seguir para la inicialización de las condiciones apropiadas para la simulación de los modelos. Los pasos son, apertura y visualización del modelo a simular, elección de la fuente de datos y sus parámetros, caracterización de la portadora, asignación de los datos al modelo a cada bloque cuyos parámetros dependen de las características del sistema, elección del tipo de modulación M-aria (opción para los sistemas multinivel), determinación de filtros e inicio de la simulación.

Una vez realizada la primera experiencia de modulaciones digitales el estudiante adquiere un alto grado de familiaridad con el entorno gráfico y sus elementos para la ejecución de las próximas experiencias.

### **2.2.1 Criterios de diseño.**

Cada una de las características del sistema determina parámetros de varios bloques del modelo. Modificar una de éstas requiere gran inversión de tiempo pues implicaría la asignación bloque a bloque del nuevo valor, con probabilidades de error humano en caso de olvidar la asignación de dicho valor a alguno de los bloques.

Para solucionar esto y a la vez hacer el cálculo de otros parámetros del sistema mediante funciones preestablecidas es posible definir variables en el workspace de Matlab, lo cual conlleva a emplear dos entornos al tiempo (Simulink y workspace) de manera no evidente, provocando pérdida de tiempo y posibles errores si se inicia la simulación sin asignar la totalidad de los parámetros requeridos.

### **2.2.2 Características.**

Los elementos de la interfaz están etiquetados con términos claros y concisos comúnmente usados para denominar el tipo de proceso solicitado o los parámetros de los sistemas.

La estructura general de las interfaces está organizada de acuerdo a las actividades necesarias en la inicialización del sistema; éstas orientan paso a paso al estudiante en la realización de las acciones solicitadas y son consistentes en el sentido que los elementos de la interfaz creados para operaciones y funciones comparables tienen una forma de activación similar.

La interfaz asigna automáticamente los valores de los parámetros de todos los bloques que así lo requieran, haciendo los cálculos necesarios y/o a partir de las variables introducidas por el estudiante, minimizando así la posibilidad una simulación errónea producto de la ausencia o falta de renovación de algún parámetro.

Al finalizar la simulación, durante el proceso de almacenamiento, la interfaz crea un archivo que puede ser empleado con paquetes de software de uso común para el análisis de los datos obtenidos, sin depender de la disponibilidad del software Matlab.

Las características de la interfaz permiten al estudiante realizar varias simulaciones de manera rápida y segura, concentrándose únicamente en los datos resultantes y su correspondiente análisis.

## 2.3 LOS MODELOS

En Simulink, para la creación de los modelos de sistemas de modulación se requiere el conocimiento de sus herramientas para lograr una adecuada implementación. Si bien el estudiante puede desarrollar habilidades en el uso de esta herramienta, este aspecto es poco relevante dentro de los objetivos del laboratorio. Con esto en mente, se construyeron los modelos de los sistemas de modulación; de manera que al iniciar la práctica el estudiante tiene a su disposición los modelos ya listos para iniciar el proceso de simulación.

En la “toolbox” de comunicaciones de Simulink existen bloques de modulación y demodulación analógica y digital listos para usar en un sistema. Estos bloques están definidos mediante una función S (una herramienta de programación adicional de Matlab y Simulink) o mediante otros bloques de moduladores que a su vez están basados en funciones S, factor que limita su uso cuando se desea analizar y profundizar en la estructura interna de cada modulación, objetivo principal de este trabajo de grado.

Los modelos de los sistemas básicos de modulación digital desarrollados contienen bloques de modulación y demodulación cuya estructura interna está al alcance del estudiante proporcionándole la posibilidad de interactuar activamente con los parámetros que definen el sistema y con las señales generadas en cada una de las etapas incrementando el nivel de comprensión y conocimiento de las diferentes clases de modulación. Estos modelos tienen

parámetros por defecto, que son función de variables que describen las características de la señal de entrada y la portadora.

### **2.3.1 Criterios de diseño.**

El estudiante invierte mucho tiempo durante el montaje de los sistemas en tareas y procesos propios del uso de la herramienta de simulación, descuidando el análisis de los conceptos involucrados en el sistema.

Durante el análisis del sistema, el estudiante se cuestiona sobre los posibles resultados de casos específicos o situaciones que despiertan su interés sin la posibilidad de comprobarlos debido a que los parámetros característicos del sistema no se pueden modificar o sólo se pueden escoger de un conjunto de valores preestablecidos.

Los sistemas comúnmente se representan mediante un diagrama de bloques, elemento familiar para el estudiante. Al analizar el comportamiento de un sistema mediante una estructura que difiere del diagrama de bloques examinado previamente se invierte tiempo en la relación de estas dos herramientas.

La presencia de módulos con etapas similares y de bloques con tareas iguales en etapas diferentes dificulta la ubicación de cada señal examinada si los elementos del sistema no se identifican de manera clara y apropiada.

Además de las cadenas de datos típicas como las cuadradas y las aleatorias es de interés analizar datos específicos generados por el software utilizado o externamente.

Un sistema posee características generales que determinan las características específicas de cada una de las etapas que lo conforman. Para realizar un estudio más profundo del sistema se necesita conocer cómo y cuáles características definen cada etapa.

Una vez simulado el modelo, visualizar de manera clara y bien identificada las señales más relevantes dentro del proceso permite realizar en primera instancia un enfoque general del funcionamiento del modelo.

El posterior análisis de las señales obtenidas puede ser requerido para reforzar conceptos y esbozar conclusiones de la práctica, contar con herramientas adecuadas para almacenar los datos en formatos básicos permite examinarlos mediante el software usado u otros programas adecuados para tal fin.

### **2.3.2 Características.**

Los modelos poseen una estructura general similar. En primera instancia se tiene la etapa de selección de la fuente de datos a partir del área de trabajo de Matlab, un archivo o una fuente de las predeterminadas en Simulink, a continuación la etapa del modulador conformada por un número de subsistemas igual al número de las modulaciones M-arias disponibles para el análisis, cada subsistema está conformado por los bloques requeridos para realizar el proceso de modulación. Luego se encuentra la etapa del demodulador conservando la misma metodología del modulador, cada subsistema tiene los bloques requeridos para demodular. Por último, se tiene

la etapa de los dispositivos de medida, visualización y almacenamiento de los resultados.

La estructura del modelo es visiblemente clara, en la primera capa del modelo se observan las etapas anteriormente mencionadas, en ésta los dispositivos de alimentación del sistema y los de análisis y visualización de datos son configurados para un adecuado uso, en la siguiente se especifican los bloques que se ajustan a la tarea requerida por cada uno de los dispositivos que conforman el sistema real y, donde las características del sistema se asignan; en último lugar se cuenta con una capa donde se encuentran bloques básicos de Simulink empleados para la emulación de las funciones de dispositivos no disponibles como bloques preestablecidos, esta capa existe sólo para algunos de los bloques.

El usuario puede modificar las características del sistema modelado según su criterio, éstas como se menciona anteriormente, se definen en los bloques de la segunda capa; cada bloque posee una caja de dialogo constituida por una breve descripción de su función e indica, cuando es indispensable, los parámetros necesarios para configurarlo. Por defecto, los parámetros están definidos en término de variables que representan dichas características.

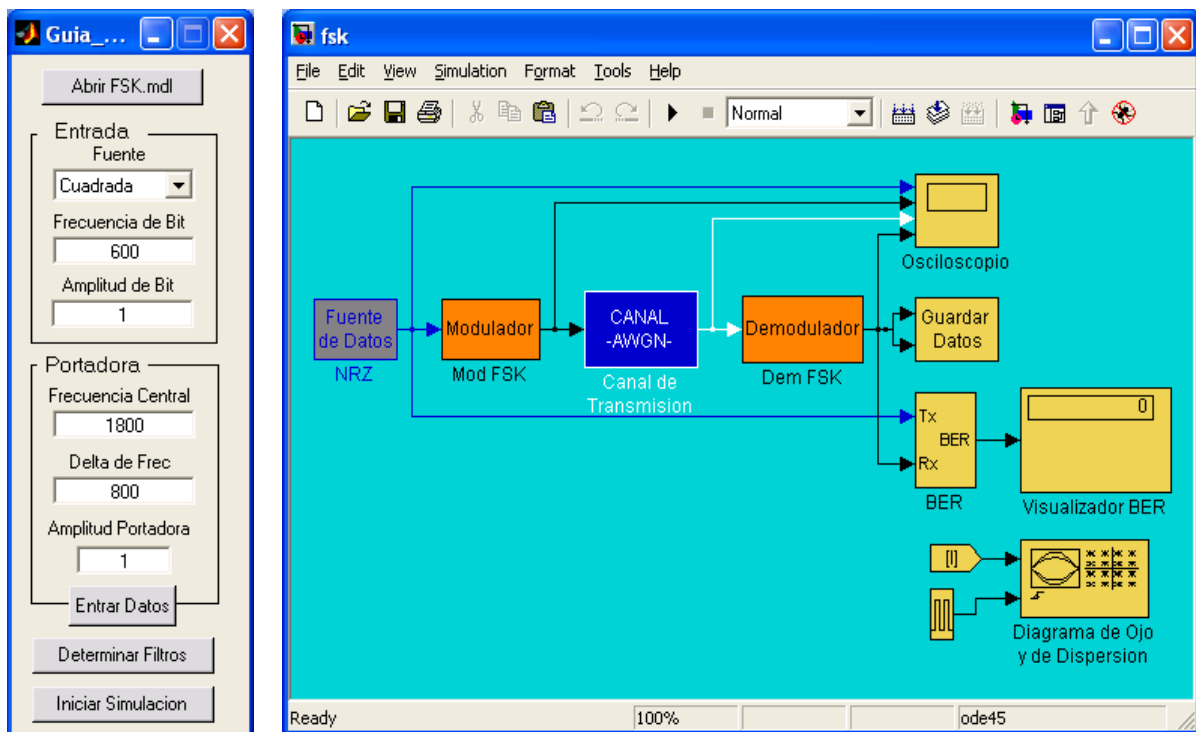
Las herramientas de medida y visualización de datos para examinar el proceso de modulación están ubicadas a la salida de los bloques que generan las señales más relevantes en el proceso como son la de entrada, la modulada y la recuperada. La concatenación de estas últimas brinda un enfoque general del sistema. Sin embargo, están disponibles para situarlas

en cualquier parte del modelo permitiendo el acceso a las demás señales presentes.

Los módulos y los bloques del modelo están identificados con un nombre concreto. Éste especifica la tarea que desempeñan y la etapa donde están ubicados dentro del modelo evitando confusiones o interpretaciones erradas en presencia de módulos o bloques similares.

### 3. MODELO DE LA MODULACIÓN POR VARIACIÓN DE FRECUENCIA (FSK)

Figura 1. Modulación por variación de frecuencia



El entorno a usar para la práctica de modulación por variación de frecuencia (FSK, “**Frequency Shift Keying**”), se muestra en la figura 1. La interfaz gráfica y el modelo del sistema (archivo fsk.mdl) son las herramientas mediante las cuales el estudiante desarrolla la experiencia propuesta.

En la interfaz se configuran las condiciones iniciales del sistema para la apropiada simulación; ésta contiene valores por defecto, cuya asignación permite realizar directamente una simulación. Las características del sistema definidas por defecto, son:

- Los datos de entrada son representados con una señal aleatoria.
- La frecuencia de los datos de entrada es 600 bits por segundo (bps).
- La amplitud de los datos de entrada es 1.
- La frecuencia de la señal portadora se define en términos de la frecuencia central igual a 1800 Hz y la desviación de frecuencia igual a 800 Hz.
- La amplitud de la señal portadora de la información es 1.

El modelo contiene la estructura general del sistema, la fuente de datos, el modulador FSK, el demodulador FSK, los elementos y dispositivos de visualización, análisis y almacenamiento de datos.

### 3.1 MODULACIÓN FSK

En esta sección se detallan los conceptos teóricos tenidos en cuenta en el momento de modelar cada etapa involucrada en el proceso de modulación digital FSK binaria. El modulador FSK y el demodulador FSK son dos bloques elaborados específicamente para la implementación del laboratorio de modulación digital; éstos se muestran en las figuras 2.a y 5.a respectivamente.

#### **Modulador FSK.**

La cadena de bits de entrada, se presenta al modulador como símbolos, en el caso de la modulación FSK binaria, los símbolos son equivalentes a los posibles bits de la cadena de entrada, 1 lógico y 0 lógico, (ver tabla 1).

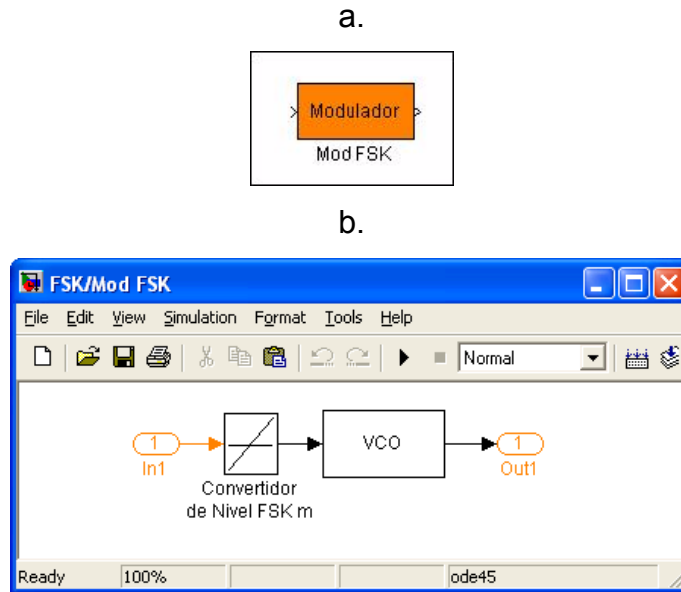
**Tabla 1.** Tabla de verdad FSK

Bit de Entrada	Símbolo de Entrada	Frecuencia de Salida
0	$s_0$	$2\pi(f_c - \Delta f)$
1	$s_1$	$2\pi(f_c + \Delta f)$

Los símbolos de entrada al sistema son representados mediante señalización NRZ (**non return to zero**) unipolar. En la modulación FSK binaria, el cambio de frecuencia de la portadora es proporcional a la polaridad de la señal de entrada binaria. Debido a esto, se representaron los datos con señalización NRZ bipolar, mediante el bloque '*look up table*' denominado *convertidor de*

nivel. Como se puede ver en el subsistema del modulador FSK mostrado en la figura 2.b.

**Figura 2.** Modulador FSK. a) Bloque. b) Subsistema

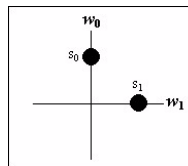


El diagrama de constelación de FSK mostrado en la figura 3 muestra la frecuencia utilizada para transmitir cada símbolo; es importante señalar que la constelación FSK no contiene información de la fase de la señal sino de la frecuencia de la señal, característica que varía en la señal modulada, (ver tabla 1). Entonces se tiene que, la información digital es transmitida cuando, cada uno de los símbolos posibles, son distinguidos uno del otro, emitiendo una portadora senoidal cuya frecuencia central varía por una cantidad fija entre dos valores. La expresión general es:

$$A_c \text{sen}(2\pi(f_c + \angle(A_b) \Delta f)t)$$

Donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $f_c$  es la frecuencia central de portadora en Hertz,  $\angle A_b$  es la amplitud de los datos de entrada, y  $\Delta f$  es la desviación de frecuencia máxima en Hertz. Este proceso denominado modulación, se lleva a cabo mediante un oscilador controlado por voltaje (VCO, “**Voltage Controlled Oscillator**”) configurado como modulador FSK<sup>2</sup>, que conmuta entre dos frecuencias en respuesta a los cambios de voltaje dc en su entrada.

**Figura 3.** Diagrama de constelación FSK

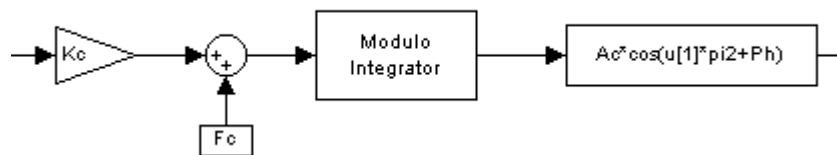


En el subsistema del modulador FSK se usa el bloque ‘*Voltage-Controlled Oscillator*’ disponible en las librerías de Simulink. Los parámetros de la máscara de este bloque son: amplitud de salida, frecuencia de oscilación en Hertz, sensibilidad de entrada y fase inicial en radianes. El bloque VCO tiene una estructura interna básica mostrada en la figura 4. El bloque que genera la señal de portadora (señal de salida del VCO) es el ‘*Fcn*’ denominado *sin* cuya expresión es:  $A_c \cdot \cos(u[1] \cdot \pi \cdot 2 + Ph)$ . Los factores de la portadora que se pueden modificar son: la amplitud,  $A_c$ , la fase,  $Ph$ , y la frecuencia,  $u[1]$  (entrada al bloque ‘*Fcn*’). La señal  $u[1]$  es la salida del bloque ‘*modulo integrator*’ y depende tanto de la señal de entrada al VCO como de la sensibilidad,  $K_c$  y la frecuencia de oscilación,  $F_c$ . La señal dc de entrada al

<sup>2</sup> TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Segunda edición. Prentice Hall. México, 1996. p 458.

VCO es amplificada por el factor  $K_c$  (sensitividad del VCO) y se le adiciona el valor  $F_c$  (frecuencia de oscilación), para aplicarla al bloque 'modulo integrator'. El bloque 'modulo integrator' integra la señal a su entrada en tiempos continuos y reduce el modulo al parámetro *absolute value bound*,  $K=1$ , para producir estrictamente una señal de salida entre  $-K$  y  $K$ .

**Figura 4.** Estructura interna del VCO



Tomado del subsistema del VCO disponible en Simulink, Matlab.

Los parámetros del VCO se seleccionan de acuerdo con las especificaciones de su estructura interna. La amplitud de salida es igual a la amplitud deseada para la portadora, la frecuencia de oscilación es igual a la frecuencia central de la portadora (si la señal de entrada al VCO es cero, este valor es el único que determina la frecuencia de la señal de salida del VCO), la sensibilidad de entrada es igual a la desviación de frecuencia sobre la magnitud de la amplitud de los datos de entrada (si la señal dc de entrada al VCO, positiva o negativa, es amplificada por un valor proporcional a la desviación de frecuencia, al adicionarle el valor de la frecuencia de oscilación el resultado es un valor mayor o menor que el valor de la frecuencia central; este valor es el que determina la frecuencia de marca y de espacio de la señal de salida del VCO) y la fase inicial es igual a  $-\pi/2$  radianes (la función fundamental generada es una cosenoidal, y la portadora requerida es una senoidal).

Una condición de 1 lógico en la entrada, cambia al VCO de la frecuencia de oscilación natural a la frecuencia de marca; una condición de 0 lógico en la entrada, cambia al VCO de su frecuencia de oscilación natural a la frecuencia de espacio. Las señales a la salida del VCO son:

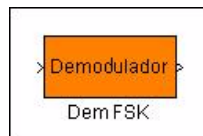
$$s_0 = \text{sen}(2\pi f_1 t) \quad \text{y} \quad s_1 = \text{sen}(2\pi f_2 t)$$

### Demodulador FSK.

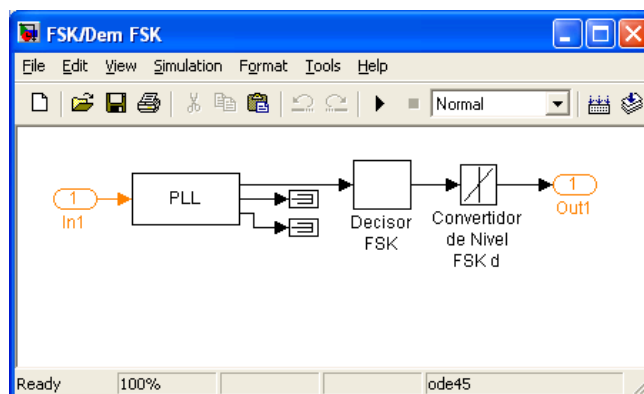
En el sistema FSK binario la información digital transmitida se extrae identificando cada uno de los posibles símbolos a partir de la desviación de frecuencia de la señal modulada con respecto a la frecuencia central de la portadora, (ver tabla 1).

**Figura 5.** Demodulador FSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



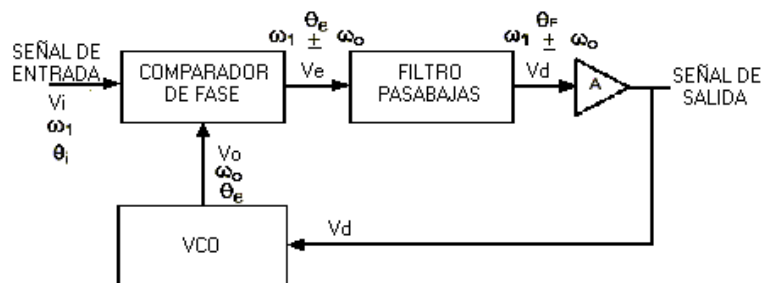
b.



Existen varios métodos para detectar la presencia de determinada frecuencia en una señal. Uno de ellos es mediante un lazo de amarre por fase (PLL, “**Phase Locked Loop** “) configurado como demodulador FSK<sup>3</sup>, éste produce un nivel de dc proporcional a la diferencia de la frecuencia de la señal a su entrada y la frecuencia de operación libre (frecuencia de portadora), producida por el VCO contenido en él.

Un PLL es un sistema de realimentación constituido por un comparador de fase y un filtro pasabajas en la trayectoria directa de la señal y, un oscilador controlado por tensión (VCO) en la trayectoria de realimentación. El diagrama de bloques general del PLL se muestra en la figura 6.

**Figura 6.** Estructura general de un PLL



La operación del PLL en términos de las componentes de frecuencia producidas por el comparador de fase es descrita a continuación. El comparador de fase es un circuito multiplicador que mezcla la señal de entrada con la señal del VCO. Esta mezcla produce frecuencias de suma y

<sup>3</sup> TOMASI, Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Segunda edición. Prentice Hall. México, 1996. p 461.

diferencia,  $w_i \pm w_c$ . Cuando el lazo está enganchado, el VCO duplica la frecuencia entrante de modo que la componente de diferencia de frecuencia,  $w_i - w_c$ , es cero; por lo tanto, la salida del comparador de fase (voltaje de error) contiene una componente de continua, dc. El filtro pasabajas elimina la componente de suma de frecuencia,  $w_i + w_c$ , pero pasa la componente dc, que es aplicada a la entrada del VCO. Así, el rango de enganche es limitado por el rango del voltaje de error que puede ser generado y produce la correspondiente desviación de frecuencia del VCO.

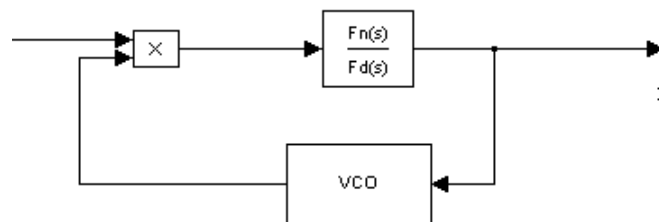
Considerando el caso en que el lazo todavía no está enganchado, el comparador de fase de nuevo mezcla las señales de entrada y del VCO para producir componentes de suma ( $w_i + w_c$ ) y diferencia ( $w_i - w_c$ ) de frecuencia. Sin embargo, la componente  $w_i - w_c$ , puede caer fuera de la frecuencia de corte del filtro pasa bajas y ser eliminado junto con el componente  $w_i + w_c$ . Si éste es el caso, no se transmite ninguna información alrededor del lazo y el VCO permanece en su frecuencia de operación libre. Al acercarse la frecuencia entrante a la del VCO, la frecuencia de la componente  $w_i - w_c$ , disminuye y se acerca al ancho de banda del filtro pasa bajas. Ahora, algo del componente  $w_i - w_c$  pasa, llevando al VCO hacia la frecuencia de la señal de entrada. Esto, a su vez, disminuye la frecuencia de la componente  $w_i - w_c$ , y permite que se transmita más información a través del filtro pasa bajas del VCO.

