

# Estudio y comparación en eficiencia espectral y probabilidad de error de los esquemas de modulación GMSK y DBPSK

## Studying and comparing spectrum efficiency and error probability in GMSK and DBPSK modulation schemes

Juan Mario Torres Nova<sup>1</sup> y Hernán Paz Penagos<sup>2</sup>

### RESUMEN

GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) y DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) son dos esquemas de modulación digital usados frecuentemente en los sistemas de comunicaciones vía radio; sin embargo, existe interdependencia en el aprovechamiento de sus beneficios (eficiencia espectral, baja tasa de error de bit, baja interferencia intersímbolos, etc.); es decir, la optimización de un parámetro acarrea problemas en otro; por ejemplo, el esquema GMSK logra reducir el ancho de banda al introducirle un filtro gaussiano a un modulador MSK (*Minimum Shift Keying*) a cambio de incrementar la interferencia intersímbolos en el sistema. Por su parte, el esquema DBPSK obtiene menor probabilidad de error, ocupando mayor ancho de banda; así mismo, facilita la transmisión de los datos de forma síncrona debido al retardo de un bit que tiene el receptor al recuperar la señal.

**Palabras clave:** eficiencia espectral, modulación DBPSK, modulación GMSK, probabilidad de error.

### ABSTRACT

Gaussian minimum shift keying (GMSK) and differential binary phase shift keying (DBPSK) are two digital modulation schemes which are frequently used in radio communication systems; however, there is interdependence in the use of its benefits (spectral efficiency, low bit error rate, low inter symbol interference, etc). Optimising one parameter creates problems for another; for example, the GMSK scheme succeeds in reducing bandwidth when introducing a Gaussian filter into an MSK (minimum shift keying) modulator in exchange for increasing inter-symbol interference in the system. The DBPSK scheme leads to lower error probability, occupying more bandwidth; it likewise facilitates synchronous data transmission due to the receiver's bit delay when recovering a signal.

**Keywords:** spectrum efficiency, DBPSK modulation, GMSK modulation, error probability.

Recibido: marzo 10 de 2008

Aceptado: octubre 27 de 2008

### Introducción

El surgimiento de nuevas técnicas de modulación digital ha sido importante porque han evolucionado los sistemas de comunicaciones electrónicas a más servicios y mejor calidad de los mismos (Couch, 1998). Dos de los esquemas utilizados actualmente en comunicaciones inalámbricas son GMSK y DBPSK, debido a las facilidades que estas ofrecen en cuanto a su transmisión y recepción, eficiencia espectral y probabilidad de error.

El estudio de dichos esquemas de modulación MSK y PSK (*Phase Shift Keying*) mejorados se remonta a los años noventa cuando se buscaban mejores soluciones de acceso inalámbrico y aparecieron tecnologías como DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*), GSM (*Global System for Mobile communication*), PCS (*Sistema de Comunicaciones Personales*), etc., que investigaban sobre esquemas de modulación y codificación más eficientes; por ejemplo: en los años 1980–1989 nace el equipo de trabajo europeo "Group Special Mobile", que tuvo como objetivo estandarizar una norma digital única para Europa e introdujo el esquema GMSK; más tarde, en 1995 comienza a operar en América PCS 1900, y así, nuevas tecnologías y estándares abren el horizonte de

esquemas de modulación digital mejorados que ofrecen mayor eficiencia espectral, baja tasa de error de bit e interferencia intersímbolo controlada; se puede obtener mayor información en Lathi (1998) y Sklark (1993).

GMSK es un esquema de modulación derivado de MSK, el cual consiste en una modulación FSK (*Frequency Shift Keying*) modificado; tiene la particularidad de que la señal modulada no contiene discontinuidades en la fase, y la frecuencia cambia en el cruce por cero cuando cambian los datos de entrada (Stremler, 1989).

En los sistemas de modulación binaria de fase, la referencia de fase para la demodulación se deriva a partir de la fase de la portadora en el intervalo de señalización anterior, y el receptor decodifica la información digital basada en esa diferencia de fase (Carlson, 2002). Si las perturbaciones en el canal y otros factores como la estabilidad de los osciladores son lo suficientemente estables y no afectan la fase entre intervalos adyacentes, entonces la fase se puede codificar, no con respecto a un valor absoluto, por ejemplo, 0 grados para un "1" y 180 grados para un "0"; sino más bien por codificación diferencial en términos del cambio de fase entre intervalos sucesivos. Así, 0 grados de desfase desde el intervalo an-

<sup>1</sup> Ingeniero electrónico, Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", Colombia. Ingeniero de Implementación, ANDCOM Ltda, Colombia. jmtnov@gmail.com, jmtnov@hotmail.com

<sup>2</sup> Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Ingeniero electrónico, Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", Colombia. M.Sc., en Teleinformática, Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", Colombia. Ph.D. (c) Universidad Pedagógica de Colombia, Bogotá. Profesor, dedicación exclusiva, Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", Colombia. hpazster@gmail.com, hernan.paz@escuelaing.edu.co

terior puede designar un "1", mientras que un desfase de 180 grados puede designar un "0". Para solucionar este problema se emplea la modulación DBPSK.

