

Espectro Ensanchado por Saltos de Frecuencia para la Transmisión de Información por Líneas de Potencia

Spread Spectrum Frequency Hopping for Power Line Communication

Andrés Mauricio Agudelo Ramírez, Pablo César Bernal Gallo, Edwin Andrés Quintero Salazar
Programa de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

pablober@utp.edu.co
 andresmau@utp.edu.co
 equintero@utp.edu.co

Resumen— En este artículo se presentan los resultados obtenidos al realizar el diseño y la simulación de un sistema de transmisión de información por línea de potencia (PLC) mediante la modulación de espectro ensanchado por saltos de frecuencia (FHSS), en la herramienta *Simulink*® del entorno de desarrollo integrado *Matlab*®. Se muestra además el comportamiento de la tasa de error de bits (BER) frente a perturbaciones externas de diferentes potencias, para distintos tiempos de simulación; lo cual permite demostrar el comportamiento lineal del sistema de comunicaciones. Finalmente, se realiza un análisis espectral de las señales involucradas en la transmisión, con el fin de verificar el ensanchamiento del espectro característico de la modulación FHSS.

Palabras clave— Canal AWGN, secuencia pseudo-aleatoria, espectro ensanchado, línea de transmisión, modulación, relación señal a ruido, tasa de error de bits.

Abstract— This article presents the results obtained by performing the design and simulation of a system based on power line communication (PLC) using frequency hopping spread spectrum modulation (FHSS), in *Simulink*® tool for the integrated development environment *Matlab*®. It also shows the behavior of the bit error rate (BER) against external disturbances of different energy values for different simulation times, which can prove the linear behavior of the communications system. Finally, a spectral analysis is performed of the signals involved in the transmission, in order to verify the spread spectrum characteristic of the FHSS modulation.

Key Word — AWGN channel, pseudo-random sequence, spread spectrum, transmission line, modulation, signal to noise ratio, bit error rate.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la importancia de las comunicaciones ha aumentado considerablemente ya que el acceso a sistemas de transmisión de información es totalmente indispensable para el desarrollo personal y profesional de los seres humanos. Sin embargo, aún hoy en día, en muchos

lugares del planeta existen zonas que carecen de acceso a servicios de comunicaciones tales como telefonía e internet, lo cual tiene repercusiones negativas en el desarrollo de la población de estos lugares, situación que conlleva al desmejoramiento de su calidad de vida.

Es necesario considerar que la problemática en la cobertura de los sistemas de comunicación es mucho menor en comparación con el servicio de energía eléctrica, ya que la cobertura de este servicio es considerablemente mayor, más aun, si se hace referencia a zonas rurales de país. En vista de lo anterior, resulta beneficioso y además necesario el uso de las líneas eléctricas de potencia como medio de transporte de información para la prestación de servicios de comunicaciones en sectores remotos, lo cual se convierte en una buena opción para minimizar esta problemática. La tecnología basada en este principio recibe el nombre de PLC (*Power Line Communications*, por sus siglas en inglés) [1], [2], [3].

Así mismo, la transmisión de información a través de líneas eléctricas de potencia exige la implementación de técnicas de modulación que brinden seguridad a los datos propagados, pues como es natural para el lector, todos los usuarios de la red eléctrica tienen acceso al canal de comunicación (en este caso, AWGN).

En este documento se desarrolla el diseño y la simulación de un sistema de transmisión de información a través de líneas eléctricas de potencia, utilizando para ello la modulación de espectro ensanchado por saltos de frecuencia (FHSS, *frequency hopping spread spectrum*), lo cual permite blindar la información frente a posibles intromisiones de usuarios no autorizados en el canal de comunicación.

FHSS es una técnica de modulación en espectro ensanchado donde la señal se emite sobre una serie de radiofrecuencias aparentemente aleatorias, saltando de frecuencia en frecuencia sincrónicamente con el transmisor. Los receptores no autorizados escucharán una señal ininteligible, característica que convierte a esta técnica en ideal para aplicaciones PLC.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Transmisión de información por líneas eléctricas de potencia

El aprovechamiento de las redes existentes de transmisión de energía eléctrica para el transporte de información, resulta ser de gran utilidad, pues contribuye a la prestación de servicios de comunicaciones en zonas remotas a las que solo llegan las líneas de transmisión de energía; lo cual podría transformar por completo la calidad de vida y el acceso a la información de los habitantes de dichos lugares de difícil acceso. Este tipo de tecnología se conoce como *PLC* por sus siglas en inglés (*power line communication*).

Para llevar a cabo este aprovechamiento es necesario realizar varios análisis sobre las redes eléctricas, ya que éstas no están diseñadas originalmente con el objetivo de transportar información. Esto lleva a considerar los efectos que se producen al inyectar en la red eléctrica una señal de alta frecuencia, por lo que se deben estudiar métodos de modulación para que la transmisión sea confiable, segura, clara y no interfiera con el propósito original de las redes eléctricas [4].

B. Topología de la red

La red eléctrica se encuentra dividida principalmente en tres secciones con distintos niveles de tensión: la tensión alta, media tensión y la sección de baja tensión. Desde el punto de vista de la transmisión de información no todas las partes de la red eléctrica de distribución son de igual interés. La red de baja tensión es la de mayor interés ya que esta es denominada de última milla, tal como se ilustra en la Figura 1 [5].

