

Transmisión de información a través de líneas eléctricas de potencia mediante multiplexación por división de frecuencias ortogonales

Power Line Communication by means of Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Andrés Mauricio Agudelo Ramírez^{1*}, Pablo César Bernal Gallo², Edwin Andrés Quintero Salazar^{3*}

¹ Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. *maucio_0719@hotmail.com

² Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. pablobernal84@gmail.com

³ Ingeniero Electrónico, Magíster en Instrumentación Física; Especialista en Pedagogía para la Docencia Universitaria; Profesor Asistente, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. *equintero@utp.edu.co

Fecha de recepción del artículo: 30/09/2010; Fecha de aceptación del artículo: 11/11/2010

Resumen

En este documento se presentan los resultados obtenidos al realizar la simulación de un sistema de transmisión de información sobre línea eléctrica de potencia (PLC), utilizando multiplexación por división de frecuencias ortogonales; en la herramienta *Simulink*®, del entorno de desarrollo integrado *Matlab*®. A partir de la representación informática del sistema, se observan las distorsiones introducidas por el canal en la señal transmitida, el espectro de la señal modulada utilizando la técnica mencionada anteriormente, y la tasa de error de bits medida en el receptor.

Palabras clave

Espectro, línea de transmisión, modulación, multiplexación.

Abstract

This paper presents the results obtained by the simulation of a system of power line communication (PLC), using orthogonal frequency division multiplexing, in *Simulink*® tool, of the integrated

development environment *Matlab*®. From the computer representation of the system, observe the distortions introduced by the channel on the transmitted signal, the modulated signal spectrum using the technique mentioned above, and the bit error rate measured at the receiver.

Keywords

Spectrum, transmission line, modulation, multiplexing.

Introducción

Actualmente, la importancia de las comunicaciones se ha incrementado considerablemente, pues el acceso a los medios de transmisión de información es completamente indispensable para el desarrollo social, económico, tecnológico y científico de las naciones. Aun en el presente siglo, en muchos lugares del país existen zonas que no poseen acceso a ningún servicio de comunicación, tales como la telefonía y el internet; lo cual causa dificultades en el desarrollo educativo de la población de estos

lugares, situación que posteriormente se refleja en una disminución de su competitividad laboral [1].

Es necesario mencionar que las cifras de cobertura de las redes de comunicaciones en Colombia y en el mundo, generalmente son inferiores a las del servicio de energía eléctrica, detectándose una diferencia aún más pronunciada si se trata de zonas rurales. Según lo anterior, resulta supremamente beneficioso el uso de las líneas eléctricas de potencia, como medio de transporte de información, para la prestación de servicios de comunicaciones en zonas alejadas. La tecnología que posibilita esta nueva aplicación de las redes de distribución de energía, recibe el nombre de *PLC* (Power Line Communication) [2]. A pesar de lo anterior, los conductores de electricidad se encuentran expuestos a campos electromagnéticos de transformadores, interferencias de señales de radiofrecuencia, y a la intromisión de usuarios no deseados debido al hurto de energía. Estos factores hacen necesario establecer técnicas de modulación que permitan proteger la información a transmitir sobre la red eléctrica, de tal manera que no se generan efectos indeseados sobre los datos recibidos. Una de las posibles metodologías a utilizar, la cual permitiría proteger la información transmitida, consiste en la implementación de la modulación mediante multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*OFDM*).

De todos los tipos de modulación empleados para el uso de la tecnología *PLC*, el sistema más extendido es *OFDM*, utilizado también en estándares *IEEE* para redes inalámbricas de área metropolitana, e incluido dentro de las especificaciones para la radiodifusión de televisión digital terrestre. Este sistema multiportadora es eficiente y flexible para trabajar en un medio como la red eléctrica, ya que el rango espectral queda dividido en *slots*, cuyo ajuste permite que los equipos se adapten dinámicamente a las condiciones del medio, potenciando aquellas frecuencias donde el ruido es menor, y anulando el uso de frecuencias donde la perturbación toma valores elevados. Además, la flexibilidad de este sistema facilita la posibilidad de reajustar el margen espectral de trabajo de los equipos para no interferir con otros canales de comunicación.

