

## **Implementación en MatLab de Detector de Envolverte mediante la modulación Delta Sigma para señales BFSK**

*Erick Moisés Hernández Quiñones<sup>1</sup>, Jorge Torres Gómez<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Centro de Trabajo. Grado científico del primer autor email@servidor.dominio*

*<sup>2</sup> Centro de Trabajo, Grado científico del segundo autor email@servidor.dominio*

### **RESUMEN / ABSTRACT**

En el presente trabajo se abordan métodos de demodulación de señales BFSK, siendo el objetivo de estudio la aplicación del Detector de Envolverte con menos costo computacional y de hardware. Este objetivo es alcanzado con la aplicación de la modulación delta sigma en la implementación de los filtros del sistema, lográndose la implementación de aritmética con precisión de 1 bit. Se muestran ejemplos de implementación en MatLab y simulación del parámetro BER del demodulador.

Palabras claves: BFSK, delta sigma, Detector de Envolverte.

### ***Sigma Delta based Envelope Detector MatLab Implementation applied to BFSK signals***

*This paper addresses demodulation's techniques for BFSK signals, application of envelope detector with less computational and hardware cost is the objective. It is reached with filters based on sigma delta modulation in wich one bit arithmetic operation is performed. Simulations are illustrated by MatLab implemented algorithm and the obtaining of BER parameter.*

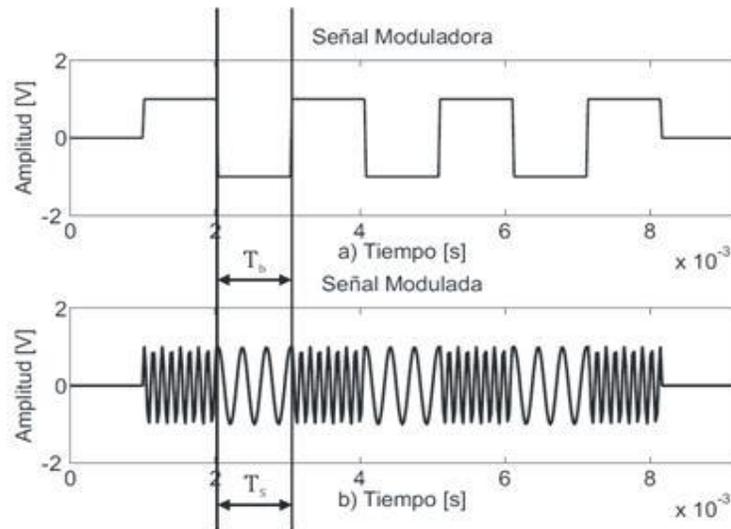
*Key words: BFSK, envelope detector, sigma delta.*

## **INTRODUCCIÓN**

Entre los distintos tipos de modulaciones digitales se encuentra la modulación BFSK (Binary Frequency Shift Keying), que se distingue por variar la frecuencia de una portadora entre solo dos valores en correspondencia con los dos símbolos posibles transmitidos por la fuente. En la figura 1 se muestra un ejemplo de modulación BFSK, esta transforma la figura 1 a) en la figura 1 b). Los símbolos transmitidos por la fuente se representan como la secuencia de pulsos rectangulares de nivel bajo y alto en la figura 1 a). La modulación asigna a un nivel de voltaje una componente de frecuencia, y otra componente al otro nivel. Se denomina tiempo de símbolo a la duración temporal de un símbolo transmitido y es igual al tiempo de bit en la modulación BFSK, dado que cada símbolo tiene longitud de un bit. En cambio la demodulación consiste en pasar de la figura 1 b) a la figura 1 a), se recibe una señal con dos componentes de frecuencia y se debe recuperar el nivel que representa cada símbolo transmitido.