En este artículo se resumen los aspectos más destacados de las técnicas de modulación GMSK y DBPSK, que son la representación de la señal en el dominio del tiempo, circuitos moduladores y demoduladores, ancho de banda y probabilidad de error. De los dos últimos aspectos se evaluó, en cada una de las técnicas mencionadas, su desempeño frente al ruido, y la eficiencia espectral frente a la limitación de ancho de banda del espacio libre; así mismo, se compararon y correlacionaron los rendimientos y eficiencias encontradas.

**Marco teórico**

GMSK es un esquema de modulación no lineal de fase continua que se basa en el filtrado de la modulación MSK por medio de un filtro gaussiano para evitar los cambios abruptos de la fase que se presenta en la modulación MSK. El filtrado convierte cada dato modulante que ocupa en bandabase un periodo de tiempo (T), en una respuesta en la que cada símbolo ocupa varios periodos, dependiendo del BT (producto ancho de banda – tiempo) del filtro. Sin embargo, dado que esta conformación de pulsos no cambia el modelo de la trayectoria de la fase GMSK se puede detectar coherentemente como una señal MSK, o no coherentemente como una señal FSK.

En la Figura 1 se ilustra cómo la fase se suaviza debido a la introducción del filtro gaussiano donde se pasa una secuencia de datos de 0 1 0 0 por el modulador.

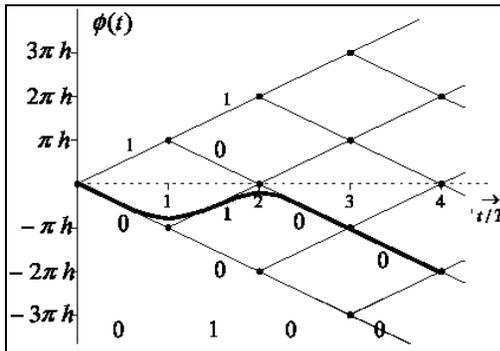


Figura 1. Diagrama de fase para GMSK (U. Sevilla, 2007)

En la práctica, GMSK es muy atractiva por su excelente eficiencia espectral de potencia. El filtro de premodulación introduce ISI (interferencia intersímbolos) en la señal transmitida, pero esta degradación no es grave si el parámetro BT del filtro es mayor a 0,3 porque en la medida en que se extienda el bit a varios periodos se tiene una mayor probabilidad de error al poder detectar el dato en la recepción.

La señal final GMSK se puede representar a través de una expresión matemática. Esta función está expresada en (1):

$$s(t) = \sqrt{2E_b T} \cos(2\pi f_c t + \theta(t) + z_0) \quad (1) \quad \text{(Laster, 1997)}$$

donde  $E_b$  es la energía de señal por bit y  $Z_0$  es una constante de fase aleatoria que puede ser asumida como cero ( $Z_0 = 0$ ).

La fase de la señal modulada está dada por (2):

$$\theta(t) = \sum_i m_i \pi h \int_{-\infty}^{t-T} g(u) du \quad (2) \quad \text{(Laster, 1997)}$$

donde  $m_i$  es la señal de datos NRZ (Non Return Zero), la cual tiene como valores 1 y -1. El índice de modulación  $h=0.5$  resulta en el máximo cambio de fase de  $\pi/2$  radianes por cada intervalo de datos.

Si se usa un modulador en cuadratura I y Q como el de la Figura 2, las señales I y Q banda base pueden ser creadas usando una red de cambio de fase.