Modulación OFDM

OFDM se puede considerar como una tecnología de modulación digital, o una forma especial de modulación multiportadora, considerada la piedra angular de la próxima generación de productos y servicios de radio frecuencia de alta velocidad para uso tanto personal como corporativo. La técnica de espectro disperso de *OFDM* distribuye los datos en un gran número de portadoras que están espaciadas entre sí en distintas frecuencias precisas. Ese espaciado evita que los demoduladores vean frecuencias distintas a las propias.

Este sistema, al operar con gran número de portadoras, ofrece las siguientes ventajas [3]:

- Sincronización más simple y robusta.
- Fácil adaptación a cortes.
- Mejor inmunidad a ruidos impulsivos e interferencias.
- Mejor robustez frente a distorsiones.
- Posibilidad de adaptación a los cambios en las condiciones de transmisión de la línea eléctrica.
- Posibilidad de implementación de filtros para proteger los servicios que puedan resultar interferidos.

Un avance que ayudó al desarrollo del protocolo *IEEE802.16*¹, fue la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*OFDM*). La modulación *OFDM* presenta muchos beneficios que no poseen otras modulaciones previas a esta, entre las cuales cabe resaltar el hecho de que las redes inalámbricas transmiten en relativos pequeños anchos de banda. *OFDM* ha tenido gran aceptación en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas de banda ancha y, además del estándar *IEEE802.16* ya mencionado, también se utiliza en otros estándares

¹ Se trata de una especificación para las redes de acceso metropolitanas inalámbricas de banda ancha fijas, publicada inicialmente el 8 de abril de 2002. En esencia, recoge el estándar de facto *WiMAX*. El estándar actual es el *IEEE 802.16-2005*, aprobado en 2005.

como el *IEEE 802.11* (popularmente conocido como WiFi); así como también en los estándares de radiodifusión de televisión digital terrestre (*DVB-T*) y de radio digital (*DRM* y *DAB*). La idea fundamental de *OFDM* consiste en disminuir el ancho de banda con el que se transmite una señal para que la selectividad en frecuencia le afecte lo menos posible. Para lograr esta operación, se divide el flujo a transmitir, de tasa de símbolos R_s , en N sub-flujos de tasa R_s/N . Cada uno de estos subflujos modulará una subportadora, de forma que es posible afirmar que se tienen subsistemas de portadora única en paralelo. La señal transmitida por cada uno de ellos tendrá un ancho de banda B_s/N , donde B es el ancho de banda de la señal que resultará al transmitir el flujo original con una única portadora.

Uno de los aspectos característicos del esquema *OFDM* es la transmisión de subportadoras ortogonales. Esto quiere decir que si se toma a $\theta_i(t)$ y $\theta_j(t)$ como dos sub-portadoras del sistema, siempre se debe cumplir la Ec. 1, en la que T_{sOFDM} denota el periodo de cada símbolo *OFDM*.

$$(1) \int_0^{T_{sOFDM}} \phi_i(t) \cdot \phi_j(t) dt = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

La forma en la que se consigue la ortogonalidad de las subportadoras, está relacionada con el pulso conformación elegido, que en el caso de los sistemas *OFDM*, se escoge rectangular. El pulso rectangular cumple con el criterio de *Nyquist* de *ISI* (interferencia de intersímbolo) nula. Esto quiere decir que si se considerara un canal de comunicaciones ideal, la señal en el receptor estará libre de *ISI*. En el dominio de la frecuencia, el espectro del pulso rectangular tiene la forma de una función de muestreo.

Los nulos del espectro estarán por lo tanto en las frecuencias $f_n = n/T_{sOFDM}$ con $n \in \mathbb{Z}$. Para conseguir que las subportadoras sean ortogonales, se escogen sus frecuencias de forma que coincidan con los nulos del espectro de muestreo (la separación entre ellas será igual a $\Delta f_n = 1/T_{sOFDM}$). Con

esto se consigue que en el máximo de energía de cada una de las subportadoras, el resto contribuya con una energía nula, lo que permite recuperar cada subflujo de datos de forma independiente y sin interferencias entre ellos, esto es, sin *ICI*.

Gracias al uso de subportadoras ortogonales es posible afirmar que *OFDM* realiza un uso muy eficiente del espectro. En la Figura 1 se muestra el espectro de una señal *OFDM*.