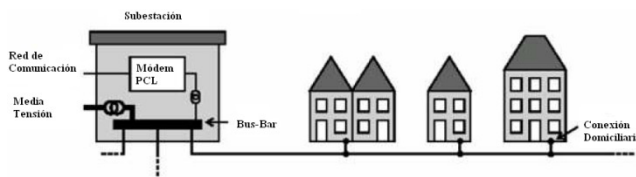


Figura 1. Topología de una red PLC.

C. Especificaciones del canal PLC

En la Figura 2 es posible observar el modelo circuital para el canal PLC. A partir de este diagrama se describen la corriente y la tensión de acuerdo a las ecuaciones (1) y (2).

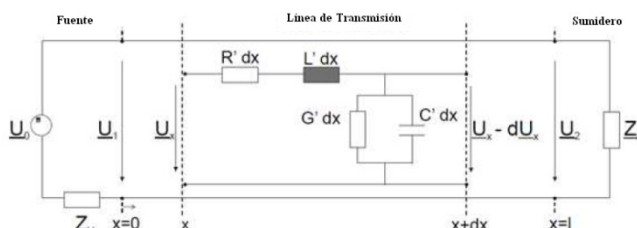


Figura 2. Propagación de la señal en una red PLC.

$$U(x) = U_2 \cosh(\gamma x) + I_2 Z_L \sinh(\gamma x) \quad (1)$$

$$I(x) = I_2 \cosh(\gamma x) + \frac{U_2}{Z_L} \sinh(\gamma x) \quad (2)$$

Donde los términos Z_L y γ identifican la impedancia característica de la línea de transmisión y el coeficiente de propagación, respectivamente.

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que la onda solo se propaga desde la fuente hasta el receptor, la función de transferencia de una línea de longitud l está dada por:

$$H(f) = \frac{U(x=l)}{U(x=0)} = e^{-\gamma l} = e^{-\alpha(f)l} e^{-j\beta(f)l} \quad (5)$$

D. Modulación de Espectro Ensanchado por Saltos de Frecuencia (*FHSS*, *frequency hopping spread spectrum*)

Con el método de modulación de espectro ensanchado por saltos de frecuencia (*conocido como FHSS*, *frequency hopping spread spectrum*), la señal es emitida aparentemente al azar sobre una serie de radio frecuencias determinadas, saltando de una frecuencia a otra en intervalos definidos de tiempo. El receptor debe saltar sobre estas frecuencias de manera sincronizada con el transmisor para de esta manera lograr recuperar correctamente el mensaje. Dado que los usuarios indeseados (espías) no conocen la secuencia de saltos, lo único que logran captar es un ruido por un período de tiempo corto [6].

Las Figuras 3 y 4 muestran el número de canales normalmente asignados para una señal *FHSS*. Existen 2^k portadoras de frecuencias formando 2^k canales. La anchura de cada canal usualmente corresponde al ancho de banda de la señal de entrada. El transmisor opera en un canal a la vez para cada intervalo. Por ejemplo, el estándar *IEEE 802.11* posee un intervalo de *300ms*. Durante este intervalo algún número de bits (posiblemente una fracción de un bit) es transmitido usando algún esquema de codificación. Un código pseudo-aleatorio de ensanchamiento muestra la secuencia de los canales utilizados. Tanto el transmisor como el receptor usan el mismo código para sintonizarse sincronizadamente [7].

En la Figura 5 se presenta el diagrama de bloques de un sistema de comunicación basado en modulación *FHSS*. Para la transmisión, una serie de datos binarios alimentan el modulador usando algún esquema de codificación analógica-digital como *FSK* (*frequency shift keying*) o *BPSK* (*Binary Phase Shift Keying*). La señal resultante se centra en alguna de las frecuencias base. Para esta modulación se utiliza un código pseudo-aleatorio o código *PN*. Cada uno de los k -bit de la secuencia *PN* es referente a cada una de las 2^k frecuencias portadoras. Para cada siguiente intervalo (cada k -bit del código *PN*) es seleccionada una nueva portadora de frecuencia. Esta frecuencia es posteriormente modulada por la señal producida

inicialmente por el modulador para generar una señal con la misma forma pero ahora centrada en la frecuencia de otra portadora. En el receptor, la señal de espectro expandido es demodulada usando la misma secuencia del código PN para obtener la señal de salida [8].

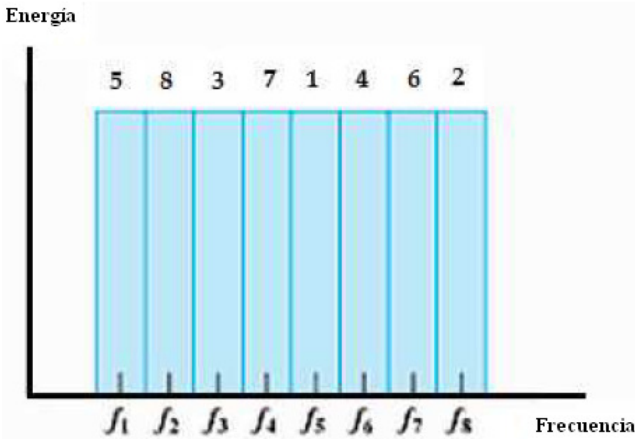


Figura 3. Asignación de canales en la modulación FHSS.

