



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TEMA:

**Esquema de modulación GMSK: Aspectos teóricos y simulación en
MatLab Simulink**

AUTOR:

Saavedra Robles, Gustavo Xavier

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

TUTOR:

Philco Asqui, Luis Orlando

Guayaquil, Ecuador

16 de Marzo del 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
Saavedra Robles, Gustavo Xavier como requerimiento para la obtención
del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

Philco Asqui, Luis Orlando

DIRECTOR DE CARRERA

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 16 del mes de Marzo del año 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Saavedra Robles, Gustavo Xavier**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “**Esquema de modulación GMSK: Aspectos teóricos y simulación en MatLab Simulink**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 16 del mes de Marzo del año 2017

EL AUTOR

SAAVEDRA ROBLES, GUSTAVO XAVIER



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

AUTORIZACIÓN

Yo, **Saavedra Robles, Gustavo Xavier**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Esquema de modulación GMSK: Aspectos teóricos y simulación en MatLab Simulink**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 16 del mes de Marzo del año 2017

EL AUTOR

SAAVEDRA ROBLES, GUSTAVO XAVIER

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento [Saavedra Gustavo Final.docx](#) (D26183095)

Presentado 2017-03-05 22:57 (-05:00)

Presentado por fernandopm23@hotmail.com

Recibido edwin.palacios.ucsg@analysis.urkund.com

Mensaje Revisión TT Gustavo Saavedra [Mostrar el mensaje completo](#)
1% de esta aprox. 18 páginas de documentos largos se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	▣
+		TESIS-PARTE2.docx	<input type="checkbox"/>
+		Briones y Muñoz FINAL 2017.docx	<input type="checkbox"/>
+	>	http://doi.org/10.1109/TCOM.1972.1091177	<input checked="" type="checkbox"/>
+	Fuentes alternativas		
+		TT RFID Cristian Jativa.docx	<input type="checkbox"/>

Reiniciar Exportar Compartir

0 Advertencias

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

TEMA:

Esquema de modulación GMSK: Aspectos teóricos y simulación en MatLab Simulink

AUTOR: Saavedra Robles, Gustavo Xavier

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

TUTOR: Philco Asqui, Luis Orlando

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a mis padres, Gustavo y Mercy, por creer en mí, dándome ejemplos dignos de superación y entrega.

Va por ustedes, se lo merecen, porque admiro su fortaleza, por haber fomentado el deseo de superación y anhelo de triunfo en la vida. Hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, lo que me hizo ir hasta el final.

A mi esposa, Verónica, mi apoyo fundamental e incondicional en el transcurso de la carrera; quien me brindó el amor y la motivación adicional que necesitaba para terminar este trabajo; con quien espero compartir muchos logros más.

También dedico este trabajo a mis hijos Axel y Poly, que llegaron a transformar mi vida, convirtiéndose en fuente de inspiración para progresar y ser un ejemplo para ellos.

A todos ustedes dedico el producto de mi esfuerzo.

EL AUTOR

SAAVEDRA ROBLES, GUSTAVO XAVIER

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme dado sabiduría, fuerzas y valor para culminar esta etapa de mi vida, por haber puesto en mí camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil y en especial a la Facultad Técnica para el Desarrollo por permitirme ser parte de una generación de triunfadores y gente productiva para el país.

Mi agradecimiento al director de la Unidad de Titulación MSc. Edwin Palacios, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo.

Al Ing. Orlando Philco por el respeto a mis sugerencias e ideas, por la dirección y revisión cuidadosa que ha realizado de este texto y sus valiosas sugerencias en momentos de duda.

Gracias a mi familia, a mis padres y a mis hermanos, porque me han prestado un gran apoyo moral y humano sin ningún interés, necesario en los momentos difíciles de este trabajo y esta profesión.

Pero, sobre todo, gracias a mi esposa y a mis hijos, por su paciencia, comprensión y solidaridad con este proyecto, por el tiempo que me han concedido, un tiempo robado a la historia familiar. Sin su apoyo este trabajo nunca se habría escrito y, por eso, este trabajo es también el suyo.

A todos, muchas gracias.

EL AUTOR

SAAVEDRA ROBLES, GUSTAVO XAVIER



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

PHILCO ASQUI LUIS ORLANDO

TUTOR

f. _____

HERAS SÁNCHEZ MIGUEL ARMANDO

DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

PALACIOS MELÉNDEZ EDWIN FERNANDO

COORDINADOR DE TITULACIÓN

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen.....	XIV
CAPÍTULO 1: Descripción general del Trabajo de Titulación	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes del problema de investigación.	5
1.3. Definición del problema de investigación.....	7
1.4. Justificación del problema de investigación.....	7
1.5. Objetivos del trabajo de titulación.	8
1.5.1. Objetivos General.	8
1.5.2. Objetivos específicos:.....	8
1.6. Hipótesis.	8
CAPÍTULO 2: Fundamentación teórica de la modulación GMSK.....	10
2.1. Modulación MSK.....	10
2.2. Modulación por desplazamiento gaussiano mínimo (GMSK).	14
2.2.1. Características del filtro gaussiano.	15
2.2.2. Parámetro B_bT del filtro.	17
2.3. Señal GMSK en el tiempo.	18
2.4. Espectro de potencia de GMSK.....	21
2.5. Comportamiento de la probabilidad de error.	24
2.6. Diagramas de ojo de GMSK.....	27
2.7. Generación de señales moduladas en GMSK.....	28

2.7.1.	Modulación directa.....	29
2.7.2.	Modulación en cuadratura.....	30
2.8.	Detección de señales moduladas en GMSK.	32
2.8.1.	Detección coherente.....	32
2.8.2.	Métodos de detección no coherentes.....	34
2.9.	Aplicaciones de la modulación GMSK.	35
CAPÍTULO 3: Desarrollo de simulación del sistema GMSK		38
3.1.	Sistema simulado.....	38
3.2.	Transmisor GMSK.	39
3.3.	Canal de ruido blanco gaussiano blanco.....	42
3.4.	Receptor GMSK.....	44
3.5.	Herramientas utilizadas	46
3.6.	Simulación del Sistema GMSK	47
CAPÍTULO 4: Conclusiones y recomendaciones.....		52
4.1.	Conclusiones.....	52
4.2.	Recomendaciones	52
Bibliografía		54

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Diagrama de fase de MSK.....	12
Figura 2. 2: Espectro de potencia de la señal modulada en MSK.	13
Figura 2. 3: Respuesta a impulso del filtro gaussiano para varios valores de B_bT	18
Figura 2. 4: Señal modulada GMSK.	20
Figura 2. 5: Diagrama de fase de GMSK.....	21
Figura 2. 6: Densidad espectral de potencia de GMSK para distintos valores B_bT	23
Figura 2. 7: Comparación entre la probabilidad de error de MSK y GMSK para $B_bT=0.25$	26
Figura 2. 8: Diagramas de ojos de la componente de fase de la señal GMSK para varios valores de B_bT	28
Figura 2. 9: Esquema en bloques del modulador de GMSK simple.	29
Figura 2. 10: Esquema en bloques del modulador de GMSK con PLL.	30
Figura 2. 11: Esquema en bloques del modulador de GMSK en cuadratura.	31
Figura 2. 12: Diagrama en bloques del demodulador coherente con recuperación de portadora. Elaborado por: Autor	33
Figura 2. 13: Demodulador coherente con circuitos digitales.	34
Figura 2. 14: Comportamiento de la P_e para detección coherente y no coherente de GMSK. Elaborado por: Autor, adaptado de (Kostedt & Kemerling, 1995).....	35

Capítulo 3

Figura 3. 1: Sistema GMSK simulado en Matlab/Simulink.....	39
Figura 3. 2: Transmisor GMSK simulado en Matlab/Simulink.....	39
Figura 3. 3: Ventana de configuración y bloque Random Integer.....	40

Figura 3. 4: Ventana de configuración y bloque Unipolar to Bipolar Converter.	41
Figura 3. 5: Ventana de configuración y bloque GMSK.	42
Figura 3. 6: Ventana de configuración y bloque AWGN.	43
Figura 3. 7: Receptor GMSK simulado en Matlab/Simulink.	44
Figura 3. 8: Ventana de configuración y bloque Demulador GMSK.	45
Figura 3. 9: Bloque de salida del receptor To Workspace.	45
Figura 3. 10: Bloque Diagrama de la constación.....	46
Figura 3. 11: Bloque Diagrama de ojos.	47
Figura 3. 12: Bloques Error rate calculation y Display.	47
Figura 3. 13: Ventana del Simulink para la simulación del sistema GMSK...48	
Figura 3. 14: Ventana del Simulink que muestra la constelación GMSK a la salida del transmisor.....	49
Figura 3. 15: Ventana del Simulink que muestra la constelación GMSK a la entrada del receptor despues de salir del canal.....	49
Figura 3. 16: Ventana del Simulink que muestra el diagrama de ojo de la señal de GMSK a la salida del transmisor.....	50
Figura 3. 17: Ventana del Simulink para la simulación del sistema GMSK despues de la simulación durante 100000 segundos.	51

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1: Ancho de banda ocupado por un porcentaje de potencia determinado	24
--	----

Resumen

Para el desarrollo de simulación del sistema GMSK propuesto en el trabajo de titulación se describe las generalidades del proyecto que son: Antecedentes, Definición y Justificación del Problema a investigar, objetivo general y específicos, así como también, la hipótesis y la metodología de investigación. Dentro de las técnicas de modulación digital, caracterizadas por su eficiencia energética se encuentra el método conocido como GMSK. En el presente trabajo se realiza un análisis de los principales aspectos teóricos y técnicos de este importante método, así como de los parámetros fundamentales que influyen en su desempeño en sistemas de radio móviles. Además, se realiza una valoración de los principales métodos de realización práctica de módems GMSK con dispositivos para el procesamiento de señales digitales, teniendo en cuenta los requerimientos de velocidad y consumo de potencia de los sistemas móviles. Utilizando las herramientas del MATLAB/SIMULINK se realiza la simulación de los principales esquemas para la generación de señales GMSK.

Palabras claves: MODULACIONES DIGITALES, MSK, GMSK, MODEMS, MATLAB, SIMULINK.

CAPÍTULO 1: Descripción general del Trabajo de Titulación

1.1. Introducción.

Hasta la década de 1950 la transmisión de señales analógicas era la que dominaba el panorama de las comunicaciones mundiales. A raíz del auge alcanzado por las técnicas informáticas para el procesamiento automatizado de datos, los sistemas digitales se extendieron a casi la totalidad de los campos del ámbito profesional. La introducción de estas técnicas digitales permitió incrementar la velocidad en el procesamiento de los datos, así como aumentar los volúmenes de información que podía ser manejada y la fiabilidad en los resultados obtenidos. Este crecimiento condicionó la búsqueda de nuevos métodos que permitieran comunicar los diferentes sistemas informáticos, generando en el campo de las telecomunicaciones un mayor interés en el desarrollo de sistemas orientados a la transmisión de información digital.

La transmisión de información digital puede realizarse utilizando dos métodos fundamentales. Uno de estos métodos consiste en enviar las señales de información directamente por el medio físico, sin realizar traslación de frecuencia del espectro de la señal. Esta técnica se conoce como transmisión digital en banda base, pues no emplea ningún método de modulación previa. En este, las secuencias de pulsos digitales de información se representan por formas de pulsos adecuadas y se envían

directamente por el canal. Existen diferentes formas de pulsos, llamados también códigos de línea, con el fin de obtener características específicas como son el contenido espectral de potencia en bajas frecuencias, inmunidad ante las interferencias y la complejidad circuital en la codificación y la decodificación. El empleo de las técnicas en banda base se limita por lo general para la transmisión de información a cortas distancias y a medios de físicos de carácter pasa-bajos. Esto se debe fundamentalmente a que la mayoría de los códigos de línea tienen componentes espectrales importantes en bajas frecuencias (Carlson, Crilly, & Rutledge, 2002; Xiong, 2000).

Gran parte de los medios de transmisión existentes en la actualidad presentan carácter pasa-bandas, por lo que se hace necesario trasladar el espectro de la señal de información hasta la banda de paso del canal. Este es el caso de los sistemas de transmisión de datos por los canales telefónicos de voz y en los sistemas de radiocomunicaciones digitales. Se hace necesario utilizar los métodos de modulación digital de portadora existentes, muy difundidos en la transmisión de datos a grandes distancias y en comunicaciones inalámbricas.

Los métodos de modulación de portadora consisten en la modificación intencional de alguno de los parámetros o características de una señal portadora, en correspondencia directa con la señal que contiene la

información que se desea transmitir, llamada señal moduladora o de datos. Esta modificación debe ser realizada de manera que la señal resultante tenga características que la hagan apropiada para su transmisión a través del medio físico y que la información pueda ser recuperada fielmente en el receptor.

Existen tres técnicas básicas de modulación de portadora, las cuales se obtienen como resultado de hacer variar uno de los parámetros primarios de la señal portadora:

- Modulación digital de amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*).
- Modulación digital de frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*).
- Modulación digital de fase (PSK, *Phase Shift Keying*).

Estos esquemas básicos se modifican con el fin de mejorar su desempeño en un sistema determinado. Basándose en estos esquemas y sus combinaciones, se obtienen gran variedad de técnicas digitales que permiten mejorar la eficiencia de los sistemas de comunicaciones modernos. La selección del método de modulación empleado en una determinada aplicación es una tarea compleja y que requiere una cuidadosa planificación. Existen varios criterios que permiten evaluar el desempeño de las técnicas de modulaciones digitales entre los cuales se encuentran: la eficiencia en la utilización de la potencia y el ancho de banda, así como la complejidad en los circuitos para su generación y detección. La elección final debe ser el

resultado de un compromiso entre los requisitos de calidad deseados y la complejidad y coste del sistema (Xiong, 2000).