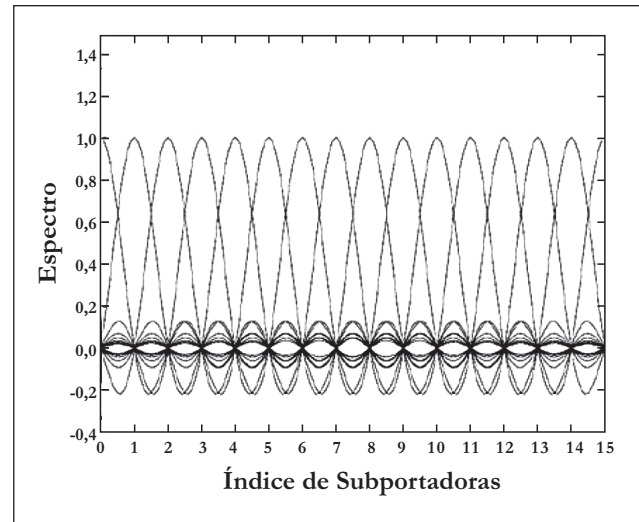


Figura 1. Espectro típico de una señal *OFDM*.

Matemáticamente, una señal *OFDM* es expresada mediante una sumatoria de pulsos cambiantes tanto en el tiempo como en la frecuencia, y multiplicada por los símbolos de información. En una notación de tiempo continuo, los k -ésimos símbolos de *OFDM* pueden ser escritos como se puede observar en la Ecuación 2 (ver pág. 114) [3].

La forma de onda $\omega(t)$ del transmisor se puede definir mediante la Ecuación 3 (ver pág. 114).

Finalmente, una secuencia continua para la transmisión de los símbolos en *OFDM* se puede expresar según la Ec. 4:

$$(4) s_{RF}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S_{RF,k}(t - KT)$$

$$(2) \quad S_{RF_1 k}(t-KT) = \left\{ R_e \begin{bmatrix} w(t-kT) \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} x_{i,k} e^{j2\pi \left(f_c + \frac{1}{T_{FFT}} \right) (t-kT)} \\ KT - T_{win} - T_{guard} \leq t \leq kT + T_{FFT} + T_{win} \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$$

Donde:

T = Longitud de cada símbolo. Tiempo transcurrido entre dos símbolos *OFDM* consecutivos.

T_{FFT} = Tiempo efectivo de la *FFT*. Parte efectiva de un símbolo *OFDM*.

T_{guard} = Intervalo de guarda (*GI*). Duración de un prefijo cíclico.

T_{win} = Intervalo de la ventana. Duración del sufijo/prefijo de la ventana para la configuración espectral².

f_c = Frecuencia central.

$F = \frac{1}{T_{FFT}}$ = Espacio de frecuencia entre los *SCs* (portadoras únicas, “Single-Carrier”) adyacentes.

N = Longitud de la *FFT*. Número de puntos *FFT*.

k = Índice de símbolos transmitidos.

i = Índice sobre *SC*, $i \in \left\{ -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \right\}$

$x_{i,k}$ = Puntos de la constelación de la señal. Símbolo complejo {dato, piloto, nulo} modulado en la i -ésima *SC* del k -ésimo símbolo *OFDM*.

$$(3) \quad \omega(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} [1 - \cos(\pi(t + T_{win} + T_{guard}) / T_{win})] - T_{win} - T_{guard} \leq t \leq T_{guard} \\ 1 - T_{guard} \leq t \leq T_{FFT} \\ \frac{1}{2} [1 + \cos(\pi(t + T_{win} + T_{guard}) / T_{win})] T_{FFT} \leq t \leq T_{FFT} - T_{win} \end{array} \right\}$$

² Ventana o (windowing), es una conocida técnica para reducir el nivel de los lóbulos laterales, y, por lo tanto, para reducir la potencia de la señal transmitida fuera de la banda [4].

La Figura 2 muestra el espectro de una señal *OFDM* ante diferentes longitudes de ventana.

