

Dynamic Characterization and Equalization of a Power Line Communication Channel

M. N. Hadad, *Member, IEEE*, M. A. Funes, *Member, IEEE*, P. G. Donato and D.O. Carrica, *Senior Member, IEEE*

Abstract— Power Line Communication (PLC) systems need signal processing algorithms in order to recover the transmitted signals from the high degrading medium. In the literature exist some techniques that work on the basis of a constant, known channel, but it was demonstrated that the PLC channel is time variant, therefore these techniques lose efficiency. This work presents a dynamic equalization algorithm computed in the time domain, where the channel characterization is done by a recursive least squares algorithm using the transmitted data as reference. The proposal was tested with simulations and was statistically validated using in time variant PLC channel models, obtaining a lower error rate than other methods.

Keywords— Power Line Communication, Equalization, Recursive Least Squares, Binary Error Rate.

I. INTRODUCCION

LA TECNOLOGÍA de comunicaciones basada en la transmisión de datos sobre la red eléctrica (Power Line Communication, PLC) es una tecnología que ha presentado un interés creciente en la última década [1], [2]. El atractivo de esta tecnología se basa en el alcance del tendido de la red eléctrica, que presenta una mayor capilaridad que otras redes físicas como la telefónica. Esto impulsa la utilización de dicha infraestructura, tanto a nivel doméstico como a mayor escala para la transmisión de datos. Sin embargo, es evidente que las redes eléctricas fueron diseñadas para distribuir energía eléctrica y no para transmitir señales de comunicación por lo que existen algunas dificultades para la transmisión y recepción de datos [3], [4]. Los principales problemas que presentan las redes eléctricas como medio de comunicación son su respuesta en frecuencia variante con el tiempo y la posición, las diversas fuentes de ruido y la existencia de interferencia multicamino. Esta última, debida a las reflexiones provenientes de las diversas desadaptaciones de impedancia presentes en la red, produce que la respuesta en frecuencia del canal degrade fuertemente las señales transmitidas (al igual que en el canal wireless) y consecuentemente resulte en la limitación mas severa cuando se desean lograr altas velocidades de transmisión.

La influencia del canal sobre la transmisión puede ser

mitigada utilizando alguna técnica de procesamiento de señal que permita recuperar la información original. Una forma de hacerlo es empleando un filtrado tal que cancele el efecto del canal y, de esta manera, se obtengan los datos originales. Esta técnica es conocida como ecualización y en la literatura [5], [6] se han propuesto diversos esquemas de ecualización entre los que se encuentran ZF (*Zero Forcing*) y MMSE (*Minimum Mean Squares equalization*). Éstos operan en el dominio de la frecuencia por lo que presentan una serie de desventajas, respecto a la ecualización en el tiempo, como ser: la necesidad de realizar una DFT (*Discrete Fourier Transform*) (o FFT (*Fast Fourier Transform*)) e IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*), el agregado de un preámbulo para separar los bloques de datos y la necesidad de sincronización de estos bloques.

Los esquemas de ecualización previamente mencionados son generalmente aplicados asumiendo canales invariantes en el tiempo y a partir de un conocimiento previo del mismo. Sin embargo, la respuesta del canal es variante en el tiempo [7], por lo que es necesario identificarla en forma dinámica para poder realizar una correcta ecualización. Existen diversos trabajos en la literatura que proponen formas de obtener esta respuesta, entre ellos el de Lei y Huang [8], basado en un principio de correlación con una señal conocida para obtener la respuesta del canal, y el trabajo de Morelli *et al.* [9] que utiliza los algoritmos LSE (*Least Squares Estimation*) y RLS (*Recursive Least Squares*). La estimación con cualquiera de estos métodos requiere conocer el mensaje transmitido originalmente, por lo que la caracterización del canal se realiza enviando un preámbulo conocido entre los paquetes de datos lo que reduce la velocidad efectiva de transmisión.

Este trabajo tiene como objetivo mejorar la velocidad de transmisión en un canal PLC a partir de la utilización de los datos como fuente de referencia para la estimación del canal. Para lograr este objetivo se presenta un sistema de ecualización dinámica en el dominio del tiempo en el que se utiliza la respuesta del canal obtenida mediante el algoritmo RLS empleando los datos enviados para realizar la caracterización.

II. MODELO DE LA RED ELÉCTRICA COMO CANAL DE COMUNICACION

La red eléctrica está diseñada para distribuir energía y no como medio de transmisión por lo que existen algunas problemáticas que afectan a la función transferencia que dificultan la utilización de este medio para la transmisión de

M. N. Hadad, Universidad Nacional de Mar del Plata, Conicet, mhadad@fi.mdp.edu.ar.

M. A. Funes, Universidad Nacional de Mar del Plata, Conicet, mfunes@fi.mdp.edu.ar.

P. G. Donato, Universidad Nacional de Mar del Plata, Conicet, donatopg@fi.mdp.edu.ar.

D. O. Carrica, Universidad Nacional de Mar del Plata, Conicet, carrica@fi.mdp.edu.ar.

datos a alta velocidad:

- La topología de la red es variante en el tiempo.
- Las cargas conectadas a la red poseen una impedancia variante en el tiempo.
- La existencia de desadaptaciones y ecos que producen interferencia multicamino.