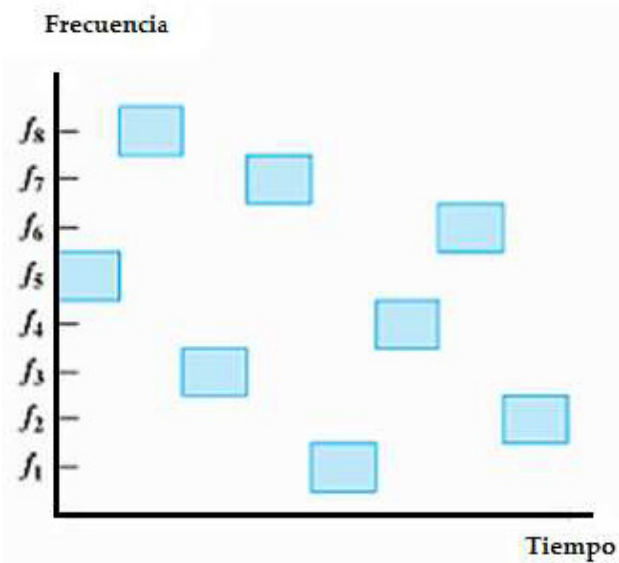


Figura 4. Asignación de frecuencias en la modulación FHSS.

E. FHSS sobre FSK

Es posible definir la entrada FSK en la modulación FHSS mediante la siguiente ecuación:

$$S_d(t) = A \cos[2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f)t] \quad (6)$$

Para:

$$iT < t < (i + 1)T \quad (7)$$

Donde:

A: Amplitud de la señal.

f_0 : Frecuencia de base.

b_i : Valor del i -ésimo bit de los datos (+1 para binario 1 y -1 para binario 0).

Δf : Separación entre las frecuencias.

T : Duración de bit.

$1/T$: Velocidad de los bits.

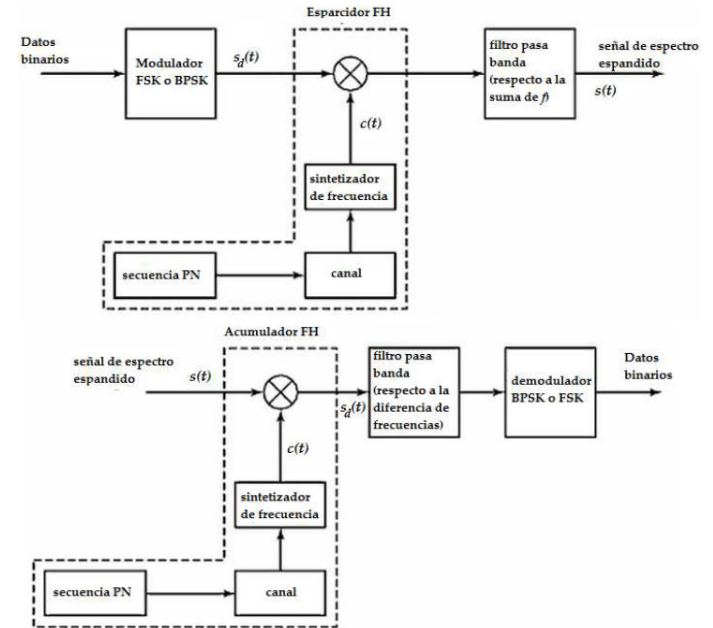


Figura 5. Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones basado en la modulación FHSS.

Así, durante el intervalo del i -ésimo bit la frecuencia de los datos de entrada es f_0 si el bit de entrada es -1 o $f_0 + 4f$ si el bit de entrada es +1. La frecuencia del sintetizador genera un tono de frecuencia constante, cuya frecuencia salta entre un conjunto de 2^k frecuencias con un patrón de salto determinado por los k -bits de la secuencia PN. Por simplicidad, se asume que la duración de una espera es igual a la duración de un bit y se ignora la diferencia de las fases entre la señal de datos $S_d(t)$ y la señal expandida. Además, se define una señal chip $c(t)$, por lo cual el producto de las señales durante la i -ésima espera (i -ésimo bit) es:

$$p(t) = S_d(t)c(t) = A \cos[2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f)t] \cos[2\pi f_i t] \quad (8)$$

Donde f_i es la frecuencia de la señal generada por el sintetizador durante la i -ésima espera. Mediante el uso de identidades trigonométricas (8) se transforma en:

$$p(t) = 0,5A [\cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f + f_i)t) + \cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f - f_i)t)] \quad (9)$$

Si se considera el filtro pasa banda presente en el transmisor ilustrado en la Figura 5, el cual es usado para bloquear la diferencia de frecuencias y dar paso a la suma de frecuencias aumentando el rendimiento de la señal FHSS, se tiene:

$$s(t) = 0,5A [\cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f + f_i)t)] \quad (10)$$

Así, durante el intervalo del i -ésimo bit la frecuencia de la señal de datos es $f_0 + f_i$ si el bit de datos es -1 y $f_0 + f_i + 4f$ si el bit de datos es +1.