Dentro del grupo de modulaciones caracterizadas por su eficiencia energética, los esquemas de modulaciones de fase continua (CPM, *Continuos Phase Modulation*) encuentran un elevado número de aplicaciones, fundamentalmente en sistemas de radiocomunicaciones móviles. En estas técnicas de modulación la amplitud de la envolvente se mantiene constante, lo cual le confiere una alta inmunidad al ruido y a las interferencias. Además, presentan un espectro de potencia con baja radiación fuera de banda, lo cual constituye un requisito imprescindible para su empleo en sistemas de telefonía móviles, donde es necesario disminuir la interferencia entre canales vecinos. La alta eficiencia desde el punto de vista de utilización de la potencia que presentan estos esquemas le confieren una gran importancia, ya que permite disminuir el consumo de potencia de las estaciones móviles y el consiguiente ahorro de baterías (Feher, 1987).

1.2. Antecedentes del problema de investigación.

Existen varios esquemas de modulaciones de fase continua, los cuales se dividen atendiendo a la naturaleza de los pulsos moduladores. Las modulaciones con pulsos moduladores rectangulares presentan la menor interferencia inter-símbolos posible, mientras que las modulaciones con pulsos moduladores conformados espectralmente permiten disminuir el

ancho de banda de transmisión, utilizando un filtro de pre-modulación para filtrar la señal de datos. Uno de estos esquemas es la modulación por desplazamiento gaussiano mínimo (GMSK, *Gaussian Minimum Shift Keying*), en la cual la respuesta a impulso del filtro de pre-modulación tiene característica gaussiana.

La técnica de modulación GMSK fue propuesta por primera vez en 1981 por dos científicos japoneses, en un artículo publicado en la prestigiosa revista IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (Murota & Hirade, 1981). Este método fue diseñado específicamente para su empleo en sistemas de radiotelefonía móvil, debido a que presenta una gran eficiencia desde el punto de vista de utilización de la potencia y un ancho de banda relativamente estrecho. GMSK es un tipo de modulación de frecuencia binaria, en la cual la diferencia entre las frecuencias de los diferentes estados lógicos se escoge de forma tal que asegure transiciones continuas en la fase de la señal modulada. El filtrado de la señal de datos previo a la etapa de modulación provoca que se obtenga un espectro de potencia compacto y permite disminuir el tamaño de los lóbulos secundarios que se presenta en las modulaciones CPM que emplean pulsos moduladores rectangulares. Esta conformación del espectro ocurre a expensas de un aumento en la interferencia inter-símbolos, provocada por el filtro de pre-modulación.

1.3. Definición del problema de investigación.

La bibliografía para el estudio de GMSK es escasa y, en ocasiones, incompleta y difícil de comprender. Es difícil disponer de los detalles de la tecnología que permitan la implementación práctica. Esta situación dificulta el estudio de los principales aspectos de la misma relativos a su desempeño, simulación, implementación y comparación con otros esquemas de modulación. Lo anterior constituye el **problema científico** de esta investigación.

1.4. Justificación del problema de investigación.

Las mejoras en el ancho de banda y su alta eficiencia energética, hacen de GMSK un esquema muy empleado, sobre todo en sistemas celulares de segunda generación como es el caso del estándar europeo GSM (*Group Standard Mobile*), así como en otros sistemas con restricción energética. Lo anterior no significa que el método haya perdido fuerza, pues como método energéticamente eficiente será siempre un fuerte candidato a considerar en estos tiempos, donde el ahorro energético y el cuidado del medio ambiente resultan de vital importancia. Resulta entonces que el estudio de esta técnica de modulación tiene gran importancia, ya que es imprescindible para poder diseñar y evaluar el rendimiento de nuevos sistemas digitales a implementar o ya implementados. No se debe olvidar que GMSK, como variante de FSK, es especialmente robusto frente a interferencias y ruidos.

1.5. Objetivos del trabajo de titulación.

1.5.1. Objetivos General.

El **objetivo general** de este trabajo es:

Realizar una investigación donde se analicen los principales aspectos teóricos y técnicos del esquema de modulación GMSK, así como la simulación, posibilidades de implementación y determinación de los parámetros fundamentales que influyen en su rendimiento.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Determinar los fundamentos teóricos y técnicos de la modulación GMSK, así como los aspectos que influyen en su rendimiento.
- Diseñar el sistema de modulación por desplazamiento gaussiano mínimo utilizando la herramienta MatLab/Simulink.
- Realizar la evaluación del sistema GMSK utilizando Matlab/Simulink.

1.6. Hipótesis.

La determinación de los fundamentos teóricos, los aspectos técnicos fundamentales, así como la simulación y análisis de los principales métodos de implementación de GMSK, pondría en una situación ventajosa nuestra universidad en el campo de las investigaciones en esta área, dirigidas fundamentalmente a la realización de módems GMSK; lo cual constituye la hipótesis de esta investigación.

1.7. Metodología de investigación.

La mayoría de trabajos relacionados a las modulaciones digitales, en este caso Modulación por desplazamiento gaussiano mínimo (GMSK), utilizan herramientas robustas de programación como MatLab/Simulink. La metodología de investigación científica del proyecto de titulación, es llamado el método de la simulación. Mientras, que el tipo de investigación utilizado es, descriptivo, explicativo y exploratorio.

CAPÍTULO 2: Fundamentación teórica de la modulación GMSK.

La técnica de modulación GMSK pertenece al grupo de las modulaciones CPM, caracterizado por su aprovechamiento eficiente de la potencia. La amplitud de la señal modulada permanece constante lo que le confiere una alta inmunidad al ruido y a las interferencias, en comparación con otros esquemas como ASK y QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), en las cuales la información está contenida en los cambios de amplitud y fase de la envolvente. Esta propiedad es fundamental porque permite su empleo en sistemas con amplificadores no lineales como los amplificadores clase C, lo que trae como consecuencia un menor consumo de potencia y resulta una técnica ideal para su empleo en sistemas móviles.

Este importante método es derivado de la modulación por desplazamiento mínimo (MSK, *Minimum Shift Keying*) y fue desarrollada con el objetivo de mejorar las características de MSK para que pudiera emplearse en sistemas de comunicaciones móviles por radio. Resulta entonces necesario, antes de entrar en un análisis más profundo de GMSK, determinar los principales aspectos de la modulación MSK.

2.1. Modulación MSK.

La modulación por desplazamiento mínimo, es un tipo de modulación binaria de frecuencia desarrollada en 1961 (Xiong, 2000). Este método

pertenece al grupo de modulaciones de fase continua en la que la señal moduladora es un tren de pulsos rectangulares bipolar. Entre sus propiedades fundamentales se encuentran:

- Amplitud de la envolvente constante
- Esquema eficiente energéticamente.
- Ancho de banda relativamente estrecho.
- Posibilidad de detección coherente.

En la señal MSK la fase permanece continua en los cambios de estado de la señal de datos, de manera que la señal es continua en todo el eje tiempo y la envolvente no presenta saltos abruptos ni discontinuidades. En este método las frecuencias asociadas a los estados lógicos "0" y "1" tienen la mínima separación posible para que puedan considerarse ortogonales.

La diferencia entre las frecuencias de los diferentes estados, normalizado para la tasa de bits de la señal de datos, se conoce como índice de modulación (h) y tiene un valor de 0.5 en MSK. Este valor indica que la máxima separación que existe entre las frecuencias de la señal MSK es igual a la mitad de la tasa de bits. Los cambios en la frecuencia de la señal modulada ocurren en los cruces por ceros de la señal de datos, lo que garantiza que la envolvente no presente discontinuidades. Como puede observarse en la figura 2.1, la fase varía linealmente y está limitada a un

aumento de $\pm\pi/2$ durante el tiempo de duración de un bit de la señal de datos.

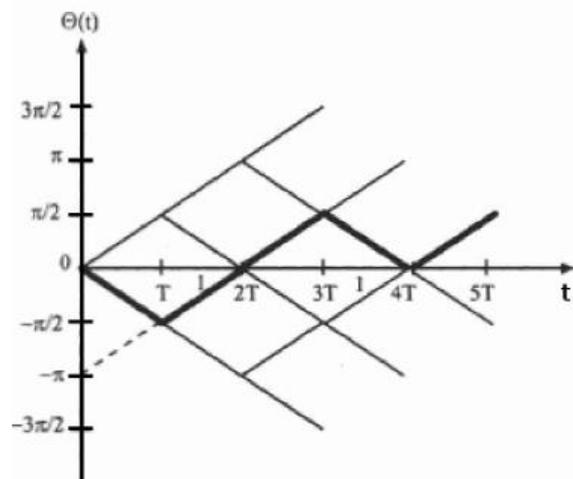


Figura 2. 1: Diagrama de fase de MSK.
Elaborado por: Autor.

MSK posee las buenas características de las modulaciones de fase continua, sin embargo, no se puede emplear en sistemas de radio móviles. Esto se debe fundamentalmente a que las modulaciones que emplean estos sistemas deben tener baja radiación fuera de banda, para minimizar la interferencia entre canales vecinos.

Generalmente se toma como norma de calidad del sistema una radiación de potencia en el canal adyacente de 60 a 80 dB menor que la radiación en el canal deseado (Feher, 1987). La señal MSK no satisface esta condición. En la figura 2.2 puede observarse la densidad espectral de potencia de la señal MSK, obtenido por el autor con ayuda del software MATLAB/SIMULINK.

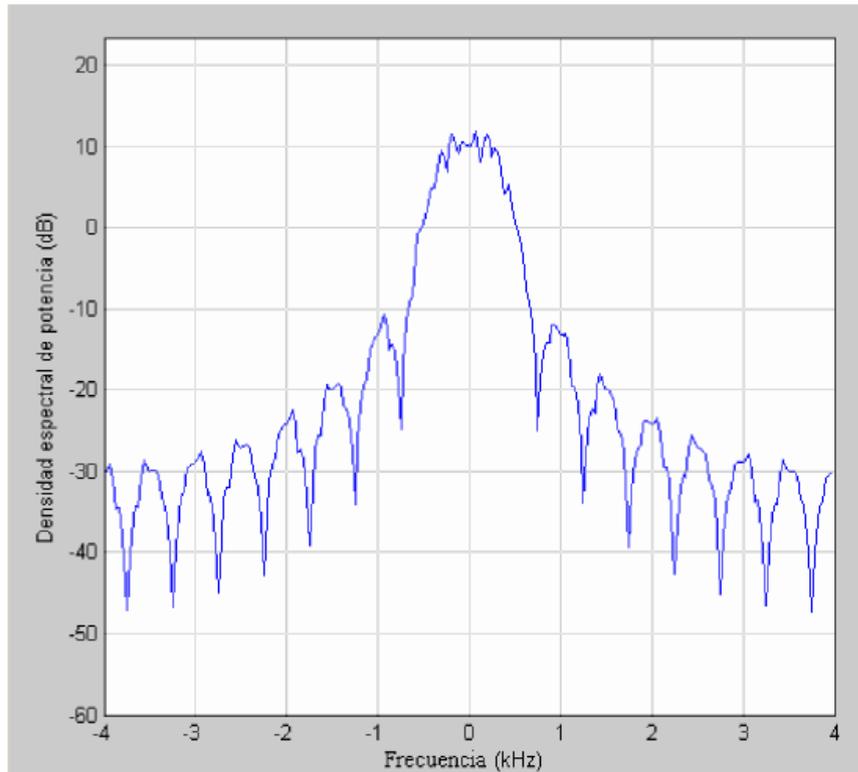


Figura 2. 2: Espectro de potencia de la señal modulada en MSK.
Elaborado por: Autor.

En el espectro de potencia puede apreciarse la presencia de lóbulos laterales de tamaño notable, lo que aumenta la interferencia entre canales vecinos y deteriora la calidad del sistema. La presencia de los lóbulos laterales se debe a que, aunque la señal modulada no presenta discontinuidades ni saltos en la fase, en los cruces por cero de la señal de datos bipolar la fase cambia aún muy bruscamente, produciendo una deformación en el espectro de potencia de la señal modulada.

Para su utilización en sistemas de transmisión de datos inalámbricos, donde se necesita un bajo nivel de interferencia entre canales adyacentes,

resulta imprescindible disminuir la potencia radiada en los lóbulos laterales. El espectro de la señal MSK se procesa haciendo pasar la señal de datos NRZ (No Return to Zero) por un filtro de pre-modulación, que provoque una disminución de la radiación lateral fuera de banda. En correspondencia con las características del filtro empleado se obtiene un grupo de modulaciones de gran importancia en las telecomunicaciones modernas, entre las que se encuentra la modulación GMSK (Feher, 1987).

2.2. Modulación por desplazamiento gaussiano mínimo (GMSK).

Esta técnica de modulación binaria fue desarrollada específicamente para su empleo en sistemas de comunicaciones móviles y transmisión de datos inalámbricos. El motivo fundamental para su creación fue el de obtener un esquema en el cual se logrará disminuir la radiación de potencia fuera de banda que presenta la modulación MSK, conservando sus buenas propiedades de eficiencia en el uso de potencia y alta inmunidad a las interferencias. Además, la técnica resultante debía permitir la utilización de detectores coherentes que, aunque más complejos de implementar, tienen un mejor desempeño que los mecanismos de detección no coherente en cuanto a la probabilidad de error.