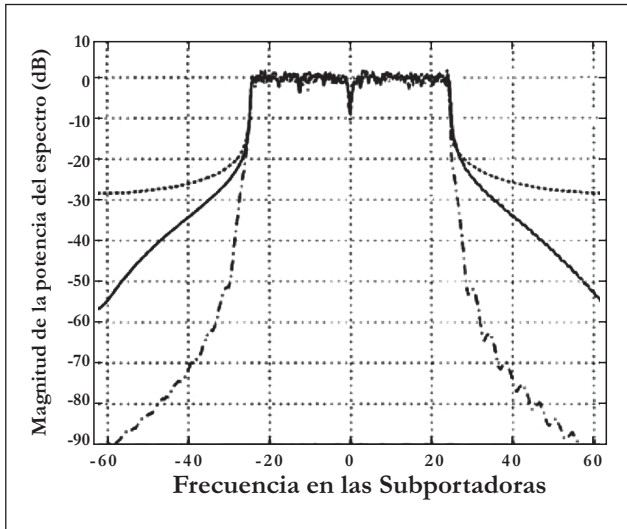


Figura 2. Espectro de una señal *OFDM* para diferentes N_{win} .

Simulaciones y resultados

El montaje de esta modulación en el simulador es un poco complejo, ya que se debe realizar una multiplexación, además de otros procesos que

permitan ordenar las señales de forma ortogonal [5]. En la Figura 3 se visualiza el diagrama de la simulación *OFDM* utilizada para la obtención de datos estadísticos en el tiempo. La simulación inicia con un generador de pulsos que representa la señal de datos a transmitir, la cual ingresa a un retenedor de orden cero, con el fin de realizar su discretización [6]. Posteriormente, la señal se inyecta a un modulador *BPSK*. Luego de esto, se lleva a cabo el proceso de modulación *OFDM*, el cual consiste básicamente en una multiplexación, para finalmente enviar la señal modulada a través del canal *AWGN*, donde se le adiciona una proporción de ruido dada por un $SNR=40$. Saliendo del canal, la señal pasa por los demoduladores *OFDM* y *BPSK* para así realizar el proceso de medición gráfica y numérica. El tiempo utilizado en esta simulación es de 0.1s.

La Figura 4a muestra la entrada y la salida en el dominio del tiempo para un $SNR = 60$. En esta figura no es posible observar el comportamiento de la señal ante la adición de ruido del canal, por esta razón se muestra la Figura 4b, para la cual se manejó un $SNR = 40$. En esta última se notan claramente los impulsos transitorios a causa del ruido.

La Tabla 1 muestra la respuesta de la modulación *OFDM* con un tiempo de muestreo de 1.5×10^{-6} s,

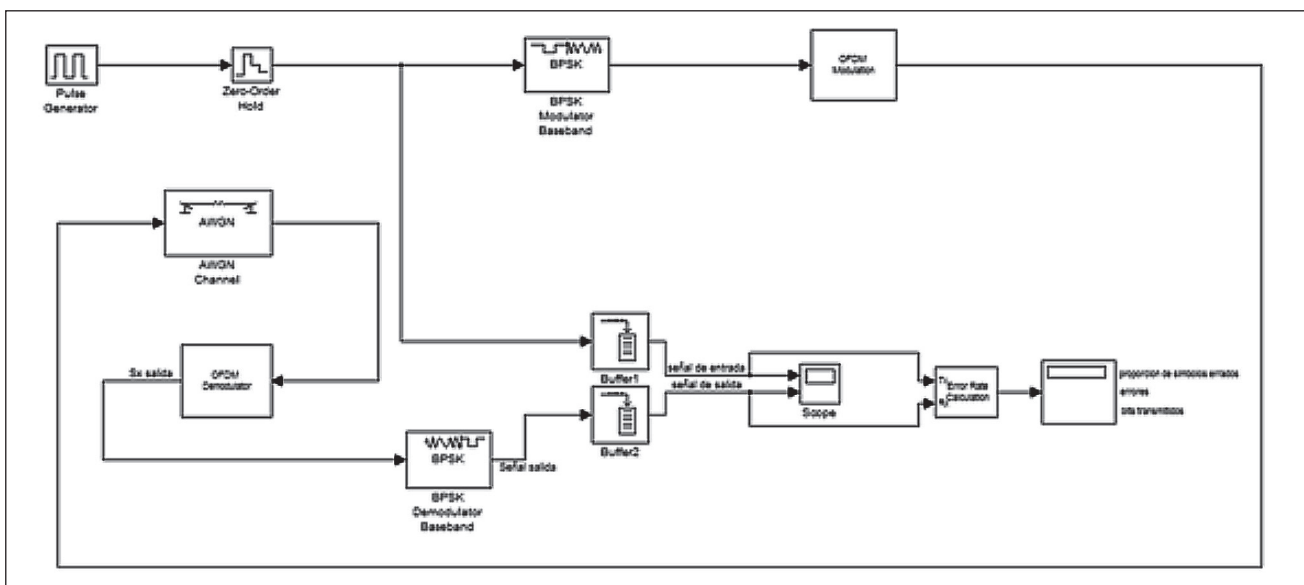


Figura 3. Montaje en *Simulink*® de *Matlab*® para la simulación de un sistema de comunicación *PLC* mediante *OFDM*.