Ahora, en el receptor es recibida la señal $s(t)$. Esta es multiplicada por la réplica de la señal expandida para producir la señal de la forma:

$$p(t) = s(t)c(t) = 0,5A \cos[2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f + f_i)t] \cos[2\pi f_i t] \quad (11)$$

Usando de nuevo identidades trigonométricas (11) se transforma en:

$$p(t) = 0,25A [\cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f + f_i)t) + \cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f)t)] \quad (12)$$

En este caso el filtro pasa banda es diseñado para bloquear la suma de frecuencias y permitir el paso de la diferencia, obteniendo así la señal $S_d(t)$ definida por la ecuación:

$$S_d(t) = 0,25A \cos[2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f)t] \quad (13)$$

F. FHSS sobre MFSK

Una técnica de modulación comúnmente usada en conjunto con FHSS es múltiple FSK (MFSK), la cual utiliza $M = 2L$ frecuencias diferentes para codificar los L -bits de la señal de entrada al mismo tiempo. Así, la señal arrojada por el transmisor se define por la siguiente ecuación:

$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_i t) \quad (14)$$

$$1 \leq i \leq m \quad (15)$$

Donde:

$$f_i: f_c + (2i-1-M)f_d$$

f_c : Frecuencia de portadora

f_d : Diferencia de frecuencias

M : Número de los diferentes elementos de la señal = 2^L

L : Número de bits por elemento de la señal

Para FHSS, la señal MFSK es trasladada a una nueva frecuencia T_c segundos cada vez para modular la señal MFSK con una señal portadora FHSS. El efecto es trasladar la señal al canal FHSS apropiado. Para una velocidad de datos R , la duración de un bit es $T = 1/R$ segundos y la duración de cada elemento de la señal es $T_s = LT$ segundos. Si T_c es mayor o igual que T_s la modulación es llamada FHSS lenta, de lo contrario es conocida como FHSS rápida [9]. La Figura 6 muestra un caso de FHSS lenta usando MFSK con un $M = 4$, lo cual indica que se usarán 4 diferentes frecuencias para codificar los datos de entrada de 2 bits a la vez. Cada elemento de la señal está sintonizado en una frecuencia discreta, y el ancho de banda total de MFSK está dado por $W_d = Mf_d$ en un sistema FHSS con $k = 2$, esto es, $4 = 2k$ canales diferentes cada uno con

una anchura de W_d . Por lo tanto, el total del ancho de banda de FHSS es $W_s = 2^k W_d$. Cada par de bits de la secuencia PN es usado para seleccionar cada uno de los cuatro canales. Este canal es el principal de dos elementos de la señal o cuatro bits $T_c = 2$; $T_s = 4T$:

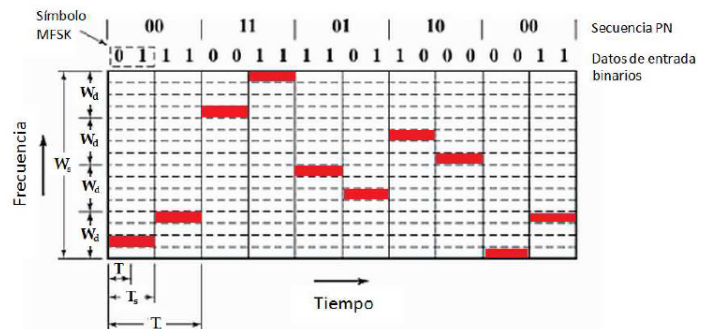


Figura 6. FHSS lenta usando MFSK ($M=4$, $k=2$).

III. RESULTADOS

Las simulaciones del comportamiento de un canal de transmisión de información a través de línea de potencia y mediante FHSS se llevaron a cabo en el software Matlab®, particularmente en la herramienta Simulink® con su Blockset de comunicaciones, el cual proporciona todas las herramientas necesarias para la elaboración de simulaciones de este tipo de sistemas de comunicaciones. Las características analizadas en las señales involucradas fueron las siguientes:

- Comportamiento de las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia.
- Respuesta del sistema de comunicaciones frente a la inyección de ruido sobre el canal AWGN. La adición de la perturbación se realiza mediante la variación de la relación señal ruido (SNR) en el canal de transmisión.

En la Figura 7 se observa el diagrama de bloques de la simulación de un sistema de transmisión de información a través de línea de potencia y mediante la modulación FHSS, implementada en Simulink® de Matlab®. Esta simulación inicia en un generador de pulsos que representa la señal de datos a transmitir. A continuación la señal es muestreada para luego ser multiplicada por una secuencia pseudo-aleatoria (código PN) que lleva a cabo el proceso de expansión de su espectro. Posteriormente la señal es codificada y ensamblada en paquetes de bits para su ingreso al modulador MFSK, el cual posee un número M -ario de 2 y un producto $BT=0.5$. Seguidamente, la señal es multiplicada por el subsistema que genera los saltos en la frecuencia para así entrar al canal AWGN donde se le adiciona una proporción de ruido dada por un $SNR=60$. El proceso de demodulación de la señal consiste básicamente en la multiplicación de la misma por el subsistema de saltos, luego se realiza la demodulación MFSK y se decodifica la señal. Finalmente, se multiplica por el código pseudo-aleatorio y se realiza el proceso de medición gráfica y numérica. El tiempo utilizado inicialmente en la simulación fue de 0,1s.