En GMSK la señal moduladora tiene la forma de un tren de pulsos con característica gaussiana. Estos pulsos se obtienen como resultado de pasar la señal de datos bipolar por el filtro pasa-bajos de pre-modulación. Los

parámetros del filtro determinan las propiedades fundamentales la señal modulada, por lo que su diseño debe ser un proceso muy cuidadoso y debe estar relacionado estrechamente con las especificaciones del sistema donde se empleará.

2.2.1. Características del filtro gaussiano.

El filtro pasa-bajos con característica gaussiana que se utiliza en la etapa previa a la modulación debe tener un ancho de banda estrecho y una pendiente de corte abrupta, lo cual es necesario para suprimir las componentes de altas frecuencias. Además, debe garantizar que el área de los pulsos de salida se corresponda con un desplazamiento de fase de $\pi/2$, necesario para poder utilizar detección coherente.

Al pasar la señal de datos bipolar por el filtro gaussiano cada bit de datos, que ocupa en banda base un período de tiempo T , se convierte en una respuesta infinita en la que cada símbolo ocupa varios períodos, dependiendo de los parámetros de diseño del filtro. El filtrado hace que la señal modulada tenga transiciones de fase aún más suaves en los cambios de estado de la señal de datos, a cambio de introducir un nivel apreciable de interferencia inter-símbolos (IIS) (Murota & Hirade, 1981).

La respuesta a impulso del filtro gaussiano es:

$$h(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{\alpha} \exp\left\{-\frac{\pi^2 t^2}{\alpha^2}\right\} \quad (1)$$

en que:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{B_b \sqrt{2}}$$

B_b : ancho de banda del filtro entre los puntos de media potencia.

t : variable tiempo.

O lo que es equivalente su función de transferencia es:

$$H(f) = \exp\left\{-\frac{\log(2)}{2B_b^2} f^2\right\} \quad (2)$$

en que:

f : variable frecuencia.

La señal de pulsos a la salida del filtro gaussiano tiene la forma que se muestra a continuación cuando a la entrada del filtro se tiene un tren de pulsos rectangulares bipolares.

$$g(t) = \frac{1}{2T} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{2\pi B_b}{\sqrt{\log(2)}}(t - T/2)\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{2\pi B_b}{\sqrt{\log(2)}}(t + T/2)\right) \right] \quad (3)$$

Donde $\operatorname{erf}(\)$ es la función de error dada por:

$$\text{erf}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau$$

2.2.2. Parámetro B_bT del filtro.

El principal parámetro de diseño del filtro gaussiano es el producto ancho de banda del filtro – tiempo de duración de un bit (B_bT). Este parámetro afecta significativamente el desempeño de la modulación GMSK, ya que determina cuantos períodos T se extienden los pulsos gaussianos hacia ambos lados. Para valores menores de B_bT , los pulsos se extienden por más períodos de bits, lo que introduce cierto nivel de interferencia inter-símbolos a la entrada del modulador.

En la figura 2.3 se puede observar cómo cambia la respuesta a impulso del filtro gaussiano para diferentes valores de B_bT . Mientras menor sea el valor de B_bT , se tiene una respuesta a impulso más suave, lo cual provoca que los pulsos a la salida del filtro se extiendan por más periodos de bits y las transiciones de fase de la señal modulada sean aún más suaves.

El valor de este parámetro influye directamente en la forma del espectro de potencia y en el comportamiento de la probabilidad de error de la señal GMSK. Por su importancia, esta influencia se analizará con profundidad más adelante.

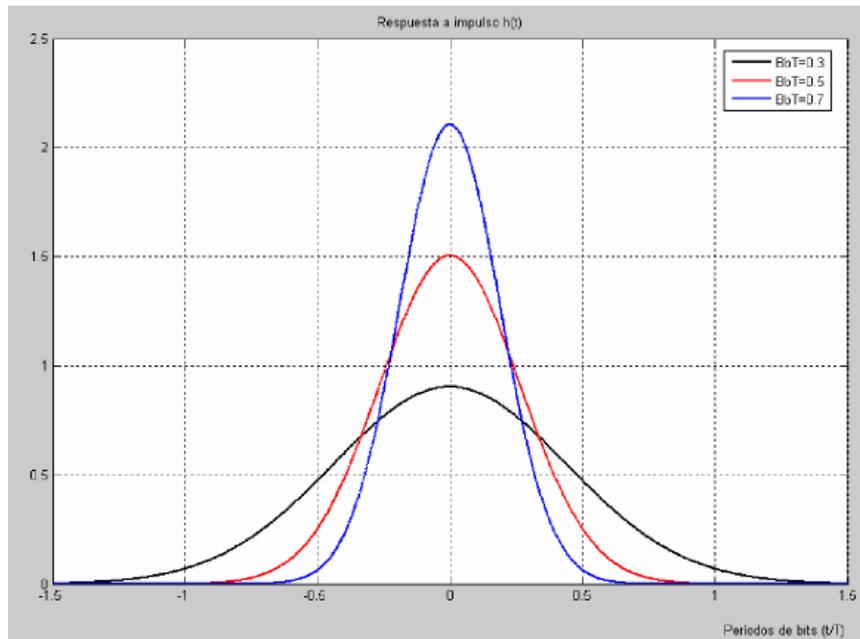


Figura 2. 3: Respuesta a impulso del filtro gaussiano para varios valores de BbT.
Elaborado por: Autor.

2.3. Señal GMSK en el tiempo.

La señal GMSK, al igual que las restantes modulaciones de fase continua, es una señal definida en todo el eje tiempo, que no presenta saltos ni discontinuidades en la envolvente. La expresión matemática que define este tipo de modulación es:

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta(t)) \quad (4)$$

en que:

A_c : amplitud de la portadora.

f_c : frecuencia de la portadora.

$\theta(t)$: exceso de fase.

El exceso de fase que contiene la información está dado por:

$$\theta(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k \pi h \int_{-\infty}^{t-kT} g(u) du \quad (5)$$

en que:

h : índice de modulación.

a_k : dígitos de la fuente de información.

$g(u)$: pulsos gaussianos moduladores.

La modulación GMSK es un tipo de modulación digital de frecuencia. Para una secuencia de datos binaria aleatoria, se obtiene la señal modulada que se muestra en la figura 2.4. Existe una diferencia de frecuencias entre los estados lógicos “0” y “1”, lo que demuestra el carácter de FSK de esta técnica de modulación.

A simple vista no puede observarse ninguna diferencia entre esta señal y las señales FSK. La diferencia principal radica en que en GMSK las frecuencias asociadas a los distintos estados lógicos tienen la mínima separación posible para que se puedan considerar ortogonales, permitiendo así el empleo de detección coherente. Además, en GMSK la fase varía linealmente y no presenta saltos abruptos en los instantes de transición de la señal de datos.

Al igual que en MSK los cambios en la fase de la señal modulada están limitados a un aumento de $\pm\pi/2$ durante el período de duración de un bit. Un

cambio de fase de la señal de $+\pi/2$ representa un “1” lógico y un cambio de fase de $-\pi/2$ representa un “0” lógico. Los cambios en la frecuencia de la señal GMSK ocurren en los cruces por cero de la señal de datos bipolar (Glover & Grant, 2010). La diferencia entre las frecuencias f_H y f_L , asociadas a los estados lógicos “0” y “1” es igual a la mitad de la tasa de bits (índice de modulación $h=0.5$), como se muestra a continuación:

$$f_H = f_c + \frac{1}{4T_b} \quad (6)$$

$$f_L = f_c - \frac{1}{4T_b} \quad (7)$$

$$\Delta f = f_H - f_L = \frac{1}{2T_b} \quad (8)$$

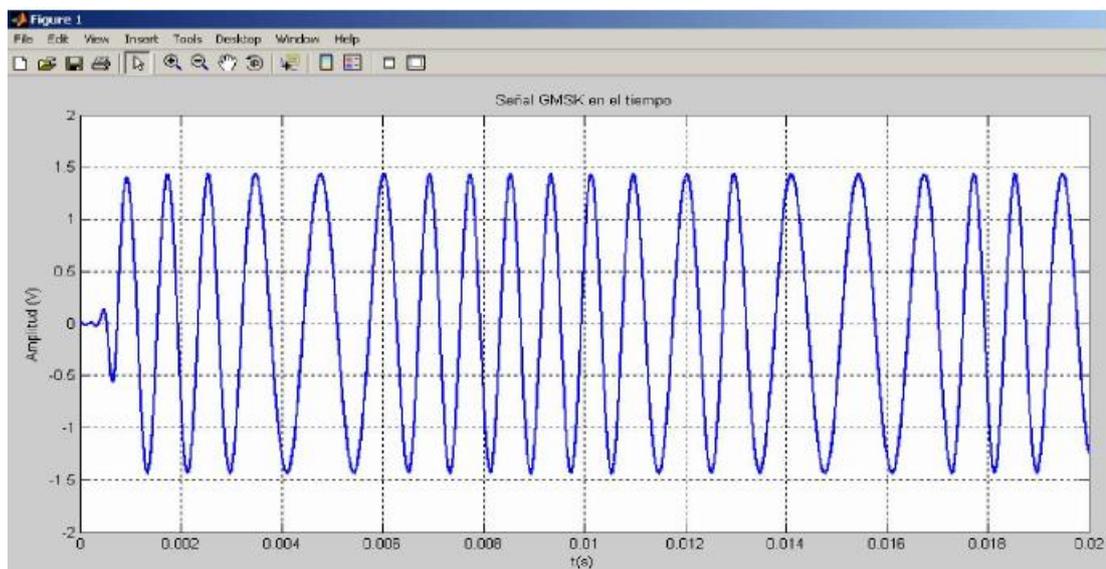


Figura 2. 4: Señal modulada GMSK.
Elaborado por: Autor.

El filtro gaussiano suaviza los cambios de fase de que presenta la modulación MSK, obteniéndose transiciones de fase más suaves en los cambios de estado de la señal de datos. En la figura 2.5 se muestran como varía la fase de una señal modulada en GMSK para una secuencia de datos "01100". Como puede observarse en los instantes que la señal moduladora cambia de estado la fase cambia suavemente, sin que se produzcan saltos abruptos.

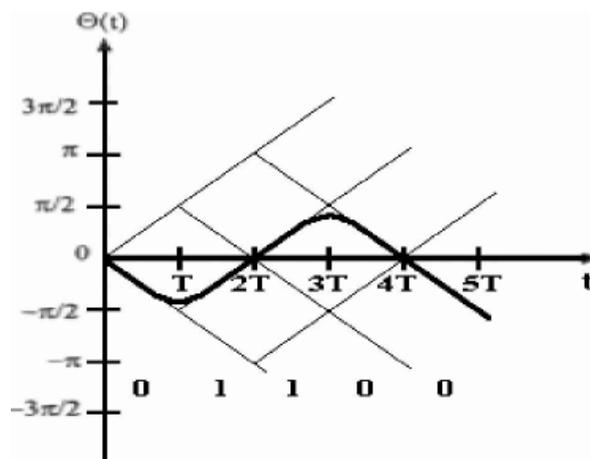


Figura 2. 5: Diagrama de fase de GMSK.
Elaborado por: Autor.

2.4. Espectro de potencia de GMSK.

La principal desventaja de la modulación MSK es la radiación de potencia fuera de banda, debido a que su espectro de potencia presenta lóbulos laterales de tamaño apreciable. En GMSK se logra disminuir la presencia de esta radiación lateral mediante el filtrado de la señal de datos, previo a la etapa de modulación. El filtro gaussiano hace que la señal modulada presente transiciones de fase más suaves, lo que resulta en un espectro de potencia más compacto, donde los lóbulos laterales tienen un

menor tamaño y el lóbulo principal es mucho más estrecho. Esta es una de las características que hacen que el esquema de modulación GMSK pueda ser empleado eficientemente en sistemas móviles (Murota & Hirade, 1981).

La determinación del espectro de potencia de GMSK, en general para las modulaciones CPM con forma de pulsos infinita, es un procedimiento complejo matemáticamente. Generalmente puede ser obtenido empleando simulaciones por computadora.

La figura 2.6 muestra el espectro de potencia de la señal GMSK contra la desviación normalizada de frecuencia respecto a la frecuencia central de portadora $(f - f_c) T$, para varios valores de $B_b T$. El valor de $B_b T = \infty$ corresponde a la modulación MSK.

El parámetro $B_b T$ del filtro influye de manera muy significativa en la densidad espectral de potencia de la señal GMSK. Para valores menores el espectro de potencia se hace más compacto y presenta menor radiación fuera de banda. Esto es muy deseable sobre todo en comunicaciones móviles ya que permite disminuir la interferencia entre canales vecinos que deteriora la calidad del sistema.