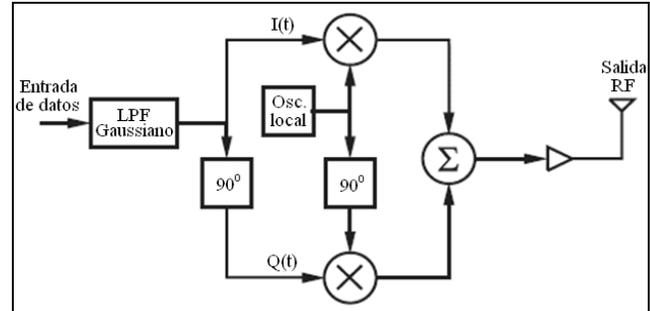


Figura 2. Diagrama de bloques del modulador I y Q

Esta red debe mantener una relación de 90 grados entre las señales I y Q para todas las frecuencias en la banda de interés. Las dos funciones resultantes  $I(t)$  y  $Q(t)$  son pasadas a través del modulador I/Q, el cual lleva a la salida la señal  $m(t)$  que es escrita como (3)

$$m(t) = \text{sen}(2\pi f_c t) I(t) + \text{cos}(2\pi f_c t) Q(t) \quad (3)$$

(University of Hull, 2007)

donde  $f_c$  es la frecuencia de portadora usada. La señal GMSK modulada  $m(t)$  está representada en la Figura 3.

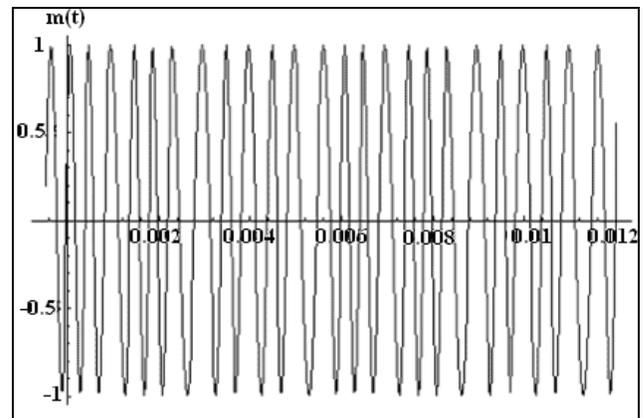


Figura 3. Salida de la señal modulada GMSK (University of Hull, 2007)

Una de las dificultades que presenta esta modulación es la complejidad de realizar tal esquema de modulación. El filtro gaussiano se implementa en un circuito digital donde se programa la función de transferencia de este. Además, realizar y sincronizar un esquema en cuadratura no es tarea fácil.

Actualmente la modulación GMSK es usada en técnicas de transmisión de datos como GPRS (General Packet Radio Service), que es un subsistema introducido en las normas de los protocolos GSM. GPRS ha introducido la conmutación de paquetes de datos dentro de las redes GSM y se destaca que GSM usa un BT de 0,3.

La técnica de modulación DBPSK es una forma alterna de modulación digital donde la información de la entrada está contenida en

la diferencia de las fases de dos elementos sucesivos de señalización y no en la fase absoluta. En cambio de esto se puede utilizar una técnica parcialmente coherente. También es importante que uno de los dos elementos de señalización recibido se retarda un intervalo de tiempo (demora de 1 bit), y que la diferencia de fase de los dos elementos determina la condición lógica de los datos.

La salida en tiempo de la señal DBPSK es igual a la de la modulación BPSK (*Binary Phase Minimum Shift Keying*), con la diferencia de que la entrada de los datos es diferencial. La expresión es la siguiente (4):

$$X_{DBPSK}(t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \cos(2\pi f_c t - \phi_i) \prod \left( \frac{t - nT_b}{T_b} \right) \right] \quad (4)$$

$$\text{donde } \phi_i = \begin{cases} 0 & \text{transmisión } 1 \\ \pi & \text{transmisión } 0 \end{cases} \quad (5)$$

(Briceño, 2005, pp. 397)

Para realizar una transmisión DBPSK se debe tener en cuenta el tipo de código de línea que se utilice debido a la diferencia del diseño del circuito. Para este tipo de modulación se utiliza el código NRZ y Manchester diferencial.

A continuación se muestra el esquema de un modulador DBPSK utilizando el código NRZ en la Figura 4.

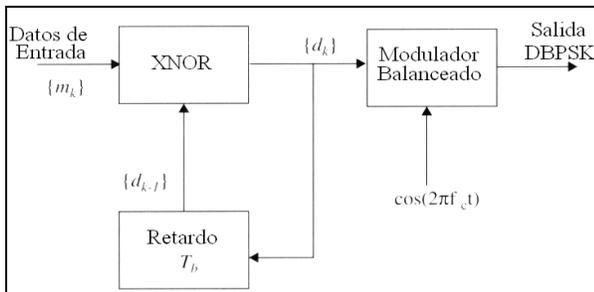


Figura 4. Modulador DBPSK usando código NRZ

Un bit de información que llega a la entrada del sistema de modulación se opera XNOR con el bit anterior, antes de entrar al modulador balanceado. Para el primer bit de datos no hay otro bit con el cual comparar y, en consecuencia, se supone un bit inicial de referencia. Para la secuencia de entrada 110100011 se tiene la señal modulada DBPSK de salida representada en la Figura 5.