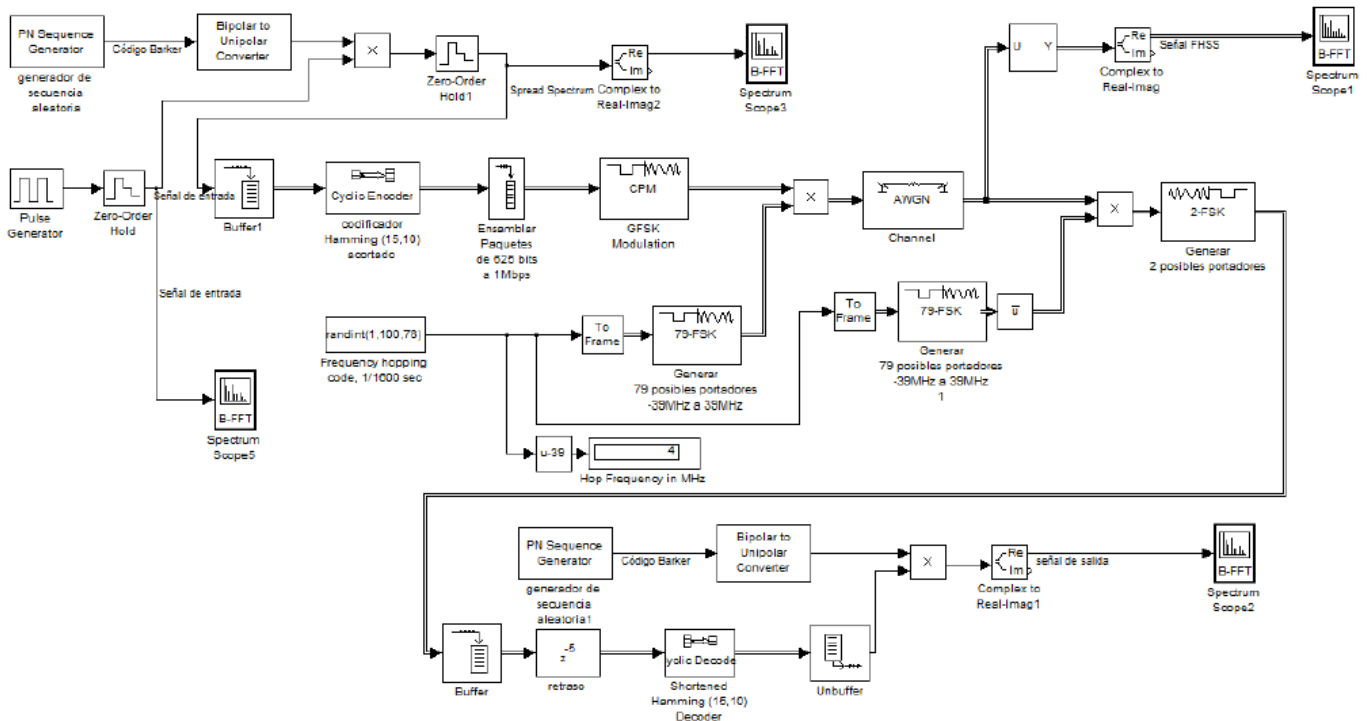


Figura 7. Diagrama de bloques de la simulación de un sistema de comunicación PLC basado en FHSS.

En la Figura 8 se presentan las señales de entrada y de salida del sistema de comunicaciones en el dominio del tiempo, para $SNR=60$. Allí se observa que el comportamiento del montaje frente a perturbaciones externas es bastante bueno, ya que no se observan diferencias sustanciales entre las señales.

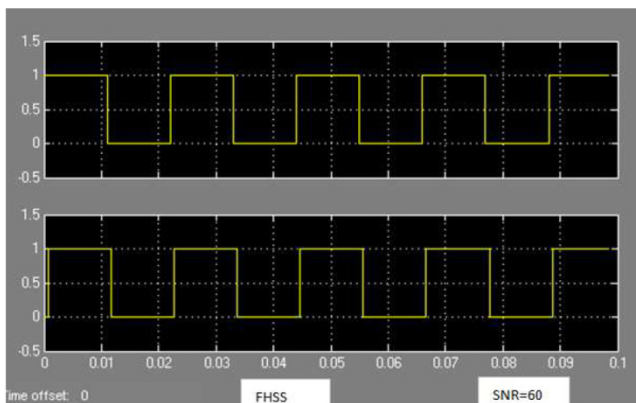


Figura 8. Señales de entrada (arriba) y de salida (abajo) del sistema de transmisión de información PLC basado en FHSS.