Los demoduladores empleados para señales BFSK pueden ser agrupados según la necesidad de utilizar el Tiempo de símbolo en su esquema. Entre los que necesitan de este parámetro se encuentra el Detector de Correlación [1] el Demodulador Arco-tangente Diferencial (ADM) [2] y el Demodulador Digital Diferencial Cruzado Múltiple (DCDM) [3]. Entre los que precinden del Tiempo de símbolo se encuentra el Demodulador para BFSK basado en auto-sincronía [4], el Detector Diferencial [5], el Detector de Envolvente [1] y el demodulador que emplea el Filtro Adaptativo Notch [6-7].

Las señales BFSK que se abordan en el presente artículo no cuentan como una señal de sincronía con el tiempo de símbolo y no se conoce su valor, por este motivo se decide excluir el estudio de los métodos que no precinden de este parámetro, para su utilización se necesita de circuitos recuperadores de sincronía que pueden resultar altos consumidores de recursos. Entre los demoduladores que no emplean el Tiempo de símbolo se destaca el Detector de Envolvente, este no presenta un tiempo de convergencia como el caso del filtrado adaptativo y no necesita de implementar un retardador de difícil obtención como el caso del Detector Diferencial. No obstante cuenta con un elevado consumo de recursos de cómputo y hardware debido a la complejidad de las operaciones aritméticas que realizan y el número de bits involucrados en las mismas, un ejemplo lo constituyen los sumadores y multiplicadores necesarios para implementar los filtros FIR, donde las operaciones se realizan con señales de varios bits de precisión entre 12, 14, 16 o 32 bits en dependencia del conversor analógico digital empleado. Dicha característica justifica la búsqueda de soluciones menos costosas para demodular, siendo esta la esencia del Detector de Envolvente basado en la Modulación Delta-Sigma (MDS).



**Figura 1. Modulación BFSK. a) Símbolos transmitidos por la fuente. b) Modulación de la señal portadora, menor frecuencia para nivel bajo, mayor frecuencia para el nivel alto.**

#### DETECTOR DE ENVOLVENTE CON BASE EN LA MODULACIÓN DELTA SIGMA

Con el objetivo de reducir el consumo de recursos de hardware se modifica el circuito del Detector de Envolvente convencional para emplear operaciones aritméticas de un solo bit con MDS. El Detector de Envolvente se compone de dos ramas, cada una detecta la presencia de un símbolo de frecuencia alta o baja, en la figura 2 la rama superior detecta la envolvente del símbolo de menor frecuencia, la etapa de decisión compara las envolventes de cada rama para decidir según el nivel más alto el símbolo transmitido. Cada rama está compuesta de un filtro pasa-banda para filtrar el contenido espectral de cada símbolo seguido de un filtro paso-bajo para recuperar la envolvente de esta señal, ambos filtros se consideran de tipo FIR, la demodulación se realiza por la comparación de los niveles de voltaje de las ramas, si la rama superior presenta un nivel más alto entonces se decide por ese símbolo.

La principal transformación del esquema de la figura 2 al emplear MDS está dada por la sustitución de los filtros FIR pasa-banda por FIR pasa-banda ternarios [8-11], ver figura 3. El filtro ternario conforma en su salida una forma de onda similar al realizado por los filtros pasa-banda de la figura 2 con la precisión en bits según el convertor A/D empleado, la ventaja de emplear el filtro ternario en sustitución del filtro pasa-banda es que opera con multiplicadores de valor 0, 1 o -1, estos se convierten en compuertas que permiten “pasar” o no el bit codificado. El resto del esquema de la figura 3 está conformado por rectificadores, los cuales mantienen en su salida la entrada si esta es positiva, de lo contrario su salida es cero. Luego el bloque MDS codifica para realizar la comparación con el sumador en formato de un solo bit, este hace función del comparador de la figura 2. Esta salida codificada ahora cuenta con tres posibles niveles  $-2\Delta$ ,  $0$  o  $2\Delta$ , los cuales con el bloque de atenuación se convierten en secuencias de valor  $-\Delta$ ,  $0$  o  $\Delta$ . Por último se codifica con el bloque MDS para conformar una forma de onda con valores  $-\Delta$  o  $\Delta$  que representan la secuencia de bits transmitidos en la figura 1a) pero codificados con MDS, esta secuencia se decodifica con un demodulador delta sigma [12-13] (no representado en el esquema y

constituido por un filtro paso-bajo) y se recupera con precisión de punto flotante o punto fijo la información transmitida.