Cuando el PLL se engancha a la señal FSK aplicada a su entrada, el desplazamiento de frecuencia conforme cambia la señal entre las frecuencias de marca y espacio determina el voltaje de error de dc a la salida del comparador de fase, que se desplaza entre dos niveles de tensión, correspondientes a la salida binaria demodulada. Debido a que sólo hay dos

frecuencias de entrada (marca y espacio), también hay sólo dos voltajes de error de salida.

En el subsistema del demodulador FSK se usa el bloque '*Phase-Locked Loop*' disponible en las librerías de Simulink. Los parámetros de la máscara de este bloque son: numerador del filtro pasabajas, denominador del filtro pasabajas, sensibilidad de entrada del VCO en Hertz por Voltios, frecuencia de libre operación del VCO en Hertz, fase inicial del VCO en Radianes, y amplitud de salida del VCO. El bloque PLL tiene una estructura interna básica mostrada en la figura 7.

**Figura 7.** Estructura interna del PLL



Tomado del subsistema del PLL disponible en Simulink.

Los parámetros del PLL se seleccionan de acuerdo con las especificaciones de su estructura interna. El numerador y denominador del filtro pasa bajas se calcula desde la interfaz `guia_fsk.m`, mediante el código mostrado en la figura 8. Es un filtro butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual  $(f_m - f_s)$ , donde  $f_s$  es la frecuencia de espacio y  $f_m$  es la frecuencia de marca, (la diferencia de frecuencia entre las frecuencias de marca y espacio no debe

ser eliminada por este filtro). La sensibilidad de entrada del VCO es igual a la desviación de frecuencia sobre la magnitud de la señal de entrada al PLL multiplicada por la ganancia del filtro pasabajas del PLL, (las variaciones de frecuencia producidas por el VCO dependen del rango del voltaje a su entrada por la sensibilidad, que debe ser igual a la desviación de frecuencia). La frecuencia de libre operación del VCO es igual a la frecuencia central de la portadora. La fase inicial del VCO es igual a  $-\pi/2$  (la portadora es una senoidal). La amplitud de salida del VCO es igual a la amplitud de la portadora.

**Figura 8.** Código del filtro pasabajas para el PLL

```
%Filtro pasabajas, para el PLL.  
Wn=2*pi*1.5*(fm-fs);  
[num, den]=butter(2,Wn,'s');
```

Tomado del archivo .m generado para la modulación FSK

La señal a la salida del PLL en un periodo de bit presenta oscilaciones alrededor del valor esperado, y por lo tanto, posee más de dos niveles de voltaje. El elemento decisor es el encargado de establecer si el símbolo transmitido es un “0” lógico o un “1” lógico. Aprovechando la simetría del voltaje de error dc con respecto a cero, se establece como límite de decisión entre los dos símbolos, el nivel de voltaje cero; los valores de la señal mayores que cero corresponden al símbolo  $s_1$  y los menores o iguales a cero al símbolo  $s_0$ .

En el subsistema del demodulador FSK se usa el bloque *decisor FSK*, (ver figura 5.b). Este bloque fue creado durante la elaboración del modelo y está disponible en la librería LabMoDig, librería creada para el laboratorio. El parámetro de la máscara del bloque es tiempo de muestreo, igual al tiempo de bit. Este bloque cada tiempo de bit toma una muestra de la señal y la mantiene hasta el próximo tiempo de bit eliminando las oscilaciones, y luego a las muestras mayores que cero les asigna la amplitud A y a las menores o iguales a cero la amplitud -A.

La señal a la salida del decisor es bipolar, para obtener la señal de datos binaria original, los símbolos se representan con señalización NRZ unipolar mediante el bloque '*Look-Up Table*' denominado *convertidor de nivel FSK d*, (ver figura 5.b). El parámetro del convertidor de nivel, vector de valores de entrada es igual al vector conformado por los niveles de la señal NRZ bipolar, [-A A], y el vector de valores de salida es igual al vector conformado por los niveles de la señal NRZ unipolar, [0 A].

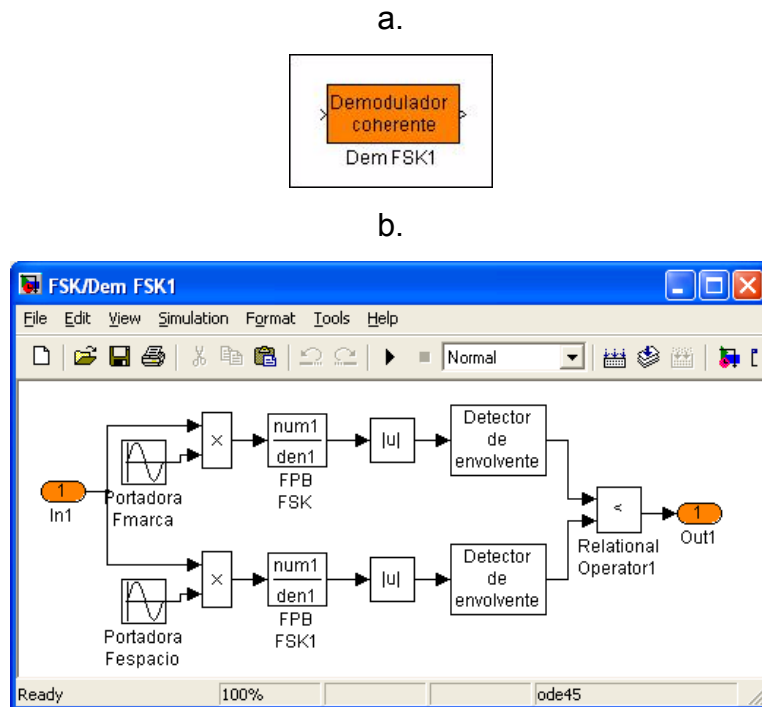
## **3.2 OTROS METODOS DE DEMODULACION**

### **3.2.1 Demodulador FSK coherente.**

El demodulador FSK coherente se usa para demodular una señal FSK de fase continua (CO-FSK), si la transición de fase no es continua el demodulador tiene problemas para seguir el cambio de frecuencia y por consiguiente puede tener errores. Una señal modulada FSK de fase continua binaria se logra al sincronizar las frecuencias de marca y de espacio con la rapidez de bits de entrada binaria, es decir, la frecuencia de marca y espacio

debe estar separada de la frecuencia central exactamente por un múltiplo impar de la mitad de la rapidez de bits,  $f_m$  y  $f_s = n(fb/2)$ .

**Figura 9.** Demodulador FSK coherente. a). Bloque. b). Subsistema



La señal se divide en dos canales. En el primer canal la señal modulada se demodula al multiplicarla por una señal portadora que tiene una frecuencia 'fm' correspondiente a la señal de marca. Las componentes resultantes están compuestas por componentes en dc y componentes a alta frecuencia. Las componentes de dc determinan el símbolo correspondiente a la frecuencia de marca. Se emplea un filtro para eliminar las altas frecuencias. El filtro empleado es definido en el archivo guia\_fsk mediante el código mostrado en la figura 10. A la salida del filtro la información esta contenida en la

envolvente de la señal, para extraerla se usa un elemento decisor que detecta la envolvente.

**Figura 10.** Código del filtro pasabajas para el demodulador coherente

```
%Filtro pasabajas, para el demodulador coherente.  
Wn=2*pi*4*Fb;  
[num, den]=butter(2,Wn,'s');
```

Tomado del archivo .m generado para la modulación FSK

En el otro canal se realiza un procesamiento similar para detectar la presencia del símbolo correspondiente a la frecuencia de espacio. Para lo cual se multiplica por una señal portadora que tiene una frecuencia 'fs' correspondiente a la señal de espacio.

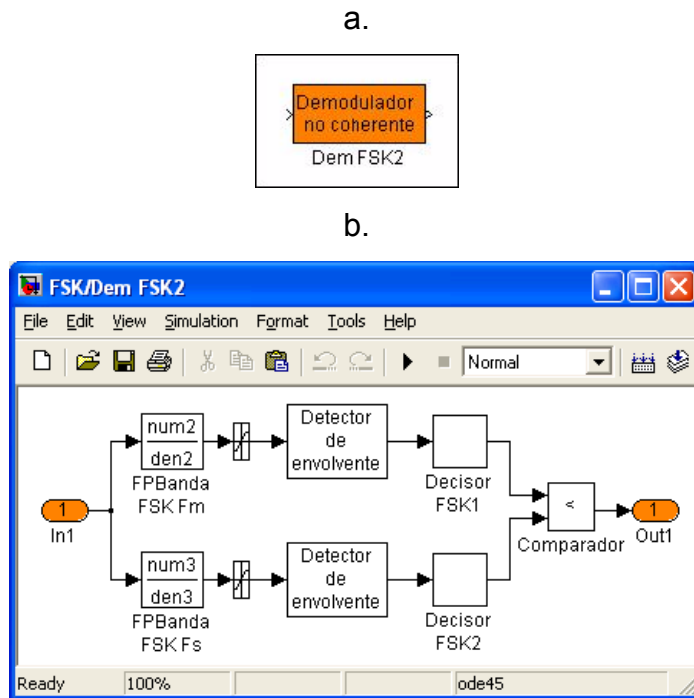
Las señales de cada uno de los canales se comparan para determinar cual de los dos contiene información de la señal transmitida. El comparador coloca a su salida uno nivel alto si la salida correspondiente al canal de la frecuencia de marca es más grande que la salida correspondiente al otro canal , y en caso contrario coloca un nivel bajo.

### **3.2.2 Demodulador FSK no coherente.**

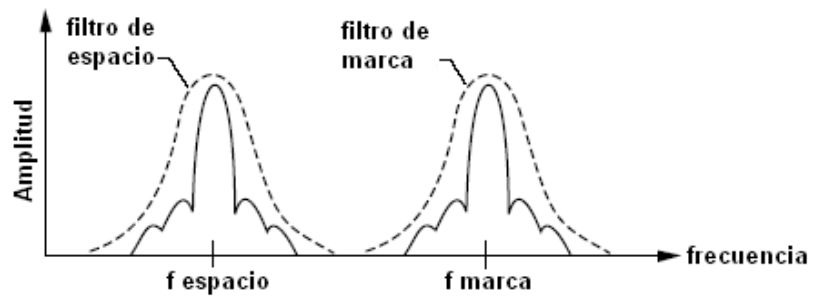
En este tipo de demodulación la información de la fase no es necesaria. la señal pasa por dos filtros acoplados correspondientes a un filtro pasabandas con frecuencia central igual a la frecuencia de marca y otro con frecuencia central igual a la frecuencia de espacio (ver figura 12). El filtro acoplado se puede determinar con una respuesta frecuencial Sinc (similar al espectro de

la señal transmitida) que aproveche la captura de la información útil para evitar interferencia del ruido.

**Figura 11.** Demodulador FSK no coherente. a) Bloque. b) Subsistema



**Figura 12.** Filtros acoplados para el demodulador no coherente



Los filtros son butterworth con respuesta máximamente plana, el ancho de banda establecido experimentalmente se define como cuatro veces la frecuencia de bit, o un cuarto del periodo de bit de entrada. Los filtros son definidos en el archivo guia\_fsk.mdl, el código es mostrado en la figura 13. programa toma la frecuencia de marca y de espacio y calcula los filtros pasabandas respectivos, el ancho de banda optimo.

**Figura 13.** Código del filtro pasabandas para el demodulador no coherente

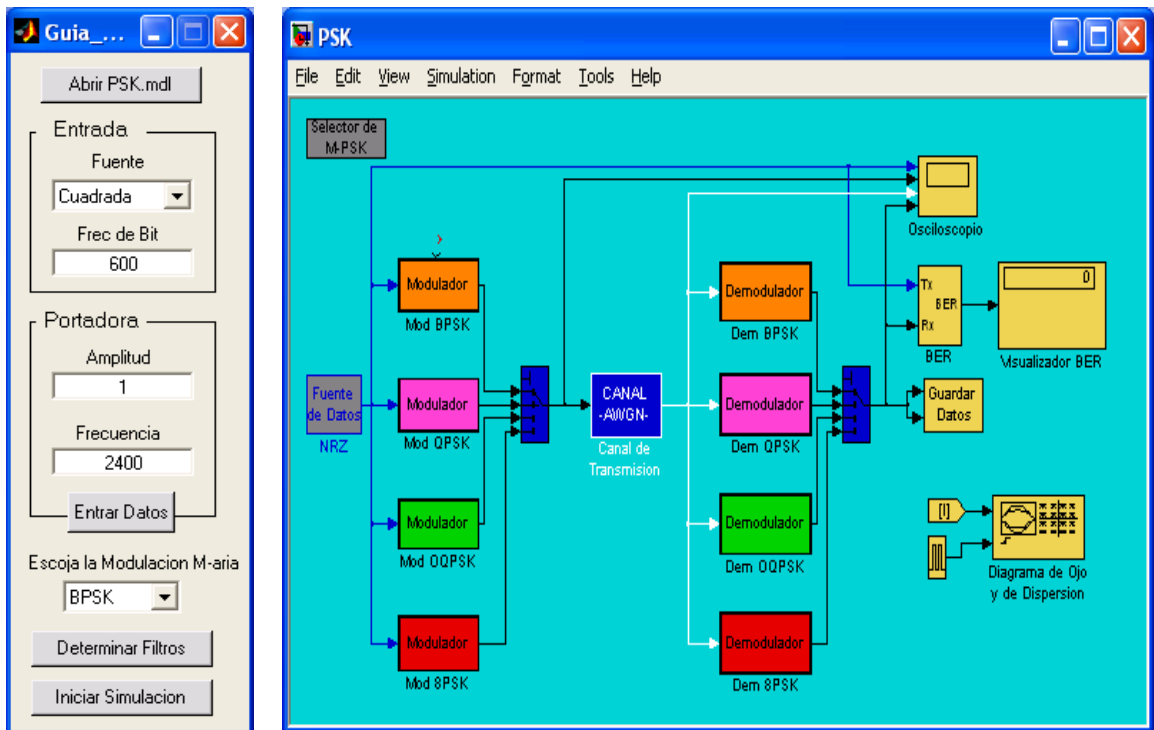
```
%Filtro pasabanda para el demodulador no coherente  
Wm=2*pi*[Fm-2*Fb Fm+2*Fb];  
[numm, denm]=butter(2,Wm,'s');  
Ws=2*pi*[Fs-2*Fb Fs+2*Fb];  
[nums, dens]=butter(2,Ws,'s');
```

Tomado del archivo .m generado para la modulación FSK

La señal a la salida del filtro presenta picos de amplitud que no permiten una adecuada detección de envolvente por lo cual se usa el bloque Saturación. Enseguida la señal pasa a través de un limitador de amplitud que corta los efectos del ruido, a salida de ellos se coloca un detector de envolvente y luego son comparadas para determinar cual tiene la mayor magnitud. El detector de envolvente presenta la señal sin las componentes de frecuencia, y luego el circuito decisor se encarga de sincronizar correctamente la información a la frecuencia de bit de entrada y comparar si la salida correspondiente a la frecuencia de marca es mas grande que la salida correspondiente a la de espacio, si es así se ha transmitido una señal de marca, la detección de la señal de espacio es de la forma similar.

## 4. MODELO DE LA MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE (PSK)

Figura 14. Modulación por variación de fase



El entorno a usar para la práctica de modulación por variación de fase (PSK, “**Phase Shift Keying**”), se muestra en la figura 14. La interfaz gráfica y el modelo del sistema (archivo psk.mdl) son las herramientas mediante las cuales el estudiante desarrollará la experiencia propuesta.

En la interfaz se configuran las condiciones iniciales del sistema para la apropiada simulación; ésta contiene valores por defecto, cuya asignación permite realizar directamente la simulación. Las características del sistema definidas por defecto, son:

- Los datos de entrada son representados con una señal cuadrada.
- La frecuencia de los datos de entrada es 600 bits por segundo (bps).
- La amplitud de la señal portadora de la información es 1.
- La frecuencia de la señal portadora es igual a 2400 Hz.
- La modulación M-aria es BPSK.

El modelo contiene la estructura general del sistema, la fuente de datos, los moduladores y demoduladores para cada una de las M-arias PSK implementadas, los elementos y dispositivos de visualización, análisis y almacenamiento de datos. La fuente de los datos de entrada es común para todos los tipos de modulación PSK M-arias.

## **4.1 SUBSISTEMAS DE MODULACIÓN M-ARIA PSK**

En las siguientes secciones se detallan los conceptos teóricos tenidos en cuenta al modelar cada etapa involucrada en el proceso de modulación digital PSK. Debido a que el proceso de modulación M-PSK en general es similar, y las diferencias entre las M-arias son pequeñas, aquellos conceptos explorados en las primeras secciones serán obviados en las siguientes. Las M-arias PSK implementadas son BPSK, QPSK, OQPSK y 8PSK. Los moduladores M-PSK y los demoduladores M-PSK son bloques elaborados específicamente para la implementación del laboratorio de modulación digital.

### **4.1.1 Modulación BPSK.**

La modulación BPSK tiene la configuración más sencilla de las modulaciones PSK M-arias. Con  $M=2$ , ésta maneja de forma serial la señal de entrada y a diferencia de las otras M-arias, para el proceso de modulación sólo requiere de una portadora en fase. Los bloques del modulador BPSK y del demodulador BPSK se muestran en las figuras 15.a y 17.a respectivamente.

#### **Modulador BPSK.**

La cadena de bits de entrada, se presenta al modulador como símbolos, en el caso de la modulación BPSK, los símbolos son equivalentes a los posibles bits de la cadena de entrada, 1 lógico y 0 lógico, (ver tabla 2).

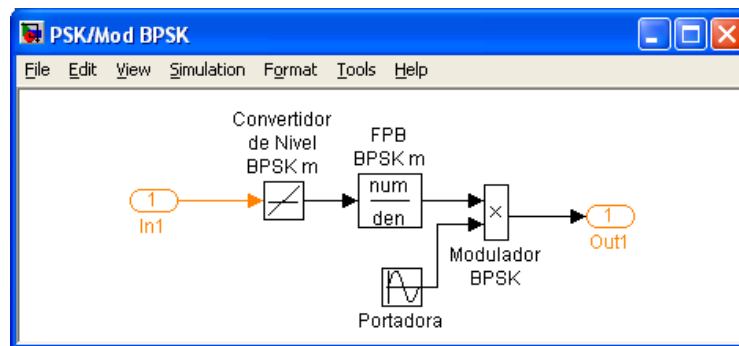
Los símbolos de entrada al sistema son representados mediante señalización NRZ (*non return to zero*) unipolar, el 1 lógico se representa con una amplitud de A voltios y el 0 lógico con una amplitud de 0 voltios.

**Figura 15.** Modulador BPSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.



**Tabla 2.** Tabla de verdad BPSK

Bit de Entrada	Símbolo de Entrada	Fase de Salida
0	$s_0$	$180^\circ$
1	$s_1$	$0^\circ$

En la modulación BPSK, la fase de la portadora cambia con la polaridad de la señal de entrada binaria. Debido a que el cambio de fase depende de la polaridad, se representan los datos con señalización NRZ bipolar, el 1 lógico se representa con una amplitud de  $A$  voltios y el 0 lógico con una amplitud de  $-A$  voltios, mediante el bloque 'Look-Up Table' denominado *convertidor de nivel BPSK m*, (ver figura 15.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: vector de valores de entrada y vector de valores de salida. El

parámetro del convertidor de nivel, vector de valores de entrada es igual al vector conformado por los niveles de la señal NRZ unipolar,  $[0 A]$ , y el vector de valores de salida es igual al vector conformado por los niveles de la señal NRZ bipolar,  $[-A A]$ .

El espectro en frecuencia de la señal cuadrada y de una señal aleatoria es una forma de onda sinc. El espectro es infinito pero la energía de la señal está concentrada en una pequeña gama de frecuencias. La cadena de símbolos tiene características frecuenciales similares porque como se mencionó anteriormente esta representada con señalización NRZ bipolar. Debido a consideraciones de ancho de banda se aplica un filtro pasabajas con una frecuencia de corte igual a la tasa de símbolos, limitando el espectro.

En el subsistema del modulador se usa el bloque '*Transfer Fcn*' denominado *FPB BPSK m*, (ver figura 15.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: numerador y denominador. El cálculo de todos los filtros necesarios en el sistema de modulación M-PSK se efectúa en el archivo *guia\_psk.m* de la interfaz. El código se muestra en la figura 16; con éste se realizan los cálculos para determinar el filtro pasabajas del modulador requerido en todas las M-arias. El numerador y denominador del filtro se obtienen mediante el comando de Matlab, *butter(n, Wc, 's')*, donde *n* es el orden del filtro, *Wc* es la frecuencia de corte en radianes y *s* determina que el filtro es digital. El filtro definido es un butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual a la tasa de símbolo, para BPSK es igual a *fb*.

**Figura 16.** Código del filtro pasabajas para el modulador M-PSK

```
%BW según la M-aria
switch M
case 1
    Bw=fb;
case 2
    Bw=fb/2;
case 3
    Bw=fb/2;
case 4
    Bw=fb/3;
end
%Filtro pasabajas, limitar BW
n=2;
f=Bw;
Wc=2*pi*f;
[num, den]=butter(n,Wc,'s');
```

Tomado del archivo .m generado para la modulación PSK

El diagrama de constelación de BPSK (ver figura 17), muestra las fases de la portadora que representa cada símbolo. Entonces se tiene que, la información digital es transmitida cuando, cada uno de los símbolos posibles, son distinguidos uno del otro, emitiendo una portadora senoidal cuya fase varía entre dos valores, (ver tabla 2). La expresión general es:

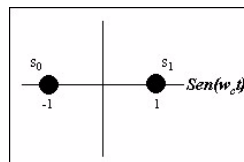
$$A \sin(2\pi f_c t + \angle A_b)$$

Con  $A = |A_b|A_cG$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz,  $A_b$  es la amplitud de los datos de entrada cuyo ángulo determina la fase de la portadora y  $G$  es la ganancia del filtro pasabajas. Este proceso denominado modulación, se lleva a cabo mediante el producto de la señal de entrada limitada en frecuencia y la señal portadora.

En el subsistema del modulador se usa el bloque ‘*Product*’ como *modulador de producto BPSK* y el bloque ‘*Sine Wave*’, como generador de la señal portadora denominado *portadora*, (ver figura 15.b). El parámetro de la máscara del primer bloque es número de entradas; éste es igual al número de señales a multiplicar, en este caso igual a 2. Los parámetros de la máscara del segundo bloque son: amplitud, nivel dc, frecuencia en radianes/segundo, fase en radianes y tiempo de muestreo. Estos parámetros se seleccionan de acuerdo con las especificaciones de la portadora. La amplitud es la amplitud de la portadora, el nivel de dc es 0, la frecuencia es igual a la frecuencia de la portadora, la fase es 0 y el tiempo de muestreo es 0. La salida del multiplicador es una de las dos posibles señales:

$$\pm A \text{sen}(2\pi f_c t)$$

**Figura 17.** Diagrama de constelación BPSK



### **Demodulador BPSK.**

En el sistema BPSK la información digital transmitida se extrae identificando cada uno de los posibles símbolos a partir de la fase de la señal modulada, (ver tabla 2). La fase se determina al hallar la componente en continua de la señal resultante de multiplicar la señal modulada y la portadora de referencia.

En el subsistema del demodulador para multiplicar la señal modulada con la señal portadora de referencia se emplea, de forma análoga al *modulador de producto BPSK*, un bloque ‘*Product*’ como *demodulador BPSK*. Y como

generador de la portadora se usa el bloque 'Sine Wave', con los mismos parámetros, (ver figura 18.b). Las posibles señales resultantes son:

$$s_1 = (A \sin(2\pi f_c t))(A_c \sin(2\pi f_c t)) = AA_c \sin^2(2\pi f_c t)$$

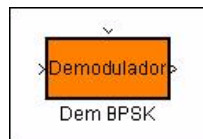
$$= \frac{AA_c}{2} - \frac{AA_c}{2} \cos(2(2\pi f_c)t)$$

$$s_0 = (-A \sin(2\pi f_c t))(A_c \sin(2\pi f_c t)) = -AA_c \sin^2(2\pi f_c t)$$

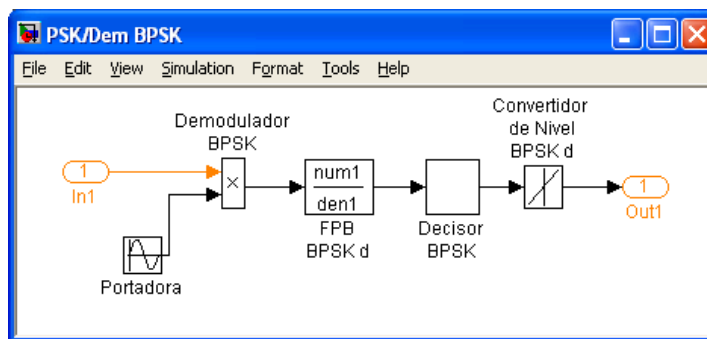
$$= -\frac{AA_c}{2} - \frac{AA_c}{2} \cos(2(2\pi f_c)t)$$

**Figura 18.** Demodulador BPSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.



En la señal a la salida del multiplicador se identifican dos términos, un término a bajas frecuencias y otro al doble de la frecuencia de la señal portadora. El primer término determina la relación entre las fases de la señal recibida y la portadora de referencia. La componente dc es positiva cuando la señal modulada tiene una fase  $0^\circ$  (bit, 1 lógico), igual a la portadora y es

negativa cuando tiene una fase de  $180^\circ$  (bit, 0 lógico), en desfase con la portadora. Por lo tanto, se requiere un filtro pasabajas para eliminar las componentes de frecuencia presentes al doble de la frecuencia de la portadora.