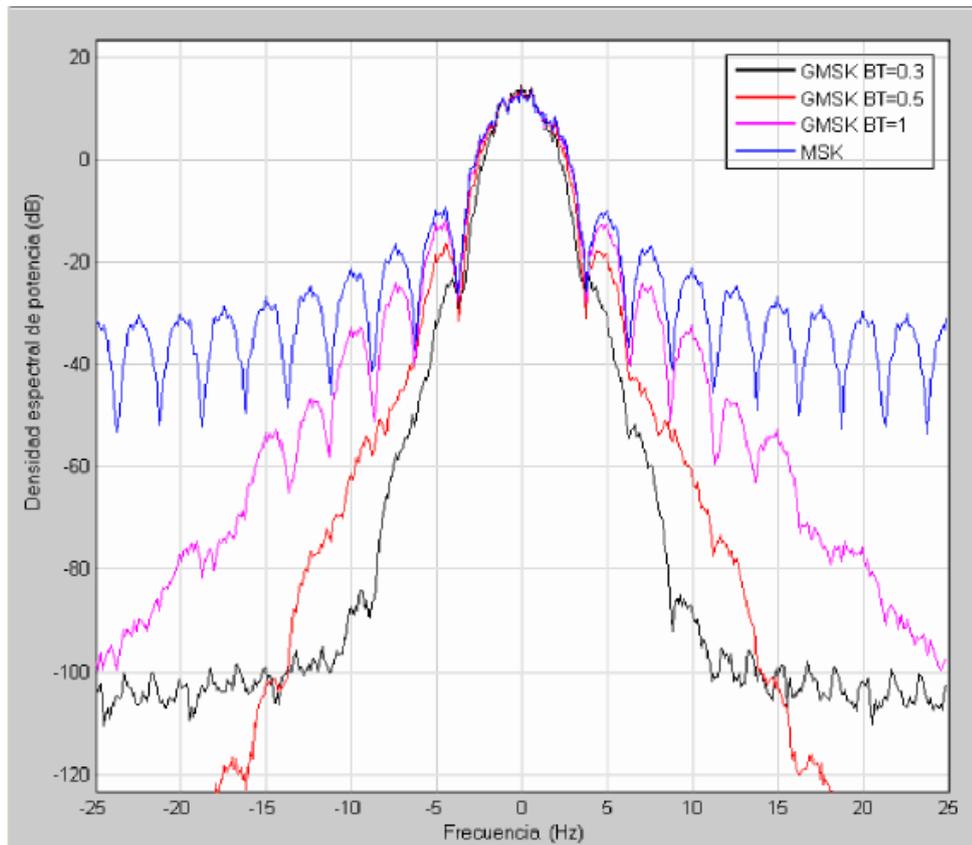


Figura 2. 6: Densidad espectral de potencia de GMSK para distintos valores B_bT .
Elaborado por: Autor

En la tabla 2.1 se relaciona el ancho de banda ocupado (normalizado para la tasa de bits) para una fracción de potencia determinada, donde el producto B_bT es un parámetro variable. Puede observarse que el ancho de banda necesario para contener una fracción de potencia disminuye con la disminución de B_bT , obteniéndose un espectro de potencia más compacto. Sin embargo, el producto B_bT no puede escogerse tan pequeño como se quiera pues este afecta también la probabilidad de error del sistema. El valor de B_bT del filtro se escoge teniendo en cuenta un compromiso entre el ancho

de banda ocupado por la señal y la complejidad de los circuitos para su detección, para una tasa de bits erróneos determinada.

Tabla 2. 1: Ancho de banda ocupado por un porcentaje de potencia determinado

	90%	99%	99.9%	99.99%
GMSK $B_bT=0.2$	0.52	0.79	0.99	1.12
GMSK $B_bT=0.25$	0.57	0.86	1.09	1.37
GMSK $B_bT=0.5$	0.69	1.04	1.33	2.08
MSK $B_bT= \infty$	0.78	1.20	2.76	6.00

Fuente: (Benedetto & Biglieri, 2006).

2.5. Comportamiento de la probabilidad de error.

El filtro gaussiano de pre-modulación utilizado para disminuir la energía radiada en los canales adyacentes, provoca que los pulsos de información en banda base se extiendan durante varios períodos de bits. Cada pulso se convierte en una respuesta infinita hacia ambos lados, produciéndose el fenómeno conocido como interferencia inter-símbolos a la entrada del modulador. Los pulsos gaussianos se extienden esencialmente durante $1/B_bT$ períodos de bits. Por ejemplo, cada bit se extiende aproximadamente hasta 3 períodos de bits para $B_bT=0.3$ y hasta dos períodos de bits para $B_bT=0.5$.

La interferencia inter-símbolos introducida por el filtro gaussiano provoca una degradación del comportamiento de la tasa de errores, especialmente en las condiciones de desvanecimiento rápido que

caracteriza los canales de radio móviles. Este nivel de interferencia está estrechamente relacionado con el parámetro B_bT del filtro. A medida que disminuye el producto B_bT , aumenta el número de períodos de bits durante los cuales se extienden los pulsos gaussianos y el nivel de IIS (Glover & Grant, 2010).

El comportamiento de la probabilidad de error de (P_e) GMSK en presencia de ruido blanco gaussiano aditivo puede ser aproximado por:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\alpha E_b}{N_0}} \right) \quad (9)$$

en que:

$\frac{E_b}{N_0}$: relación entre la energía promedio de un bit y la densidad espectral de ruido.

$\operatorname{erfc}()$: función de error complementario dada por:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-u^2) du \quad (10)$$

La constante α toma valores numéricos que dependen del producto B_bT (Murota & Hirade, 1981).

$$\alpha = \begin{cases} 0.68 & B_bT = 0.25 \\ 0.85 & B_bT = \infty \end{cases}$$

Para analizar el comportamiento de la probabilidad de error se puede graficar la ecuación (9) para varios valores de B_bT , comprobando así la influencia de este parámetro en la degradación de la P_e , como se muestra en la figura 2.7.

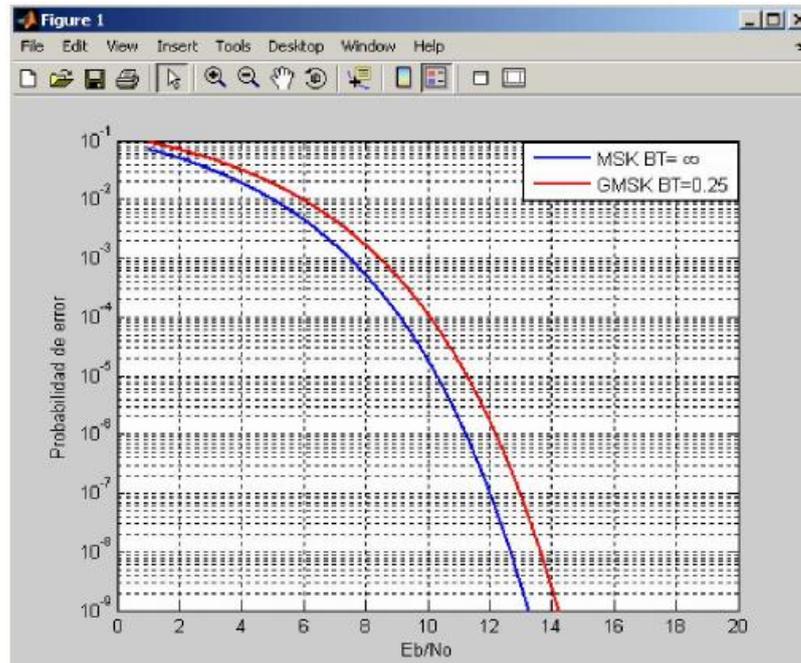


Figura 2. 7: Comparación entre la probabilidad de error de MSK y GMSK para $B_bT=0.25$.

Elaborado por: Autor

La señal GMSK con $B_bT=0.25$ se degrada alrededor de 1 dB con respecto a la modulación MSK (que no introduce interferencia inter-símbolos), y aproximadamente 1.7 dB de la transmisión de señales antipodales. Para valores de B_bT menores que 0.25 la degradación del sistema es mucho mayor, lo que provoca que los circuitos para la detección de GMSK se tornen muy complejos de implementar.

2.6. Diagramas de ojo de GMSK.

La degradación de la probabilidad de error introducida por la interferencia inter-símbolos también puede analizarse mediante la obtención de los diagramas de ojo para distintos valores de B_bT . Los diagramas de ojo brindan información muy valiosa que permite evaluar el desempeño de distintos sistemas de comunicaciones digitales. Por ejemplo, la apertura del ojo está determinada por la máxima interferencia inter-símbolos permitida por el sistema y determina el instante óptimo de muestreo.

En la figura 2.8 se muestran los diagramas de ojos para la componente en fase de la modulación GMSK, para varios valores de B_bT . A medida que disminuye el valor B_bT del filtro gaussiano el diagrama de ojo se va cerrando, lo que hace más difícil la sincronización y aumenta la probabilidad de error (Glover & Grant, 2010).

En la práctica el filtro se debe diseñar con el objetivo de lograr baja radiación fuera de banda (valores pequeños de B_bT), tratando de mantener la interferencia inter-símbolos por debajo de los niveles de calidad del sistema. Los valores de B_bT que más se utilizan en la práctica son 0.25, 0.3 y 0.5.

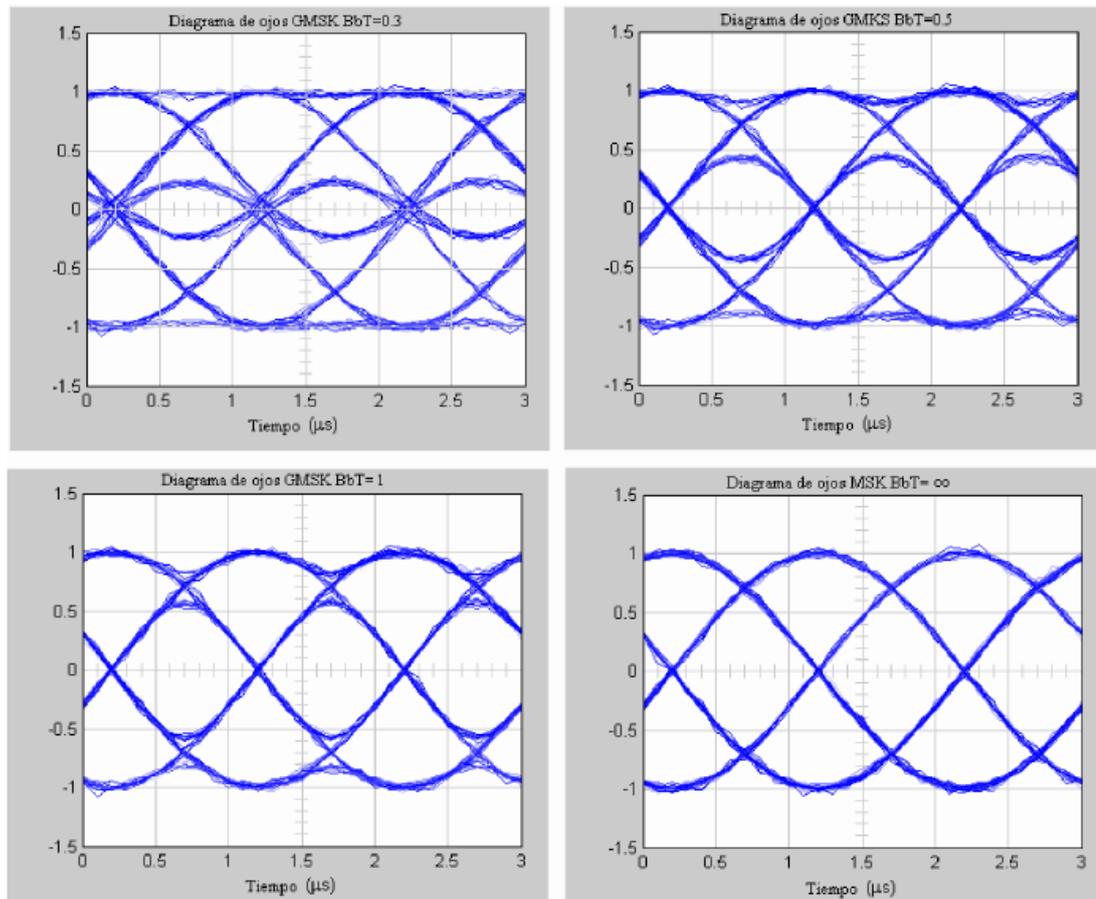


Figura 2. 8: Diagramas de ojos de la componente de fase de la señal GMSK para varios valores de B_bT .
Elaborado por: Autor

2.7. Generación de señales moduladas en GMSK.

La generación de señales moduladas en GMSK se puede realizar por distintos métodos, siempre que se mantengan las propiedades fundamentales de las señales GMSK como son: envolvente constante y transiciones de fase continuas. Las frecuencias de los estados lógicos “1” y “0” deben tener la menor separación posible manteniendo la condición de ortogonalidad, lo que se obtiene con un índice de modulación de 0.5.

2.7.1. Modulación directa.

La forma más simple de generar señales moduladas en GMSK es utilizando un modulador de frecuencia, con índice de modulación de 0.5, tal como se muestra en la figura 2.9. La señal de datos bipolar se hace pasar por un filtro pasa-bajos con característica gaussiana, el cual realiza la conformación espectral de la señal moduladora.

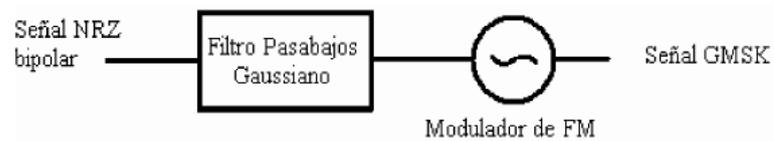


Figura 2. 9: Esquema en bloques del modulador de GMSK simple.
Elaborado por: Autor

El tren de pulsos gaussianos que se obtienen a la salida del filtro gaussiano se pasa a través del modulador, en el cual la frecuencia se desvía de la frecuencia central de portadora en correspondencia con la señal de datos. El modulador de FM es generalmente un oscilador controlado por voltaje (VCO, Voltage Controlled Oscillator). La implementación del filtro gaussiano puede realizarse mediante el empleo de técnicas digitales para el diseño de filtros.

Este método de obtención presenta desventajas que limitan su utilización práctica. Su principal deficiencia radica en que resulta muy difícil mantener el valor de la frecuencia de portadora dentro de un rango permisible, que permita cumplir con las restricciones de sensibilidad y linealidad de las modulaciones de frecuencia (Murota & Hirade, 1981).