### Filtro FIR Ternario

La operación del filtro FIR ternario se basa al igual que el FIR convencional en la operación de convolución, la diferencia es que el ternario codifica con MDS la señal de entrada así como los coeficientes. La figura 4 muestra los bloques funcionales de este filtro, este indica la implementación en la forma directa I de la operación del FIR [14]. El procesamiento se realiza totalmente con la modulación delta sigma, la señal de entrada se codifica con un MDS de 1er orden dado por su sencillez en hardware y porque sus niveles de ruido de cuantificación son permisibles como se muestra en las simulaciones realizadas, el bloque MDS se muestra en la figura 5. La operación del filtro en la figura 4 indica el sobre muestreo R veces superior al de la razón de Nyquist, esto se realiza para controlar el ruido de cuantificación que introduce el bloque MDS mediante el comparador, los resultados presentados se obtuvieron para un valor de  $R=64$ .

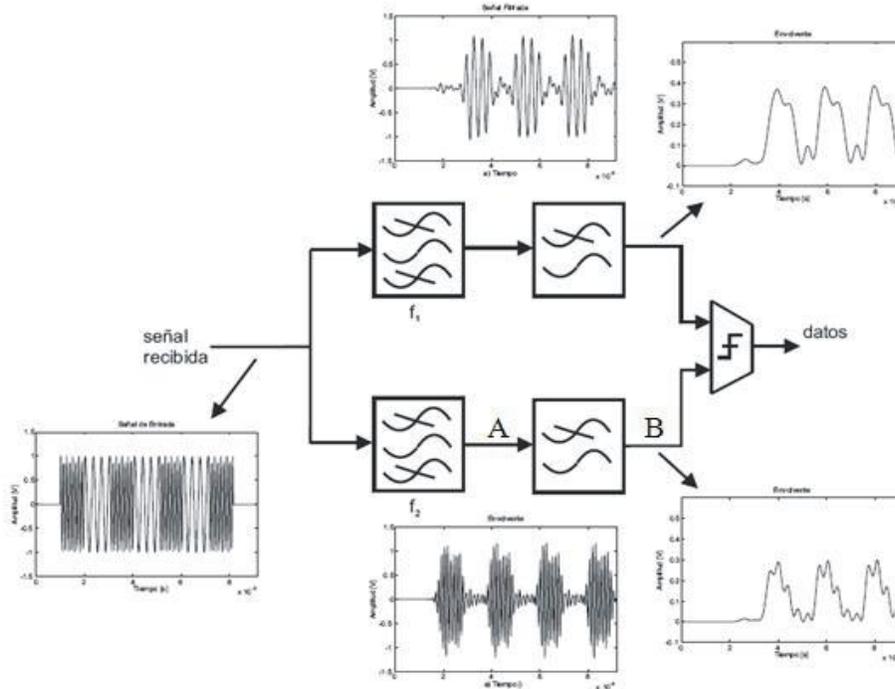


Figura 2. Esquema circuital del Detector de Envoltente.

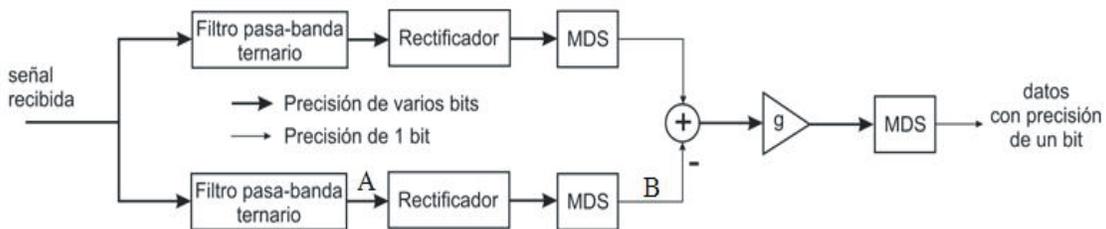


Figura 3. Diagrama en bloques del demodulador para BFSK con MDS.