En el subsistema del demodulador se usa el bloque '*Transfer Fcn*' denominado *FPB BPSK d*, (ver figura 18.b), de manera análoga al utilizado en el modulador. El código para realizar los cálculos del filtro pasabajas del demodulador requerido en todas las M-arias se muestra en la figura 19. El filtro definido es un butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual al 50% de la frecuencia de la portadora.

**Figura 19.** Código del filtro pasabajas para el demodulador M-PSK

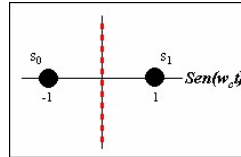
```
%Filtro pasabajas, eliminar altas frecuencias.  
Bw1=0.5*fc;  
n1=2;  
f1=Bw1;  
Wn1=2*pi*f1;  
[num1, den1]=butter(n1,Wn1,'s');
```

Tomado del archivo .m generado para la modulación PSK

La señal a la salida del filtro en un periodo de bit presenta oscilaciones alrededor del valor esperado, y por lo tanto, ésta posee más de dos niveles de voltaje. El decisor es el elemento encargado de establecer si el símbolo transmitido es un "0" lógico o un "1" lógico. Según el diagrama de constelación para BPSK (ver figura 17) y aprovechando la simetría con respecto a cero de la componente dc a la salida del filtro, el límite de las regiones de decisión (ver figura 20), entre los dos símbolos es el nivel de

voltaje cero; los valores de la señal mayores que cero corresponden al símbolo  $s_1$  y los menores o iguales a cero al símbolo  $s_0$ .

**Figura 20.** Regiones de decisión BPSK



En el subsistema se usa el bloque denominado *decisor BPSK*, (ver figura 18.b). El bloque decisor BPSK fue creado durante la elaboración del modelo FSK y está disponible en la librería LabMoDig, librería creada para el laboratorio. El parámetro de la máscara del bloque es tiempo de muestreo, igual al tiempo de bit. Este bloque cada tiempo de bit toma una muestra de la señal y la mantiene hasta el próximo tiempo de bit eliminando las oscilaciones, y luego a las muestras mayores que cero les asigna la amplitud  $A$  y las menores o iguales a cero la amplitud  $-A$ .

La señal a la salida del decisor es bipolar, para obtener la señal de datos binaria original, los símbolos se representan con señalización NRZ unipolar mediante el bloque '*Look-Up Table*' denominado *convertidor de nivel BPSK d*, (ver figura 18.b). El parámetro del convertidor de nivel, vector de valores de entrada es igual al vector conformado por los niveles de la señal NRZ bipolar,  $[-A A]$ , y el vector de valores de salida es igual al vector conformado por los niveles de la señal NRZ unipolar,  $[0 A]$ .

#### **4.1.2 Modulación QPSK.**

Un nuevo concepto involucrado en los siguientes tipos de modulaciones es su característica multinivel. En las modulaciones M-arias ( $M > 2$ ) cada símbolo es formado por  $\log_2(M)$  bits de información, siendo M el número de señales de transmisión que difieren en su fase, cada una equivalente a un símbolo.

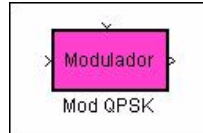
La modulación QPSK consiste en procesos de modulación BPSK paralelos para cada uno de los bits del símbolo; estos procesos difieren entre sí debido al desfase presente entre las portadoras de cada canal. De aquí en adelante el canal con la portadora con fase igual a  $0^\circ$  se denominará *en fase* y el canal con la portadora con fase igual a  $90^\circ$  se denominará *en cuadratura*. Los bloques del modulador QPSK y demodulador QPSK se muestran en las figuras 21.a y 23.a.

#### **Modulador QPSK.**

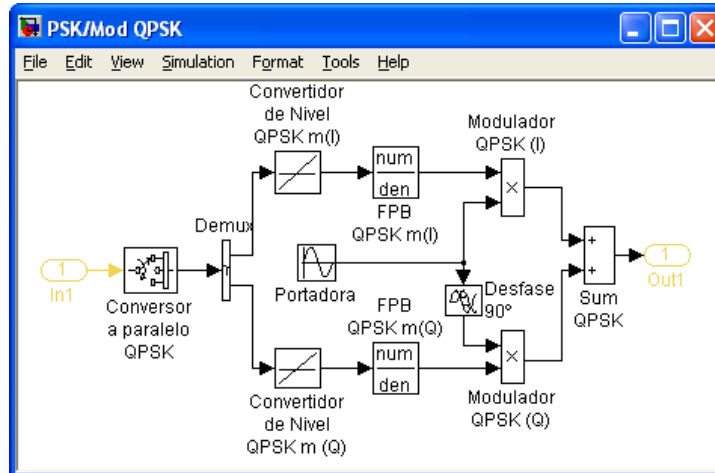
La cadena de bits de entrada, se presenta al modulador como símbolos, en el caso de la modulación QPSK,  $M=4$ . Los símbolos son el conjunto de posibles combinaciones de dos bits denominados dibits, (ver tabla 3); éstos se conforman desde la cadena de bits de entrada creando conjuntos de dos bits. Con este fin, en el subsistema se usa el bloque '*Distributor*' denominado *conversor a paralelo QPSK*, (ver figura 21.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: ancho del vector de salida y condiciones iniciales. El parámetro ancho del vector de salida define el número de bits en paralelo a la salida del bloque y el parámetro condiciones iniciales define el nivel de la señal antes de la salida del primer conjunto de bits. Los parámetros del conversor a paralelo QPSK establecidos son: el ancho del vector de salida igual a 2 y las condiciones iniciales igual a 0.

**Figura 21.** Modulador QPSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.



**Tabla 3.** Tabla de verdad QPSK

Bits de entrada	Símbolo de entrada	Fase de salida
0 0	$s_0$	$45^\circ$
0 1	$s_1$	$135^\circ$
1 1	$s_2$	$-135^\circ$
1 0	$s_3$	$-45^\circ$

La modulación de los símbolos se realiza mediante dos canales, en fase y en cuadratura, uno para cada bit. Por lo tanto cada símbolo es demultiplexado en el subsistema mediante el bloque 'Demux', (ver figura 21.b). El parámetro

de la máscara del bloque es número de salidas; éste es igual al número de bits de cada símbolo, en este caso es igual a 2.

De aquí en adelante el proceso de la modulación se desarrolla de manera paralela como dos procesos de modulación BPSK. El canal en fase y en cuadratura son idénticos, excepto por la portadora. Para el canal en cuadratura la portadora es desfasada  $90^\circ$ . En el subsistema se emplea el bloque '*Transport Delay*', denominado *desfase  $90^\circ$* , (ver figura 21.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: tiempo de retardo, entrada inicial, y tamaño inicial de buffer. El tiempo de retardo es un cuarto del periodo de la frecuencia de la portadora, la entrada inicial es 0 y el tamaño inicial de buffer es 1024.

Los bits en cada canal son representados con señalización NRZ bipolar. Al igual que en BPSK se requiere el uso de los filtros limitadores de ancho de banda; éstos mediante el código de la figura 16, están definidos como butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual a la tasa de símbolo para QPSK, igual a  $f_b/2$ . La tasa de bit a la entrada de cada canal es un medio de la tasa de bit de entrada. Debido a la conversión a paralelo, los bits que conforman el símbolo tienen el doble del periodo que los bits de la cadena de datos de entrada.

El diagrama de constelación de QPSK en fase, (figura 22.a), muestra la fase utilizada para transmitir cada símbolo a través del canal. Este diagrama es igual al diagrama de constelación de BPSK, por lo tanto, el proceso de modulación es similar al de BPSK. Entonces se tiene que, cada uno de los posibles bits del símbolo, son distinguidos, uno del otro, emitiendo una

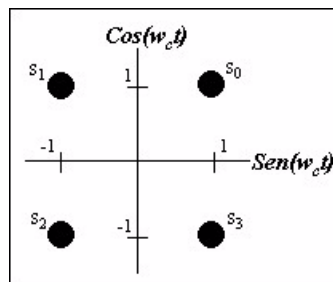
portadora senoidal cuya fase varía entre dos valores según el canal, (ver tabla 4). La expresión general para la salida del canal en fase es:

$$A \text{sen}(2\pi f_c t + \angle A_b)$$

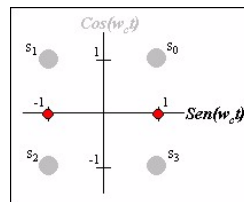
Con  $A = |A_b|A_cG$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz,  $A_b$  es la amplitud de los datos de entrada y  $G$  es la ganancia del filtro pasabajos. Las dos posibles señales de salida del canal en fase, son:

$$\pm A \text{sen}(2\pi f_c t)$$

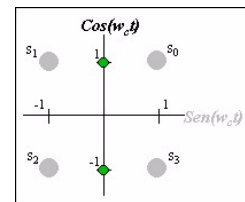
**Figura 22.** Diagrama de constelación QPSK. a). En fase. b). En cuadratura



a.



b.



El diagrama de constelación de QPSK en cuadratura, (figura 22.b), muestra la fase utilizada para transmitir cada símbolo a través del canal. La expresión general para la salida del canal en cuadratura es:

$$A \text{sen}\left(2\pi f_c t + \left(\frac{\pi}{2} + \angle A_b\right)\right) = A \cos(2\pi f_c t + \angle A_b)$$

Con  $A = |A_b|A_cG$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz,  $A_b$  es la amplitud de los datos de entrada y  $G$  es la ganancia del filtro pasabajos. Las dos posibles señales de salida del canal en cuadratura, son:

$$\pm A \operatorname{sen}\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}\right) = \pm A \cos(2\pi f_c t)$$

**Tabla 4.** Tabla de verdad para cada canal QPSK

Canal en fase		Canal en cuadratura	
Bit de entrada	Fase de salida	Bit de entrada	Fase de salida
0	180°	0	270°
1	0°	1	90°

La modulación de los dos canales es combinada mediante un sumador lineal. En el subsistema del modulador se usa el bloque ‘Sum’ denominado ‘Sum QPSK’, (ver figura 21.b). El parámetro de la máscara de este bloque es, lista de signos; la lista es precedida por el símbolo |, en ella se indica el signo a asignar a cada señal de entrada antes de realizar la adición, en este caso el parámetro se define como |++. La salida del sumador es la señal modulada y la fase de cada símbolo modulado corresponde con el diagrama de constelación de QPSK, (ver figura 22) y con la fase de salida para QPSK (ver tabla 3).

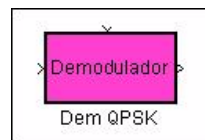
### **Demodulador QPSK.**

En el sistema QPSK, la demodulación de los símbolos se realiza de manera similar a la modulación, mediante dos canales, en fase y en cuadratura, uno

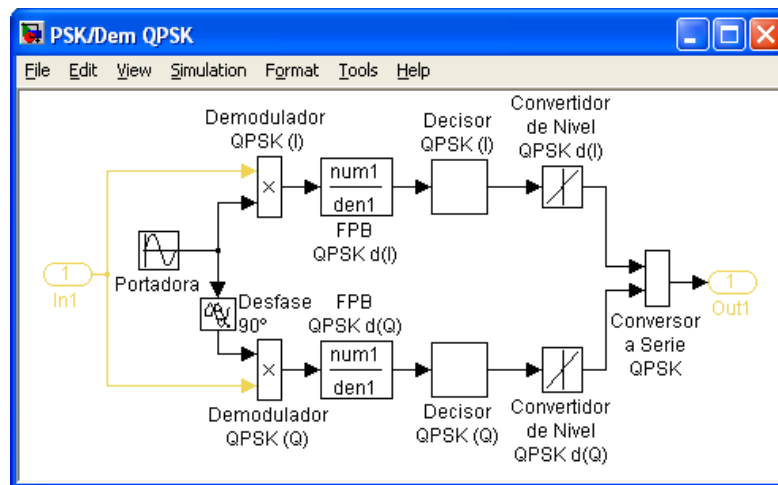
para cada bit. Por lo tanto, la señal modulada es aplicada a la entrada de cada uno de los canales. El proceso de la demodulación se desarrolla de manera paralela como dos procesos de demodulación BPSK.

**Figura 23.** Demodulador QPSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.

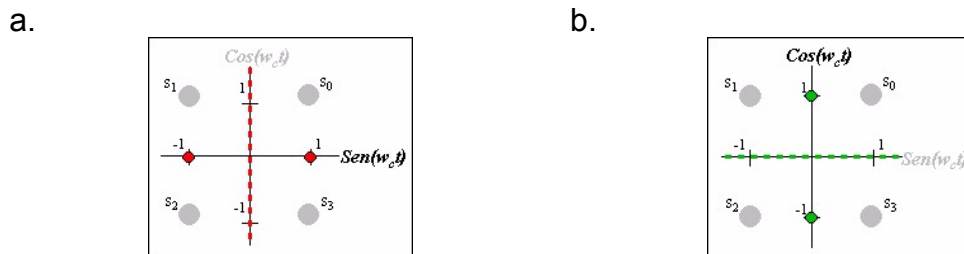


La información digital transmitida se extrae identificando cada uno de los posibles símbolos a partir de la fase de la señal modulada, (ver tabla 3). La fase se determina de manera análoga que en el proceso de demodulación BPSK multiplicando la señal modulada con la portadora de referencia, (ver figura 23.b).

En la señal a la salida del multiplicador se identifican tres términos, un término a bajas frecuencias, y dos al doble de la frecuencia de la señal portadora. El primer término determina la relación de la fase de la señal recibida con respecto a la portadora de referencia. Por lo tanto, se requiere un filtro pasabajas para eliminar las componentes de frecuencia presentes al doble de la frecuencia de la portadora, (ver figura 23.b). Los filtros del demodulador son los mismos para todas las M-arias implementadas, (ver figura 19).

El elemento decisor es el encargado de eliminar oscilaciones alrededor del valor esperado que presenta la señal a la salida del filtro en un periodo de bit. Según los diagramas de constelación para QPSK en fase y en cuadratura se establecen las regiones de decisión de acuerdo con los bits esperados, (ver figura 24). Aprovechando las características de la componente de dc a la salida del modulador de producto, simétrica con respecto a cero, se establece el nivel de voltaje cero como la frontera de decisión entre los dos bits de símbolo.

**Figura 24.** Regiones de decisión QPSK. a). En fase. b). En cuadratura



La señal a la salida del decisor se representa con señalización NRZ unipolar (ver figura 23.b). Las señales de cada canal se alimentan al bloque *conversor a serie QPSK*, para obtener la cadena de datos binaria transmitida. Este bloque convierte los bits en paralelo de su entrada en bits en serie. El bloque conversor a serie QPSK fue creado durante la elaboración del modelo y está disponible en la librería LabMoDig, librería creada para el laboratorio.

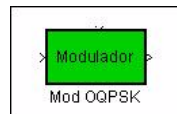
### 4.1.3 Modulación OQPSK.

El sistema de modulación OQPSK es una forma modificada de QPSK en donde la señal modulada del canal en fase cambia de fase en los puntos medios de los bits del canal en cuadratura y viceversa. Los bloques del modulador y demodulador OQPSK se muestran en las figuras 25.a y 26.a.

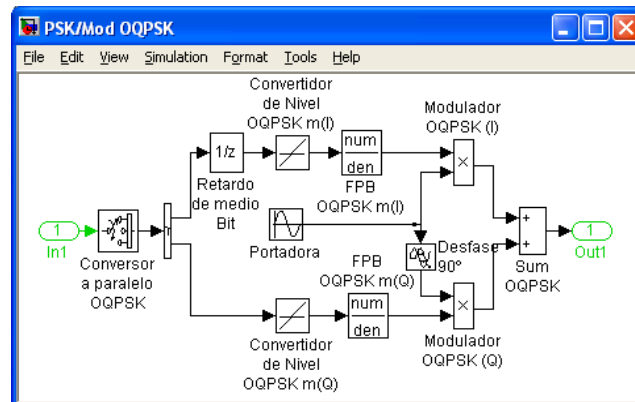
### Modulador OQPSK.

**Figura 25.** Modulador OQPSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.



La estructura interna del modulador OQPSK esta basada sobre los mismos conceptos del modulador QPSK. La diferencia consiste en la aplicación de un retardo de medio bit de símbolo a los bits del canal en fase.

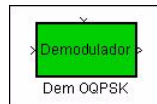
En el subsistema se usa el bloque 'Unit Delay' denominado *retardo de medio bit*, (ver figura 25.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: condiciones iniciales y tiempo de muestreo. El parámetro condiciones es igual a 0 y el parámetro tiempo de muestreo es igual un medio del periodo de bit de símbolo, igual a un periodo de bit de la cadena de bits de entrada.

### Demodulador OQPSK.

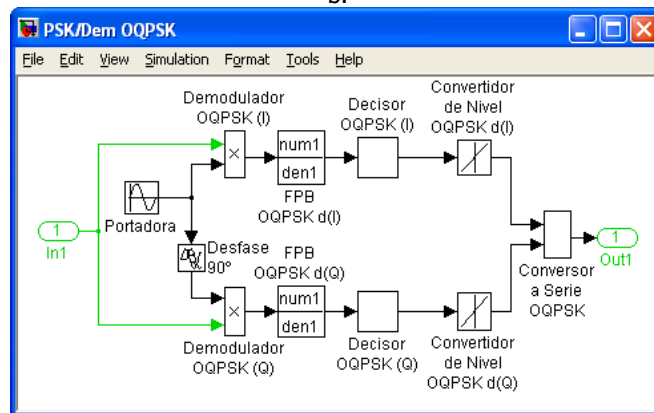
La estructura interna del demodulador OQPSK esta basada en los mismos conceptos del demodulador QPSK.

**Figura 26.** Demodulador OQPSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.



#### 4.1.4 Modulación 8PSK.

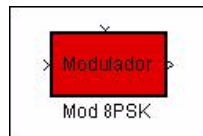
La modulación 8PSK es una modulación M-aria con  $M=8$ , por lo tanto existen 8 posibles señales de transmisión que difieren en su fase. Los bloques de cada uno de los subsistemas, modulador y demodulador se detallan en las figuras 27.a y 29.a.

#### Modulador 8PSK.

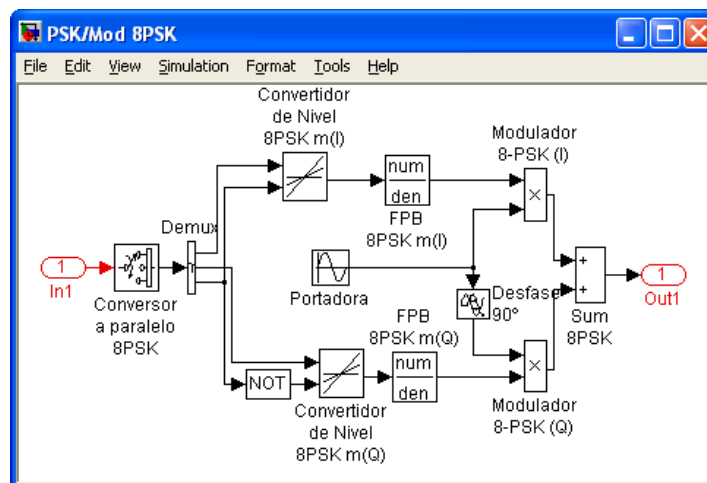
La cadena de bits de entrada, se presenta al modulador como símbolos. En el caso de la modulación 8PSK, los símbolos son el conjunto de las posibles combinaciones de tres bits denominados tribits. Los tribits se asignan a cada símbolo empleando codificación gray, dos símbolos consecutivos sólo difieren en un bit, (ver tabla 5).

Figura 27. Modulador 8PSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.



**Tabla 5.** Tabla de verdad 8PSK

Bits de entrada			Símbolo de entrada	Fase de salida
I	Q	C		
1	1	1	s <sub>0</sub>	+22.5°
1	1	0	s <sub>1</sub>	+67.5°
1	0	0	s <sub>2</sub>	+112.5°
1	0	1	s <sub>3</sub>	+157.5°
0	0	1	s <sub>4</sub>	-157.5°
0	0	0	s <sub>5</sub>	-112.5°
0	1	0	s <sub>6</sub>	-67.5°
0	1	1	s <sub>7</sub>	-22.5°

Los símbolos se conforman desde la cadena de bits mediante el bloque *conversor a paralelo 8PSK*, (ver figura 27.b), cuyos parámetros son: el ancho del vector de salida igual a 3 y las condiciones iniciales igual a 0. Los bits de cada símbolo se denominan, bit I (en fase), bit Q (en cuadratura) y bit C (de control).

Cada símbolo es demultiplexado mediante el bloque '*Demux*', (ver figura 27.b), cuyos parámetros son: número de salidas igual al número de bits de cada símbolo, en este caso es igual a 3. La modulación de los símbolos se realiza como en la modulación QPSK mediante dos canales, en fase y en cuadratura, pero a diferencia de QPSK a cada canal se aplican dos bits. Al canal en fase se aplican el bit I y el bit C, y al canal en cuadratura, el bit Q y el bit C negado.

En esta parte el proceso de modulación inicia a desarrollarse en paralelo, (ver figura 27.b). En cada canal se modula la portadora en fase y en magnitud de acuerdo con la polaridad y magnitud de la señal modulante. Cada una de las cadenas de bit a la entrada del canal es unipolar y tiene sólo dos niveles; éstas se combinan para obtener una señal bipolar con cuatro niveles, señal PAM. El bit I y el bit Q determinan la polaridad y el bit C y su negación determinan la magnitud, (ver tabla 6).

Para obtener la señal PAM, se usa el bloque '*Look-Up Table (2-D)*' denominado *convertidor de nivel 8PSK m(I)*, (ver figura 27.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: fila, columna y tabla. El parámetro fila es un vector, éste contiene los índices de las filas de la tabla, [0 1], los cuales deben ser iguales a los niveles de los posibles bits de una de las cadenas de entrada; el parámetro columna es un vector, éste contiene los índices de las columnas de la tabla, [0 1], los cuales deben ser iguales a los niveles de los posibles bits de la otra cadena de bits de entrada; y el parámetro tabla es una matriz, ésta contiene la magnitud y la polaridad asignada a cada combinación de bits, [-0.541,-1.307;0.541,1.307].

**Tabla 6.** Tabla de verdad para cada canal 8PSK

Canal en fase				Canal en cuadratura				
Bit de entrada		Señal PAM	Señal de salida		Bit de entrada		Señal de salida	
I	C		Magnitud	Fase	Q	/C	Magnitud	Fase
1	1	+1.307	1.307	0°	1	0	+0.541	0.541 90°
1	0	+0.541	0.541	0°	1	1	+1.307	1.307 90°
0	0	-0.541	0.541	180°	0	1	-1.307	1.307 270°
0	1	-1.307	1.307	180°	0	0	-0.541	0.541 270°

El espectro en frecuencia de la señal PAM es una forma de onda sinc similar al de una señal cuadrada o de una señal aleatoria. Para limitar el ancho de banda de las señales PAM se usaron los filtros especificados por el código de la figura 16, butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual a la tasa de símbolo para 8PSK, igual a  $f_b/3$ . La tasa de bit a la entrada de cada canal es un tercio de la tasa de bit de entrada.