Para eliminar las deficiencias del método anterior y poder mantener la frecuencia de portadora dentro de los límites permisibles, se pueden utilizar otras variantes como el modulador que se muestra en la figura 2.10. En este se utiliza un circuito regulador de fase (PLL, Phase Locked Loop) para eliminar las desviaciones de la frecuencia portadora. Este esquema está compuesto por un defasador PSK binario, que provoca un desplazamiento de $\pi/2$ en la fase, seguido de un PLL sintonizable, que suaviza las transiciones en la fase de la señales de salida (Murota & Hirade, 1981). Este modulador tiene gran importancia pues las características transferenciales del lazo se diseñan para mejorar los requerimientos en el espectro de potencia de la señal GMSK.

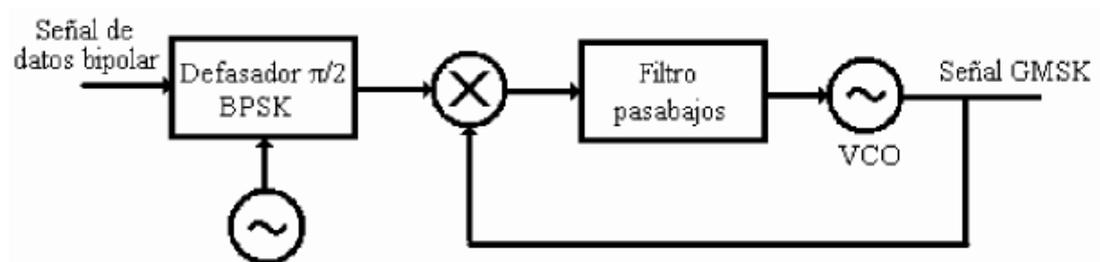


Figura 2. 10: Esquema en bloques del modulador de GMSK con PLL.
Elaborado por: Autor

2.7.2. Modulación en cuadratura.

La modulación en cuadratura es otro método efectivo que permite eliminar los inconvenientes de los sintetizadores de frecuencias. Este método consiste en separar la señal de pulsos moduladores gaussianos en dos señales independientes en cuadratura de fase. Las señales I (en fase) y Q (en cuadratura de fase) se mezclan de manera independiente, con dos

portadoras a la misma frecuencia y en cuadratura de fase. Las señales resultantes se suman obteniéndose la señal modulada en GMSK. La utilización de la modulación en cuadratura presenta como ventajas que su implementación es más sencilla, lo que simplifica los circuitos en los sistemas de radio digitales (Kostedt & Kemerling, 1995; Xiong, 2000). El esquema en bloques de este tipo de modulador se muestra en la figura 2.11.

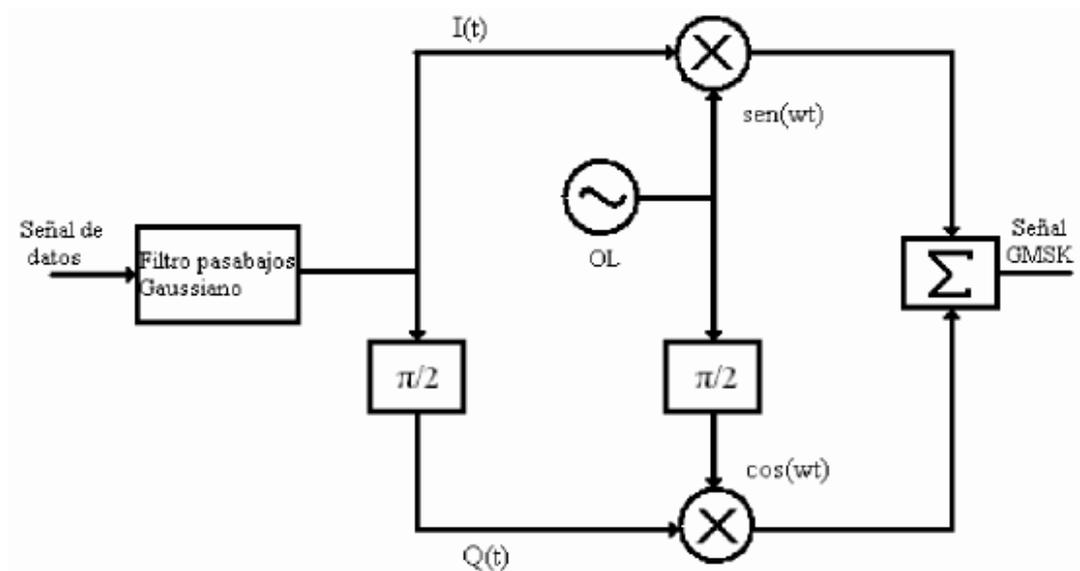


Figura 2. 11: Esquema en bloques del modulador de GMSK en cuadratura.
Elaborado por: Autor

En la práctica este método tiene grandes aplicaciones. Generalmente las señales en cuadratura de fase se generan digitalmente y son convertidas luego a sus equivalentes analógicos. La forma más eficiente para generar estas señales es almacenar tablas de encuestas (*lookup tables*) para cada una de las señales $I(t)$ y $Q(t)$ en dispositivos de memoria.

2.8. Detección de señales moduladas en GMSK.

La demodulación de señales GMSK, al igual que las demás variantes de modulaciones de fase continua, puede realizarse mediante métodos de detección coherente o no coherente. Los esquemas de detección coherente son por lo general más complejos de implementar, ya que requieren de mecanismos para recuperar la portadora de referencia y la señal de reloj. En cambio, en los mecanismos de detección no coherentes, no se necesita conocer información de la portadora, lo que los hace menos complejos circuitalmente. La menor complejidad circuital de los métodos de detección no coherentes se obtiene a expensas de un aumento de la probabilidad de error en el sistema (Elnoubi, 1986).

2.8.1. Detección coherente.

La detección de señales GMSK por métodos coherentes se realiza mediante la demodulación de las componentes en cuadratura de manera independiente. La señal modulada se hace pasar por un filtro pasa bandas con característica gaussiana, que limita en banda el ruido presente en la señal a la entrada del receptor. El valor del producto B/T del filtro de pre-detección se escoge para maximizar la relación señal a ruido de la señal e introducir un nivel de IIS despreciable. El valor óptimo para GMSK es $B/T=0.63$ (Murota & Hirade, 1981). La señal a la salida del filtro se mezcla con dos señales sinusoidales a la frecuencia de portadora y en cuadratura de fase, obteniéndose las señales $I(t)$ y $Q(t)$ en banda base.

Para la realización de los esquemas de detección coherente es necesario implementar un circuito que permita recuperar la señal de reloj y generar una portadora coherente en frecuencia y fase con la portadora que se empleó para modular los datos. La recuperación de la portadora y la señal de reloj es una tarea que presenta alta complejidad circuital, y se hace más difícil a medida que aumenta la velocidad de la señal de datos.

Uno de los métodos que más se emplea en la actualidad es el método de De Buda (1972). En este método la portadora de referencia se obtiene dividiendo por cuatro la suma de las dos frecuencias discretas, contenidas en la salida de un doblador de frecuencias, y la diferencia entre estas frecuencias permite recuperar la señal de reloj. En la figura 2.12 se presenta el diagrama en bloques del demodulador coherente ortogonal, que emplea el método de De Buda para generar una portadora coherente y recuperar la señal de reloj (Murota & Hirade, 1981).

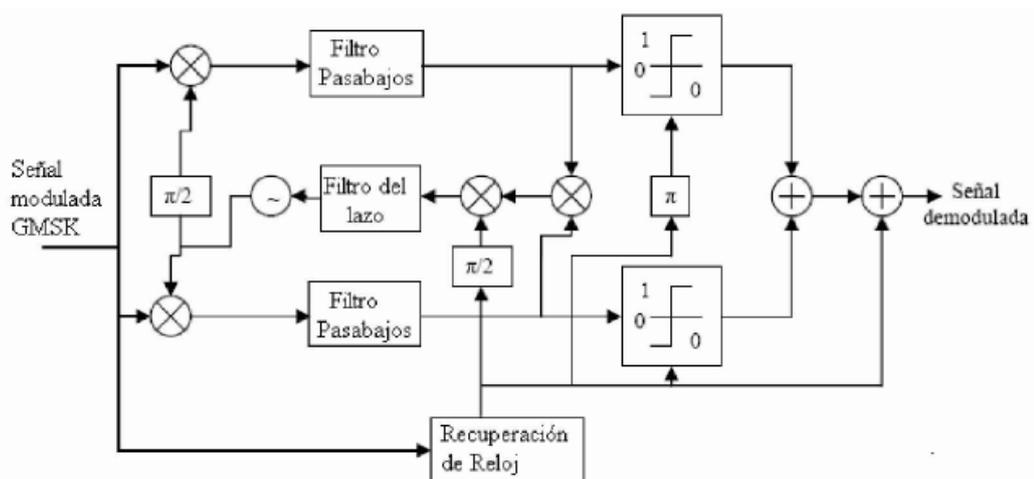


Figura 2. 12: Diagrama en bloques del demodulador coherente con recuperación de portadora. Elaborado por: Autor

Este tipo de demodulador puede ser implementado también empleando circuitos digitales como se muestra en la figura 2.13. En esta configuración los biestables tipo D actúan como los demoduladores de producto en cuadratura. Las portadoras en cuadratura son generadas utilizando dos biestables tipo D. La frecuencia central del VCO se fija para que sea cuatro veces la frecuencia central de la portadora. Este esquema es muy adecuado para su empleo en las estaciones móviles de radio, debido a que su implementación resulta simple, de pequeñas dimensiones y económica.

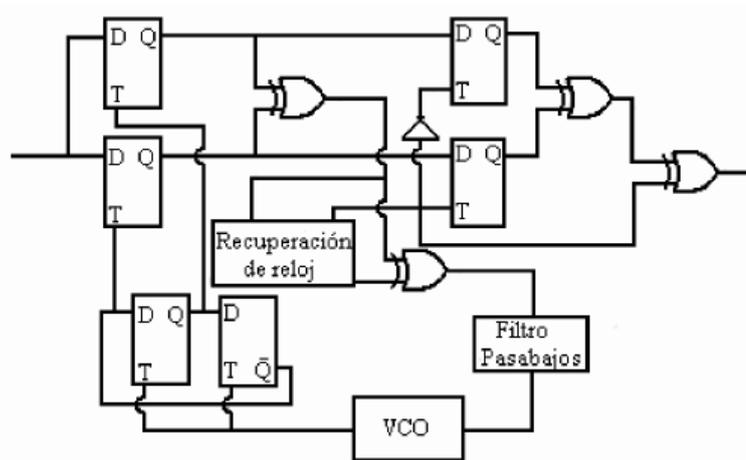


Figura 2. 13: Demodulador coherente con circuitos digitales.
Elaborado por: Autor

2.8.2. Métodos de detección no coherentes.

Las técnicas de demodulación no coherentes no requieren de conocimientos de la fase de la portadora en el receptor, lo que elimina la necesidad de emplear osciladores locales y circuitos para recuperar la portadora y la señal de reloj. Las técnicas no coherentes son generalmente menos costosas y más fáciles de implementar que las técnicas coherentes.

Existen varios tipos de circuitos que se pueden utilizar con estos fines tales como los discriminadores de frecuencia y los circuitos reguladores de fase. Sin embargo, los métodos de detección no coherentes presentan una degradación tasa de errores mayor que los métodos de detección coherentes. Para lograr una probabilidad de error de 10^{-4} , se requiere aproximadamente 3.5dB más de potencia de la señal en el caso de detección no coherente (Kostedt & Kemerling, 1995), respecto a lo requerido en la detección coherente, tal como se observa en la figura 2.14.

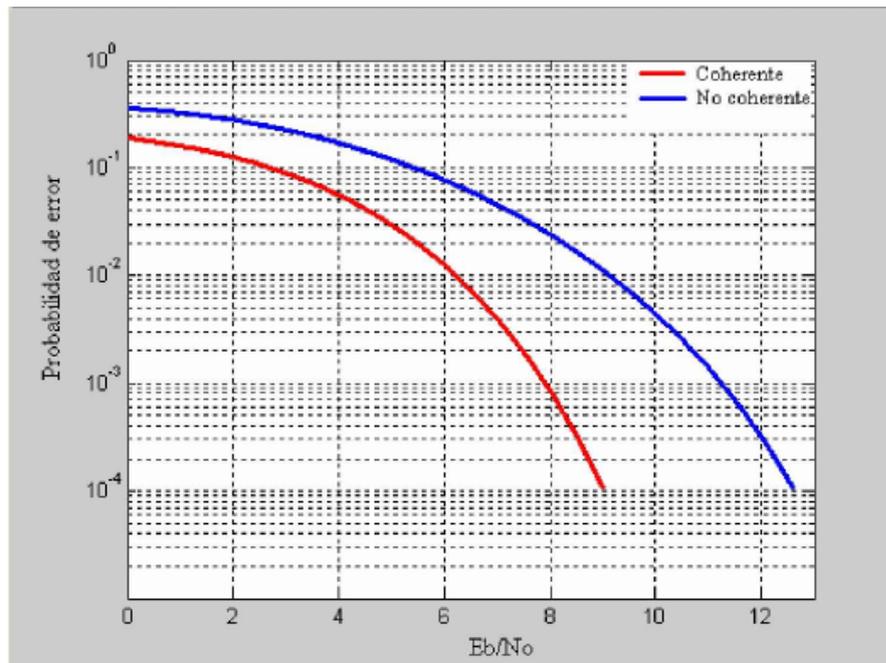


Figura 2. 14: Comportamiento de la Pe para detección coherente y no coherente de GMSK. Elaborado por: Autor, adaptado de (Kostedt & Kemerling, 1995)

2.9. Aplicaciones de la modulación GMSK.

Las buenas propiedades que poseen las señales GMSK, demuestran que este esquema de modulación digital es muy apropiado para su empleo

en sistemas de comunicaciones inalámbricas. GMSK se adoptó como el esquema de modulación que se emplea en el sistema de telefonía celular de segunda generación europeo GSM (*Group Special Mobile*) y el sistema general de paquetes por radio GPRS (*General Packet Radio Service*).