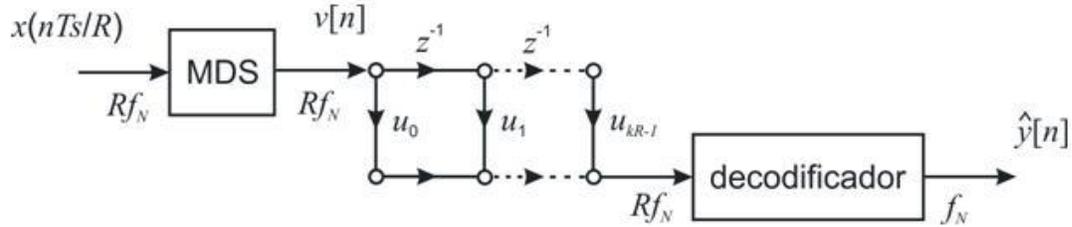


Figura 4. Esquema de filtro ternario FIR.

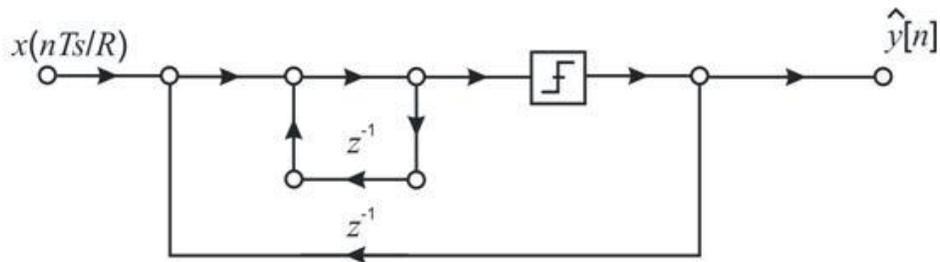


Figura 5. Esquema de un MDS de 1er orden.

Los coeficientes del filtro denotados por  $u_0, u_1, \dots, u_{KR-1}$  se obtienen por la aplicación del modulador de la figura 5 a la respuesta al impulso del filtro diseñado denotado por  $h_0, h_1, \dots, h_{K-1}$ , los coeficientes  $h_i$  pueden interpolarse con razón R o diseñarse el filtro con un total de KR elementos y no habrá necesidad de interpolar. La operación resultante de convolucionar las versiones codificadas según MDS  $(v * u)$  y sin codificar  $(x * h)$  difieren espectralmente como se indica en la ecuación 1) [11].

$$\begin{aligned}
 S_e(f) = & 4sen^2\left(\frac{\pi f}{Rf_N}\right) |A(f)|^2 S_\epsilon(f) \\
 & + 4sen^2\left(\frac{\pi f}{Rf_N}\right) |A(f)|^2 S_x(f) \\
 & + 16sen^4\left(\frac{\pi f}{Rf_N}\right) |A(f)|^2 S_\epsilon(f) \\
 & + 8sen^2\left(\frac{\pi f}{Rf_N}\right) \mathcal{R}\left\{A^*(f)A(f)\left(e^{\frac{j2\pi f}{Rf_N}} - 1\right)\right\} S_\epsilon(f) \quad 1)
 \end{aligned}$$

Donde:

$$S_e(f) = \mathcal{F}\{(v * u - x * h)[n]\}$$

$$A(f) = \mathcal{F}\{h[n]\}$$

$$S_\epsilon(f) = \mathcal{F}\{\epsilon[n]\}$$

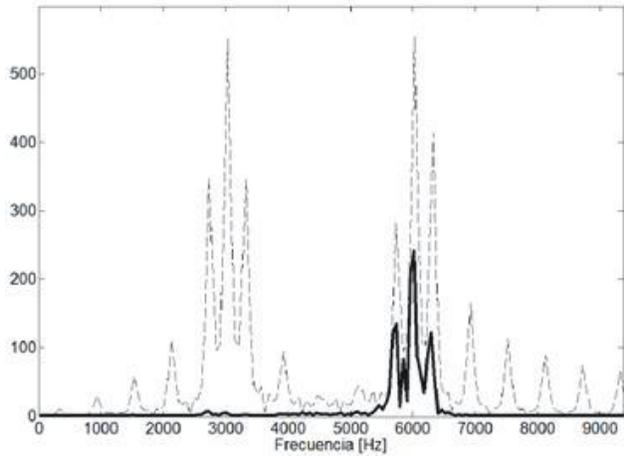
$\epsilon[n]$  error de cuantificación que introduce el comparador del esquema de la figura 5 cuando se codifica con MDS la señal recibida.

$$\Lambda(f) = \mathcal{F}\{\lambda[n]\}$$

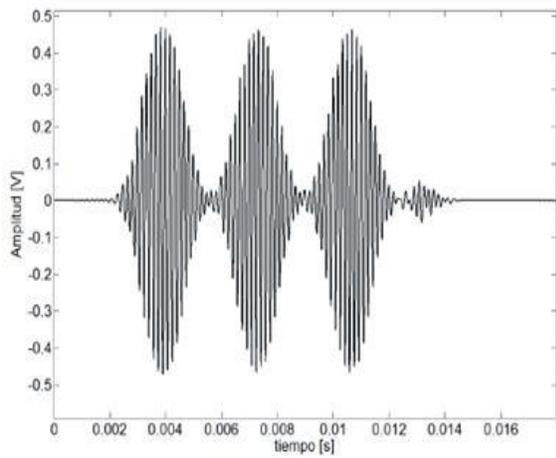
$\lambda[n]$  error de cuantificación que introduce el cuantificador de tres niveles (ternario) del esquema de la figura 5 cuando se codifica con MDS la respuesta al impulso del filtro FIR  $h_i$

De la relación 1) se puede observar que el término sinusoidal influye en el error de operación del filtro ternario en todos los sumandos, espectralmente  $S_e(f)$  será cercano a cero alrededor de las bajas frecuencias, donde el término  $h_i$  decide el rango, entre mayor sea este valor menores serán los errores de operación con el filtro de la figura 4.

Para validar el funcionamiento del filtro ternario programado en MatLab se muestran resultados en la figura 6 a), del espectro de la señal recibida mostrado en línea discontinua se suprime el contenido de las bajas frecuencias mostrado en línea continua. Este filtrado provoca temporalmente la supresión del tono a la salida del filtro como se muestra en la figura 6b), ahora los tonos quedan separados de tal forma que se puede proceder a la etapa de comparación de sus envolventes, se puede apreciar la similitud de los resultados en los puntos A de las figuras 2 y 3. El funcionamiento como Detector de Envolvente no es similar al de la figura 2, la comparación realizada en el punto B de la figura 2 es a partir de envolventes, mientras que la realizada en el punto B de la figura 3 es con formas de onda como las de la figura 6b). En realidad la detección de la envolvente se realiza con el decodificador que se coloque a la salida de la figura 3, este se conforma como filtro paso-bajo y se configura con una frecuencia de corte que recupere la envolvente de las ramas superior e inferior, la figura 7 muestra la recuperación de una secuencia alterna de niveles en alto y bajo.



A)



b)

**Figura 6. Operación del filtro FIR ternario. a) Componentes de frecuencia de la señal BFSK recibida (línea discontinua) y de la señal filtrada pasa-banda con el FIR ternario realizado con MDS donde se elimina la componente de 3000 Hz (línea discontinua). b) Señal obtenida a la salida de la rama inferior del demodulador, donde se aísla la componente de 3000 Hz con el filtro FIR pasa-banda ternario.**