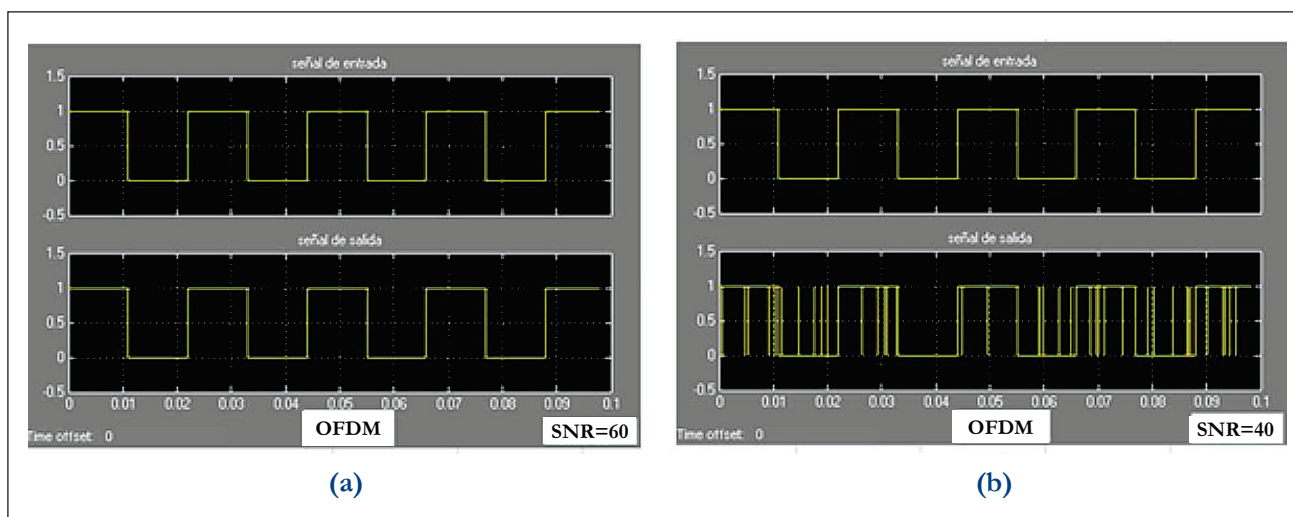


Figura 4. Señal de entrada y salida en el dominio del tiempo para el sistema simulado.

Tabla 1. Análisis estadístico: Relación señal a ruido Vs. proporción de bits errados en *OFDM*.

Tiempo de Simulación = 0.01s Tiempo de Muestreo = 1.5e-6			
SNR	Bits Transmitidos	Bits Errados	Proporción de Bits Errados
5	6667	3058	0.4587
10	6667	2922	0.4383
20	6667	2142	0.3213
30	6667	536	0.0804
35	6667	45	0.0067
40	6667	0	0

un tiempo de simulación de 0.01s, y realizando la variación en el SNR para llevar a cabo la obtención de datos.

En la Figura 5 se muestra el gráfico de relación señal ruido contra proporción de bits errados para el sistema *PLC* bajo modulación *OFDM*. En este caso se puede observar una curva que describe un comportamiento sumamente interesante logrando una estabilización en un SNR = 35 aproximadamente, lo cual refleja la excelente respuesta de esta modulación ante el ruido.

Para finalizar, se llevó a cabo un análisis en el tiempo con el fin de observar detalladamente la proporción de bits errados en función del tiempo de simulación. Los datos obtenidos se pueden ver en la Tabla 2.