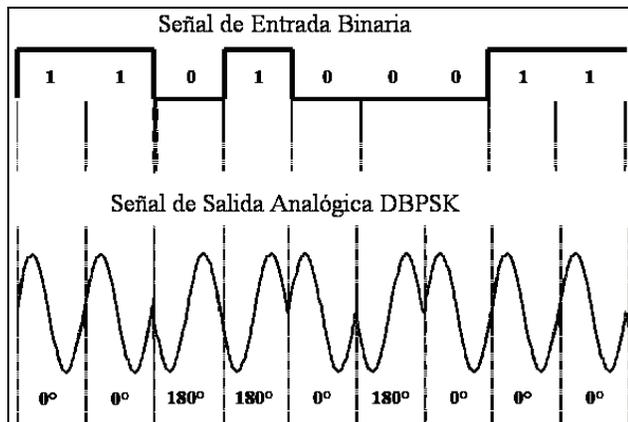


Figura 5. Entrada de datos binaria contra señal de salida DBPSK

Para diseñar un receptor DBPSK, se hace a través de un detector de producto. Este hace las veces de mezclador, con la diferencia de que a la entrada contiene un filtro pasabandas y el circuito regenerador de la señal. El esquema de un demodulador DBPSK se muestra en la Figura 6.

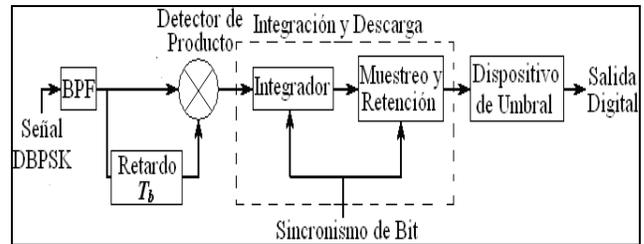


Figura 6. Receptor DBPSK

El detector de producto hace que la señal DBPSK de entrada tome valores positivos si se encuentran en fase, y negativos si presentan desfases. La salida del detector de producto se ilustra en la Figura 7.

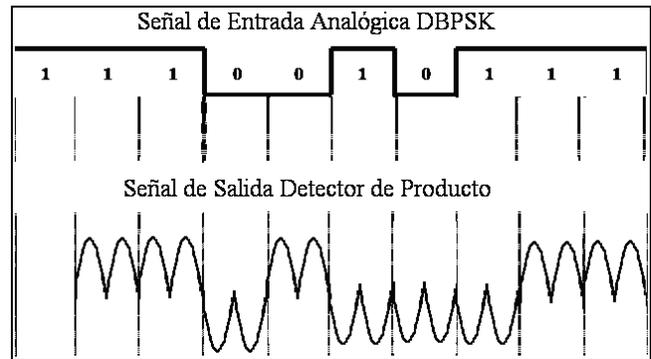


Figura 7. Señal de entrada DBPSK contra señal de salida de detector de producto

Realizar un esquema DBPSK es más simple que hacer un esquema GMSK, porque para la transmisión de DBPSK requiere de un sistema fácil de implementar, en comparación con el filtro gaussiano y el modulador en cuadratura. Además, en la recepción los elementos usados en DBPSK corresponden a un demodulador BPSK con la mejora del detector de producto; en cambio, el receptor GMSK usa un circuito complejo de implementar para poder detectar las señales de fase y cuadratura, y también poder compensar la ISI introducida por el modulador en la transmisión.

Como aplicación principal de la modulación DBPSK se tiene que es ampliamente utilizada en Wi-Fi (*Wireless Fidelity*). Wi-Fi es la tecnología utilizada en una red o conexión inalámbrica para la comunicación de datos entre equipos situados dentro de una misma área (interior o exterior) de cobertura. Conceptualmente, no existe ninguna diferencia entre una red con cables (cable coaxial, fibra óptica, etc.) y una inalámbrica. La diferencia está en que las redes inalámbricas transmiten y reciben datos a través de ondas electromagnéticas, lo que supone la eliminación del uso de cables y, por tanto, una total flexibilidad en las comunicaciones.

### Medidas de rendimiento de los esquemas de modulación GMSK y DBPSK

Por el hecho de usar un filtro gaussiano en la señalización GMSK, se obtiene un efecto en la probabilidad de error de bit, BER (*Bit*

Error Rate) en el sistema, pero realmente es mayor la ventaja del mejoramiento de la eficiencia espectral que el aumento de la BER.