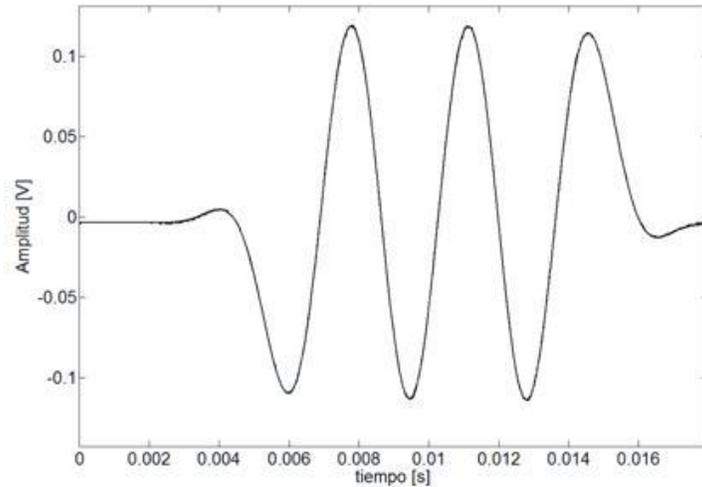
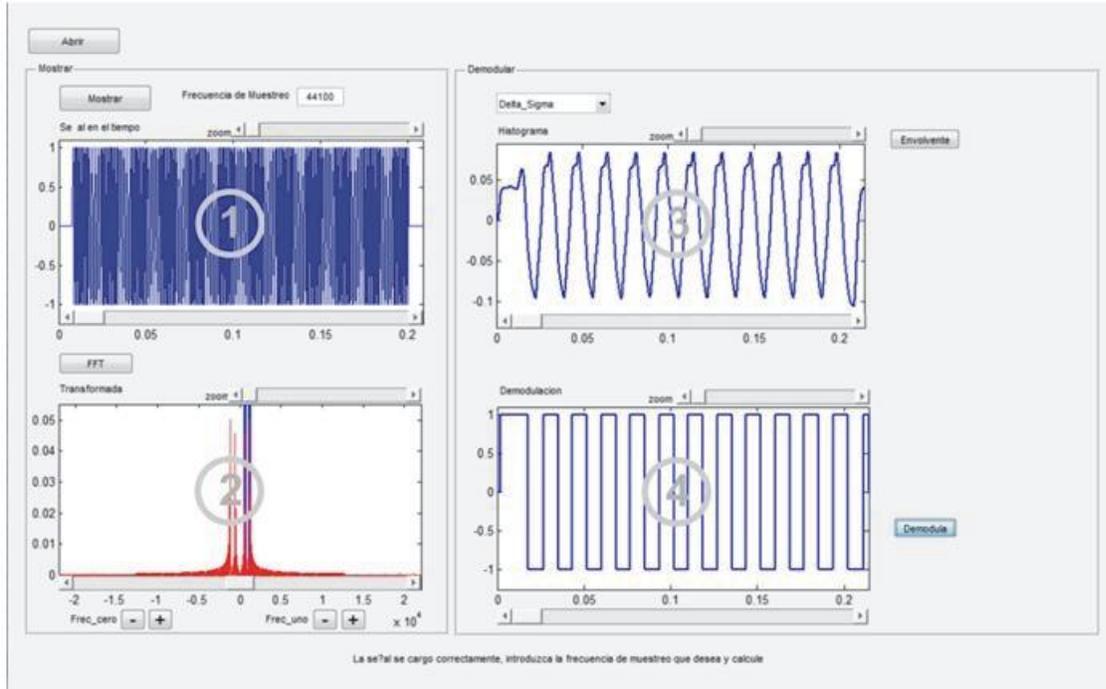


Figura 7. Envolvente capturada al filtrar paso-bajo la codificación obtenida a la salida del esquema de la figura 3.