Cada una de los parejas posibles de bits, son distinguidas, una de la otra, emitiendo una portadora senoidal cuya fase y magnitud varía entre dos valores según el canal, (ver tabla 6). El diagrama de constelación de 8PSK en fase, (figura 28.a), muestra la fase y magnitud utilizadas para transmitir cada símbolo a través del canal. La expresión general para la salida del canal en fase es:

$$|A_i| A \sin(2\pi f_c t + \angle A_i),$$

Con  $A = A_c G$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $G$  es la ganancia del filtro pasabajas,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz, y  $A_i$  es la amplitud de los datos modulantes. Las posibles señales a la salida del canal en fase, son:

$$\pm A_1 A \sin(2\pi f_c t) \quad \text{y} \quad \pm A_0 A \sin(2\pi f_c t)$$

El diagrama de constelación de 8PSK en cuadratura, figura 28.b, muestra la fase y amplitud utilizadas para transmitir cada símbolo a través del canal. La expresión general para la salida del canal en cuadratura es:

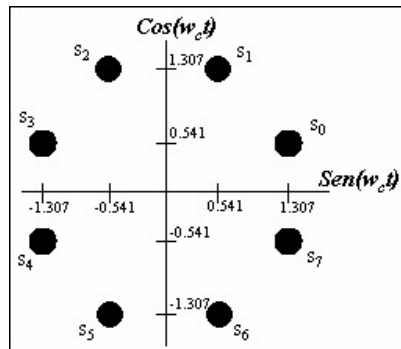
$$|A_i| A \cos(2\pi f_c t + \angle A_i),$$

Con  $A = A_c G$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $G$  es la ganancia del filtro pasabajas,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz, y  $A_i$  es la

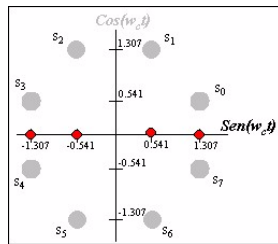
amplitud de los datos modulantes. Las posibles señales de salida del canal en cuadratura, son:

$$\pm A_1 A \cos(2\pi f_c t) \quad \text{y} \quad \pm A_0 A \cos(2\pi f_c t)$$

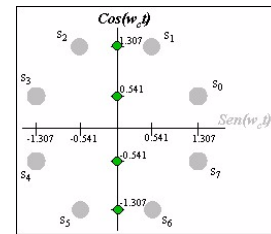
**Figura 28.** Diagrama de constelación 8PSK. a). En fase. b). En cuadratura



a.



b.



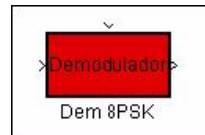
Las señales de los dos canales son combinadas mediante un sumador lineal, bloque 'Sum', (ver figura 27.b). La salida del sumador es la señal modulada 8PSK y la fase de cada símbolo modulado corresponde con el diagrama de constelación de 8PSK, (figura 28) y con la fase de salida para 8PSK (ver tabla 5).

### Demodulador 8PSK.

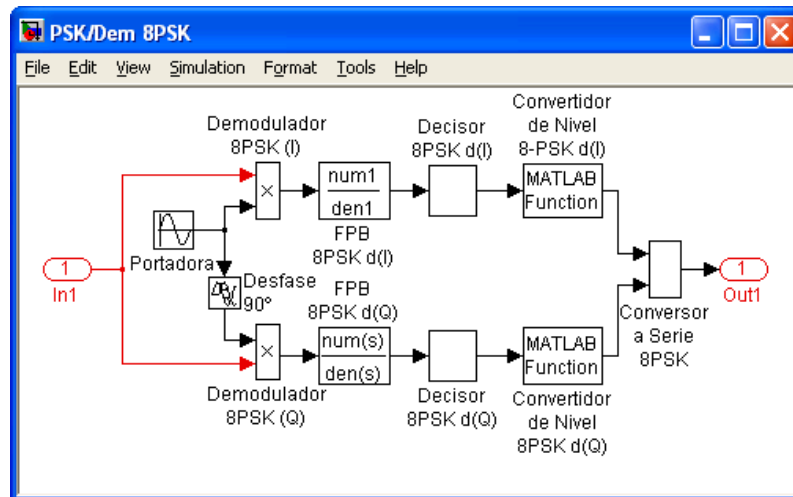
En el sistema 8PSK, la demodulación de los símbolos se realiza de manera análoga a la demodulación QPSK, mediante los dos canales, en fase y en cuadratura. La señal modulada es aplicada a la entrada de cada uno de los canales.

**Figura 29.** Demodulador 8PSK. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.

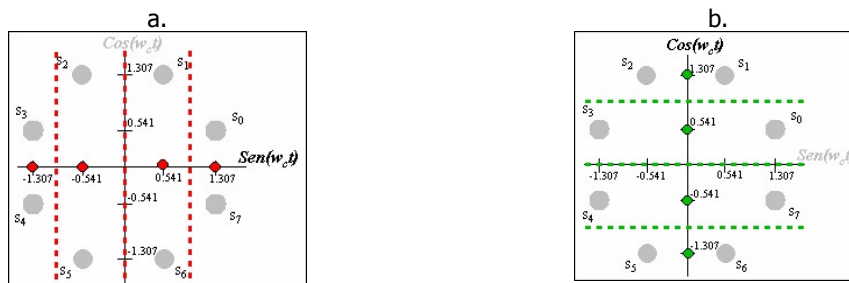


La información digital transmitida se extrae identificando cada uno de los posibles símbolos a partir de la fase de la señal modulada, (ver tabla 5). La demodulación se realiza multiplicando la señal modulada con la portadora de referencia, (ver figura 29.b).

En la señal a la salida del multiplicador se identifican tres términos, un término a bajas frecuencias, y dos al doble de la frecuencia de la señal portadora. El primer término determina la relación de la fase de la señal recibida con respecto a la portadora de referencia. Por lo tanto, se requiere un filtro pasabajos para eliminar las componentes de frecuencia presentes al doble de la frecuencia de la portadora, (ver figura 29.b). El filtro del demodulador es el mismo para las M-arias implementadas, (ver figura 19).

El decisor es el encargado de establecer el nivel de la señal PAM transmitida eliminando las oscilaciones de cada uno de los niveles, (ver figura 29.b). Según el diagrama de constelación se espera obtener cuatro posibles niveles en cada canal, por lo cual se definen cuatro regiones de decisión, (ver figura 30). Las fronteras de decisión se definen como el nivel medio entre dos niveles consecutivos esperados.

**Figura 30.** Regiones de decisión 8PSK. a). En fase. b). En cuadratura



El bloque decisor 8PSK cada tiempo de bit toma una muestra de la señal y la mantiene hasta el próximo tiempo de bit eliminando las oscilaciones de la señal a la salida del filtro. A cada muestra se le resta un vector que contiene el valor de los niveles esperados,  $[-0.541, -1.307; 0.541, 1.307] * A$  (donde A es

la amplitud de la señal atenuada) , obteniendo como resultado un vector con cuatro valores por muestra. Se determinan las magnitudes de cada uno de los valores y se aplican a la entrada del bloque '*maximum/minimum index*' denominado *índice*, el cual establece la posición del valor más pequeño dentro del vector mediante un índice. Este índice determina cual de los valores esperados es más cercano al valor de la muestra, (ver tabla 7). El bloque decisor 8PSK está disponible en la librería LabMoDig, creada para el laboratorio. El parámetro de la máscara del bloque es tiempo de muestreo, igual al tiempo de bit de símbolo igual a 3 veces el periodo de bit.

**Tabla 7.** Índice para cada valor esperado

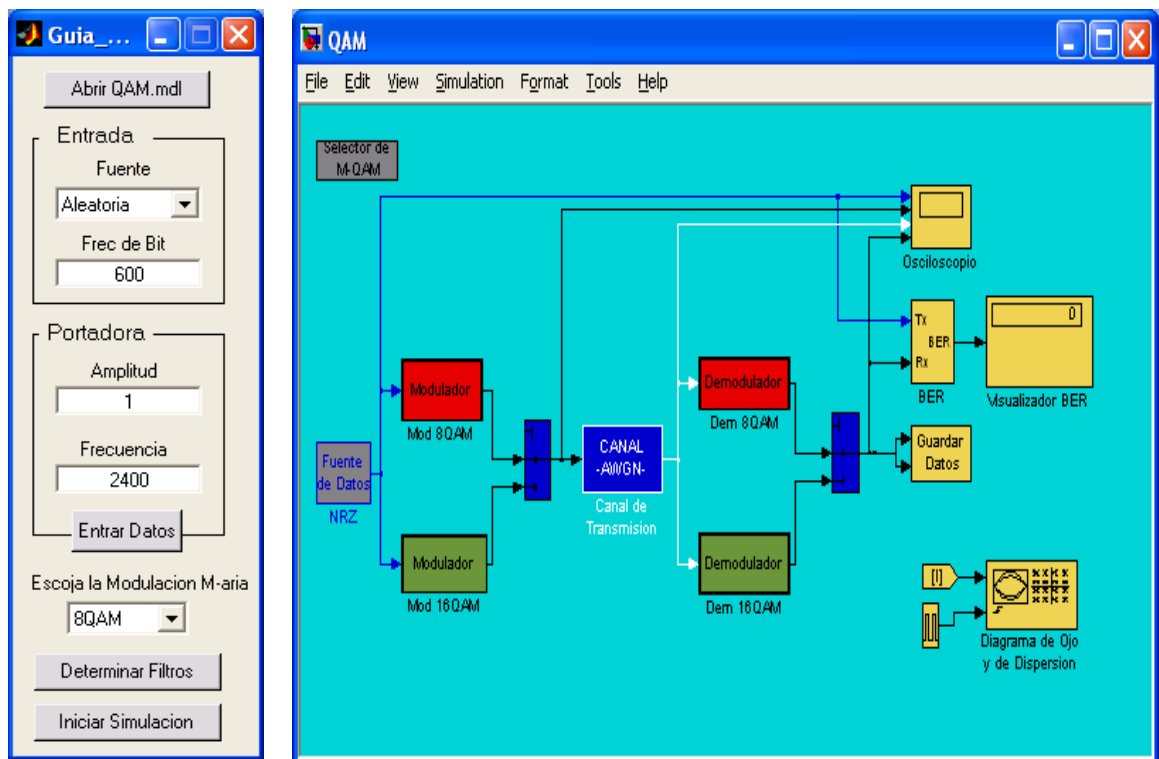
Índice	Valor esperado
0	-0.541
1	-1.307
2	0.541
3	1.307

La señal a la salida del decisor es una PAM con niveles 0, 1, 2, y 3 (los índices). La señal PAM se transforma con el bloque '*MATLAB Fcn*' denominado *convertidor de nivel 8PSK d(l)*, (ver figura 29.b), para obtener los bits de la señal de datos binaria original. Los parámetros de la máscara del bloque son: función de MATLAB y dimensiones de salida. El primer parámetro es igual a la función de matlab *de2bi(u,2)*, ésta convierte números decimales en binarios de  $u$  bits; el segundo parámetro es  $u$  igual a 2.

Los conjuntos de bits de los canales se convierten mediante el bloque *conversor a serie 8PSK*, (ver figura 29.b), en grupos de tres bits en serie para obtener la cadena de datos binaria transmitida. El bloque conversor a serie 8PSK fue creado durante la elaboración del modelo y está disponible en la librería LabMoDig, librería creada para el laboratorio.

## 5. MODELO DE LA MODULACIÓN DE AMPLITUD EN CUADRATURA (QAM)

Figura 31. Modulación de amplitud en cuadratura



El entorno a usar para la práctica de modulación por variación de fase (QAM, “**Quadrature Amplitude Modulation**”), se muestra en la figura 31. La interfaz gráfica y el modelo del sistema (archivo qam.mdl) son las herramientas mediante las cuales el estudiante desarrollará la experiencia propuesta.

En la interfaz se configuran las condiciones iniciales del sistema para la apropiada simulación; ésta contiene valores por defecto, cuya asignación permite realizar directamente la simulación. Las características del sistema definidas por defecto, son:

- Los datos de entrada son representados con una señal aleatoria.
- La frecuencia de los datos de entrada es 600 bits por segundo (bps).
- La amplitud de la señal portadora de la información es 1.
- La frecuencia de la señal portadora es igual a 2400 Hz.
- La modulación M-aria es 8QAM.

El modelo contiene la estructura general del sistema, la fuente de datos, los moduladores y demoduladores para cada una de las M-arias QAM implementadas, los elementos y dispositivos de visualización, análisis y almacenamiento de datos. La fuente de los datos de entrada es común para todos los tipos de modulación M-arias QAM.

## **5.1 SUBSISTEMAS DE MODULACIÓN M-ARIA QAM**

La modulación QAM es un método de modulación multinivel. En las modulaciones M-arias ( $M > 2$ ) cada símbolo es formado por  $n = \log_2(M)$  bits de información y, existirán M posibles señales de transmisión que difieren en su fase y amplitud.

En las siguientes secciones se detallan los conceptos teóricos tenidos en cuenta al modelar cada etapa involucrada en el proceso de modulación digital QAM. Los conceptos explorados en la primera sección serán obviados en la siguiente. Las M-arias QAM implementadas son 8QAM y 16QAM. Los moduladores M-QAM y los demoduladores M-QAM son bloques elaborados específicamente para la implementación del laboratorio de modulación digital.

### **5.1.1 Modulación 8QAM.**

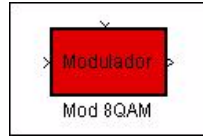
La modulación 8PSK es una modulación M-aria con  $M=8$ , por lo tanto existen 8 posibles señales de transmisión que difieren en su fase y amplitud. Los bloques existentes en cada uno de los subsistemas, modulador y demodulador se detallan en las figuras 32.a y 35.a.

#### **Modulador 8QAM.**

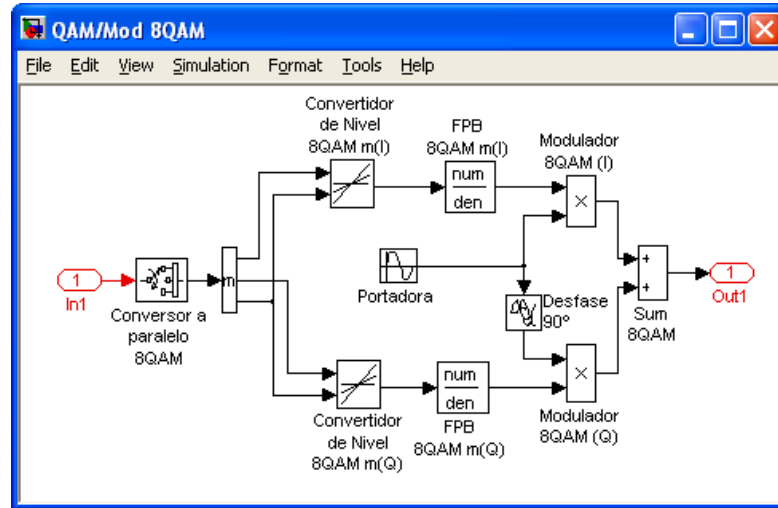
La cadena de bits de entrada, se presenta al modulador como símbolos, en el caso de la modulación 8QAM, los símbolos son el conjunto de las posibles combinaciones de tres bits denominados tribits. Los tribits se asignan a cada símbolo empleando codificación gray, dos símbolos consecutivos sólo difieren en un bit, (ver tabla 8).

**Figura 32.** Modulador 8QAM. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.



**Tabla 8.** Tabla de verdad 8QAM

Bits de entrada			Símbolo de entrada	Señal de salida	
I	Q	C		Amplitud	Fase
1	1	1	s <sub>0</sub>	1.848	+45°
1	1	0	s <sub>1</sub>	0.765	+45°
1	0	0	s <sub>2</sub>	0.765	+135°
1	0	1	s <sub>3</sub>	1.848	+135°
0	0	1	s <sub>4</sub>	1.848	-135°
0	0	0	s <sub>5</sub>	0.765	-135°
0	1	0	s <sub>6</sub>	0.765	-45°
0	1	1	s <sub>7</sub>	1.848	-45°

Los símbolos se conforman desde la cadena de bits de entrada creando conjuntos de tres bits mediante el bloque '*Distributor*' denominado *conversor a paralelo 8QAM*, (ver figura 32.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: ancho del vector de salida y condiciones iniciales. El parámetro ancho del vector de salida define el número de bits en paralelo a la salida del bloque y el parámetro condiciones iniciales define el nivel de la señal antes de la salida del primer conjunto de bits. Los parámetros del conversor a paralelo 8QAM son: el ancho del vector de salida igual a 3 y las condiciones iniciales iguales a 0. Los bits de cada símbolo se denominan, bit I (en fase), bit Q (en cuadratura) y bit C (de control).

Cada símbolo es demultiplexado mediante el bloque '*Demux*', (ver figura 32.b), cuyo parámetro es número de salidas; éste es igual al número de bits de cada símbolo, en este caso es igual a 3. La modulación de los símbolos se realiza mediante dos canales en paralelo, denominados en fase y en cuadratura. A cada canal se aplican dos bits; al canal en fase el bit I y el bit C, y al canal en cuadratura el bit Q y el bit C. El canal en fase y en cuadratura son idénticos, excepto por la portadora.

En cada canal se modula la portadora en fase y en magnitud de acuerdo con la polaridad y magnitud de la señal modulante. Cada una de las cadenas de bit a la entrada del canal es unipolar y tiene sólo dos niveles; éstas se combinan para obtener una señal bipolar con cuatro niveles, señal PAM. El bit I y el bit Q determinan la polaridad y el bit C determina la magnitud, (ver tabla 9).

**Tabla 9.** Tabla de verdad para cada canal 8QAM

Canal en fase					Canal en cuadratura				
Bit de entrada		Señal PAM	Señal de salida		Bit de entrada		Señal PAM	Señal de salida	
I	C		Magnitud	Fase	Q	C		Magnitud	Fase
1	1	+1.307	1.307	0°	1	1	+1.307	1.307	90°
1	0	+0.541	0.541	0°	1	0	+0.541	0.541	90°
0	0	-0.541	0.541	180°	0	0	-0.541	0.541	270°
0	1	-1.307	1.307	180°	0	1	-1.307	1.307	270°

Para obtener la señal PAM, en el subsistema se usa el bloque '*Look-Up Table (2-D)*' denominado *convertidor de nivel 8QAM m(I)*, (ver figura 32.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: fila, columna y tabla. El parámetro fila es un vector, éste contiene los índices de las filas de la tabla, [0 1], los cuales deben ser iguales a los niveles de los posibles bits de una de las cadenas de entrada; el parámetro columna es un vector, éste contiene los índices de las columnas de la tabla, [0 1], los cuales deben ser iguales a los niveles de los posibles bits de la otra cadena de bits de entrada; y el parámetro tabla es una matriz, ésta contiene la magnitud y la polaridad asignada a cada combinación de bits, [-0.541,-1.307;0.541,1.307].

El espectro en frecuencia de la señal PAM es una forma de onda sinc similar a la de una señal cuadrada o de una señal aleatoria; éste es infinito pero la energía de la señal está concentrada en una pequeña gama de frecuencias. Debido a consideraciones de ancho de banda se aplica un filtro pasabajas con una frecuencia de corte igual a la tasa de símbolos, para limitar el espectro.

En el subsistema del modulador se usa el bloque '*Transfer Fcn*' denominado *FPB 8QAM m*, (ver figura 32.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: numerador y denominador. El cálculo de todos los filtros necesarios en el sistema de modulación M-QAM se efectúa en el archivo *guia\_qam.m* de la interfaz. El código se muestra en la figura 33; con éste se realizan los cálculos para determinar el filtro pasabajas del modulador requerido en todas las M-arias. El numerador y denominador del filtro se obtienen mediante el comando de Matlab, *butter(n, Wc, 's')*, donde *n* es el orden del filtro, *Wc* es la frecuencia de corte en radianes y *s* determina que el filtro es digital. El filtro definido es un butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual a la tasa de símbolo, para 8QAM igual a  $f_b/3$ . La tasa de bit a la entrada de cada canal es un tercio de la tasa de bit de entrada. Debido a la conversión a paralelo, los bits que conforman el símbolo tienen el triple del periodo que los bits de la cadena de datos de entrada.

**Figura 33.** Código del filtro pasabajas para el modulador M-QAM

```

%BW según la M-aria
switch M
case 1
    Bw=fb/3;
case 2
    Bw=fb/4;
end
%Filtro pasabajas, limitar BW
n=2;
f=Bw;
Wc=2*pi*f;
[num, den]=butter(n,Wc,'s');

```

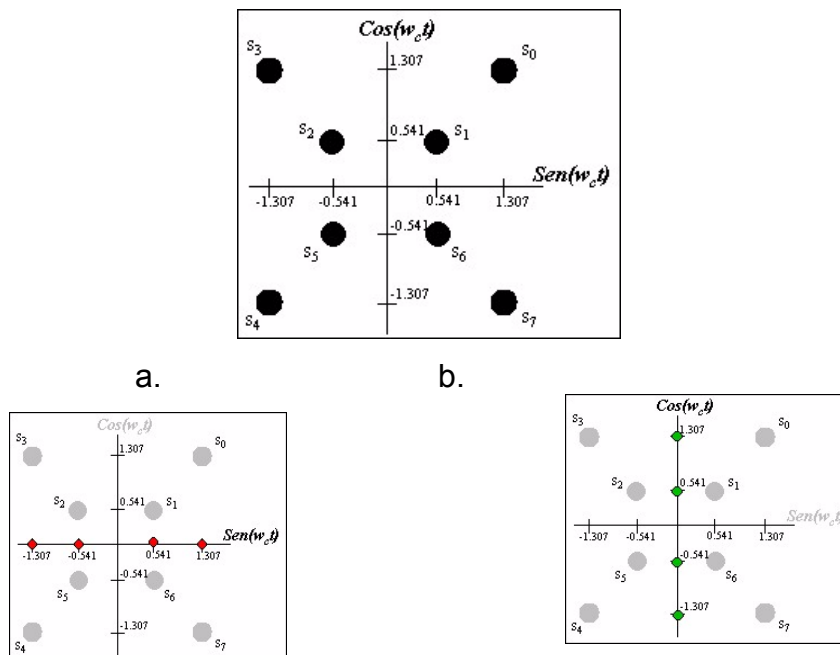
Tomado del archivo *.m* generado para la modulación QAM

Cada una de las parejas posibles de bits, son distinguidas, una de la otra, emitiendo una portadora senoidal cuya fase y magnitud varía entre dos valores según el canal, (ver tabla 9). El diagrama de constelación de 8QAM en fase, (figura 34.a), muestra la fase y magnitud utilizadas para transmitir cada símbolo a través del canal. La expresión general para la salida del canal en fase es:

$$|A_i|A \text{sen}(2\pi f_c t + \angle A_i),$$

Con  $A = A_c G$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $G$  es la ganancia del filtro pasabajas,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz, y  $A_i$  es la amplitud de los datos modulantes.

**Figura 34.** Diagrama de constelación 8QAM. a). En fase. b). En cuadratura



El diagrama de constelación de 8QAM en cuadratura, (ver figura 34.b), muestra la fase y magnitud utilizadas para transmitir cada símbolo a través del canal. La expresión general para la salida del canal en cuadratura es;

$$|A_i| A \cos(2\pi f_c t + \angle A_i)$$

Con  $A = A_c G$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $G$  es la ganancia del filtro pasabajas,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz, y  $A_i$  es la amplitud de los datos modulantes.