Para un sistema GMSK la BER está representada en (6):

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\alpha E_b}{2 N_0}} \right) \quad (6) \quad (\text{Haykin, 2001})$$

Donde  $\alpha$  es un valor constante que depende del BT de filtro gaussiano. Cuando  $\alpha$  tiene un valor de 2, corresponde a un BT igual a infinito, y cuando el BT = 0,3, el valor de  $\alpha$  es de 0,9. Para entender mejor este concepto, se tiene que la degradación del sistema debido al filtro gaussiano está dado por (7):

$$\text{Degradación (dB)} = 10 \log \left( \frac{\alpha}{2} \right) \quad (7) \quad (\text{Haykin, 2001})$$

Al elaborar una gráfica del BT del filtro contra la degradación de la señal, se obtiene la Figura 8.

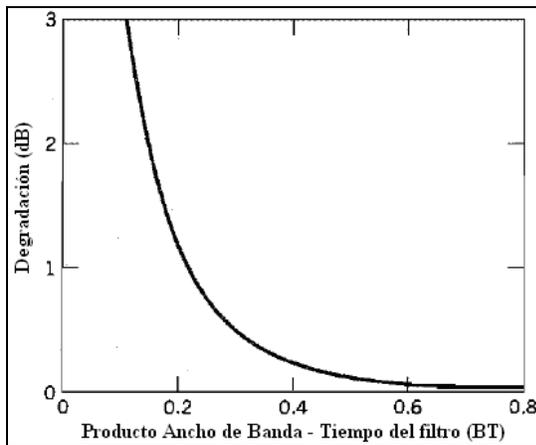


Figura 8. Esquema BT contra degradación de la señal, (Haykin, 2001, pp. 399)

Se puede notar que para BT inferiores a 0,3 la degradación de la señal es bastante, por lo tanto, es difícil recuperar la señal transmitida.

Del mismo modo, al realizar la gráfica de la ecuación (6), que relaciona la probabilidad de error del sistema GMSK para cualquier valor de BT, se tiene que la BER para el sistema GMSK con BT = 1, BT = 0,5 y BT = 0,3 está representada en la Figura 9.

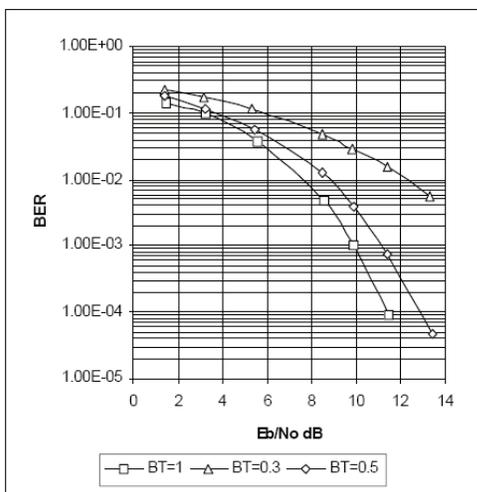


Figura 9. BER para GMSK con BT=0.3, BT=0.5, BT=1 (Plextek, 2007)

En la Figura 9 se puede ver que la probabilidad de error para el sistema GMSK es más crítico en cuanto BT disminuye. Se debe tener cuidado al momento de implementar el sistema GMSK por su sensibilidad al ruido.

La BER para la modulación DBPSK puede ser derivada de las siguientes premisas:

-El ruido de entrada aditivo es blanco y gaussiano.

-La perturbación de fase de la señal compuesta más el ruido varían lentamente, así que la fase de referencia es una constante desde el intervalo anterior de la señalización hacia el intervalo presente.

-El oscilador del portador transmisor es lo suficientemente estable a fin de que la fase durante el intervalo presente de señalización sea el mismo que el del intervalo anterior.

Para un receptor óptimo de DBPSK la BER para la demodulación es (8):

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-(E_b/N_0)} \quad (8) \quad (\text{Couch, 1998})$$

La principal ventaja de GMSK es la eficiencia espectral mejorada y la amplitud constante. A continuación se mostrarán en la Figura 10 los espectros resultantes para tres BT en GMSK y para MSK (GMSK con BT = ∞).