#### PROGRAMACIÓN DE INTERFAZ GRÁFICA EN MATLAB DEL MÉTODO Y SIMULACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE BIT ERRÓNEO

El método descrito en la sección anterior se programó en una interfaz de usuario como la mostrada en la figura 8, esta interfaz de usuario consta de 4 gráficos para la visualización de las operaciones [15]. En el gráfico 1 se muestra la señal accedida por el botón Abrir y Mostrar con la frecuencia de muestreo que se indique manualmente, el gráfico 2 muestra la operación de transformada rápida de Fourier aplicada a la señal seleccionada, en donde se determinan de forma automática la dos componentes de frecuencia de la modulación, también está la opción de ajuste manual. Los dos valores de frecuencia recuperados del gráfico 2 se emplean para calcular los valores de del filtro pasa-banda de cada rama y estos se codifican para conformar los coeficientes a emplear en el esquema de la figura 4. La decodificación de la salida del demodulador de la figura 3 se muestra en el gráfico 3 mediante el botón envolvente y la demodulación se realiza con la implementación de un lazo de histéresis para obtener los resultados de la figura 4.



**Figura 8. Interfaz Gráfica de Usuario donde se muestra la implementación del Detector de Envolverte con base en la Modulación Delta-Sigma para unas señales BFSK.**

El método descrito se simuló en la herramienta bertool de MatLab para visualizar su desempeño frente al ruido blanco gaussiano, la figura 9 muestra los resultados obtenidos con puntos para las distintas relaciones señal a ruido, en línea continua se muestra la operación del receptor óptimo, las simulaciones se realizaron para bits transmitidos entre los  $0 \text{ dB}$  y los  $3 \text{ dB}$ , y bits transmitidos entre los  $0 \text{ dB}$  y los  $3 \text{ dB}$  de forma aleatoria con igual probabilidad para ambos símbolos. Se transmitió con símbolos de 3 000 y 6 000 Hz con un tiempo de símbolo de  $T_s = 30/3000 \text{ s}$ .

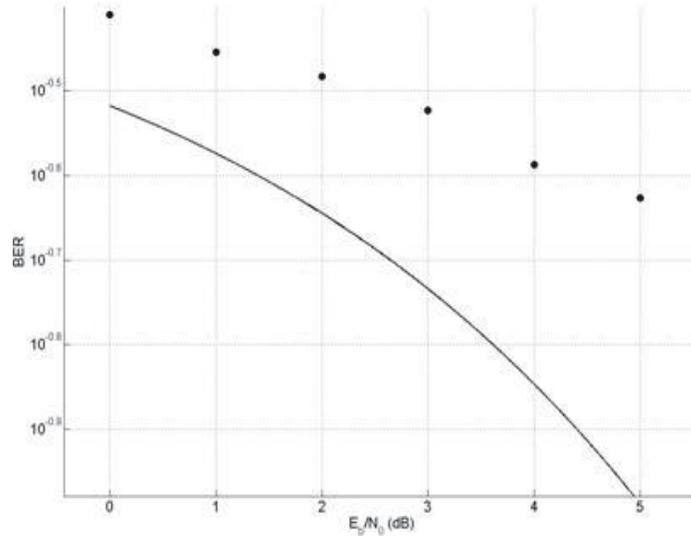


Figura 9. Simulación del parámetro BER del Detector de Envolvente con base en MDS.

La operación de demodulación se hizo en paquetes de 1000 bits transmitidos y con independencia de la sincronía con  $T_s$ , para esto se calculó la menor duración transmitida indicada en una secuencia del tipo 010 o 101 y se consideró que el 1 o el 0 representan la duración mínima de valor  $T_b = T_s$ , se procedió luego a la comparación de esta duración con los niveles detectados para recuperar el total de bits transmitidos en un nivel alto o bajo. Se decidió analizar en paquetes de 1000 para evitar errores de propagación y este número considera al menos 10 veces la probabilidad de ocurrencia del envío más pequeño en la secuencia 010 o 101.

La figura 9 indica que el receptor implementado opera de forma distante con respecto al receptor óptimo, el valor más alejado se obtiene para los  $5 \text{ dB}$  en el cual se ubica la probabilidad de bit erróneo en 0.1333 unidades por encima, lo cual equivale de forma aproximada a una pérdida de ganancia de  $4.5 \text{ dB}$ . Cabe destacar además que no se observaron errores en la recepción para 20 dB cuando se analizaron transmisiones de 5000 bits.