En la Tabla 1 se muestra la respuesta de la modulación FHSS con tiempos de muestreo y de simulación iguales a los utilizados en la Figura 8, pero ahora realizando la variación en el SNR, es decir, modificando el ruido introducido al canal. El comportamiento del sistema en

estas condiciones se observa en la tasa de bits errados. Así mismo, la Figura 9 muestra la proporción de bits errados en función de la relación señal ruido. La proporción de bits transmitidos y errados para esta modulación (BER) es muy baja, lo cual quiere decir que su comportamiento es bastante aceptable.

SNR	tiempo de simulación 0,01 tiempo de muestreo 1.5e-6		
	bits transmitidos	bits errados	proporción bits transmitidos y errados
1	6,62E+04	4120	0,0622
2	6,62E+04	3920	0,05918
3	6,62E+04	3870	0,05842
4	6,62E+04	3870	0,05842
5	6,62E+04	3870	0,05842
10	6,62E+04	3870	0,05842
20	6,62E+04	3870	0,05842
50	6,62E+04	3870	0,05842
100	6,62E+04	3870	0,05842

Tabla 1. Tasa de error de bits (BER) para diferentes valores de relación señal ruido (SNR).

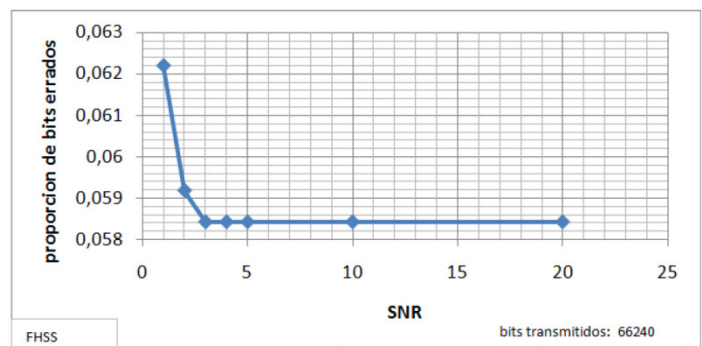


Figura 9. Comportamiento de la proporción de bits errados (*BER*) en función del ruido introducido al canal de transmisión (*SNR*).

En la Tabla 2 se presenta el comportamiento en los bits errados en función del ruido introducido al sistema (*SNR*), pero en este caso con un tiempo de simulación 10 veces mayor (*0,1s*) al utilizado en las simulaciones de la Tabla 1 y de la Figura 9 (*0,01s*). Así mismo, la Figura 10 presenta de manera gráfica el comportamiento presentado en la Tabla 2. Al comparar las Figuras 9 y 10 se observa un comportamiento muy similar, lo cual pone en evidencia el comportamiento lineal del sistema en función de las perturbaciones externas.

tiempo de simulación 0,1 tiempo de muestreo 1.5e-6			
SNR	bits transmitidos	bits errados	proporcion bits transmitidos y errados
1	6,662E+05	4,010E+04	0,06025
2	6,662E+05	3,91E+04	0,05863
3	6,662E+05	3,875E+04	0,05816
4	6,662E+05	3,87E+04	0,05809
5	6,662E+05	3,870E+04	0,05809
10	6,662E+05	3,870E+04	0,05809
20	6,662E+05	3,870E+04	0,05809
50	6,662E+05	3,870E+04	0,05809
100	6,662E+05	3,870E+04	0,05809

Tabla 2. Tasa de error de bits (*BER*) para diferentes valores de relación señal ruido (*SNR*), con un tiempo de simulación 10 veces mayor (*0,1s*).

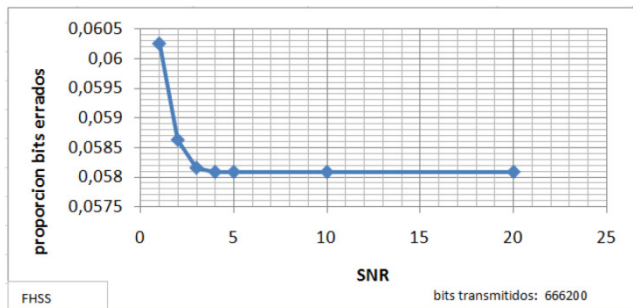


Figura 10. Comportamiento de la proporción de bits errados (*BER*) en función del ruido introducido al canal de transmisión (*SNR*), con un tiempo de simulación 10 veces mayor al utilizado anteriormente (*0,1s*).

Finalmente, se observó el comportamiento de la tasa de bits errados (*BER*) en el sistema de comunicaciones, para diferentes tiempos de simulación, con una perturbación externa constante (*SNR=40*). En la Tabla 3 se presentan los valores de bits errados arrojados por el montaje. Este comportamiento se presenta gráficamente en la Figura 11.

SNR=40 tiempo de muestreo 1,5e-6		
t de sim	bits transmitidos	bits errados
0,001	6240	3870
0,005	3,29E+04	3870
0,01	6,62E+04	3870
0,015	9,96E+04	7740
0,025	1,66E+05	1,16E+04
0,035	2,33E+05	1,55E+04
0,045	3,00E+05	1,94E+04
0,055	3,66E+05	1,94E+04
0,065	4,33E+05	2,32E+04
0,075	5,00E+05	2,71E+04
0,085	5,66E+05	3,10E+04
0,095	6,33E+05	3,48E+04
0,1	6,66E+05	3,87E+04

Tabla 3. Tasa de error de bits para diferentes tiempos de simulación en el sistema de comunicaciones desarrollado.