En el subsistema del modulador se usa el bloque '*Product*' como *modulador 8QAM* y el bloque '*Sine Wave*', como generador de la señal portadora denominado *portadora*, (ver figura 32.b). El parámetro de la máscara del primer bloque es número de entradas; éste es igual al número de señales a multiplicar, en este caso igual a 2. Los parámetros de la máscara del segundo bloque son: amplitud, nivel dc, frecuencia en radianes/segundo, fase en radianes y tiempo de muestreo. Estos parámetros se seleccionan de acuerdo con las especificaciones de la portadora. La amplitud es la amplitud de la portadora, el nivel de dc es 0, la frecuencia es igual a la frecuencia de la portadora, la fase es 0 y el tiempo de muestreo es 0. Para el canal en cuadratura la portadora es desfasada 90°. mediante el bloque '*Transport Delay*', denominado *desfase 90°*, (ver figura 32.b). Los parámetros de la máscara de este bloque son: tiempo de retardo, entrada inicial, y tamaño inicial de buffer. El tiempo de retardo es un cuarto del periodo de la frecuencia de la portadora, la entrada inicial es 0 y el tamaño inicial de buffer es 1024 Las posibles señales a la salida del multiplicador del canal en fase, son:

$$\pm A_1 A \sin(2\pi f_c t) \quad \text{y} \quad \pm A_0 A \sin(2\pi f_c t)$$

Y las posibles señales a la salida del multiplicador del canal en cuadratura, son:

$$\pm A_1 A \cos(2\pi f_c t) \quad \text{y} \quad \pm A_0 A \cos(2\pi f_c t)$$

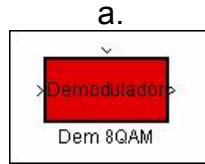
La modulación de los dos canales es combinada mediante un sumador lineal. En el subsistema del modulador se usa el bloque 'Sum', denominado 'Sum 8QAM', (ver figura 32.b). El parámetro de la máscara de este bloque es, lista de signos; la lista es precedida por el símbolo |, en ella se indica el signo a asignar a cada señal de entrada antes de realizar la adición, en este caso el parámetro se define como |++. Las señales a la salida del sumador son las señales moduladas cuya fase y amplitud corresponde con el diagrama de constelación de 8QAM, (ver figura 34) y con los valores de fase y amplitud correspondientes a cada símbolo, (ver tabla 8).

### **Demodulador 8QAM.**

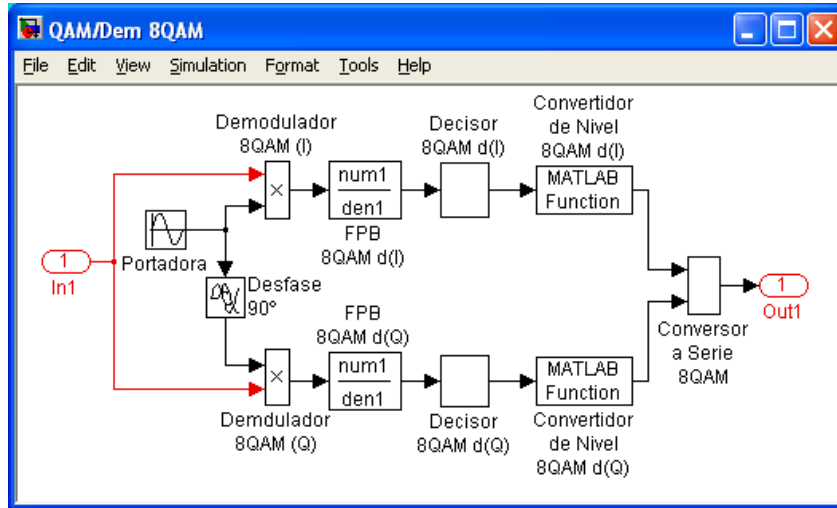
En el sistema 8QAM, la demodulación de los símbolos se realiza de manera similar a la modulación, mediante dos canales, en fase y en cuadratura, uno para cada bit. Por lo tanto, la señal modulada es aplicada a la entrada de cada uno de los canales.

La información digital transmitida se extrae identificando cada uno de los posibles símbolos a partir de la fase y amplitud de la señal presente en la entrada del receptor, (ver tabla 9). La fase y la amplitud se determina multiplicando la señal modulada con la portadora de referencia, mediante el bloque *demodulador 8QAM*, (ver figura 35.b).

**Figura 35.** Demodulador 8QAM. a) Bloque. b) Subsistema



b.



En la señal a la salida del multiplicador se identifican tres términos, un término a bajas frecuencias, y dos al doble de la frecuencia de la señal portadora. El primer término determina la relación de la fase y la amplitud de la señal recibida con respecto a la portadora de referencia. Por lo tanto, se requiere un filtro pasabajas para eliminar las componentes de frecuencia presentes al doble de la frecuencia de la portadora. En el subsistema del demodulador 8QAM se usa el bloque '*Transfer Fcn*' denominado *FPB 8QAM d*, (ver figura 35.b), de manera análoga al utilizado en el modulador. El código para realizar los cálculos del filtro pasabajas del demodulador requerido en todas las M-arias se muestra en la figura 36. El filtro definido es un butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual al 50% de la frecuencia de la portadora.

**Figura 36.** Código del filtro pasabajas para el demodulador M-QAM

```
%Filtro pasabajas, eliminar altas frecuencias.  
Bw1=0.5*fc;  
n1=2;  
f1=Bw1;  
Wn1=2*pi*f1;  
[num1, den1]=butter(n1,Wn1,'s');
```

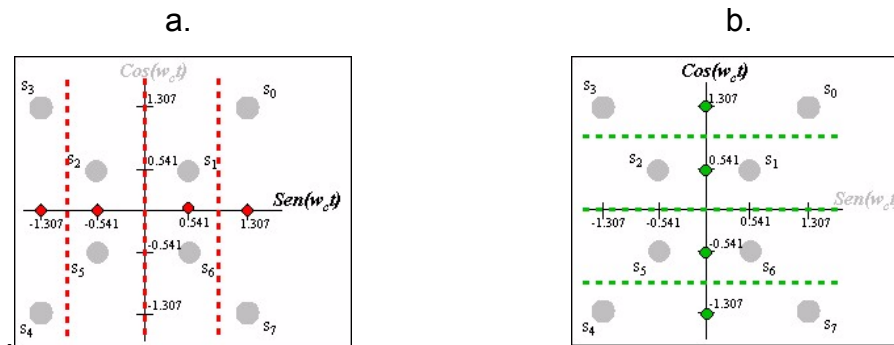
Tomado del archivo .m generado para la modulación QAM

La señal a la salida del filtro en un periodo de bit presenta oscilaciones alrededor de los valores esperados. Y por lo tanto, ésta posee más de cuatro niveles de voltaje. El decisor es el elemento encargado de establecer el nivel de la señal PAM transmitida. Según el diagrama de constelación se espera obtener cuatro posibles niveles en cada canal, por lo cual se definen cuatro regiones de decisión, (ver figura 37). Las fronteras de decisión se definen como el nivel medio entre dos de los niveles esperados consecutivos.

En el subsistema del demodulador 8QAM se usa el bloque denominado *decisor 8QAM*, (ver figura 35.b). El bloque decisor 8QAM, cada tiempo de bit toma una muestra de la señal y la mantiene hasta el próximo tiempo de bit eliminando las oscilaciones de la señal a la salida del filtro. A cada muestra se le resta un vector,  $[-0.541, -1.307; 0.541, 1.307]*A$  (donde  $A$  es la amplitud de la señal atenuada), que contiene el valor de los niveles esperados, obteniendo como resultado un vector con cuatro valores por muestra. Se determinan las magnitudes de cada uno de los valores y se aplican a la entrada del bloque '*maximum/minimum index*' denominado *índice*, el cual determina la posición del valor más pequeño dentro del vector mediante un índice. Este índice determina cual es el valor de los esperados más cercano al valor de la muestra, (ver tabla 10). El bloque decisor 8QAM está disponible

en la librería LabMoDig, creada para el laboratorio. El parámetro de la máscara del bloque es tiempo de muestreo, igual al tiempo de bit de símbolo igual a 3 veces el periodo de bit.

**Figura 37.** Regiones de decisión 8QAM. a). En fase. b). En cuadratura



La señal a la salida del decisor es una PAM con niveles 0, 1, 2, y 3 (los índices). La señal PAM se transforma con el bloque ‘MATLAB Fcn’ denominado *convertidor de nivel 8QAM d(I)*, (ver figura 35.b), para obtener los bits de la señal de datos binaria original. Los parámetros de la máscara del bloque son: función de MATLAB y dimensiones de salida. El primer parámetro es igual a la función de matlab  $\text{de2bi}(u,2)$ , ésta convierte números decimales en binarios ( $u$  bits); el segundo parámetro es  $u$  igual a 2.

Los dos conjuntos de bits de los canales se convierten mediante el bloque *conversor a serie 8QAM*, (ver figura 35.b), en grupos de tres bits en serie para obtener la cadena de datos binaria transmitida. El bloque conversor a serie 8QAM fue creado durante la elaboración del modelo y está disponible en la librería LabMoDig, librería creada para el laboratorio.

**Tabla 10.** Índice para cada valor esperado

Valor esperado	Índice
-0.541	0
-1.307	1
0.541	2
1.307	3

### **5.1.2 Modulación 16QAM.**

La modulación 16QAM es una modulación M-aria con  $M=16$ , por lo tanto existen 16 posibles señales de transmisión que difieren en su fase y amplitud. Los bloques existentes en cada uno de los subsistemas, modulador y demodulador se detallan en las figuras 38.a y 40.a.

#### **Modulador 16QAM.**

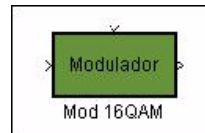
La cadena de bits de entrada, se presenta al modulador como símbolos, en el caso de la modulación 16QAM, los símbolos son el conjunto de las posibles combinaciones de cuatro bits denominados cuatribits. Los cuatribits se asignan a cada símbolo empleando codificación gray, dos símbolos consecutivos sólo difieren en un bit, (ver tabla 11).

Los símbolos se conforman desde la cadena de bits de entrada creando conjuntos de cuatro bits mediante el bloque *conversor a paralelo 16QAM*, (ver figura 38.b). Los parámetros del conversor a paralelo 16QAM son: el ancho del vector de salida igual a 4 y las condiciones iniciales iguales a 0.

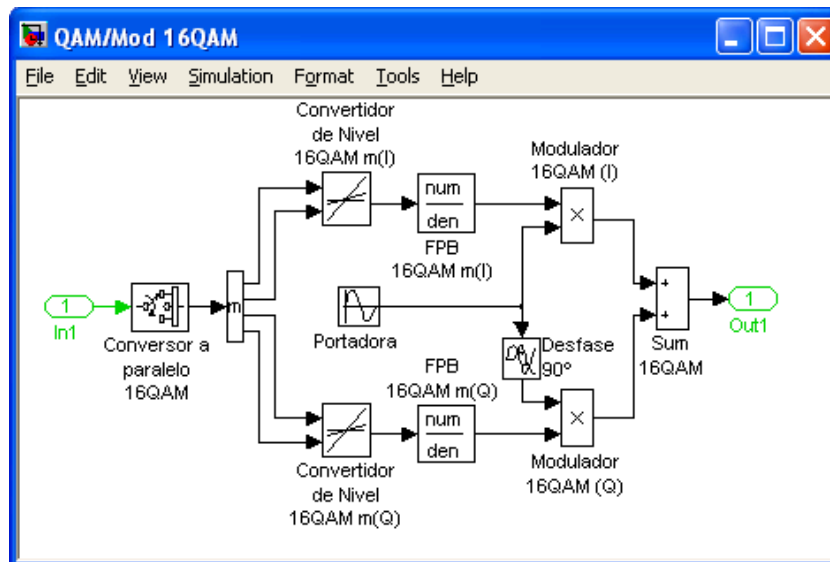
Los bits de cada símbolo se denominan, bit I y, bit I' (en fase), bit Q y, bit Q' (en cuadratura).

**Figura 38.** Modulador 16QAM. a) Bloque. b) Subsistema

a.



b.



Cada símbolo es demultiplexado mediante el bloque '*Demux*', (ver figura 38.b), cuyo parámetro en este caso es igual a 4. La modulación de los símbolos se realiza mediante los dos canales, en fase y en cuadratura. A cada canal se aplican dos bits; al canal en fase el bit I y el bit I', y al canal en cuadratura el bit Q y el bit Q'. El canal en fase y en cuadratura son idénticos, excepto por la portadora.

**Tabla 11.** Tabla de verdad 16QAM

Bits de entrada				Símbolo de entrada	Señal De salida	
I	I'	Q	Q'		Amplitud	Fase
1	0	1	0	S <sub>0</sub>	0.311	+45°
1	0	0	0	S <sub>1</sub>	0.311	+135°
0	0	0	0	S <sub>2</sub>	0.311	-135°
0	0	1	0	S <sub>3</sub>	0.311	-45°
0	0	1	1	S <sub>4</sub>	0.850	-15°
1	0	1	1	S <sub>5</sub>	0.850	+15°
1	1	1	1	S <sub>6</sub>	1.161	+45°
1	1	1	0	S <sub>7</sub>	0.850	+75°
1	1	0	0	S <sub>8</sub>	0.850	+105°
1	1	0	1	S <sub>9</sub>	0.161	+135°
1	0	0	1	S <sub>10</sub>	0.850	+175°
0	0	0	1	S <sub>11</sub>	0.850	-165°
0	1	0	1	S <sub>12</sub>	1.161	-135°
0	1	0	0	S <sub>13</sub>	0.850	-105°
0	1	1	0	S <sub>14</sub>	0.850	-75°
0	1	1	1	S <sub>15</sub>	1.161	-45°

En cada canal se modula la portadora en fase y en magnitud de acuerdo con la polaridad y magnitud de la señal modulante. Cada una de las cadenas de bit a la entrada del canal es unipolar y tiene sólo dos niveles; éstas se combinan para obtener una señal bipolar con cuatro niveles, señal PAM.

El bit I y el bit Q determinan la polaridad y el bit I' y el bit Q' determinan la magnitud, (ver tabla 12). Para obtener la señal PAM, en el subsistema

modulador se usa el *convertidor de nivel 16QAM m(I)*, (ver figura 38.b). Los parámetros configurados son: el parámetro fila como [0 1], niveles de los posibles bits de una de las cadenas de entrada; el parámetro columna como [0 1], niveles de los posibles bits de la otra cadena de bits de entrada; y el parámetro tabla como [-0.22,-0.821;0.22,0.821], magnitud y polaridad asignada a cada combinación de bits,.

**Tabla 12.** Tabla de verdad para cada canal 16QAM

Canal en fase					Canal en cuadratura				
Bit de entrada		Señal PAM	Señal de salida		Bit de entrada		Señal PAM	Señal de Salida	
I	I'		Magnitud	Fase	Q	Q'		Magnitud	Fase
1	1	+0.821	0.821	0°	1	1	+0.821	0.821	90°
1	0	+0.22	0.22	0°	1	0	+0.22	0.22	90°
0	0	-0.22	0.22	180°	0	0	-0.22	0.22	270°
0	1	-0.821	0.821	180°	0	1	-0.821	0.821	270°

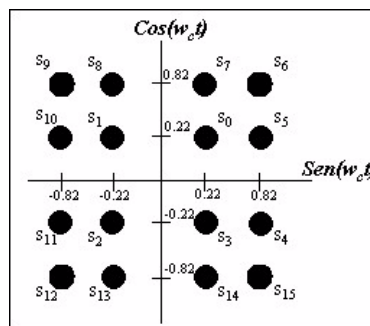
Para limitar el espectro, se usa el bloque *FPB 16QAM m*, (ver figura 38.b). El filtro definido según el código de la figura 33 es un butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual a la tasa de símbolo para 16QAM, igual a  $fb/4$ . La tasa de bit a la entrada de cada canal es un cuarto de la tasa de bit de entrada.

Cada una de los parejas posibles de bits, son distinguidas, una de la otra, emitiendo una portadora senoidal cuya fase y magnitud varía entre dos valores según el canal, (ver tabla 12). El diagrama de constelación de 16QAM en fase, (figura 39.a), muestra la fase y magnitud utilizadas para transmitir cada símbolo a través del canal. La expresión general para la salida del canal en fase es;

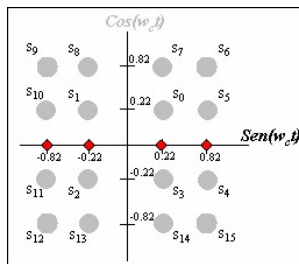
$$|A_i| A \sin(2\pi f_c t + \angle A_i)$$

Con  $A = A_c G$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $G$  es la ganancia del filtro pasabajos,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz, y  $A_i$  es la amplitud de los datos modulantes.

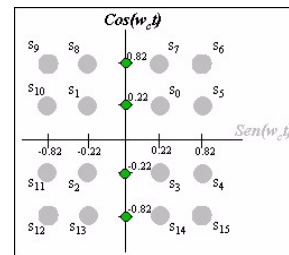
**Figura 39.** Diagrama de constelación 16QAM. a). En fase. b). En cuadratura



a.



b.



El diagrama de constelación de 16QAM en cuadratura, (ver figura 39.b), muestra las posiciones de los bits a la entrada del canal en fase relacionadas con las fases y magnitudes de la portadora. La expresión general para la salida del canal en cuadratura es:

$$|A_i| A \cos(2\pi f_c t + \angle A_i)$$

Con  $A = A_c G$ , donde  $A_c$  es la amplitud de la portadora,  $G$  es la ganancia del filtro pasabajos,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora en Hertz, y  $A_i$  es la amplitud de los datos modulantes.

Las posibles señales a la salida del multiplicador del canal en fase, son:

$$\pm A_1 A \operatorname{sen}(2\pi f_c t) \quad \text{y} \quad \pm A_0 A \operatorname{sen}(2\pi f_c t)$$

Y las posibles señales a la salida del multiplicador del canal en cuadratura, son:

$$\pm A_1 A \cos(2\pi f_c t) \quad \text{y} \quad \pm A_0 A \cos(2\pi f_c t)$$

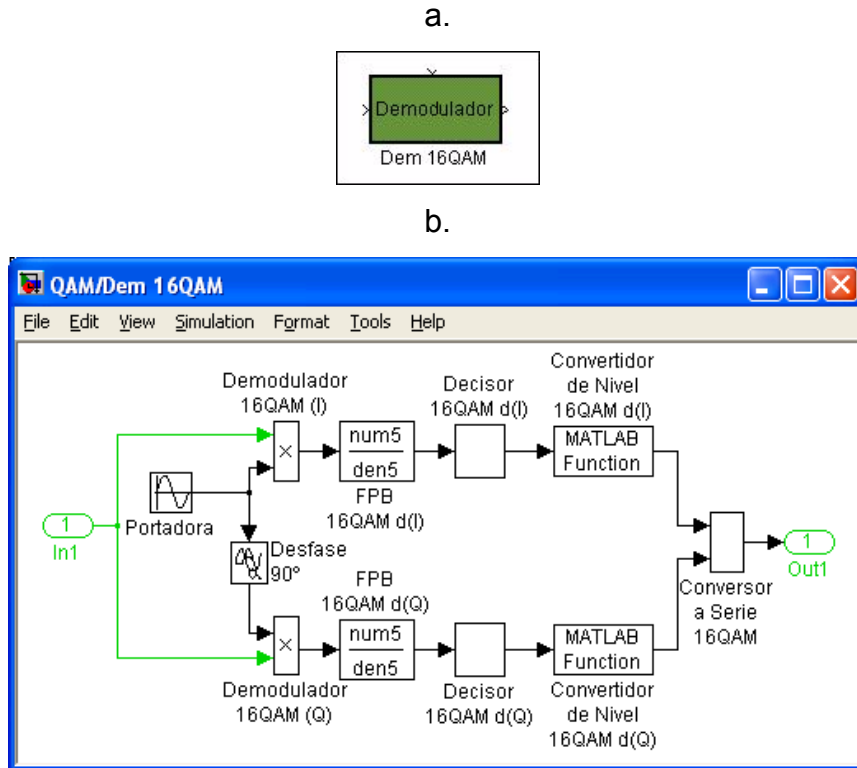
La salida del sumador es la señal modulada cuya fase y amplitud corresponde con el diagrama de constelación de 16QAM, (ver figura 39) y con los valores de fase y amplitud correspondientes a cada símbolo, (ver tabla 12).

### **Demodulador 16QAM.**

En el sistema 16QAM, la demodulación de los símbolos se realiza de manera similar a la modulación, mediante dos canales, en fase y en cuadratura, uno para cada bit. Por lo tanto, la señal modulada es aplicada a la entrada de cada uno de los canales.

La información digital transmitida se extrae identificando cada uno de los posibles símbolos a partir de la fase y amplitud de la señal modulada, (ver tabla 12). La fase y la amplitud se determina multiplicando la señal modulada con la portadora de referencia, mediante el bloque *demodulador 16QAM*, (ver figura 40.b).

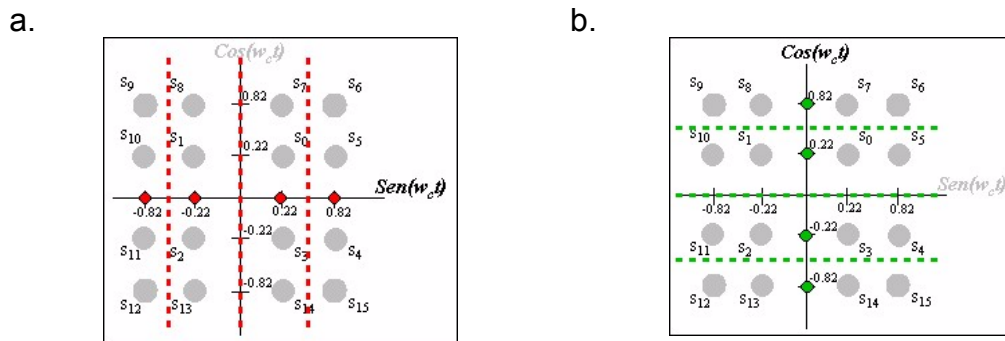
**Figura 40.** Demodulador 16QAM. a) Bloque. b) Subsistema



En la señal a la salida del multiplicador se identifican tres términos, un término a bajas frecuencias, y dos al doble de la frecuencia de la señal portadora. El primer término determina la relación de la fase y la amplitud de la señal recibida con respecto a la portadora de referencia. Por lo tanto, se usa el filtro pasabajos *FPB 16QAM d*, (ver figura 40.b), para eliminar las componentes de frecuencia presentes al doble de la frecuencia de la portadora. El filtro según el código de la figura 36 es un butterworth digital de orden 2 con una frecuencia de corte igual al 50% de la frecuencia de la portadora.

Según el diagrama de constelación se espera obtener cuatro posibles niveles en cada canal, por lo cual se definen cuatro regiones de decisión, (ver figura 41). En el bloque decisor 16QAM, el vector que se resta a cada muestra es  $[-0.22, -0.821; 0.22, 0.821] * A$  (donde A es la amplitud de la señal atenuada). El bloque decisor 16QAM está disponible en la librería LabMoDig, creada para el laboratorio. El parámetro de la máscara del bloque es tiempo de muestreo, igual al tiempo de bit de símbolo, (4 veces el periodo de bit).

**Figura 41.** Regiones de decisión 16QAM. a). En fase. b). En cuadratura



El bloque *conversor a serie 16QAM*, (ver figura 40.b), convierte los bits en paralelo en grupos de cuatro bits en serie para obtener la cadena de datos binaria transmitida.

## CONCLUSIONES

- El conjunto de prácticas de laboratorio para la simulación de la modulación digital pasa banda conformado por: la modulación por variación de frecuencia (FSK), la modulación por variación de fase (PSK), la modulación de amplitud en cuadratura (QAM), y el paralelo entre PSK y QAM; abarca las modulaciones base de las variantes de modulación digital usadas en la actualidad.
- Las prácticas están enfocadas para que, teniendo una orientación general acerca de Simulink, el estudiante esté en capacidad para desarrollarla de manera autónoma, permitiéndole la realización de éstas independientemente de la presencia de un profesor y de un horario preestablecido, recurriendo al profesor para aclarar las dudas emergentes durante su desarrollo.
- El conjunto de prácticas es apropiado para ser utilizado en un laboratorio de una asignatura a fin. El tiempo requerido para el desarrollo de cada una de las prácticas depende del número de secciones del procedimiento. Dedicando dos horas semanales al laboratorio, las prácticas se desarrollarían aproximadamente en un promedio de 10 semanas.

- La librería LabMoDig compuesta por los modelos de modulación digital pasa banda FSK, PSK y QAM creados, es una herramienta complementaria a la **toolbox** de comunicaciones para el análisis paso a paso del proceso involucrado en las modulaciones pasa banda, actividad difícil de realizar con los bloques ya existentes en Matlab debido a su estructura basada en funciones S (herramienta de programación para Simulink propia de Matlab).
- Las librerías y los bloques creados para la simulación de etapas específicas dentro del sistema de modulación digital pasa banda muestran algunas de las posibilidades que ofrece Simulink para la creación de determinados elementos comunes dentro de un sistema en una área específica.
- Los modelos elaborados tienen una estructura abierta para su estudio por parte tanto de los docentes como de los estudiantes posibilitando su reestructuración para realizar mejoras, modificaciones o nuevos modelos (aplicaciones específicas) fortaleciendo el manejo de esta herramienta (Simulink) para el modelado de sistemas de comunicaciones.
- El anexo de Simulink recopila la información general de su manejo y detalla los elementos empleados más frecuentemente en el área de comunicaciones convirtiéndose en un libro de referencia importante tanto para las prácticas de laboratorio como para aquellas personas interesadas en conocer esta herramienta.
- Las herramientas generales de MATLAB como son: Simulink y GUIDE pueden combinarse para obtener un entorno agradable y potente en la implementación de sistemas.

## RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta la próxima reforma al pensum se propone la utilización de los resultados de este proyecto como complemento práctico para la materia Comunicaciones Digitales. Los recursos necesarios para la implementación de este laboratorio serían: un auxiliar con conocimientos en Matlab y Simulink y una sala de computo (recurso disponible actualmente en la escuela, salón 207).
- Se propone la elaboración de una práctica inicial cuya temática sea 'introducción a Simulink', debido a que el conjunto de prácticas de laboratorio está basado en dicha herramienta y su desconocimiento puede producir demoras en el desarrollo de las mismas.
- Se propone incentivar el modelado de sistemas de comunicaciones más avanzados mediante Simulink para la profundización de los conceptos implicados en su estructura interna empleando una metodología análoga a la desarrollada en este proyecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANDERSON, John B. "Digital Transmission Engineering". Prentice Hall. 1999.

[2] COUCH II, Leon W. "Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicos". Quinta edición. Prentice Hall. México, 1998.

[3] HAYKYN, Simon. "Sistemas de comunicación". Editorial Limusa Wiley. México, 2002.

[4] RODEN, Martín S. "Analog and Digital Communications Systems". Fourth edition. Prentice Hall. 1996.

[5] SKLAR, Bernard. "Digital Communications Fundamentals and Applications". Prentice Hall. 1988.

[6] TOMASI, Wayne. "Sistemas de Comunicaciones Digitales Electrónicas". Cuarta edición. Editorial Pearson educación. México, 2003.

<http://www.analog.com/>

<http://www.ifent.org/electronica.htm>

<http://www.linxtechnologies.com>

<http://www.maxim.com>

<http://www.maximsolutions.com/index.htm>

<http://www.math.mcgill.ca/sysdocs/matlabr12/help/toolbox/commblocks/tutor218.html>

<http://www.mathworks.com/>

<http://www.microchip.com/1010/index.htm>

<http://www.msi.vxu.se/index.html>

<http://www.oki.com/>

<http://www.sci-worx.com/>

<http://www.stel.com/>

<http://www.unet.edu.ve/>

<http://web.usc.es/~elusive/comu.html>

<http://www.uva.es/>

<http://www.uvigo.es/indice/index.gl.htm>

<http://viento.us.es/~sergio/ASIGNATURAS/Ltx/>

**ANEXO. LABORATORIO DE COMUNICACIONES DIGITALES**

# LABORATORIO DE COMUNICACIONES DIGITALES

---

El presente laboratorio de comunicaciones digitales aborda el tema de la modulación digital pasabanda. Cada práctica planteada tiene como objetivo principal profundizar los conceptos involucrados en el proceso de la modulación mediante el análisis detallado de cada una de las etapas que lo conforman.

Las prácticas abordan tres tipos de modulación digital. La modulación por variación de frecuencia (FSK), la modulación por variación de fase (PSK) y la modulación de amplitud en cuadratura (QAM). Éstos tipos de modulación son empleados en la actualidad en diversas aplicaciones y son base de otros tipos de modulación como GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying), FFSK (Fast Frequency Shift Keying), DPSK (Differential Phase Shift Keying) y MSK (Minimum Shift Keying).

Una herramienta esencial para el desarrollo de las prácticas es el modelo de cada tipo de modulación creado en Simulink. El procedimiento de las prácticas guían paso a paso al estudiante en la realización del análisis de los modelos planteándole actividades específicas o interrogantes que conllevan a otras actividades. El análisis del modelo no esta sujeto a seguir el procedimiento descrito, pueden variarse las situaciones, los parámetros y las actividades propuestas.

El tiempo para la realización de las prácticas del laboratorio es de aproximadamente veinte (20) horas. El procedimiento está conformado por varias secciones, cuyo número varía según el tipo de modulación. En las secciones de análisis general, modulador y demodulador se promedia un tiempo de dos (2) horas; en la sección complementaria cuyas actividades son opcionales se promedia un tiempo de dos (2) horas, el cual, variará de acuerdo a las actividades que cada estudiante desarrolle; en la sección análisis de la M-aria se promedia un tiempo de una hora y media; en la sección comparación de M-arias se promedia un tiempo de una hora y media. Según el cálculo anterior y las secciones que contiene cada práctica se tiene que para la práctica de modulación por variación de frecuencia se invierte aproximadamente cuatro (4) horas; para la práctica de modulación por variación de fase se invierte aproximadamente siete (7) horas, al igual para QAM; para la práctica paralelo entre PSK y QAM se invierte aproximadamente dos (2) horas. En total el laboratorio conformado por estas prácticas tendrá una duración de 20 horas.

Los recursos necesarios para la implementación de éste laboratorio de comunicaciones digitales son: una sala de computo con disposición de un computador por cada dos alumnos, el software Matlab-Simulink, la librería LabMoDig y un auxiliar con conocimientos de Matlab y Simulink.

# LABORATORIO DE COMUNICACIONES DIGITALES

PRÁCTICA 1

## Modulación por desplazamiento de frecuencia FSK

INTEGRANTES

Nombre	Código	Grupo	Fecha

OBJETIVOS

- Identificar las características de la modulación FSK.
- Reconocer la función de cada una de las etapas del modulador y demodulador y su importancia en el proceso correspondiente.
- Identificar el efecto del canal de transmisión en la recuperación de los datos y determinar la sensibilidad de la información contenida en la señal modulada al ruido de canal.
- Determinar la eficiencia del sistema de transmisión de datos al utilizar modulación digital FSK.
- Analizar como los parámetros generales influyen en el comportamiento de cada etapa del sistema de modulación.

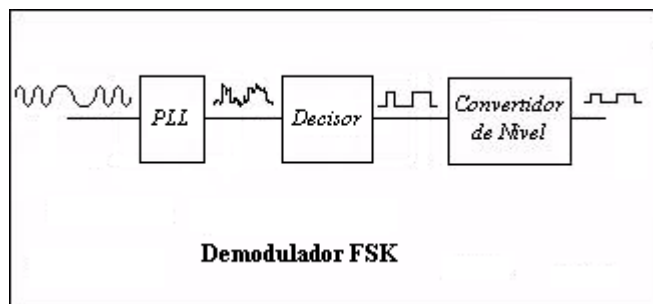
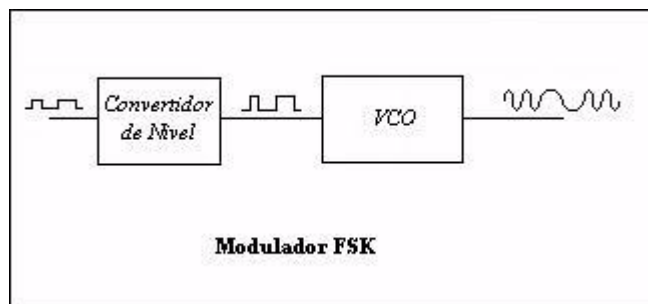
MARCO TEÓRICO

**Introducción**

La modulación por variación de frecuencia – FSK– es un esquema de modulación de envolvente constante, que hace al mensaje menos susceptible a anomalías de fase y amplitud. FSK es usado en transmisión asíncrona de baja velocidad desde 300 a 1800 bps.

Diagrama de bloques

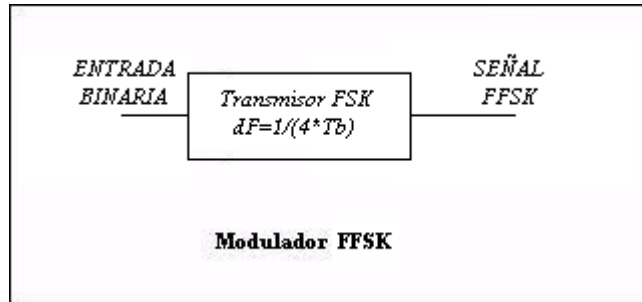
FSK



### Variantes

La modulación FSK es la base de otros tipos de modulación digital como FFSK. A continuación se presenta el diagrama de bloques de este sistema de modulación.

### FFSK



### La Modulación FSK a nivel comercial

Moduladores en circuitos integrados (CI) que hacen uso de la modulación FSK están disponibles en el mercado, hay transmisores, receptores y transceivers (transmisor y receptor en un mismo chip) , algunos de ellos son:

CI	Función	Empresa
RFRXD0420/0920	Receptor	Microchip
RFHCS362F	Transmisor	Microchip
CC1070	Transmisor	Chipcon
CC1020	Transceiver	Chipcon
CC1000	Transceiver	Chipcon

Las aplicaciones de este tipo de modulación, unas implementadas en CI y otras que emplean los CI mencionados anteriormente son muchas, entre ellas se tiene:

- Compensación de temperatura por método indirecto AN027 CC1020
- Sistema de entrada sin llaves remota (RKE) AN020
- Diseño de referencia de un modem RF AN015 CC1000
- Modem RF AN025 CC1020
- Amplificador de potencia con Bluetooth GFSK. AN579 MAX2240
- Modem FSK a 1200 bps MSM6927/6947

### Trabajo Previo

Revisar los conceptos teóricos de la modulación FSK. Conocer el funcionamiento del VCO (Voltaje Controler Oscilator - Oscilador Controlado por Voltaje) como Modulador FSK y el funcionamiento del PLL (Phase Lock Loop - Lazo de Amarre por Fase) como demodulador FSK.

Además familiarizarse con las herramientas de análisis como son el diagrama de ojo, el diagrama de constelaciones, la grafica de dispersión y, la tasa de error de bit; y con el tipo de información que proveen. Los bloques de Simulink de estas herramientas y de otras herramientas como el osciloscopio del espectro requieren formatos especificos de datos y deben ser configurados apropiadamente de acuerdo a las características del sistema. Consulte las ayudas de estos bloques.

Según la situación planteada a continuación en el **procedimiento**, desarrolle teóricamente el proceso de modulación y demodulación digital FSK y grafique la señal de entrada, la modulada y la demodulada para una cadena de ocho bits.

## PROCEDIMIENTO

Un terminal de computo requiere enviar información a otro conectado a él mediante una línea telefónica, los datos pueden ser generados con una amplitud de 1 a 5 voltios y una tasa de bit de 600 a 1200 bps con señalización NRZ unipolar. La cadena de datos digitales a transmitir por medio de la red telefónica requiere ser modulada debido a la naturaleza análoga de la red. La red telefónica desarrollada para transmisión de voz esta diseñada para pasar frecuencias en el rango de 300 a 3400Hz. Por simplicidad y economía muchos MODEM emplean la modulación FSK. En la presente práctica se simulará este proceso mediante un modelo en Simulink de la modulación FSK.

---

### Asignación de Parámetros de Entrada

1. Desde Matlab ejecute el *script* denominado **guia\_fsk** para desplegar la interfaz gráfica de FSK. Los siguientes pasos de esta sección se realizan en la interfaz gráfica.
2. Mediante el botón 'Abrir FSK.mdl', despliegue el modelo en Simulink, el cual contiene el diagrama de bloques de la modulación FSK.
3. Seleccione el tipo de fuente de datos y especifique una frecuencia de bit ( $F_b$ ) y una amplitud de bit ( $A_b$ ). Según la situación planteada la información puede ser una cadena de datos aleatoria, con una amplitud entre 1 y 5 voltios y una frecuencia entre 600 y 1200 bps (elijá un valor de esos rangos).
4. Determinadas las características de la señal modulante, defina los parámetros de la portadora (La red telefónica deja pasar frecuencias en el rango de 300 a 3400Hz): frecuencia central ( $F_c$ ), desviación de frecuencia ( $dF$ ) y amplitud de portadora ( $A_c$ ). Recuerde, el delta de frecuencia y la menor de las frecuencias portadoras debe ser mayor que la frecuencia de bit.
5. Definidos los parámetros anteriores, asígnelos a los bloques correspondientes en el modelo mediante el botón 'Entrar Datos'.
6. En el sistema de modulación se diseñan etapas de filtrado, ya sea para mejorar la efectividad de ancho de banda o rechazar componentes de frecuencia no deseadas. En la etapa de demodulación, dentro del PLL para eliminar componentes de alta frecuencia, se diseñó un filtro pasa bajas butterworth de orden 2 con una frecuencia de corte igual a  $(f_m - f_s)$ , siendo  $f_m$ , frecuencia de marca y  $f_s$ , frecuencia de espacio. Oprima el botón 'Determinar Filtros' para calcular y asignar los parámetros de los filtros.
7. El modelo está listo. Inicie la simulación mediante el botón 'Iniciar Simulación'. Ventanas adicionales a la interfaz y al modelo *fsk.mdl* se despliegan, minimícelas hasta cuando requiera la información contenida en ellas.

---

### Análisis General del Sistema

De aquí en adelante el procedimiento se realiza en el modelo *fsk.mdl*. En el modelo están disponibles herramientas de medición como son el osciloscopio de tiempo, osciloscopio de espectro, medidor de tasa de error de bit y el diagrama de ojo y de dispersión. Puede adicionar más de estos elementos donde crea conveniente.

8. Comprobar que la frecuencia de marca (aquella que representa los 1 lógicos de la señal de entrada) y de espacio (aquella que representa los 0 lógicos de la señal de entrada) corresponden con las frecuencias asignadas. ¿Son iguales la señal de entrada y la demodulada?. En el osciloscopio General se visualizan tres señales, la cadena de datos de entrada, la señal FSK modulada y la cadena de datos demodulada.
9. ¿Cuántos bits difieren entre la cadena de datos original y la demodulada?. En el pantalla del visualizador BER, se ven tres valores, el primero corresponde al porcentaje de error, el segundo al número de bits erróneos y el último a la cantidad de bits comparados.
10. Un diagrama de ojo y de dispersión es conectado a la salida del filtro; esta herramienta despliega una nueva ventana con dos divisiones, la primera corresponde al diagrama de ojo y la segunda a la gráfica de dispersión. Analice el diagrama de ojo y detalle la información contenida en este. Describa y argumente la dispersión presente en los bits recuperados. Defina una frontera para las regiones de decisión apropiada para una buena demodulación.

11. ¿Cuál es el ancho de banda de la señal de entrada y de la portadora modulada?.

---

### **Análisis del Modulador**

En el modulador es el VCO el encargado de realizar el proceso de asignación de frecuencias a los bits de entrada.

12. Cada uno de los parámetros del VCO definen características de la portadora central y la desviación de la frecuencia según los niveles dc en su entrada. Analice cada uno de los parámetros y nombre las características que determinan.

---

### **Análisis del Demodulador**

La detección se realiza a través de un PLL que proporciona un nivel dc de acuerdo a la diferencia entre la frecuencia central y la frecuencia de la señal modulada. Verifique el comportamiento del PLL como demodulador FSK.

13. Acceda a la estructura interna del PLL e identifique las etapas especificadas por los parámetros. Describa las señales en cada etapa y compare con las señales esperadas.

14. El VCO es parte fundamental en el proceso de demodulación. Analice cada uno de los parámetros y describa la relevancia que tienen dentro de este proceso.

15. El filtro extrae la señal dc (diferencia de frecuencia). Revise el espectro de frecuencias de la señal a la entrada del filtro. ¿Cuáles factores determinan la frecuencia de corte de este filtro?. Observe la respuesta frecuencial del filtro. ¿Cuál es la influencia del ancho de la banda entre la banda de frecuencias de paso y la de frecuencias de corte en la obtención de la señal dc de interés?

16. La señal a la salida del PLL tiene una naturaleza análoga. Describa la función del decisor y la importancia de la elección de la frontera entre las regiones de decisión en la demodulación.

---

### **Análisis Complementario**

Según las características de la línea telefónica, ¿cuál es la mayor tasa de bits a la que la terminal de computo puede generar los datos?. Verifique experimentalmente su razonamiento.

Realice varias simulaciones del modelo variando las características determinantes del sistema. Utilice valores extremos en los parámetros de entrada (Sugerencias:  $F_b > dF$ ,  $F_b > F_s$ , señal de datos cuadrada). Diseñe los filtros con diferente frecuencia de corte y con diferente orden, (Nota: Desde la barra de herramientas de Matlab abra el archivo `guia_fsk.m`. A partir de la línea 145 de este archivo se define el código del filtro, realice los cambios concernientes). Adicione el modelado del canal (haciendo doble clic sobre el bloque `LabMoDig` se despliega la librería que contiene el bloque `Modelo del Canal`).

Para cada una de las modificaciones realizadas siga el procedimiento de la sección *Análisis general del sistema*. Observe las señales dentro del modulador y demodulador, revise el espectro de frecuencias de la señal a la entrada del filtro, observe el comportamiento en frecuencias del filtro y justifique los resultados obtenidos.

Para la visualización de la señal en cada etapa del proceso de modulación y demodulación, esta disponible el floating scope, este contiene la información de todas las señales presentes en el sistema, seleccione las señales de interés.

### **PREGUNTAS CLAVES**

- ¿Cuál es la mínima distancia requerida entre frecuencias de marca y espacio para la modulación FSK?
- ¿Qué determina la mínima distancia entre las frecuencias de marca y espacio?
- ¿Cuál es la causa del retardo presente en la señal demodulada?
- ¿Por qué se usan filtros?
- ¿Cómo afecta la respuesta en frecuencia del filtro la función que desempeña dentro del proceso?
- ¿Cuál es el máximo ancho de banda requerido para la transmisión de una señal modulada FSK?
- ¿Se aprovecha el espectro al usar este tipo de modulación?

- ¿La potencia de la señal modulada FSK depende sólo de las potencias de portadora?
- ¿Qué tan sensible es a la presencia de ruido?
- ¿Cuáles son los factores por los cuales la velocidad de transmisión es limitada?
- ¿Cuál es la relación entre la tasa de bits por segundo y la tasa de baudios para un sistema de modulación FSK?

## **CONCLUSIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

COUCH II, Leon W. "Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicos". Quinta edición. Prentice Hall. México, 1998.

DUARTE, Dili. URIBE Oscar. "Manual de Simulink". 2004

TOMASI, Wayne. "Sistemas de Comunicaciones Digitales Electrónicas". Cuarta edición. Editorial Pearson educación. México, 2003.

<http://www.microchip.com/1010/index.htm>

<http://www.analog.com/>

# LABORATORIO DE COMUNICACIONES DIGITALES

.....

## PRÁCTICA 2

# Modulación por desplazamiento de fase PSK

### INTEGRANTES

Nombre	Código	Grupo	Fecha

### OBJETIVOS

- Identificar las características de la modulación PSK.
- Reconocer la función de cada una de las etapas del modulador y demodulador y su importancia en el proceso correspondiente.
- Identificar el efecto del canal de transmisión en la recuperación de los datos y determinar la sensibilidad de la información contenida en la señal modulada al ruido de canal.
- Determinar la eficiencia del sistema de transmisión de datos al utilizar modulación digital M-PSK.
- Analizar como los parámetros generales influyen en el comportamiento de cada etapa del sistema de modulación.
- Identificar las propiedades de las señales utilizadas como portadoras en los tipos de modulación M-aria con  $M > 2$ .

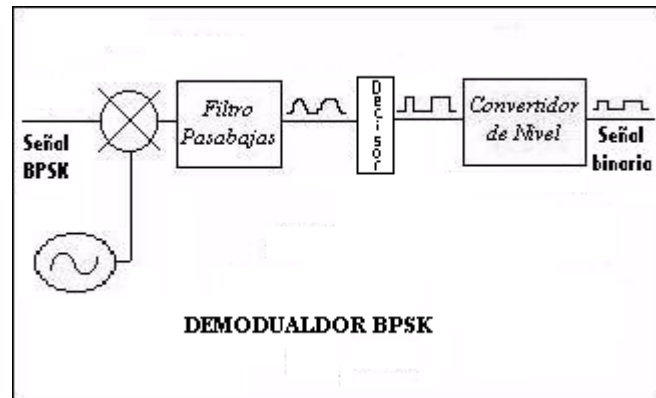
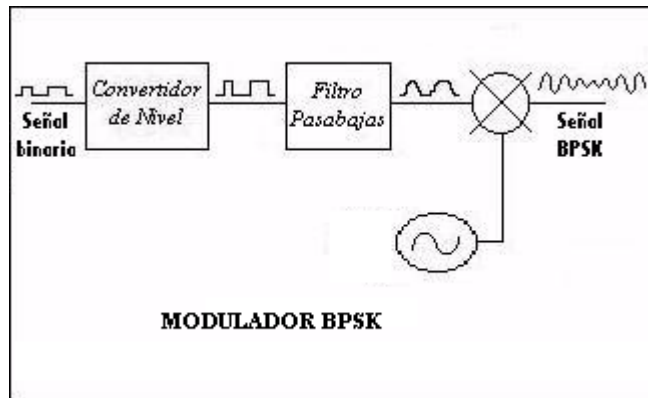
### MARCO TEÓRICO

#### Introducción

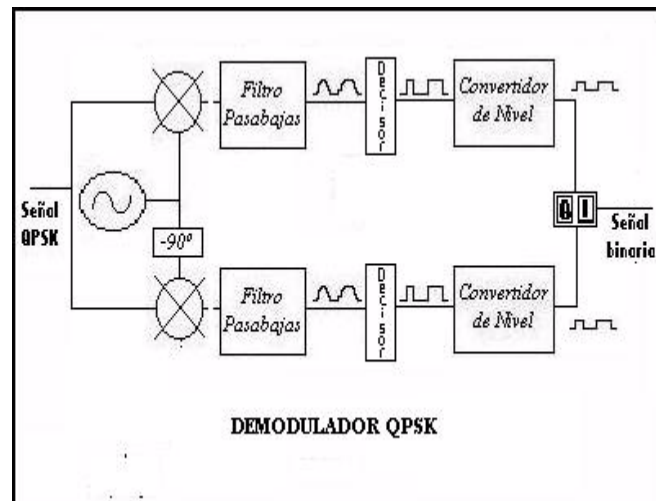
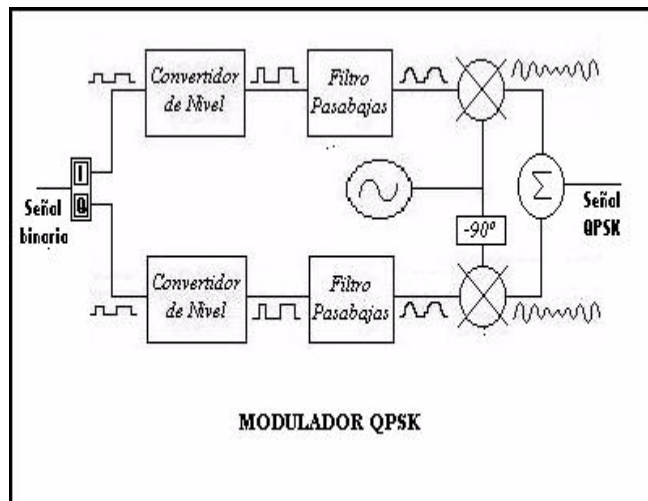
La modulación en frecuencia no es el esquema más efectivo para modular datos digitales por su pobre eficiencia de ancho de banda, la modulación en fase (PSK), ofrece una buena alternativa, en presencia de ruido blanco en el canal PSK logra la misma tasa de bits erróneos que FSK con menos relación señal a ruido. M-PSK no es un esquema de modulación de envolvente constante, y cualquier camino a través del cual una señal M-PSK viaje debe tener un grado de linealidad para evitar crear distorsión. La modulación QPSK solo se usa en sistemas de baja y media capacidad (hasta 34 Mbps). Se usan variantes de PSK para aumentar la velocidad de transmisión manteniendo limitada la velocidad de modulación (y por tanto el ancho de banda necesario). En la práctica es muy difícil comparar la fase con una señal de referencia invariable, por lo que se usa la versión llamada PSK diferencial.