En el sistema GSM se emplea modulación GMSK con un índice de modulación $h=0.5$ y una velocidad de bits de 270.833 kbps, en la banda de los 900 MHz. El ancho de banda normalizado del filtro gaussiano es $BT=0.3$. En este esquema se emplean canales con un ancho de banda de 200 kHz, lo que resulta en una eficiencia espectral en el orden de 1,35 bit/s/Hz.

GMSK también se emplea en el sistema CDPD (*Celular Digital Packet Data*) de los Estados Unidos. Esta es una tecnología inalámbrica que se utilizó para permitir la transmisión de datos por conmutación de paquetes a través del equipamiento y el espectro existente para los sistemas de radiotelefonía móvil analógica AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*).

El sistema CDPD presenta canales de banda estrecha, donde a cada canal de radiofrecuencia se le asigna una portadora en la banda de 800 a 900 MHz. Cada canal tiene un ancho de banda de 30 KHz y puede alcanzar velocidades de datos de hasta 19,2 Kbps. En este esquema se emplea GMSK con un producto $B_bT=0.5$ del filtro de pre-modulación (Saha, 1997). Otros estándares de comunicaciones también utilizaron GMSK como

esquema de modulación entre los cuales se encuentran las redes PLC (*Power Line Communications*), para transmitir datos a través de las redes de energía eléctrica, y el muy conocido *Bluetooth*.

La implementación práctica de módems GMSK para su empleo en sistemas de comunicaciones, está relacionada directamente con los avances de las técnicas digitales para el procesamiento de señales. En la actualidad, gracias al desarrollo de la tecnología en este campo, se trabaja en la búsqueda de sistemas más eficientes y menos costosos. El análisis de las características de los distintos dispositivos existentes para el procesamiento de señales, permite evaluar las posibilidades de implementación de este tipo de módems en correspondencia con las características específicas de cada sistema.

CAPÍTULO 3: Desarrollo de simulación del sistema GMSK

En este capítulo será descrita una simulación en Matlab/Simulink versión 2014a de un sistema basado en GMSK compuesto de un transmisor de GMSK, el canal que contiene ruido aditivo gaussiano y el receptor GMSK. En varios puntos de la simulación colocaremos herramientas que ayudan en la visualización de características de la señal como diagramas de ojos y diagrama de constelación. En versiones modernas del software Matlab ya existe un bloque para realizar la modulación GMSK lo que facilita la simulación de sistemas que incluyen este tipo de modulación, antiguamente cuando no existía el mencionado bloque la simulación de GMSK tenía que ser hecha a través de componentes discretos del Simulink lo que aumentaba la complejidad computacional, el tiempo necesario para la simulación y la probabilidad de error durante el diseño.

3.1. Sistema simulado

En la figura 3.1 se muestra el sistema GMSK que ha sido desarrollado a través de la herramienta de simulación Matlab/Simulink. En los bloques de color violeta claro conforman el transmisor de GMSK. Los bloques de color verde claro conforman el receptor GMSK. En color rosa se encuentra el bloque que simula el canal de comunicaciones, en este caso es ruido blanco gaussiano aditivo. Finalmente, los bloques en amarillo claro son

herramientas, que permiten mostrar tanto gráfica como numéricamente características de la señal modulada usando el esquema GMSK.

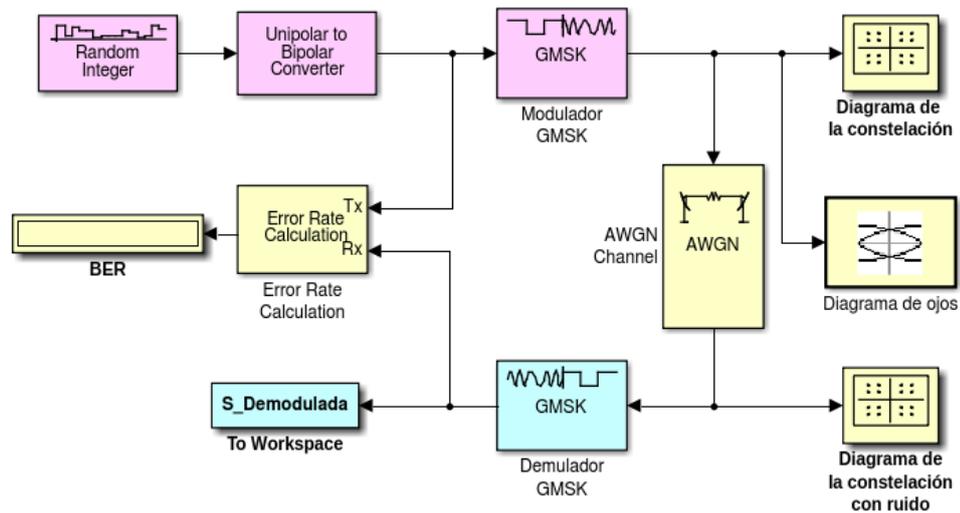


Figura 3. 1: Sistema GMSK simulado en Matlab/Simulink.
Elaborado por: Autor

3.2. Transmisor GMSK.

En la figura 3.2 se muestra el transmisor GMSK. A continuación se describirán cada una de las partes y se mostrara la onfiguracion interna de cada uno de los bloques.

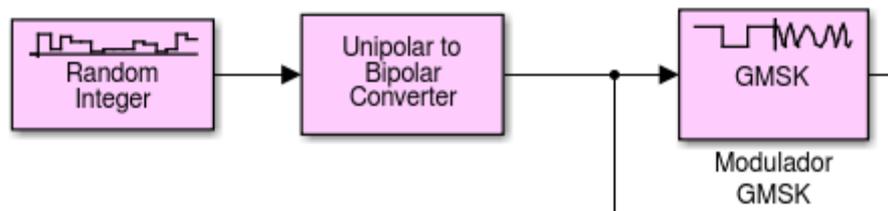


Figura 3. 2: Transmisor GMSK simulado en Matlab/Simulink.
Elaborado por: Autor

El bloque **Random Integer** sirve para generar números enteros aleatorios. En la figura 3.3. se muestra la configiración de este bloque, el

parámetro M-ary nos permite fijar el rango de valores enteros que podrán ser generados en este caso de desde 0 a 2-1, o sea 0 y 1. El parámetro *Initial seed* es un numero utilizado para generar la secuencia aleatoria.

El parámetro *Sample time* nos permite fijar el tiempo de muestreo, en este caso fue fijado a 1 (este valor debe ser anotado pues sera el que rija la velocidad de muestreo en toda la simulación). Se marcó el parámetro *Frame-based output*, esto quiere decir que la salida sera por muestras y no continúa. Finalmente el parámetro *Output data type* nos permite fijar el tipo de dato a la salida de este bloque, en nuestro caso un entero de 8 bits.

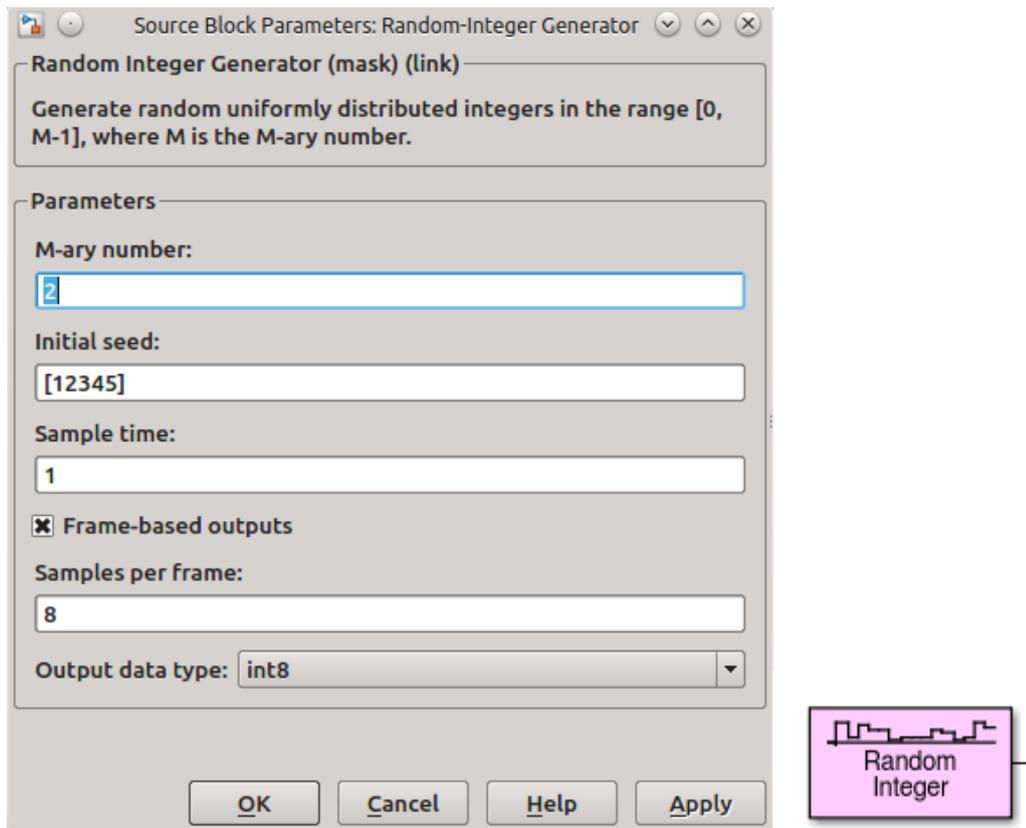


Figura 3. 3: Ventana de configuración y bloque Random Integer.
Elaborado por: Autor

El bloque **Unipolar to Bipolar Converter** tiene la función de convertir la señal de entrada de unipolar a bipolar. En la figura 3.4 se muestra la ventana de configuración, en ella es importante fijar el parámetro M-ary el cual debe tener el mismo valor que el bloque anterior en este caso 2.

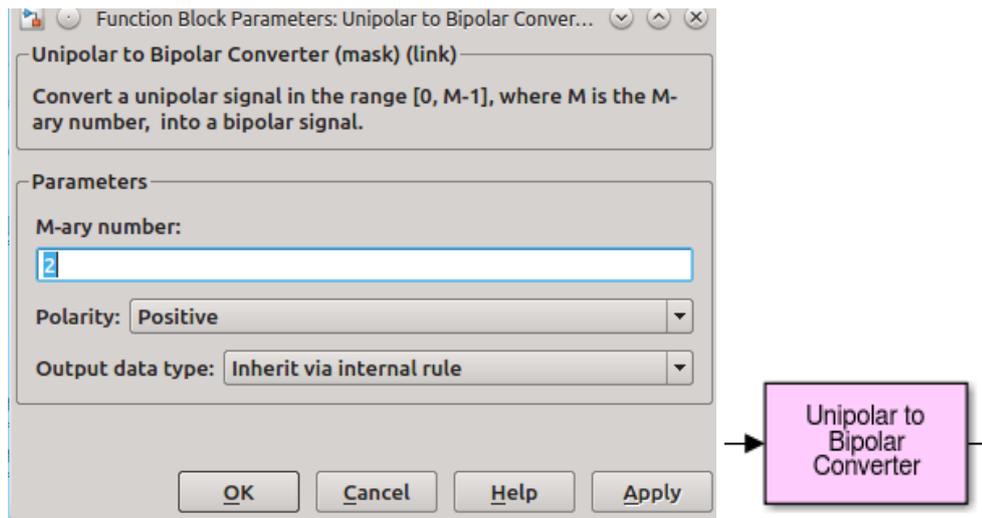


Figura 3. 4: Ventana de configuración y bloque Unipolar to Bipolar Converter.
Elaborado por: Autor

El bloque **GMSK** es el corazón del transmisor y es donde se realiza la modulación GMSK. En la figura 3.5 se muestra la ventana de configuración del bloque GMSK. El parámetro *Input Type* permite fijar el tipo de entrada que tendrá nuestro sistema, en nuestro caso lo fijamos a *Integer* pues el generador de números que colocamos anteriormente retorna números enteros.

El parámetro BT es lo mismo que la B_{bt} descrita en el capítulo anterior, como fue estudiado los valores más usados en la práctica son 0.25, 0.3 y 0.5, en nuestro caso utilizaremos 0.3. El parámetro *Pulse length* es la

duración del pulso durante la transmisión, en nuestro caso utilizaremos el valor de 3 el cual es uno de los valores recomendados en la ayuda de Matlab en lo referente al bloque GMSK. El ultimo parámetro que fijamos fue *Samples per symbol* este parámetro está relacionado con el parámetro *Samples per frames* del bloque *Random Integer*, en nuestro caso lo fijamos en 8 para que el modulador tome 8 números y conforme un símbolo para ser transmitido. El resto de parámetros se quedaron con los valores prefijados por el Matlab.