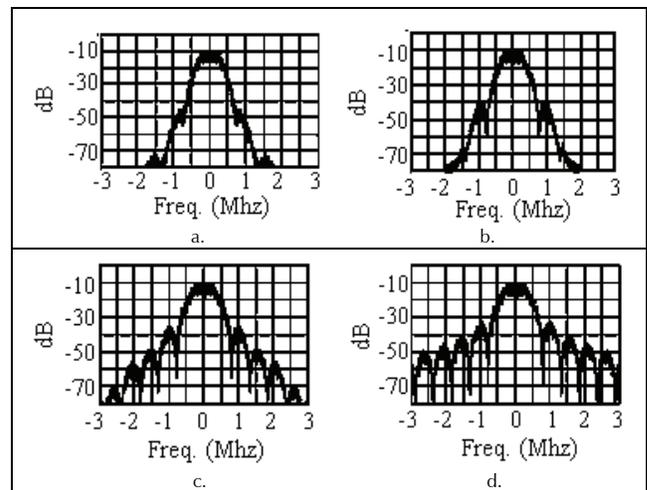


Figura 10. Comparación de espectros en frecuencia para una señal de datos. a) GMSK, BT = 0,3. b) GMSK, BT = 0,5 c) GMSK, BT = 1. d) GMSK BT = ∞ (Plextek, 2007)

Todas las formas de onda desplegadas sobre GMSK y MSK tienen la amplitud constante. Eso dice que su trayectoria de fase en cuadratura nunca deja el círculo unitario. Se puede apreciar que la modulación GMSK ocupa un menor ancho de banda que las señalizaciones DBPSK y MSK, lo que la hace con mayor eficiencia espectral. En la medida que el BT disminuye hasta 0, la eficiencia va mejorando, aunque hay que tener en cuenta la degradación del sistema.

Para poder observar el espectro en frecuencia de la señal DBPSK se puede decir que la salida DBPSK es igual a la expresión (9):

$$X_{DBPSK}(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (9) \quad (\text{Briceño, 2005, pp. 397})$$

Donde la señal A(t) es de tipo NRZ. De esta manera, la densidad espectral de potencia de la señal DBPSK será la siguiente (10):

$$S_{DBPSK}(f) = \frac{A^2 T_b}{4} \left[ \text{sinc}^2\left(\frac{f+f_c}{f_b}\right) + \text{sinc}^2\left(\frac{f-f_c}{f_b}\right) \right] \quad (10)$$

(Briceño, 2005, p. 398)

A continuación se muestra en la Figura 11 la densidad espectral de potencia de la señal DBPSK.

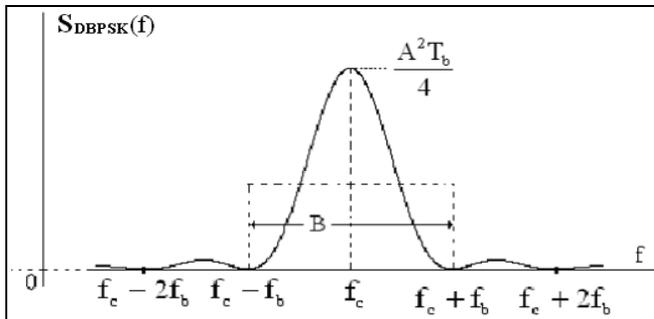


Figura 11. PSD de la señal DBPSK

La eficiencia espectral del sistema DBPSK está dada por la expresión (11):

$$\eta = \frac{R}{B} \quad (11)$$

donde R es la tasa de bits y B el ancho de banda utilizado. Para esa modulación se tiene que  $R = f_b$  y  $B = 2f_b$ , entonces la eficiencia espectral para este esquema de modulación será (12):

$$\eta = 0,5 \quad (12)$$

### Análisis, comparación y correlación de las dos técnicas anteriores desde la probabilidad de error y el ancho de banda

Para una señal de datos aleatorios que tiene una frecuencia de 1Mhz, se efectuó una modulación GMSK con tres BT (1, 0,5 y 0,3) con el software de simulación Matlab (Figura 12); de la misma manera, se elaboró el esquema DBPSK, donde se observaron los espectros en frecuencia y los diagramas de ojo para evaluar la eficiencia espectral y la probabilidad de error de cada una de las modulaciones.

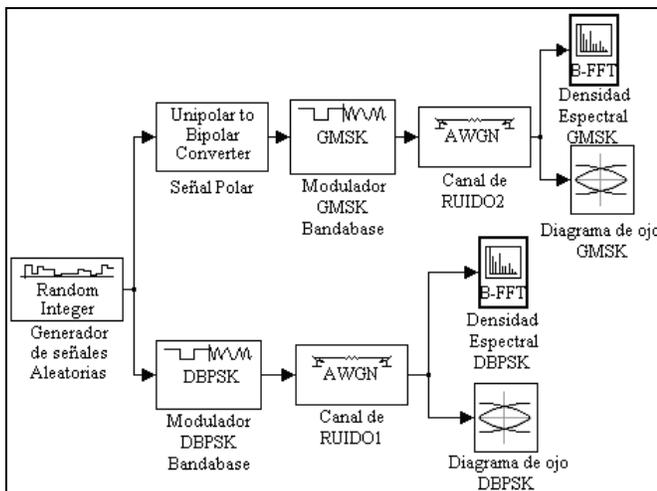


Figura 12. Esquema en Matlab para simular medidas de rendimiento de GMSK y DBPSK

En el diagrama de bloques anterior se tiene el generador de señales aleatorias, los moduladores GMSK y DBPSK, los canales de ruido, los analizadores de espectro y los simuladores de diagramas de ojo. Además, se cuenta con un convertidor de señal unipolar a polar debido a que GMSK usa este tipo de señales. El canal de ruido tiene como parámetro una relación señal a ruido a la salida del canal de 30 dB.