**Diagramas de bloques**

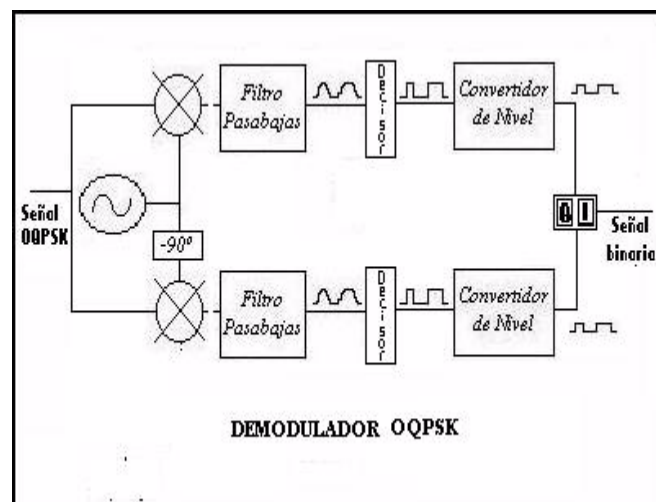
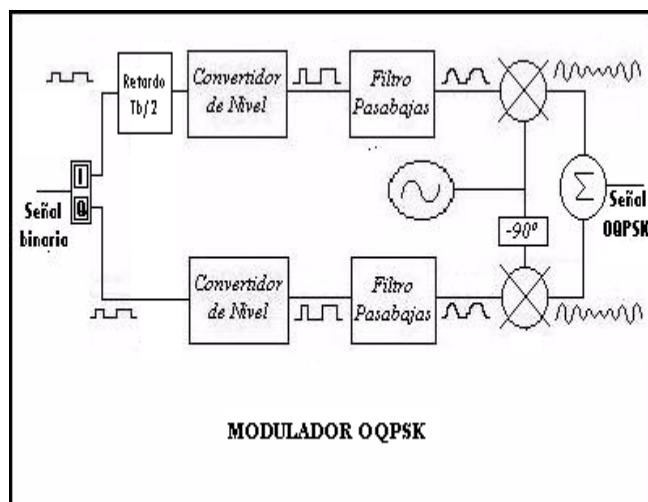
**BPSK**



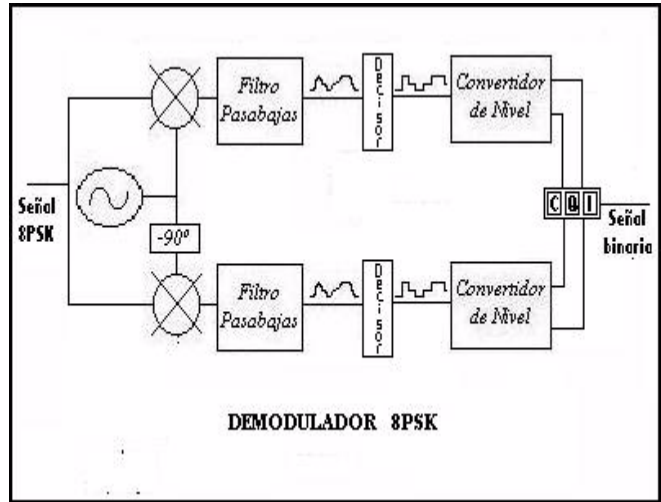
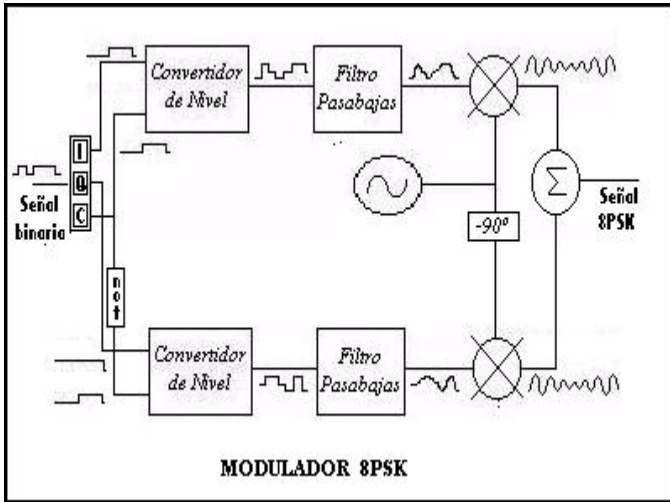
**QPSK**



**OQPSK**



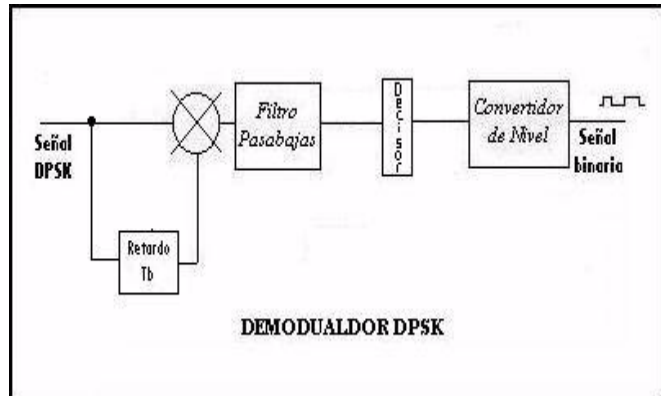
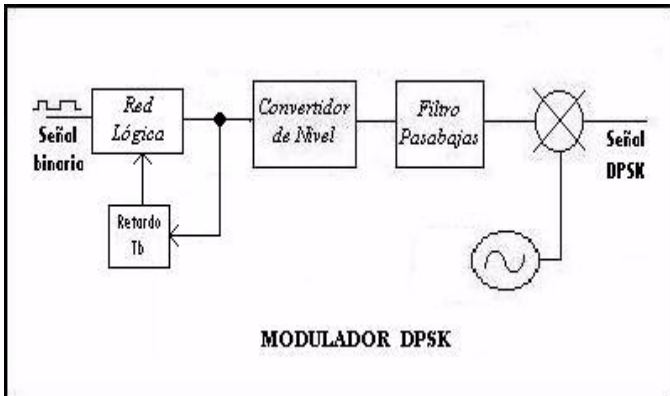
**8PSK**



**Variantes**

La modulación PSK es la base de otros tipos de modulación digital como son DPSK. A continuación se presenta el diagrama de bloques de este sistema de modulación.

**DPSK**



**La Modulación PSK a nivel comercial**

Los circuitos integrados que manejan modulación PSK son varios, algunos de los disponibles en el mercado son:

CI	Función	Empresa
AD6021	Transmit modulator	Analog Devices
MAX2450	Modulador/Demodulador	Maxim
MAX2900	Transmisor	Maxim

Las aplicaciones donde se implementa este tipo de modulación son:

- CI de RF de conversión directa para GSM/GPRS/EDGE
  - Modem p/4 QPSK
  - Modulación QPSK con el CI MAX2450
  - Estación base EDGE PCS1900
  - CI de aplicación específica para CM y CMTS
- MSM7582B  
AN686  
STEL2176

Revisar los conceptos teóricos de la modulación PSK.

Recordar el uso de las herramientas de análisis (el diagrama de ojo, el diagrama de constelaciones, la grafica de dispersión y, la tasa de error de bit) y el tipo de información que proveen. Los bloques de Simulink de estas herramientas y de otras herramientas como el osciloscopio del espectro requieren formatos específicos de datos y deben ser configurados apropiadamente de acuerdo a las características del sistema.

Según la situación planteada en la sección I y II del **procedimiento**, desarrolle teóricamente el proceso de modulación y demodulación digital BPSK, QPSK, OQPSK y 8PSK. Grafique la señal de entrada, la modulada y la demodulada para una cadena de ocho bits aleatorios.

## PROCEDIMIENTO

**I.** Retomando la situación planteada en la práctica anterior y adicionando nuevos requerimientos para el sistema recordemos que: un terminal de computo requiere enviar información a otro conectado a él mediante una línea telefónica. La cadena de datos digitales a transmitir por medio de la red telefónica requiere ser modulada debido a la naturaleza análoga de la red. La red telefónica desarrollada para transmisión de voz esta diseñada para pasar frecuencias en el rango de 300 a 3400Hz. Por simplicidad y economía muchos MODEM emplean la modulación FSK. Sin embargo la terminal está generando datos a una tasa de bit de 1800 a 3600 bps con señalización NRZ unipolar, es aquí donde empieza a jugar un papel importante el compromiso entre economía y desempeño, siendo requerido el uso de un MODEM basado en modulación PSK, el MODEM por defecto está configurado para trabajar con Modulación BPSK. En la presente práctica simularemos este proceso mediante un modelo en Simulink de la modulación PSK.

## Asignación de Parámetros de Entrada

---

17. Desde Matlab ejecute el *script* denominado **guia\_psk** para desplegar la interfaz gráfica de PSK. Los siguientes pasos de esta sección se realizan en la interfaz gráfica.
18. Mediante el botón 'Abrir PSK.mdl', despliegue el modelo en Simulink, en el cual se observa el sistema de transmisión con los moduladores y demoduladores de los diferentes tipos de modulación M-PSK disponibles.
19. Seleccione el tipo de fuente de datos y especifique una frecuencia de bit (Fb). Según la situación planteada la información puede ser una cadena de datos aleatoria con una frecuencia entre 1800 y 3600 bps (elija un valor de ese rango). La amplitud de la señal de entrada debe ser igual a 1 con señalización NRZ por requerimiento del sistema de simulación. NOTA: si desea modificar la amplitud de la señal de entrada analice los efectos y cambios necesarios para mantener la funcionalidad del sistema.
20. Determinada las características de la señal modulante, defina los parámetros de la portadora (La red telefónica deja pasar frecuencias en el rango de 300 a 3400Hz), amplitud (Ac) y frecuencia (Fc).
21. Definidos los parámetros anteriores, asígnelos a los bloques correspondientes en el modelo mediante el botón 'Entrar Datos'.
22. Según la situación planteada elija en el menú pop-up la M-aria de interés.
23. En el sistema de modulación se diseñan etapas de filtrado, ya sea para mejorar la efectividad de ancho de banda o rechazar componentes de frecuencia no deseadas. En el modulador debido a los requerimientos de ancho de banda de la señal digital tan elevados se requiere un filtro pasa bajas. El filtro diseñado es un butterworth con una frecuencia de corte de  $2 \cdot F_b$  y de orden 2. En la etapa de demodulación para eliminar componentes de frecuencia diferentes a la frecuencia de los datos, se diseñó un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte del 50% de la frecuencia central Fc y un orden 2. Oprima el botón 'Determinar Filtros' para calcular y asignar los parámetros de los filtros.
24. El modelo está listo para iniciar la simulación. Ventanas adicionales a la interfaz y al modelo psk.mdl se despliegan, minimícelas hasta cuando requiera la información contenida en ellas.

### **Análisis General del Subsistema BPSK**

---

De aquí en adelante el procedimiento se realiza en el modelo psk.mdl. En el modelo están disponibles las herramientas de medición, el osciloscopio, y el medidor de tasa de error de bit (BER). Puede adicionar estos elementos extra donde crea conveniente.

25. ¿Son iguales la señal de entrada y la demodulada?. En el osciloscopio General se visualizan tres señales, la cadena de datos de entrada, la señal PSK modulada y la cadena de datos demodulada.
26. ¿Cuántos bits difieren entre la cadena de datos original y la demodulada?. En el pantalla del visualizador BER, se ven tres valores, el primero corresponde al porcentaje de error, el segundo al número de bits erróneos y el último a la cantidad de bits comparados.
27. Un diagrama de ojo y de dispersión es conectado a la salida del filtro; esta herramienta despliega una nueva ventana con dos divisiones, la primera corresponde al diagrama de ojo y la segunda a la gráfica de dispersión. Analice el diagrama de ojo y detalle la información contenida en este. Describa y argumente la dispersión presente en los bits recuperados. Defina una frontera para las regiones de decisión apropiada para una buena demodulación.
28. ¿Cuál es el ancho de banda de la señal de entrada y de la portadora modulada?.

### **Análisis del Modulador BPSK**

---

29. ¿Cuáles son los niveles de la señal a la salida del convertidor de nivel?. Confirme realizando las mediciones necesarias. Haga una tabla con los niveles antes y después del convertidor de nivel para cada posible bit.
30. Defina la función específica del filtro. Observe la curva característica del filtro. Revise el espectro de la señal antes y después del filtro.
31. La modulación se efectúa mediante el producto de la señal de entrada con la señal portadora, ¿Cómo influyen en la modulación los niveles de la señal de entrada?. Revise las componentes espectrales resultantes. Justifique los resultados obtenidos. Opine, qué sucedería si la señal de entrada al modulador de producto se representa con señalización NRZ unipolar.

### **Análisis del Demodulador BPSK**

---

32. La demodulación se obtiene mediante la multiplicación de la señal modulada por la misma portadora. ¿Cuáles son las frecuencias generadas al realizar este proceso?. ¿Cuáles componentes frecuenciales contienen información de la señal binaria?
33. ¿Qué función cumple el filtro en el demodulador?. Observe la curva característica del filtro. Revise el espectro de la señal a la salida del filtro y justifique los resultados.
34. ¿La señal a la salida del filtro es la señal binaria transmitida?. Defina la función del decisor. ¿Cuáles regiones de decisión se establecen según el decisor?, ¿Qué influencia tienen estas regiones en la tasa de error?

### **Análisis Complementario para BPSK**

---

Según las características de la línea telefónica y de la modulación BPSK, ¿cuál es la mayor tasa de bits a la que la terminal de computo puede generar los datos?. Verifique experimentalmente su razonamiento.

Realice varias simulaciones del modelo variando las características determinantes del sistema. Utilice valores extremos en los parámetros de entrada (Sugerencias:  $F_b > dF$ ,  $F_b > F_s$ , señal de datos cuadrada). Diseñe los filtros con diferente frecuencia de corte y con diferente orden, (Nota: Desde la barra de herramientas de Matlab abra el archivo guia\_psk.m. A partir de la línea XX de este archivo se define el código del filtro, realice los cambios concernientes). Adicione el modelado del canal (haciendo doble clic sobre el bloque LabMoDig se despliega la librería que contiene el bloque Modelo del Canal). Redefina los niveles de los convertidor de nivel tanto en el modulador como en el demodulador para procesar señales representadas con señalización NRZ unipolar.

Para cada una de las modificaciones realizadas siga el procedimiento de la sección *Análisis general del subsistema BPSK*. Observe las señales dentro del modulador y demodulador, revise el espectro de frecuencias de la señal a la entrada del filtro, observe el comportamiento en frecuencias del filtro y justifique los resultados obtenidos.

**II.** Estudiar la factibilidad de incrementar la tasa de bit de los datos generados por el terminal, sin incrementar en gran medida el costo del sistema y sin sacrificar su desempeño. El MODEM utilizado está programado para emplear modulación BPSK, sin embargo éste puede ser reprogramado para emplear modulación QPSK, OQPSK y 8PSK. Escoja una de las M-arias y determine las ventajas y limitaciones obtenidas al realizar la implementación.

---

### **Análisis General de un Subsistema M-ario**

---

En el modelo están disponibles las herramientas de medición, el osciloscopio, y el medidor de tasa de error de bit (BER). Puede adicionar estos elementos extra donde crea conveniente.

35. ¿Son iguales la señal de entrada y la demodulada?. En el osciloscopio General se visualizan tres señales, la cadena de datos de entrada, la señal PSK modulada y la cadena de datos demodulada
36. ¿Cuántos bits difieren entre la cadena de datos original y la demodulada?. En el pantalla del visualizador BER, se ven tres valores, el primero corresponde al porcentaje de error, el segundo al número de bits erróneos y el último a la cantidad de bits comparados.
37. Un diagrama de ojo y de dispersión es conectado a la salida del filtro; esta herramienta despliega una nueva ventana con dos divisiones, la primera corresponde al diagrama de ojo y la segunda a la gráfica de dispersión. Analice el diagrama de ojo y detalle la información contenida en este. Describa y argumente la dispersión presente en los bits recuperados. Defina una frontera para las regiones de decisión apropiada para una buena demodulación.
38. ¿Cuál es el ancho de banda de la señal de entrada y de la portadora modulada?.

---

### **Análisis del Modulador M-ario**

---

Las modulaciones M-arias PSK a diferencia de BPSK realizan una modulación en cuadratura. Cada símbolo es modulado mediante dos canales en paralelo conocidos como canal en fase y canal en cuadratura.

39. El conversor a paralelo convierte los bits de la cadena de entrada en símbolos. ¿Son las tasas de bit y de baudio iguales?. Determine el periodo de bit y el periodo de símbolo.
40. ¿Cuáles son los niveles de la señal a la salida del convertidor de nivel?. Confirme realizando las mediciones necesarias. Haga una tabla con los niveles antes y después del convertidor de nivel para cada bit o combinación de bits.
41. Defina la función específica del filtro. Observe la curva característica del filtro. Revise el espectro de la señal antes y después del filtro.
42. La modulación se efectúa mediante el producto de la señal de entrada con la señal portadora. Revise las componentes espectrales resultantes. Justifique los resultados obtenidos.

¿Son las etapas idénticas?, ¿son las señales idénticas en los dos canales?, ¿cuál es la función del Bloque denominado desfase 90°?. Enumere las diferencias entre los dos canales, y describa la función de los elementos presentes en solo un canal.

---

### **Análisis del Demodulador M-ario**

---

Al igual que en la modulación M-aria PSK cada símbolo es demodulado mediante los canales en paralelo en fase y en cuadratura.

43. La demodulación se obtiene mediante la multiplicación de la señal modulada por la misma portadora. ¿Cuáles son las frecuencias generadas al realizar este proceso?. ¿Cuáles componentes frecuenciales contienen información de la señal binaria?
44. ¿Qué función cumple el filtro en el demodulador?. Observe la curva característica del filtro. Revise el espectro de la señal a la salida del filtro y justifique los resultados.
45. ¿La señal a la salida del filtro es la señal binaria transmitida?. Defina la función del decisor. ¿Cuáles regiones de decisión se establecen según el decisor?, ¿Qué influencia tienen estas regiones en la tasa de error?

¿Son las etapas idénticas?, ¿son las señales idénticas en los dos canales?, ¿cuál es la función del Bloque denominado desfase 90°?. Enumere las diferencias entre los dos canales, y describa la función de los elementos presentes en solo un canal.

---

### Análisis Complementario para el Subsistema M-ario

---

Según las características de la línea telefónica y de la modulación empleada, ¿cuál es la mayor tasa de bits a la que la terminal de computo puede generar los datos?. Verifique experimentalmente su razonamiento.

Realice varias simulaciones del modelo variando las características determinantes del sistema. Utilice valores extremos en los parámetros de entrada (Sugerencias: señal de datos cuadrada). Diseñe los filtros con diferente frecuencia de corte y con diferente orden, (Nota: Desde la barra de herramientas de Matlab abra el archivo `guia_psk.m`. A partir de la línea 126 de este archivo se define el código del filtro, realice los cambios concernientes). Adicione el modelado del canal (haciendo doble clic sobre el bloque LabMoDig se despliega la librería que contiene el bloque Modelo del Canal).

Para cada una de las modificaciones realizadas siga el procedimiento de la sección *Análisis general de un sistema M-ario*. Observe las señales dentro del modulador y demodulador, revise el espectro de frecuencias de la señal a la entrada del filtro, observe el comportamiento en frecuencias del filtro y justifique los resultados obtenidos.

Para la visualización de la señal en cada etapa del proceso de modulación y demodulación, esta disponible el floating scope, este contiene la información de todas las señales presentes en el sistema, seleccione las señales de interés.

**III.** Realizar una tabla comparativa de desempeño, tasa de baudios, BW, velocidad, SNR, probabilidad de error para las modulaciones QPSK, OQPSK y 8PSK que se pueden programar en el MODEM.

---

### Comparación de las Modulaciones M-arias del Sistema

---

En el modelo están disponibles las herramientas de medición, el osciloscopio, y el medidor de tasa de error de bit (BER). Puede adicionar estos elementos extra donde crea conveniente.

Desarrolle las actividades necesarias para obtener los datos necesarios para la conformación de la tabla comparativa de las modulaciones PSK M-arias.

### PREGUNTAS CLAVES

- ¿Cuál es la causa del retardo presente en la señal demodulada?
- ¿Por qué se usan filtros?
- ¿Cuál es el máximo ancho de banda requerido para la transmisión de una señal modulada PSK?
- ¿Cuándo se logra mayor eficiencia de ancho de banda en PSK?
- ¿Cuáles son los factores por los cuales la velocidad de transmisión se puede incrementar? ¿Cuáles son los factores que la limitan?, ¿Cuál es la mayor velocidad de transmisión para una tasa de bits fija?
- ¿Cuál es el mayor cambio de fase posible en QPSK? y en OQPSK?
- ¿Cuáles son las ventajas de usar codificación gray en los diagramas de constelación?. Cual codificación es mas apropiada usar?
- ¿Cuál es el nivel de aprovechamiento del espectro al usar este tipo de modulación?
- ¿Cuál es la relación entre la tasa de bits por segundo y la tasa de baudios para un sistema de modulación PSK?
- ¿Es la modulación M-PSK sensible a la presencia de ruido?, ¿Cuáles de los parámetros mas susceptibles al ruido producen distorsión en la modulación PSK?

## **CONCLUSIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

HAYKYN, Simon. "Sistemas de comunicación". Editorial Limusa Wiley. México, 2002.

DUARTE, Dili. URIBE Oscar. "Manual de Simulink". 2004

TOMASI, Wayne. "Sistemas de Comunicaciones Digitales Electrónicas". Cuarta edición. Editorial Pearson educación. México, 2003.

<http://www.analog.com/>

<http://www.maxim.com>

# LABORATORIO DE COMUNICACIONES DIGITALES

PRÁCTICA 3

## Modulación de amplitud en cuadratura QAM

INTEGRANTES

Nombre	Código	Grupo	Fecha

OBJETIVOS

- Identificar las características de la modulación QAM.
- Reconocer la función de cada una de las etapas del modulador y demodulador y su importancia en el proceso correspondiente.
- Identificar el efecto del canal de transmisión en la recuperación de los datos y determinar la sensibilidad de la información contenida en la señal modulada al ruido de canal.
- Determinar la eficiencia del sistema de transmisión de datos al utilizar modulación digital M-QAM.
- Analizar como los parámetros generales influyen en el comportamiento de cada etapa del sistema de modulación.
- Identificar las propiedades de las señales utilizadas como portadoras en los tipos de modulación M-aria con  $M > 2$ .