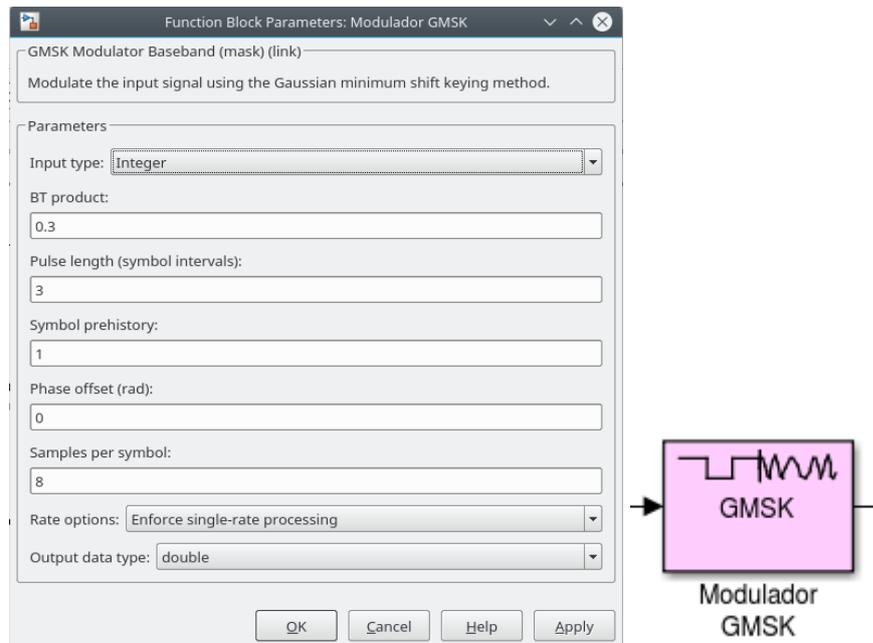


Figura 3. 5: Ventana de configuración y bloque GMSK.
Elaborado por: Autor

3.3. Canal de ruido blanco gaussiano blanco.

Para simular el canal utilizamos el bloque **AWGN** que simula un canal ruidoso adicionando ruido blanco gaussiano a la señal e introduciendo

atenuación de la misma. En la figura 3.6 se muestra la ventana de configuración del bloque AWGN.

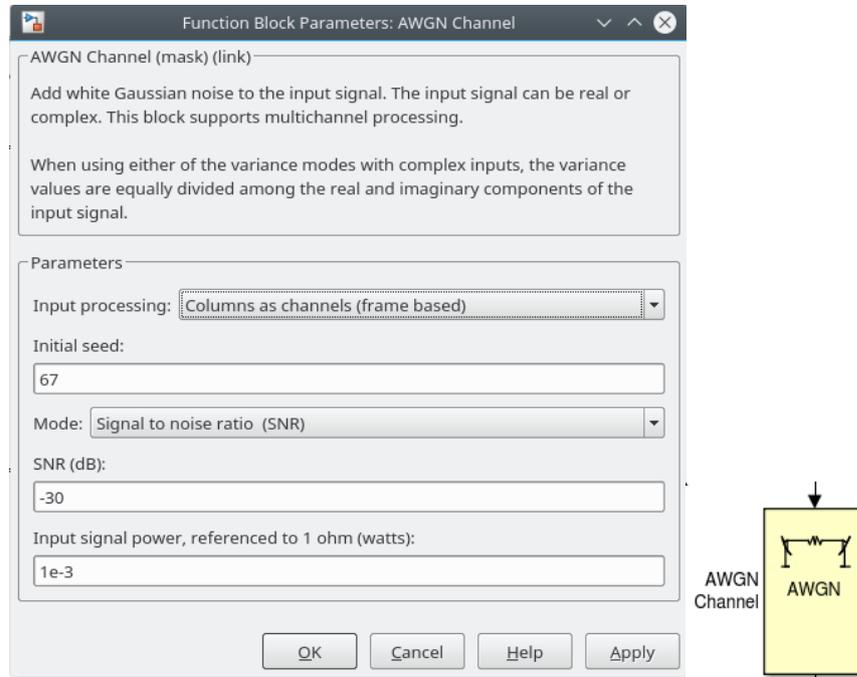


Figura 3. 6: Ventana de configuración y bloque AWGN.
Elaborado por: Autor

El parámetro *Mode* se fijó a *Signal to Noise Ratio* para especificar que a través de este tipo de medida era que ajustaríamos la cantidad de ruido en el canal. Para simular una señal de entrada similar a la que recibiría un receptor de un teléfono celular GSM el canal fue configurado con -30 dB de relación canal a ruido a través del parámetro *SNR* y para obtener el mismo efecto de recepción se introdujo una atenuación de la señal a través del parámetro *Input signal power* quedando con una potencia de 1×10^{-3} W referenciado a 1 ohm.

3.4. Receptor GMSK

En la figura 3.7 se muestra el receptor GMSK simulado usando Matlab/Simulink. A continuación, se describen los bloques que lo conforman.

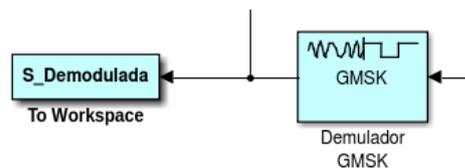


Figura 3. 7: Receptor GMSK simulado en Matlab/Simulink.
Elaborado por: Autor

El bloque **Demulador GMSK** como en el caso Modulador GMSK en el transmisor, es el corazón de receptor, como se explicó con anterioridad, debido a la popularidad alcanzada por este tipo de modulación, en las versiones más recientes del Matlab viene como un bloque predefinido, en el cual viene en forma de bloque predefinido donde se ajustan los parámetros principales de este tipo de modulación.

En la figura 3.8 se muestra la ventana de configuración de este bloque. Para realizar una recuperación exitosa de la información enviada los parámetros del demodulador GMSK deben ser configurados de la misma forma que en el modulador GMSK, los cuales fueron explicados en la sección referente el modulador GMSK. Un parámetro nuevo es *Traceback depth* que fija la cantidad de símbolos que se almacenaran antes de realizar una detección, lo que genera una demora de 16 muestras en la señal recibida.

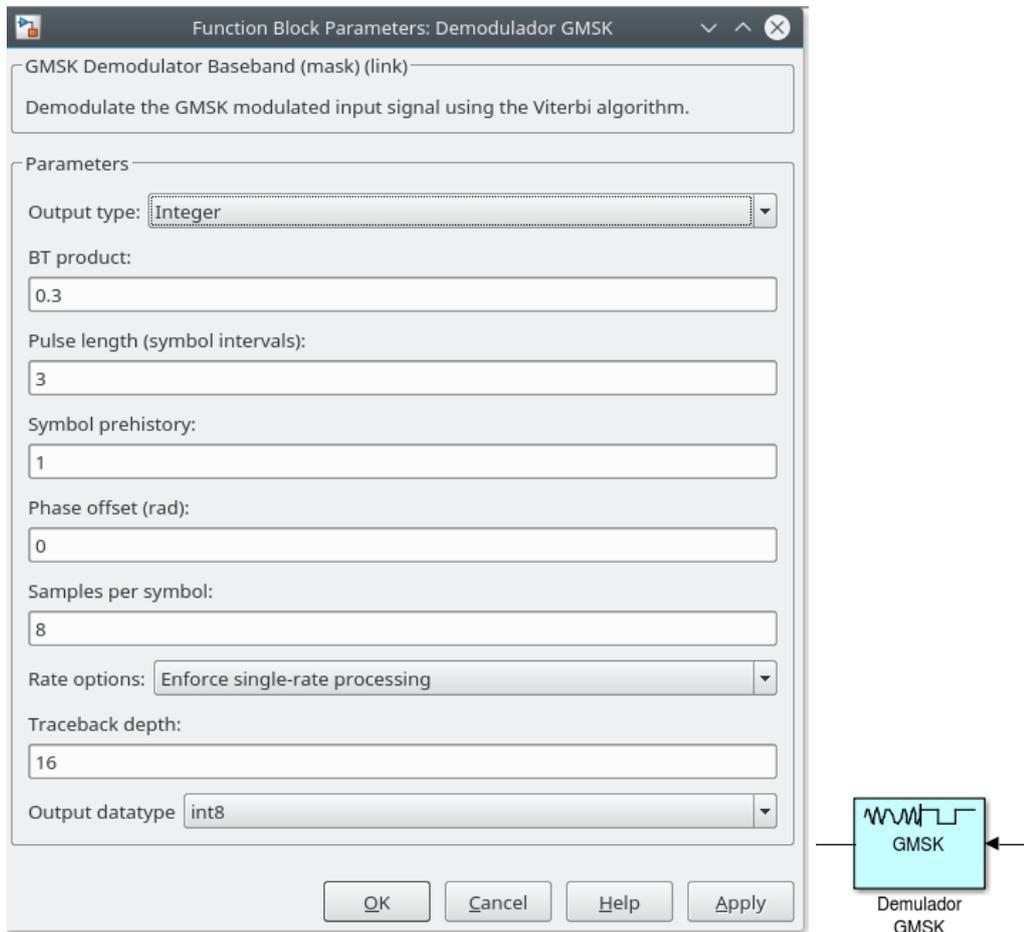


Figura 3. 8: Ventana de configuración y bloque Demulador GSMK.
Elaborado por: Autor

El último bloque en el receptor es **To Workspace** (véase la figura 3.9) el cual nos permite mandar al espacio de trabajo la señal a la salida del receptor.



Figura 3. 9: Bloque de salida del receptor To Workspace.
Elaborado por: Autor

3.5. Herramientas utilizadas

En la simulación del sistema GMSK fueron utilizadas varias herramientas disponibles en Matlab/Simulink con el objetivo de observar varias de las características de la señal modulada, así como de comprobar el buen funcionamiento del sistema simulado.

En la figura 3.10 se muestra el bloque **Diagrama de la constelación** el cual muestra la señal como un diagrama de dispersión de plano X-Y bidimensional en el plano complejo en instantes de muestreo de símbolos. En un sentido más abstracto, representa los posibles símbolos que pueden ser seleccionados por un esquema de modulación dado, como puntos en el plano complejo. Los diagramas de constelación medidos pueden usarse para reconocer el tipo de interferencia y distorsión en una señal.

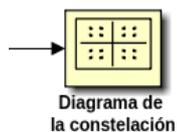


Figura 3. 10: Bloque Diagrama de la constelación.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.11 se muestra el bloque **Diagrama de ojos**, esta herramienta permite tener una idea grafica de la interferencia inter-símbolos en el sistema de telecomunicaciones, mientras más abierto se encuentre la estructura con forma de ojo menor será la interferencia inter-símbolos y viceversa.

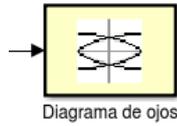


Figura 3. 11: Bloque Diagrama de ojos.
Elaborado por: Autor

En la figura 3.12 se muestran el bloque **Error Rate Calculation** y **Display**, el primero calcula la tasa de bit erróneo alcanzado durante el tiempo de simulación y el segundo muestra el valor calculado por el primero.

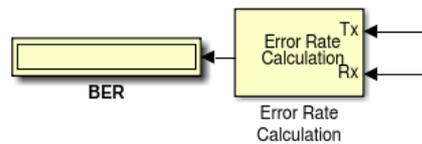


Figura 3. 12: Bloques Error rate calculation y Display.
Elaborado por: Autor

3.6. Simulación del Sistema GMSK

En este apartado mostraremos y realizaremos un breve análisis de los resultados de la simulación. En la figura 3.13 se observa la ventana del Simulink para la simulación del sistema GMSK. Hemos fijado un tiempo de simulación de 100000 durante el cual se podrá observar el comportamiento del sistema.

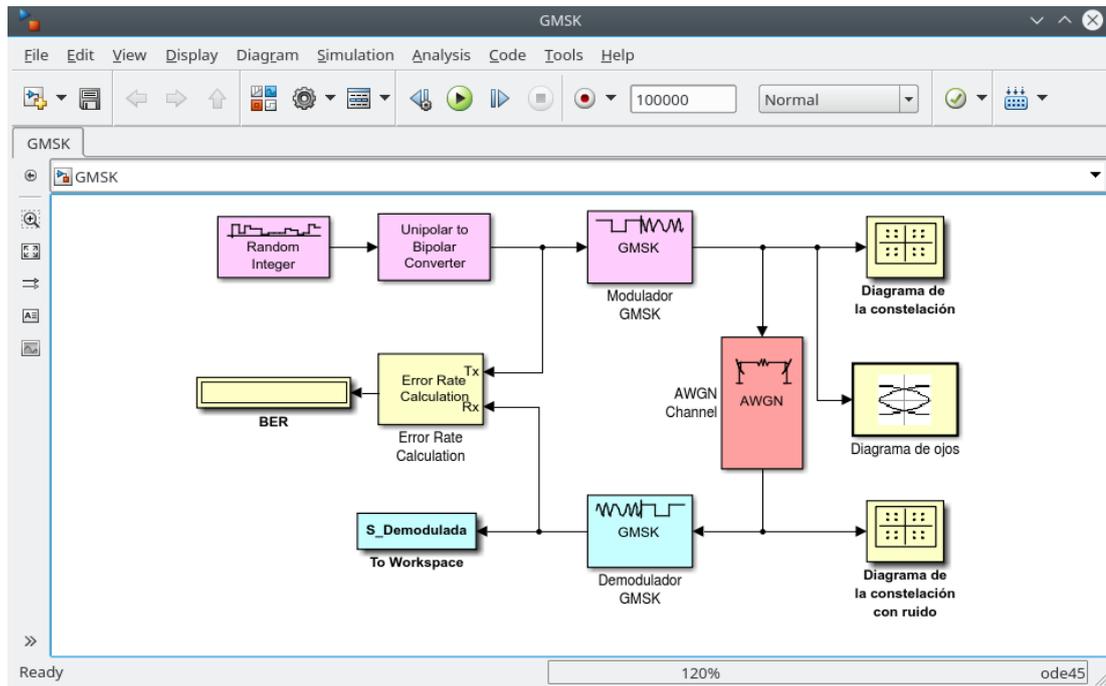


Figura 3. 13: Ventana del Simulink para la simulación del sistema GMSK.
Elaborado por: Autor

Al presionar el botón verde que da inicio a la simulación aparecen los diferentes gráficos de cada una de las herramientas que hemos colocado. En la figura 3.14 se muestra el diagrama de constelación GMSK a la salida del transmisor en el instante $T = 100000$ o sea en el último segundo de la simulación.