Luego de realizadas las modulaciones GMSK con tres parámetros de BT, y la modulación DBPSK, se simularon las densidades espectrales de potencia PSD (Power Spectral Density) de las modulaciones, que se muestran en la Figura 13.

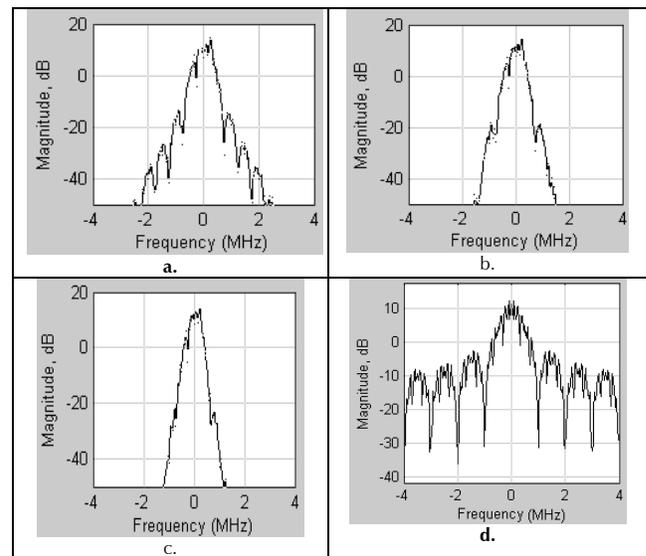


Figura 13. PSD para a) GMSK BT= 1, b) GMSK BT= 0,5, c) GMSK BT= 0,3, d) DBPSK

Nótese que para las modulaciones GMSK, en la medida en que el BT del filtro gaussiano disminuye, se requiere menor ancho de banda para la señal transmitida. En cambio, la modulación DBPSK presenta una PSD con lóbulos laterales bien definidos, lo que hace que el ancho de banda sea mayor. Para DBPSK el espectro es bastante expandido, en cambio para GMSK es más compacto. Esta es una de las razones por la cual se prefiere usar modulación GMSK con BT = 0.3 en los sistemas GSM en vez de la modulación DBPSK.

Del mismo modo, se elaboraron los diagramas de ojo de las modulaciones teniendo en cuenta los parámetros del BT del filtro Gaussiano para la modulación GMSK, y la modulación DBPSK para evaluar la dificultad de recibir las señales en el receptor y poder comparar la BER de ambos esquemas de modulación. Los diagramas de ojo de las modulaciones se ilustran en la Figura 14.

De acuerdo a los diagramas de ojo mostrados, se puede ver que, en la medida en que el valor del BT del filtro gaussiano va tendiendo a cero en la modulación GMSK, el diagrama de ojo se va cerrando, lo que hace que sea más difícil la sincronización y se tenga una mayor probabilidad de error. En cambio, la modulación DBPSK no presenta este tipo de problema. Eso se puede considerar como una desventaja de la modulación GMSK sobre DBPSK.

### Conclusiones

Aunque la técnica de modulación digital GMSK introduce ISI en la señal de entrada por el hecho de ensanchar el pulso a varios tiempos de bit, y a su vez trasladarlos unos con otros, se concluye que

si el BT del filtro gaussiano se encuentra entre 0,3 y 1, esta interferencia intersímbolos no es tan grave para la recuperación de la información. Por el contrario, la eficiencia espectral que se consigue al implementar el filtro gaussiano es mayor que la posible pérdida de información al contener errores. Por estas razones, la tecnología GSM utiliza esta técnica de modulación con un  $BT = 0,3$  para transmitir información, considerando que es posible perder información a cambio de ahorrar espectro.