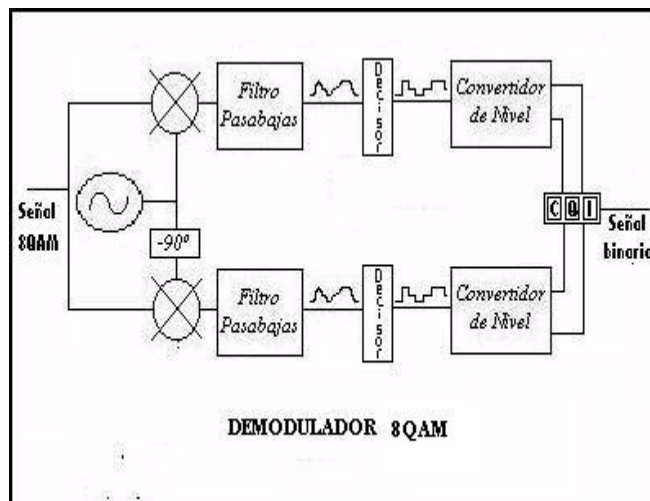
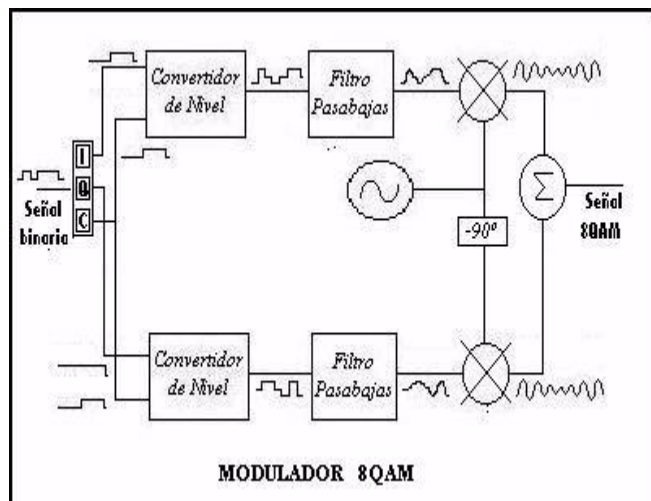
MARCO TEÓRICO

**Introducción**

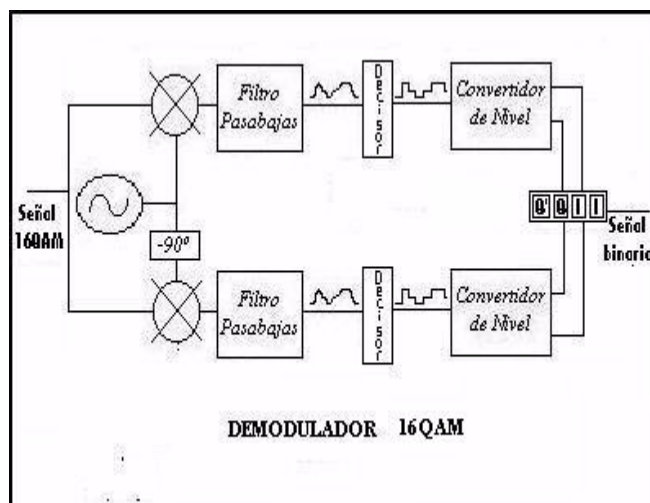
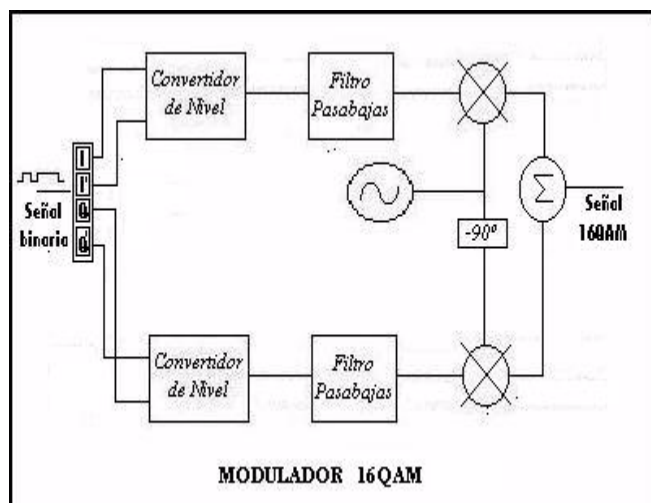
La velocidad de transmisión se incrementa en PSK utilizando una modulación la M-aria mayor, pero debido a la alta tasa de error BER en función de la relación señal a ruido no es conveniente continuar incrementando el número de fases PSK. Una alternativa es utilizar modulación de amplitud en cuadratura (QAM), la cual, no es un esquema de modulación de envolvente constante pero usa muy eficientemente el ancho de banda disponible. La modulación 16QAM permite transmitir una velocidad de 140 Mb/s (4x34 Mb/s) en un ancho de banda de 80 MHz.

**Diagramas de bloques**

**8QAM**



**16QAM**



**La Modulación QAM a nivel comercial**

Los diferentes tipos de modulaciones digitales incluyendo la modulación QAM, son escogidos según sus ventajas individuales para la implementación de determinados procesos, los fabricantes de circuitos integrados teniendo esto presente, ofrecen circuitos donde se puede escoger el tipo de modulación a usar, algunos de ellos son:

CI	Función	Empresa
AD9853	Modulador	Analog Devices
AD8345	modulador	Analog Devices
AD8346	Modulators	Analog Devices
AD8348	demodulator	Analog Devices
AD8349	modulador	Analog Devices

La modulación QAM es empleada en la implementación de sistemas diversos como son:

- Desempeño del CI MAX2363 a 2.3GHz con 16-QAM

AN1894

- Modem bidireccional total de 14.4 kbps con Protocolos incorporados
  - Conversor de QAM a ASI
  - Canal dual CATV con modulador de RF QAM
- MSC2121A  
model FRQ 150E  
Model 6210A

## **TRABAJO PREVIO**

Revisar los conceptos teóricos de la modulación QAM.

Recordar el uso de las herramientas de análisis (el diagrama de ojo, el diagrama de constelaciones, la grafica de dispersión y, la tasa de error de bit) y el tipo de información que proveen. Los bloques de Simulink de estas herramientas y de otras herramientas como el osciloscopio del espectro requieren formatos específicos de datos y deben ser configurados apropiadamente de acuerdo a las características del sistema.

Según la situación planteada en la sección I y II del **procedimiento**, desarrolle teóricamente el proceso de modulación y demodulación digital 8QAM y 16QAM. Grafique la señal de entrada, la modulada y la demodulada para una cadena de ocho bits aleatorios.

## **PROCEDIMIENTO**

**I.** Retomando la situación planteada en la práctica anterior recordemos que: un terminal de computo requiere enviar información a otro conectado a él mediante una línea telefónica. La cadena de datos digitales a transmitir por medio de la red telefónica requiere ser modulada debido a la naturaleza análoga de la red. La red telefónica desarrollada para transmisión de voz esta diseñada para pasar frecuencias en el rango de 300 a 3400Hz. Sin embargo la terminal está generando datos a una tasa de bit de 3600 a 4600 bps con señalización NRZ unipolar, se usa de un MODEM basado en modulación QAM, el MODEM por defecto está configurado para trabajar con Modulación 8QAM. En la presente práctica simularemos este proceso mediante un modelo en Simulink de la modulación QAM.

### **Asignación de Parámetros de Entrada**

46. Desde Matlab ejecute el *script* denominado **guia\_qam** para desplegar la interfaz gráfica de QAM. Los siguientes pasos de esta sección se realizan en la interfaz gráfica.
47. Mediante el botón 'Abrir QAM.mdl', despliegue el modelo en Simulink, en el cual se observa el sistema de transmisión con los moduladores y demoduladores de los diferentes tipos de modulación M-QAM disponibles.
48. Seleccione el tipo de fuente de datos y especifique una frecuencia de bit (Fb). Según la situación planteada la información puede ser una cadena de datos aleatoria con una frecuencia entre 3600 a 4600 bps (elija un valor de ese rango). La amplitud de la señal de entrada debe ser igual a 1 con señalización NRZ por requerimiento del sistema de simulación. NOTA: si desea modificar la amplitud de la señal de entrada analice los efectos y cambios necesarios para mantener la funcionalidad del sistema.
49. Determinada las características de la señal modulante, defina los parámetros de la portadora (La red telefónica deja pasar frecuencias en el rango de 300 a 3400Hz), amplitud (Ac) y frecuencia (Fc).
50. Definidos los parámetros anteriores, asígnelos a los bloques correspondientes en el modelo mediante el botón 'Entrar Datos'.
51. Según la situación planteada elija en el menú pop-up la M-aria de interés.
52. En el sistema de modulación se diseñan etapas de filtrado, ya sea para mejorar la efectividad de ancho de banda o rechazar componentes de frecuencia no deseadas. En el modulador debido a los requerimientos de ancho de banda de la señal digital tan elevados se requiere un filtro pasa bajas. El filtro diseñado es un butterworth con una frecuencia de corte de  $2 \cdot F_b$  y de orden 2. En la etapa de demodulación para eliminar componentes de frecuencia diferentes a la frecuencia de los datos, se diseñó un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte del 50% de la frecuencia central  $F_c$  y un orden 2. Oprima el botón 'Determinar Filtros' para calcular y asignar los parámetros de los filtros.
53. El modelo está listo para iniciar la simulación. Ventanas adicionales a la interfaz y al modelo qam.mdl se despliegan, minimícelas hasta cuando requiera la información contenida en ellas.

### **Análisis General del Subsistema 8QAM**

---

De aquí en adelante el procedimiento se realiza en el modelo qam.mdl. En el modelo están disponibles las herramientas de medición, el osciloscopio, y el medidor de tasa de error de bit (BER). Puede adicionar estos elementos extra donde crea conveniente.

54. ¿Son iguales la señal de entrada y la demodulada?. En el osciloscopio General se visualizan tres señales, la cadena de datos de entrada, la señal QAM modulada y la cadena de datos demodulada.
55. ¿Cuántos bits difieren entre la cadena de datos original y la demodulada?. En el pantalla del visualizador BER, se ven tres valores, el primero corresponde al porcentaje de error, el segundo al número de bits erróneos y el último a la cantidad de bits comparados.
56. Un diagrama de ojo y de dispersión es conectado a la salida del filtro; esta herramienta despliega una nueva ventana con dos divisiones, la primera corresponde al diagrama de ojo y la segunda a la gráfica de dispersión. Analice el diagrama de ojo y detalle la información contenida en este. Describa y argumente la dispersión presente en los bits recuperados. Defina una frontera para las regiones de decisión apropiada para una buena demodulación.
57. ¿Cuál es el ancho de banda de la señal de entrada y de la portadora modulada?.

### **Análisis del Modulador 8QAM**

---

Las modulaciones M-arias QAM realizan una modulación en cuadratura de forma análoga a PSK. Cada símbolo es modulado mediante dos canales en paralelo conocidos como canal en fase y canal en cuadratura.

58. El conversor a paralelo convierte los bits de la cadena de entrada en símbolos. ¿Son las tasas de bit y de baudio iguales?. Determine el periodo de bit y el periodo de símbolo.
59. ¿Cuáles son los niveles de la señal a la salida del convertidor de nivel?. Confirme realizando las mediciones necesarias. Haga una tabla con los niveles antes y después del convertidor de nivel para cada bit o combinación de bits.
60. Defina la función específica del filtro. Observe la curva característica del filtro. Revise el espectro de la señal antes y después del filtro.
61. La modulación se efectúa mediante el producto de la señal de entrada con la señal portadora. Revise las componentes espectrales resultantes. Justifique los resultados obtenidos.

¿Son las etapas idénticas?, ¿son las señales idénticas en los dos canales?, ¿cuál es la función del Bloque denominado desfase 90°?. Enumere las diferencias entre los dos canales, y describa la función de los elementos presentes en solo un canal.

### **Análisis del Demodulador 8QAM**

---

Al igual que en la modulación M-aria QAM cada símbolo es demodulado mediante los canales en paralelo en fase y en cuadratura.

62. La demodulación se obtiene mediante la multiplicación de la señal modulada por la misma portadora. ¿Cuáles son las frecuencias generadas al realizar este proceso?. ¿Cuáles componentes frecuenciales contienen información de la señal binaria?
63. ¿Qué función cumple el filtro en el demodulador?. Observe la curva característica del filtro. Revise el espectro de la señal a la salida del filtro y justifique los resultados.
64. ¿La señal a la salida del filtro es la señal binaria transmitida?. Defina la función del decisor. ¿Cuáles regiones de decisión se establecen según el decisor?, ¿Qué influencia tienen estas regiones en la tasa de error?

¿Son las etapas idénticas?, ¿son las señales idénticas en los dos canales?, ¿cuál es la función del Bloque denominado desfase 90°?. Enumere las diferencias entre los dos canales, y describa la función de los elementos presentes en solo un canal.

---

### **Análisis Complementario para 8QAM**

---

Según las características de la línea telefónica y de la modulación empleada, ¿cuál es la mayor tasa de bits a la que la terminal de computo puede generar los datos?. Verifique experimentalmente su razonamiento.

Realice varias simulaciones del modelo variando las características determinantes del sistema. Utilice valores extremos en los parámetros de entrada (Sugerencias: señal de datos cuadrada). Diseñe los filtros con diferente frecuencia de corte y con diferente orden, (Nota: Desde la barra de herramientas de Matlab abra el archivo `guia_qam.m`. A partir de la línea 125 de este archivo se define el código del filtro, realice los cambios concernientes). Adicione el modelado del canal (haciendo doble clic sobre el bloque LabMoDig se despliega la librería que contiene el bloque Modelo del Canal).

Para cada una de las modificaciones realizadas siga el procedimiento de la sección *Análisis general*. Observe las señales dentro del modulador y demodulador, revise el espectro de frecuencias de la señal a la entrada del filtro, observe el comportamiento en frecuencias del filtro y justifique los resultados obtenidos.

Para la visualización de la señal en cada etapa del proceso de modulación y demodulación, esta disponible el floating scope, este contiene la información de todas las señales presentes en el sistema, seleccione las señales de interés.

**II.** Estudiar la factibilidad de incrementar la tasa de bit de los datos generados por el terminal, sin incrementar en gran medida el costo del sistema y sin sacrificar su desempeño. El MODEM utilizado esta programado para emplear modulación BPSK, sin embargo éste puede ser reprogramado para emplear modulación QPSK, OQPSK y 8PSK. Escoja una de las M-arias y determine las ventajas y limitaciones obtenidas al realizar la implementación.

Desarrolle para la modulación 16 QAM el procedimiento de las secciones análisis general del subsistema 8QAM, análisis del modulador 8QAM y análisis del demodulador 8QAM.

**III.** Realizar una tabla comparativa de desempeño, tasa de baudio, BW, velocidad, SNR, probabilidad de error para las modulaciones QPSK, OQPSK y 8PSK que se pueden programar en el MODEM.

---

### **Comparación de las Modulaciones M-arias del Sistema**

---

En el modelo están disponibles las herramientas de medición, el osciloscopio, y el medidor de tasa de error de bit (BER). Puede adicionar estos elementos extra donde crea conveniente.

Desarrolle las actividades necesarias para obtener los datos necesarios para la conformación de la tabla comparativa de las modulaciones QAM M-arias.

### **PREGUNTAS CLAVES**

- ¿Cuál es la causa del retardo presente en la señal demodulada?
- ¿Por qué se usan filtros?
- ¿Cuál es el máximo ancho de banda requerido para la transmisión de una señal modulada QAM?
- ¿Cuándo se logra mayor eficiencia de ancho de banda en QAM?
- ¿Cuáles son los factores por los cuales la velocidad de transmisión se puede incrementar? ¿Cuáles son los factores que la limitan?, ¿Cuál es la mayor velocidad de transmisión para una tasa de bits fija?
- ¿Cuáles son las ventajas de usar codificación gray en los diagramas de constelación?. Cual codificación es mas apropiada usar?
- ¿Cuál es el nivel de aprovechamiento del espectro al usar este tipo de modulación?
- ¿Cuál es la relación entre la tasa de bits por segundo y la tasa de baudios para un sistema de modulación QAM?
- ¿Es la modulación M-QAM sensible a la presencia de ruido?, ¿Cuáles de los parámetros mas susceptibles al ruido producen distorsión en la modulación QAM?
- ¿Por qué la QAM se define para M-aria igual o superior a M=8?

## **CONCLUSIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

HAYKYN, Simon. "Sistemas de comunicación". Editorial Limusa Wiley. México, 2002.

DUARTE, Dili. URIBE Oscar. "Manual de Simulink". 2004

TOMASI, Wayne. "Sistemas de Comunicaciones Digitales Electrónicas". Cuarta edición. Editorial Pearson educación. México, 2003.

<http://www.analog.com/>

# LABORATORIO DE COMUNICACIONES DIGITALES

PRÁCTICA 4

## Paralelo entre las modulaciones M-aria QAM y PSK

### INTEGRANTES

Nombre	Código	Grupo	Fecha

### OBJETIVOS

- Comparar dos tipos de modulación diferentes con el mismo tipo de modulación M-ario.
- Analizar la ventajas y desventajas del tipo M-ario presentes en la solución de un mismo problema.

### MARCO TEÓRICO

#### Introducción

Recordemos algunos conceptos básicos de las modulaciones PSK y QAM.

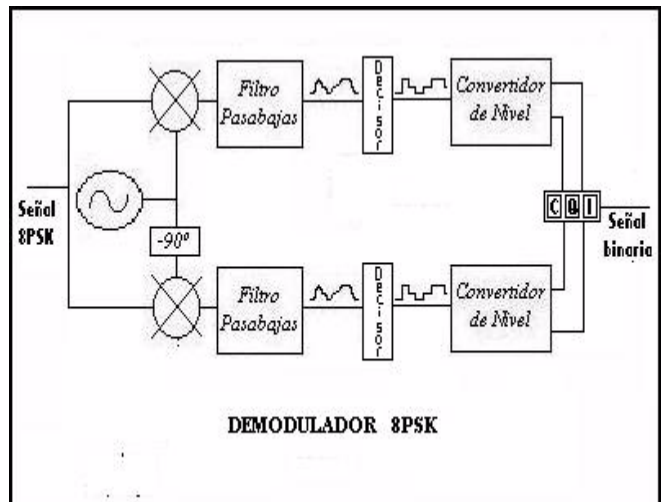
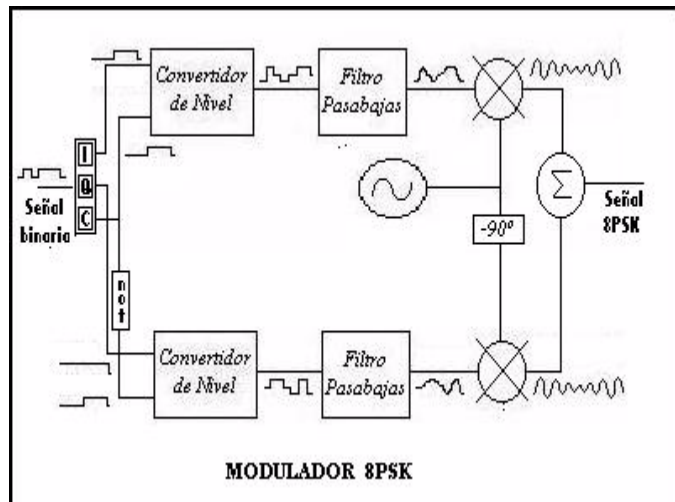
La modulación en fase PSK, ofrece una buena alternativa, en presencia de ruido blanco en el canal, PSK logra la misma tasa de bits erróneos que FSK con menos relación señal a ruido. M-PSK no es un esquema de modulación de envolvente constante, y cualquier camino a través del cual una señal M-PSK viaje debe tener un grado de linealidad para evitar crear distorsión. La modulación QPSK solo se usa en sistemas de baja y media capacidad (hasta 34 Mbps).

Se usan variantes de PSK para aumentar la velocidad de transmisión manteniendo limitada la velocidad de modulación (y por tanto el ancho de banda necesario). En la práctica es muy difícil comparar la fase con una señal de referencia invariable, por lo que se usa la versión llamada PSK diferencial.

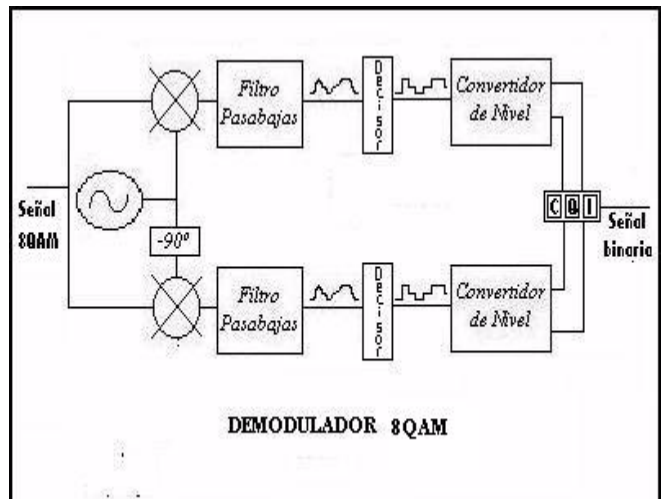
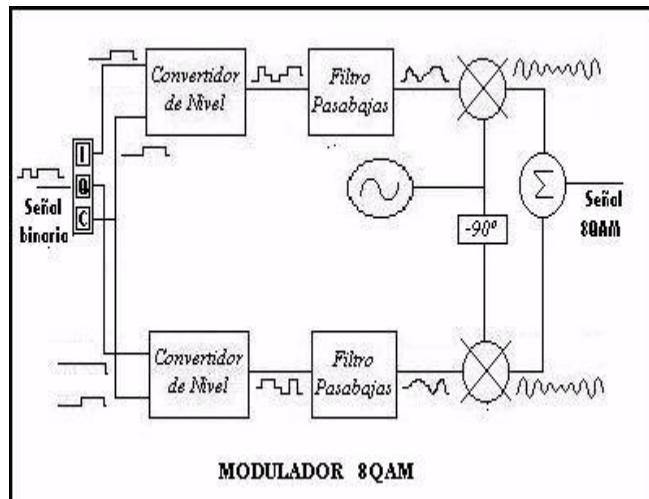
La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) no es un esquema de modulación de envolvente constante pero usa muy eficientemente el ancho de banda disponible. La modulación 16QAM permite transmitir una velocidad de 140 Mb/s (4x34 Mb/s) en un ancho de banda de 80 MHz.

## Diagramas de bloques

### 8PSK



### 8QAM



## TRABAJO PREVIO

Revisar los conceptos teóricos de la modulación QAM y PSK.

Recordar el uso de las herramientas de análisis (el diagrama de ojo, el diagrama de constelaciones, la grafica de dispersión y, la tasa de error de bit) y el tipo de información que proveen. Los bloques de Simulink de estas herramientas y de otras herramientas como el osciloscopio del espectro requieren formatos específicos de datos y deben ser configurados apropiadamente de acuerdo a las características del sistema.

Defina una situación real donde los requerimientos de tasa de bits y la velocidad en la transmisión de los datos sean altos.

## PROCEDIMIENTO

- I. Simule la situación planteada en el trabajo previo.

## Asignación de Parámetros de Entrada

---

65. Desde Matlab ejecute el *script* denominado **guia\_qam** para desplegar la interfaz gráfica de QAM y el *script* denominado **guia\_psk** para desplegar la interfaz gráfica de PSK. Los siguientes pasos de esta sección se realizan en las dos interfaces gráficas.
66. Abra el modelo en Simulink de la modulación QAM y PSK.
67. Seleccione el tipo de fuente de datos y especifique una frecuencia de bit ( $F_b$ ) en las dos interfaces. La amplitud de la señal de entrada debe ser igual a 1 con señalización NRZ por requerimiento del sistema de simulación. NOTA: si desea modificar la amplitud de la señal de entrada analice los efectos y cambios necesarios para mantener la funcionalidad del sistema.
68. Defina los parámetros de la portadora (La red telefónica deja pasar frecuencias en el rango de 300 a 3400Hz), amplitud ( $A_c$ ) y frecuencia ( $F_c$ ).
69. Definidos los parámetros anteriores, asígnelos a los bloques correspondientes en el modelo mediante el botón 'Entrar Datos'.
70. En el menú pop-up elección de la M-aria elija 8 en las dos interfaces.
71. Oprima el botón 'Determinar Filtros' para calcular y asignar los parámetros de los filtros.
72. El modelo está listo para iniciar la simulación. Ventanas adicionales a la interfaz y a los modelos se despliegan, minimícelas hasta cuando requiera la información contenida en ellas.

## Análisis General

---

De aquí en adelante el procedimiento se realiza en los modelos qam.mdl y psk.mdl. En el modelo están disponibles las herramientas de medición, el osciloscopio, y el medidor de tasa de error de bit (BER). Puede adicionar estos elementos extra donde crea conveniente.

Desarrolle las actividades necesarias para obtener los datos para la conformación de una tabla comparativa de las modulaciones 8QAM y 8 PSK

## PREGUNTAS CLAVES

- ¿Cuál es el máximo ancho de banda requerido para la transmisión de una señal modulada QAM y una PSK?
- ¿En cuál modulación se logra mayor eficiencia de ancho de banda en QAM o en PSK?
- ¿Cuál es la mayor velocidad de transmisión para una tasa de bits fija en QAM y en PSK?
- ¿Cuál es el nivel de aprovechamiento del espectro al usar este tipo de modulación?
- ¿Cuál es la relación entre la tasa de bits por segundo y la tasa de baudios para un sistema de modulación QAM y en PSK? ¿Cuál es mayor?
- ¿Cuál es la modulación más sensible a la presencia de ruido, QAM o PSK?, ¿Cuáles de los parámetros mas susceptibles al ruido producen distorsión en la modulación QAM y en la PSK?

## CONCLUSIONES

## BIBLIOGRAFÍA

- HAYKYN, Simon. "Sistemas de comunicación". Editorial Limusa Wiley. México, 2002.  
DUARTE, Dili. URIBE Oscar. "Manual de Simulink". 2004  
TOMASI, Wayne. "Sistemas de Comunicaciones Digitales Electrónicas". Cuarta edición. Editorial Pearson educación. México, 2003.