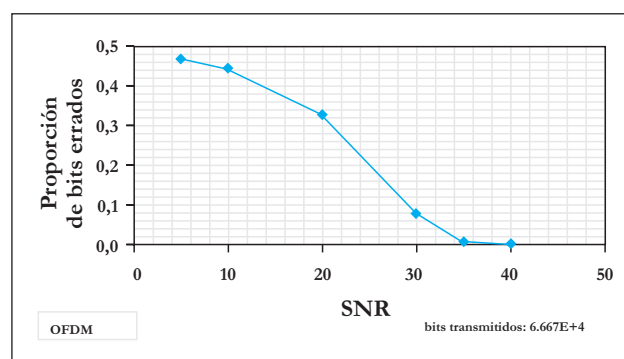


Figura 5. Relación señal a ruido vs proporción de bits errados tiempo de simulación *OFDM*.

Los resultados obtenidos en la Tabla 2 están esquematizados en la Figura 6, lo cual permite observar una respuesta lineal entre el la cantidad

de bits errados y el tiempo de simulación, que era lo que se esperaba. De esta manera se verifica la linealidad del canal, desechando la posibilidad de distorsiones de retardo.

Tabla 2. Análisis estadístico: Bits errados *vs.* tiempo de simulación en *OFDM*.

SNR = 30		
Tiempo de Muestreo = 1.5e-6		
Tiempo de Simulación	Bits Transmitidos	Bits Errados
0.001	667	45
0.005	3334	268
0.010	6667	536
0.015	10000	805
0.025	16700	1332
0.035	23300	1891
0.045	30000	2404
0.055	36700	2942
0.065	43300	3483
0.075	50000	4016
0.085	56700	4543
0.095	63300	5098
0.100	66700	5372

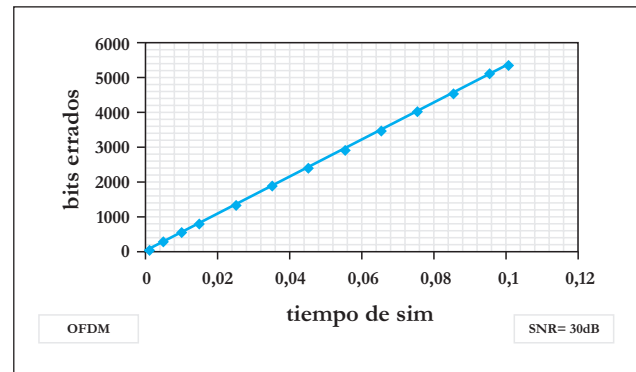


Figura 6. Bits errados *vs.* tiempo de simulación en *OFDM*. Nótese la linealidad del canal.

Los sistemas *OFDM* generan una alta tasa de transmisión al dividir el flujo de datos en muchos canales paralelos o subportadoras que se transmiten en igual número de portadoras de banda estrecha, y con tiempos de símbolo (uno o varios bits) mayores al caso de usar banda ancha; en la cual, para lograr la misma tasa de transmisión, los tiempos de símbolo son más cortos.

Para la obtención del espectro de la señal modulada en *OFDM*, fue necesario modificar el diagrama de bloques presentado en la Figura 3, de tal manera que fuera posible involucrar analizadores digitales de espectro. Este montaje se presenta en la Figura 7.