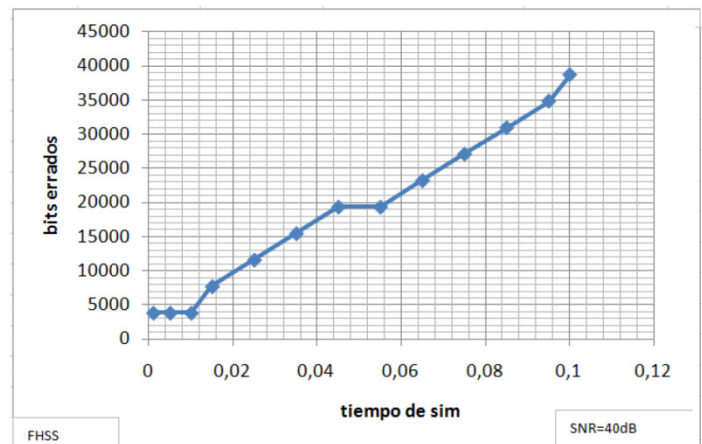


Figura 11. Tasa de error de bits (*BER*) en función del tiempo de simulación.

Al observar la Figura 11 es posible concluir que el comportamiento de la tasa de bits errados es aproximadamente proporcional al tiempo de simulación, lo cual demuestra la linealidad del sistema de comunicaciones diseñado; característica fundamental para evitar la distorsión de retardo o *jitter*.

Por otra parte, se obtuvieron los espectros de las señales más representativas presentes en el sistema, con el fin de verificar el ensanchamiento del espectro. La Figura 12 presenta el espectro de la señal que contiene los datos a transmitir (véase la gráfica superior de la Figura 8). En él se observa un componente de alta energía cercano a los 0Hz (correspondiente al componente DC), seguido de armónicos superiores de menor energía. Obsérvese también que esta señal se encuentra en banda base, es decir, todos sus componentes frecuenciales se encuentran cercanos a 0Hz.

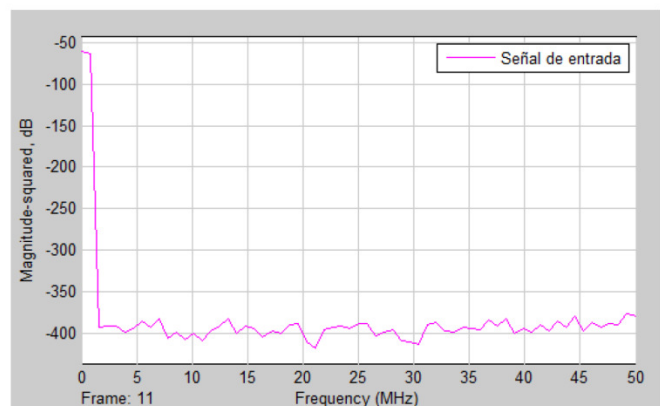


Figura 12. Espectro de la señal a transmitir.

Por otra parte, la Figura 13 presenta el espectro de la secuencia pseudo-aleatoria utilizada para generar los saltos de frecuencia propios de la modulación *FHSS*. Nótese que se trata de un

espectro amplio, con múltiples componentes espectrales de potencias cuasi-uniformes.

Así mismo, las Figuras 14 y 15 presentan el espectro de la señal modulada mediante FHSS en diferentes instantes de tiempo. Allí se observan claramente los saltos de frecuencia propios de la modulación FHSS, pues mientras en un instante de tiempo t_1 la señal se transmite en 13MHz, para un instante t_2 la información es transmitida en una banda de frecuencias centrada alrededor de los 36MHz.

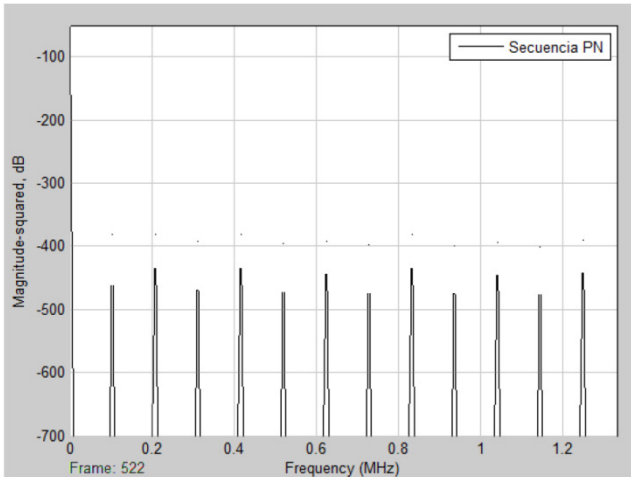


Figura 13. Espectro de la secuencia pseudo-aleatoria.