Mientras, que en la figura 3.15 se muestra el diagrama de constelación de GMSK a después de pasar a través del canal y a la entrada del receptor, puede apreciarse cuan distorsionada llega la señal.

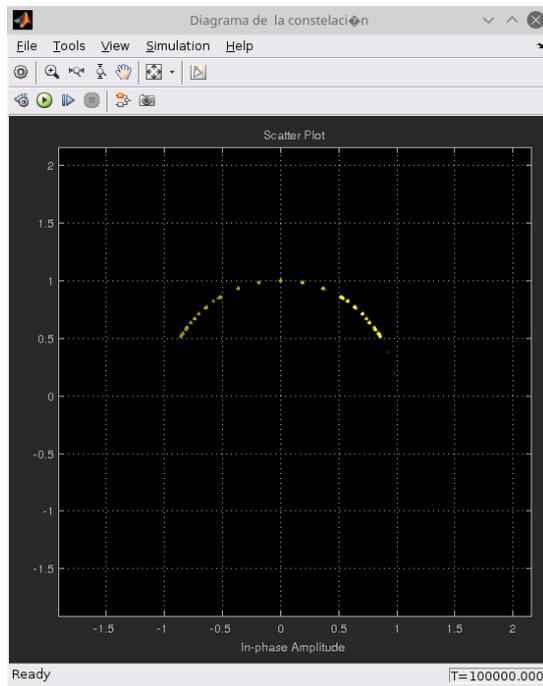


Figura 3. 14: Ventana del Simulink que muestra la constelación GMSK a la salida del transmisor.
Elaborado por: Autor

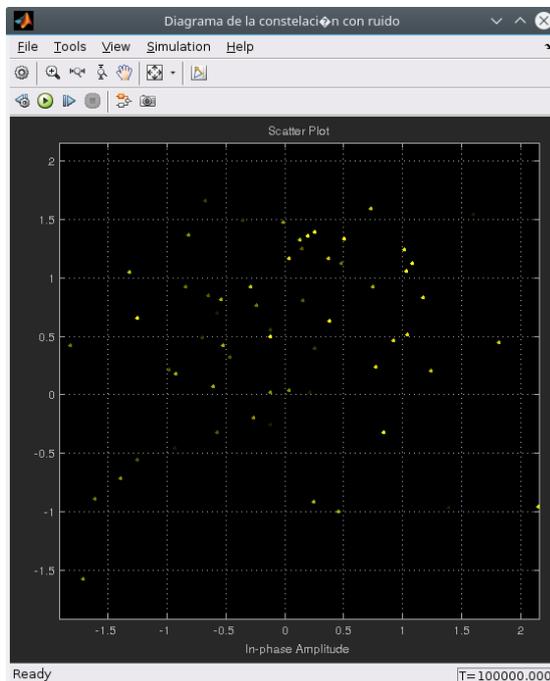


Figura 3. 15: Ventana del Simulink que muestra la constelación GMSK a la entrada del receptor después de salir del canal.
Elaborado por: Autor

En la figura 3.16 puede observarse el diagrama de ojo de la señal de GMSK a la salida del transmisor, como puede observarse el “ojo” tiene un tamaño mediano lo que quiere decir que la interferencia inter-símbolos no es tan fuerte.

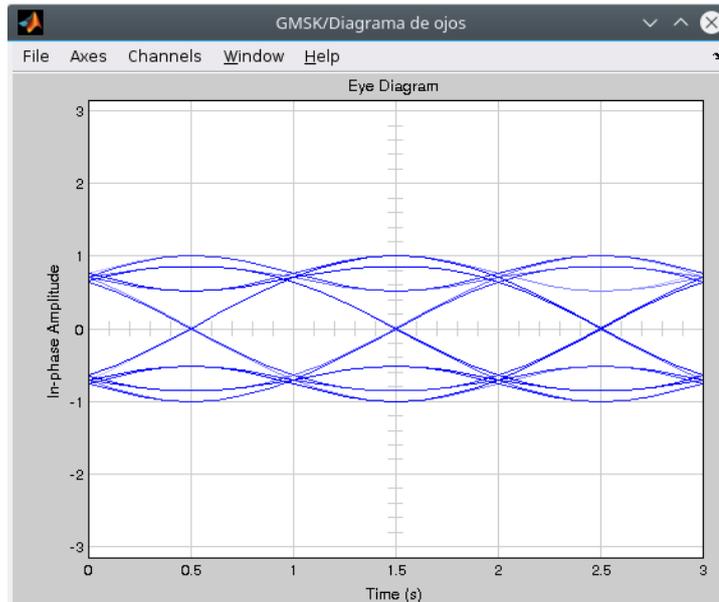


Figura 3. 16: Ventana del Simulink que muestra el diagrama de ojo de la señal de GMSK a la salida del transmisor.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.17 se muestra la ventana de simulación del Simulink después de correr la simulación de 100000 segundos, del computador donde se corra la simulación esta tardara más o menos, por ejemplo, en un computador con un procesador Intel Core I7 6700 con 8 Gb de memoria RAM la simulación dura aproximadamente 7 segundos.

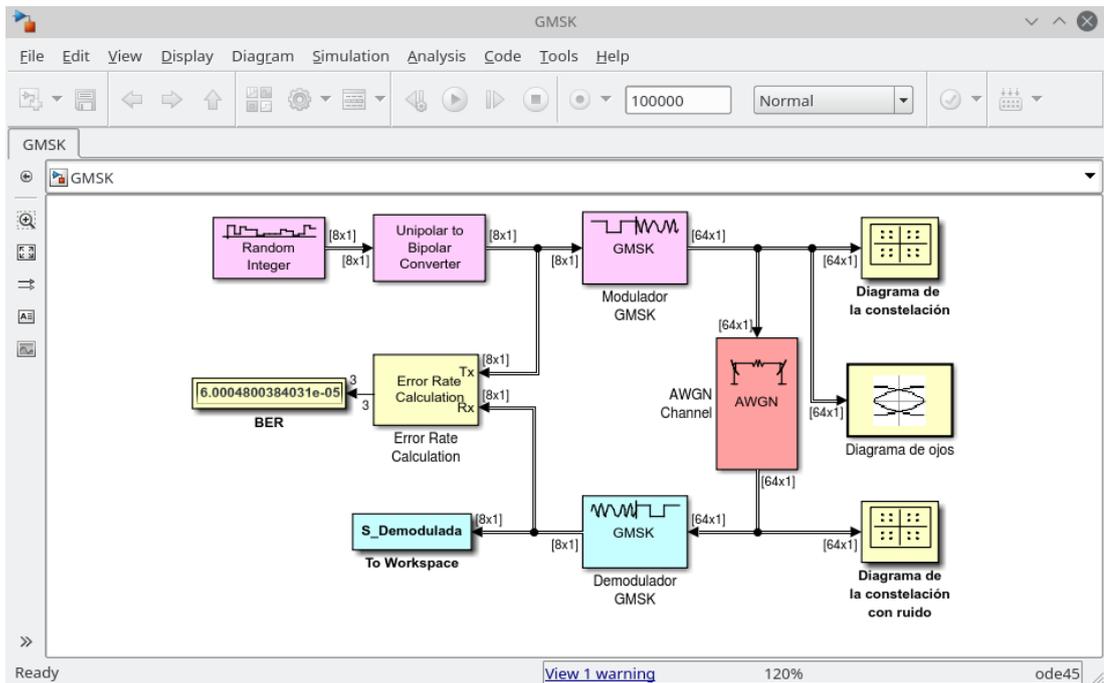


Figura 3. 17: Ventana del Simulink para la simulación del sistema GMSK despues de la simulación durante 100000 segundos.

Elaborado por: Autor

Es importante destacar que, a pesar de lo afectada que llega la señal al receptor como fue mostrado en la figura 3.15, el valor final de tasa de bit erróneo da aproximadamente 6×10^{-5} valor que concuerda con el valor esperado teóricamente.

CAPÍTULO 4: Conclusiones y recomendaciones.

4.1. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó un estudio sobre los aspectos teóricos y técnicos de la modulación GMSK a través de la consulta de la bibliografía técnica especializada, analizando los aspectos que influyen en el rendimiento de la misma.

También se realizó una simulación de un sistema GMSK utilizando Matlab/Simulink y mediante herramientas e instrumentos virtuales se pudieron observar las características de la señal modulada.

El sistema GMSK fue probado bajo las que condiciones similares a las que presenta un canal real de comunicaciones y los valores de tasa de bit erróneo son similares a los planteados teóricamente.

4.2. Recomendaciones

Realizar estudios investigativos para propuestas de trabajos de titulación en la que utilicen circuitos integrados avanzados para implementar a gran escala circuitos considerados relativamente complejos.

Ampliar el estudio del presente trabajo de titulación, utilizando bloques de codificación en el sistema para disminuir significativamente la tasa de error de bits (BER).

Bibliografía

- Anane, R., Raouf, K., & Bouallegue, R. (2015). On the evaluation of GMSK scheme with ECC techniques in Wireless Sensor Network. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 7(2), 17–28.
- Anupama, B., Chrashekhar, M. C., & Kurian, M. Z. (2013). Implementation of a GMSK Communication System on FPGA Using Distributed Algorithm. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Energy*, 2(6), 2519–2524.
- Benedetto, S., & Biglieri, E. (2006). *Principles of Digital Transmission: With Wireless Applications*.
- Carlson, A., Crilly, P., & Rutledge, J. (2002). *Communications Systems. An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communications*.
- De Buda, R. (1972). Coherent Demodulation of Frequency-Shift Keying With Low Deviation Ratio. *IEEE Transactions on Communications*, 20(3), 429–435. <http://doi.org/10.1109/TCOM.1972.1091177>
- Elnoubi, S. M. (1986). Analysis of GMSK with differential detection in land mobile radio channels. *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, 35(4), 162–167. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1623386/>

- Feher, K. (1987). *Advanced digital communications: systems and signal processing techniques*. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=523215>
- Glover, I., & Grant, P. M. (2010). *Digital communications*. Pearson Education.
- Govindaiah, P. K. (2012). Design and Development of Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) Demodulator for Satellite Communication. *Bonfring International Journal of Research in Communication Engineering*, 2(2), 06–11. <https://doi.org/10.9756/BIJRCE.1287>
- Kostedt, F., & Kemerling, J. (1995). Practical GMSK data transmission. *Wireless Design and Development*, 3(1), 21–25.
- Murota, K., & Hirade, K. (1981). GMSK Modulation for Digital Mobile Radio Telephony. *IEEE Transactions on Communications*, 29(7), 1044–1050. <http://doi.org/10.1109/TCOM.1981.1095089>
- Saha, D. (1997). Cellular digital packet data network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 46(3), 697–706. <http://doi.org/10.1109/25.618195>
- Xiong, F. (2000). Digital modulation techniques. In *Library* (pp. 1–40). Retrieved from <http://cds.cern.ch/record/1034954>



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **SAAVEDRA ROBLES, GUSTAVO XAVIER** con C.C: # 0922358791 autor del Trabajo de Titulación: **Esquema de modulación GMSK: Aspectos teóricos y simulación en MatLab Simulink** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, 16 de Marzo de 2017

f. _____
Nombre: SAAVEDRA ROBLES, GUSTAVO XAVIER
C.C: 0922358791

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	ESQUEMA DE MODULACIÓN GMSK: ASPECTOS TEÓRICOS Y SIMULACIÓN EN MATLAB SIMULINK		
AUTOR(ES)	SAAVEDRA ROBLES, GUSTAVO XAVIER		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. LUIS ORLANDO PHILCO ASQUI		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	16 de Marzo de 2017	No. DE PÁGINAS:	68
ÁREAS TEMÁTICAS:	Sistemas de Comunicación, Comunicaciones Inalámbricas		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Modulaciones digitales, MSK, GMSK, Módems, MatLab, Simulink		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>Para el desarrollo de simulación del sistema GMSK propuesto en el trabajo de titulación se describe las generalidades del proyecto que son: Antecedentes, Definición y Justificación del Problema a investigar, objetivo general y específicos, así como también, la hipótesis y la metodología de investigación. Dentro de las técnicas de modulación digital, caracterizadas por su eficiencia energética se encuentra el método conocido como GMSK. En el presente trabajo se realiza un análisis de los principales aspectos teóricos y técnicos de este importante método, así como de los parámetros fundamentales que influyen en su desempeño en sistemas de radio móviles. Además, se realiza una valoración de los principales métodos de realización práctica de módems GMSK con dispositivos para el procesamiento de señales digitales, teniendo en cuenta los requerimientos de velocidad y consumo de potencia de los sistemas móviles. Utilizando las herramientas del MATLAB/SIMULINK se realiza la simulación de los principales esquemas para la generación de señales GMSK.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-59881506	E-mail: gustavoxavier-1472@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-68366762		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
No. DE REGISTRO (en base a datos):			
No. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			