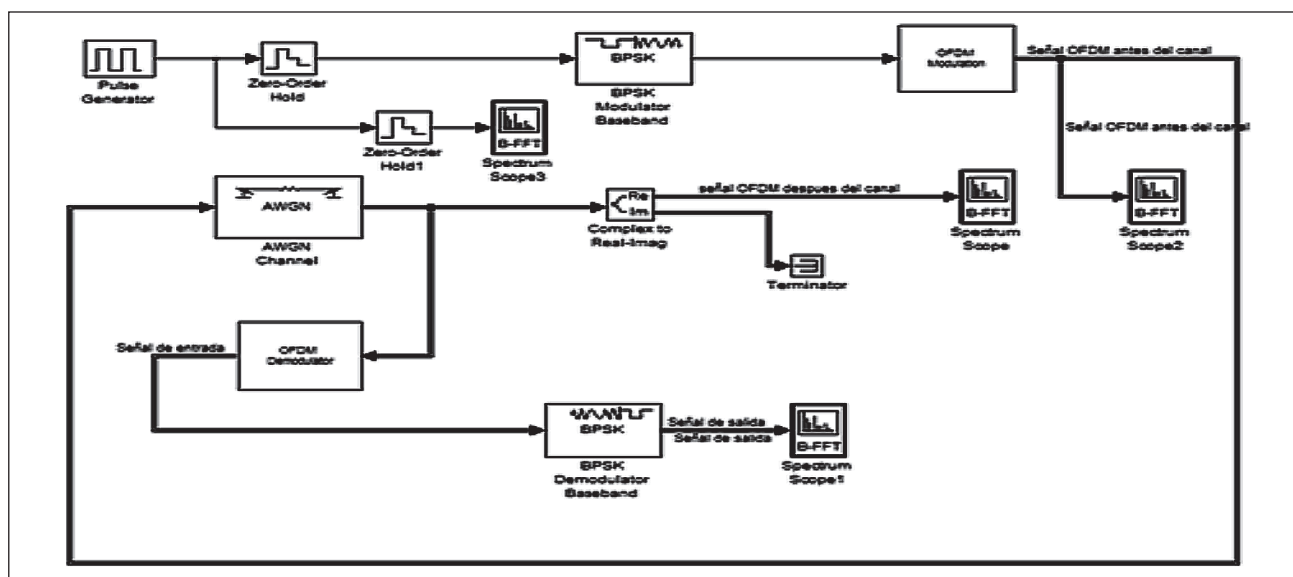


Figura 7. Diagrama de bloques para la obtención del espectro de la señal modulada en *OFDM*.

En la Figura 8 se observa el espectro de la señal *OFDM* a la salida del canal. Es posible apreciar el ruido adicionado por el canal *AWGN*.

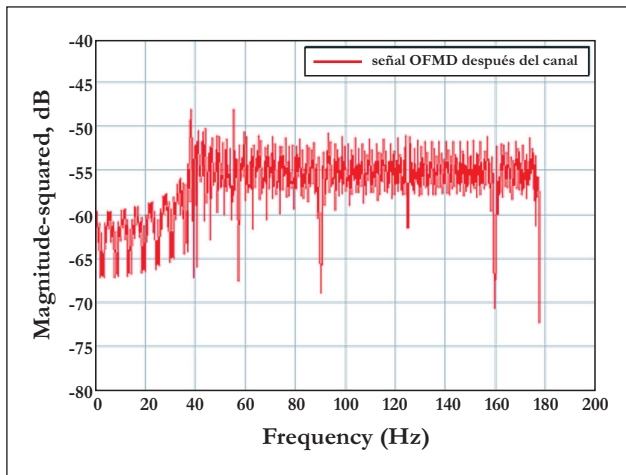


Figura 8. Espectro de la señal a la salida del canal *OFDM*.

Conclusiones

La modulación de multiplexación por división de frecuencias ortogonales *OFDM*, tiene como principal dificultad la agrupación de las ondas portadoras de forma ortogonal, lo cual se traduce en complejidades instrumentales adicionales a la hora de adelantar su implementación física. Con base en las simulaciones realizadas en el presente trabajo, es posible afirmar que si la necesidad radica en que se desea trabajar con una red con un nivel de seguridad alto, y un gran

aprovechamiento de la banda de frecuencias, *OFDM* cumple todos estos requerimientos y se acomoda perfectamente; más aun tratándose de las condiciones adversas a las cuales se ven expuestas las señales de información que viajan por líneas de distribución de energía eléctrica.

Referencias bibliográficas

1. EKOPLC. La Tecnología PLC en los Programas de Fomento de la Sociedad de la Información, Consultado 21 marzo 2010, En: <http://www.ekoplcn.net/noticias/programa-fomento/fundamentos-plc.htm>
2. Álvarez, J. Transmisión de Datos por la Red Eléctrica, Consultado 20 marzo 2010, En <http://www.victorgarcia.org/files/PLC-v2.0RC.pdf>
3. Ramjee, P. (2000). *OFDM for Wireless Communications Systems*. Artech House Publishers, New York.
4. Stallings, W. (2007). *Data and Computer Communications*. Pearson Prentice Hall, New York.
5. Haykin, S. (2001). *Communication Systems*. Jhon Wiley& Sons, New York.
6. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Matlab, Consultado 12 febrero 2010, En: <http://www.udistrital.edu.co/comunidad/estudiantes/ocala/matlabTut/>