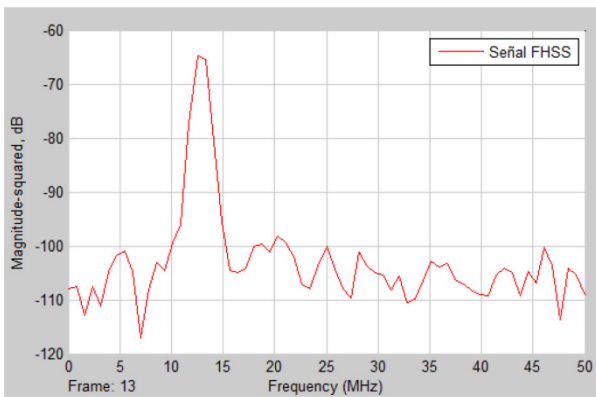


Figura 14. Espectro de la señal modulada FHSS en un instante de tiempo t_1 .

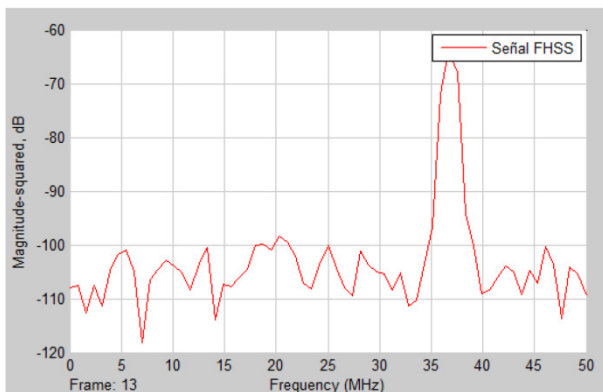


Figura 15. Espectro de la señal modulada FHSS en un instante de tiempo t_2 .

Para concluir el análisis espectral, la Figura 16 presenta la composición frecuencial de la señal obtenida en el receptor del sistema de comunicaciones (véase la gráfica inferior de la Figura 8). Nótese que la forma en el dominio de la frecuencia es muy similar a la presentada en la Figura 12 (señal transmitida), por lo cual es posible concluir que la pérdida de información en el proceso de transmisión sobre PLC mediante FHSS fue mínima.

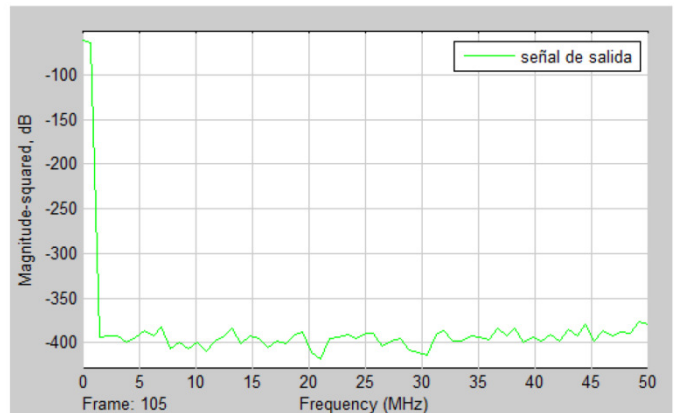


Figura 16. Espectro de la señal recibida.

IV. CONCLUSIONES

A pesar de la elevada complejidad instrumental que involucra el montaje de un sistema de transmisión de información a través de línea de potencia mediante la modulación de espectro ensanchado por saltos de frecuencia (dificultad asociada a la necesidad de un sincronismo perfecto entre transmisor y receptor en el momento de aplicar la secuencia pseudo-aleatoria), es posible concluir que esta técnica presenta muy buenos resultados, ya que ofrece inmunidad frente a las perturbaciones externas, además de una seguridad elevada, ya que el espectro de la señal transmitida se camufla con el del ruido. Sin embargo, el hecho de que el espectro de la señal modulada se amplíe considerablemente, implica una reducción en el ancho de banda disponible del canal para otras transmisiones, por lo cual el número de usuarios que pueden acceder simultáneamente al sistema de comunicaciones se reduce considerablemente.

REFERENCIAS

[1] J. Ametsitsi, R. Jaap and F. Kim, “Power Line Communication Hub System and Method”, U.S. Patent US2007/0198748 A1, Aug. 23, 2007.

[2] G. Flammer, “Power Line Communication Using Frequency Hopping”, U.S. Patent US2010/0074304 A1, Mar. 25, 2010.

[3] W. J. Kaiser and G. J. Pottie, "Integrated Low-Power Communication System Design for Wireless Sensor Networks", *IEEE Communications Magazine*, pp. 142-150, Dic. 2004.

[4] PORRAS, A. Análisis de viabilidad para brindar servicios de Internet en RACSA a través de las redes eléctricas de Costa Rica, utilizando la tecnología PLC. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. 2007.

[5] PAEZ, H. Sistema de comunicación de datos a través de la red eléctrica domiciliaria, disponible en: <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/Rev1816.pdf?ri=d844c56dc91fa40ee6ec8de91f9ff981>

[6] HAYKIN, S. Communication Systems. Jhon Wiley & Sons, Inc. 4th edition. 2001.

[7] FERNÁNDEZ, M. Sistemas de Comunicación. Marcombo 2001.

[8] TOMASI, W. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Prentice Hall. 2001.

[9] STALLINGS, W. Data and computer communications, Pearson Prentice Hall 8th edition. 2007.