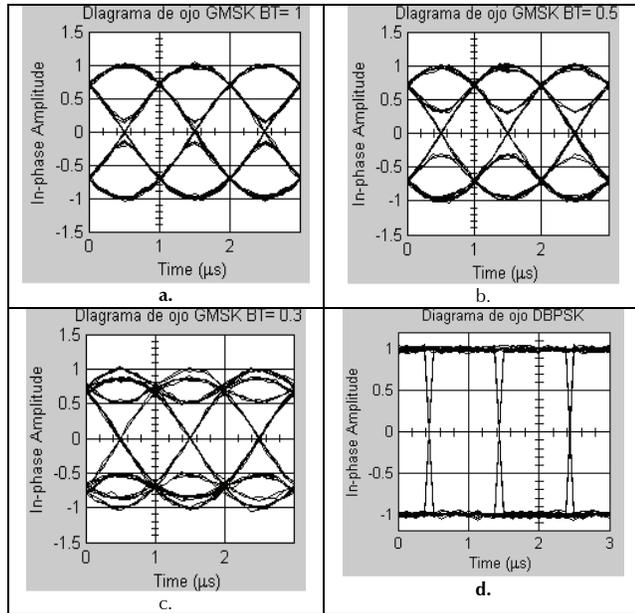


Figura 14. Diagrama de ojo de a) GMSK BT= 1, b) GMSK BT= 0,5, c) GMSK BT= 0,3, d) DBPSK

La técnica de modulación digital DBPSK tiene la gran ventaja de no requerir detección coherente. Además, al existir siempre un retardo equivalente a un tiempo de bit en el receptor, el sistema DBPSK siempre se encuentra en una frecuencia definida, lo que impide que la transmisión de datos se haga de forma asincrónica, y no se presenta la pérdida de información que sí tiene la modulación GMSK, pero el ancho de banda de esta modulación es casi el triple que el de GMSK con  $BT = 0,3$ , lo que hace que sea más ineficiente. La modulación DBPSK es ampliamente utilizada en comunicaciones inalámbricas como Wi Fi.

El trabajo de simulación en Matlab facilitó la comprensión de la eficiencia espectral de los esquemas de modulación GMSK y DBPSK por la representación gráfica; así mismo, permitió evidenciar el efecto del ruido en los datos de información a través del diagrama de ojo.

## Nomenclatura

BER	: Bit Error Rate
BPSK	: Binary Phase Shift Keying
BT	: Producto ancho de banda – tiempo
DBPSK	: Differential Binary Phase Shift Keying

DECT	: Digital Enhanced Cordless Telecommunications
$E_b$	: Energía de bit
FSK	: Frequency Shift Keying
GMSK	: Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	: General Packet Radio Service
GSM	: Global System for Mobile Communication
ISI	: Interferencia Intersímbolo
MSK	: Minimum Shift Keying
NRZ	: Non Return Zero
PCS	: Personal Communication System
PSK	: Phase Shift Keying
PSD	: Power Spectral Density
XNOR	: Compuerta OR Negada

## Bibliografía

- Briceño, J. E., Principios de las Comunicaciones., 3ra Ed, Edición digital, Taller de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes, Mérida, 2005, pp. 397–399.
- Carlson, B., Crilly, P. B., Rutledge, J. C., Communication Systems., Fourth Edition, Mc Graw Hill, United States, 2002.
- Couch II, Leon W., Digital and analog communication systems, 5ta Ed, Prentice Hall International, INC., Greenville, 1998.
- Haykin, S., Communication Systems., 4ta Ed, John Wiley & Sons, New York, 2001 pp. 396–400.
- Laster, J., Robust GMSK demodulation using demodulator diversity and BER estimation., Tesis presentada al Virginia Polytechnic Institute, Para optar al grado de Doctor of Philosophy, 1997.
- Lathi, B. P., Modern Digital and Analog Communication System, Third Edition, Oxford University Press, England, 1998.
- Plextek Ltd., Introduction to digital modulation schemes., [consultada el 12 de Septiembre de 2007] Disponible en <http://www.plextek.co.uk/papers/schmsv6.pdf>
- Skllark, B., Defining Designing, and Evaluating Digital Communication Systems., IEEE Comm. Magazine, Nov 1993, pp. 92–101.
- Stremmer Ferrel, G., Sistemas de comunicaciones (versión en español de la obra titulada: Introduction to Communication Systems., Second edition, publicada originalmente en inglés por Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading Massachusetts, E.U.A.), Fondo Educativo Interamericano, S. A., Alfaomega, 1989.
- Universidad de Sevilla., Radiación y Radiocomunicación. Tema 6. Comunicaciones Digital, Universidad de Sevilla., [consultada el 18 de Septiembre de 2007] Disponible en <http://viento.us.es/~murillo/docente/radio/documentos/tema6v2.pdf>. Consultada en Agosto del 2007.
- University of Hull., Appendix D – Digital Modulation and GMSK., [consultada el 21 de Septiembre de 2007] Disponible en: <http://www.emc.york.ac.uk/reports/linkpcp/appD.pdf>.