## Conclusiones

El Detector de Envolvente resulta la vía más directa de las técnicas que no requieren sincronía con el tiempo de símbolo para demodular señales BFSK, dado que no necesita de la convergencia de coeficientes para su funcionamiento, no obstante su aplicación en hardware puede resultar costosa. El resultado obtenido con MDS logra operaciones aritméticas con un solo bit en la operación de los filtros FIR pasa-banda, logrando una reducción en el consumo de hardware del sistema, por ejemplo el filtro para el procesamiento de la figura 6a) sin MDS requiere de 357 coeficientes de precisión punto fijo de 16 bits, mientras que empleando MDS se reduce a 139 coeficientes no cero de 1 bit de precisión que actúan como seguidores o inversores y no como multiplicadores. Se recomienda la aplicación de los resultados a filtros con mayor rapidez en la respuesta al paso unitario, la etapa final para la demodulación requiere del reconocimiento de las secuencias con envío elemental, en donde resulta importante determinar con la mayor precisión la longitud temporal de este envío.

## Referencias Bibliográficas

- 1- B. Sklar: Digital Communications, Fundamentals and Applications, Second Edition Ed. Prentice Hall, 2001
- 2- H. Elissa: "Arctan Differentiated Digital Demodulador for FM/FSK Digital Receivers" pp. 200-203, 2002.
- 3- S. Masaya: "Direct Conversion Receiver for 2 and 4 level FSK Signals" pp. 392-396, 1995.
- 4- R. Tervo and K. Zhou: "DSP based self-tuning BFSK demodulation": Communications, Computers and Signal Processing, Vol.1, 1993., pp. 68 - 71, IEEE Pacific Rim Conference on Victoria, BC, 1993,
- 5- K.-H. H. C.-K. Wang: "A cost effective binary FSK demodulator for low-IF radios ": VLSI Technology, Systems, and Applications, pp. 133 - 136, Proceedings of Technical Papers. 2001 International Symposium on Hsinchu, 2001,.
- 6- K. R. Kadambari, K.V.; Mallik, R.K.: "Demodulation of BFSK signals by adaptive digital notch filtering": Personal Wireless Communications, pp. 217 - 219, 2000 IEEE International Conference on Hyderabad, 2000
- 7- S. A. Nishimura, M.: "A lattice-based adaptive IIR notch filter and its application to FSK demodulation": Circuits and Systems, pp. 586 - 589, Proceedings. ISCAS 2000 Geneva. The 2000 IEEE International Symposium on Geneva.
- 8- A. C. Thompson, et al.: "Efficient single-bit ternary digital filtering using sigma-delta modulator": Signal Processing Letters, vol. 11, pp. 164-166, 2004.
- 9- S. S. S. M. Kershaw, M. B. Sandler, M. Anderson: "Realisation and implementation of a sigma-delta bit stream FIR filter": IEE Proceedings Circuits Devices and Systems, vol. 143, 1996.
- 10- A. H. Thompson, Z and O'Shea, P: "A single-bit digital non-coherent baseband BFSK demodulator ": Analog & Digital Techniques in Electrical Engineering, pp. 515 - 518 Vol. 1, TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference ), Chiang Mai, Thailand 2004.
- 11- P. W. Wong: "Fully sigma-delta modulation encoded FIR filters": IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 40, pp. 1605-1610, 1992.
- 12- S. R. Nosworthy, et al.: Delta-Sigma data converters: theory, design, and simulation, Ed: IEEE Press, 1997.
- 13- G. I. Bourdopoulos and A. Pnevmatikakis: Delta-Sigma Modulators: Modeling, Design and Applications, Ed: Imperial College Press, 2003.
- 14- A. V. Oppenheim, et al.: Discrete-Time Signal Processing, Second Edition, Ed: Prentice Hall, 1998.
- 15- E. M. H. QuiÑones, "Implementación en MatLab de un demodulador para BFSK mediante la modulación Delta-Sigma" Tesis en Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, CITI-CUJAE, CUJAE, La Habana, 2012.