Existen trabajos en los que se ha analizado la función transferencia de modo de obtener un modelo que permita analizar estos comportamientos. Los modelos existentes se pueden clasificar a partir de la forma de modelar el canal de comunicaciones, ya sea mediante su comportamiento o su estructura física. En el modelado por comportamiento [10] se utilizan parámetros derivados de un análisis estadístico a partir de extensas campañas de medidas con lo que se obtiene un modelo que no posee una correspondencia directa con un canal específico. En cambio, si se realiza un modelado físico [11] los parámetros se ajustan a partir de las características físicas del canal lo que permite obtener una correspondencia con dicho canal real. Este último es el que presenta un mayor interés para el diseño y análisis de sistemas PLC.

En el trabajo de Cañete *et al.* [7] se propone un modelo de la red eléctrica como canal de comunicaciones basado en un modelado físico de la red. Este modelo contempla la naturaleza variante en el tiempo de la transferencia de la red eléctrica empleando una serie de subsistemas invariantes en el tiempo cuyas respuestas representan medidas instantáneas de la respuesta LPTV (*linear periodic time variant*) que se repiten durante el período de línea. Este modelo utiliza una topología simple con un esquema de cargas con pocos parámetros desde los cuales se obtiene un modelo determinístico del canal. En la Fig. 1 se muestra esta topología en la cual las cargas son modeladas considerando sus distintas naturalezas y su variación con el tiempo. A partir de este modelo de red, los autores realizaron un generador de modelos de canal PLC [12] que permite obtener las funciones transferencia LTI que conforman el sistema LPTV. En la Fig. 2 se observan los posibles valores de la respuesta en frecuencia de estos sistemas LTI (*linear time invariant*) para un ciclo de red utilizando un sistema LPTV de 7 cargas. Las variaciones resultantes son de hasta 20dB en un rango de frecuencias muy amplio lo que hace necesario que el sistema de ecualización se adapte a éstas para lograr una correcta recuperación de la señal transmitida.

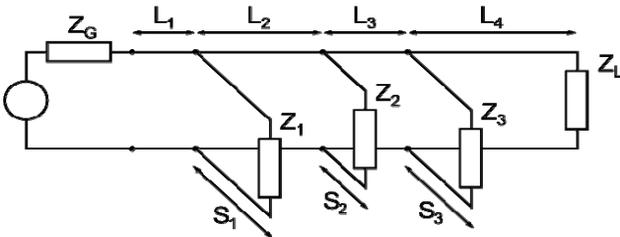


Figura 1. Topología del modelo.

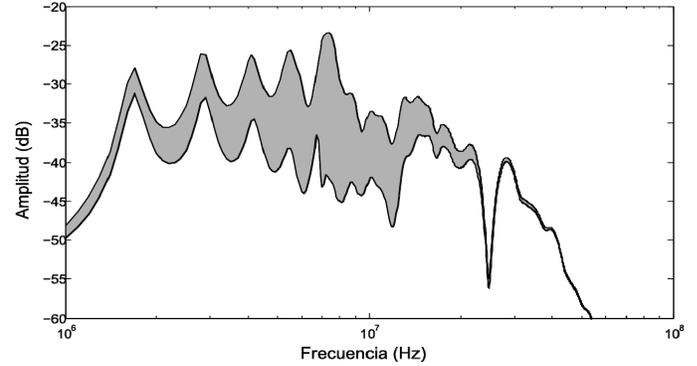


Figura 2: Área de variación en la respuesta en frecuencia de los modelos LTI generados por el simulador de canal PLC para un canal LPTV de 7 cargas.

III. SISTEMA DE ECUALIZACIÓN.

En la sección anterior se mostró, con un ejemplo, la magnitud de la variación de la función transferencia del canal LPTV. Esto hace necesario el desarrollo de un sistema de ecualización que pueda compensar dinámicamente estas variaciones, utilizando algún algoritmo que permita caracterizar en forma dinámica la respuesta del canal. Un método que permite la identificación de la función transferencia de un sistema en forma recursiva, minimizando el error cuadrático medio, es el RLS [13].

Considerando un sistema genérico de la forma:

$$y(n) = \sum_{k=0}^a h_k u(n-k) + \varepsilon(n) \quad (1)$$

donde $y(n)$ es la salida, $u(n)$ es la entrada, h_k el término k -ésimo ($0 \leq k \leq a$) de la respuesta al impulso del sistema y $\varepsilon(n)$ el término de error. La ecuación (1) se puede reescribir matricialmente como:

$$y(n) = \varphi^T(n) \theta + \varepsilon(n) \quad (2)$$

donde:

$$\begin{aligned} \varphi^T(n) &= [u(n) \quad u(n-1) \quad u(n-2) \quad \dots \quad u(n-a)] \\ \theta &= [h_0 \quad h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_a]^T \end{aligned} \quad (3)$$

La estimación de la respuesta $\hat{\theta}$ [13] está dada por:

$$\hat{\theta}(n) = P(n) \left[\sum_{s=1}^n \varphi(s) y(s) \right] \quad (4)$$

con

$$P(n) = \left[\sum_{s=1}^n \varphi(s) \varphi^T(s) \right]^{-1} \quad (5)$$

De acuerdo con [13] esta estimación, en forma iterativa, tiene la forma:

$$\hat{\theta}(n) = \hat{\theta}(n-1) + P(n)\varphi(n) \left[y(n) - \varphi^T(n)\hat{\theta}(n-1) \right]$$

$$P(n) = P(n-1) - \frac{P(n-1)\varphi(n)\varphi^T(n)P(n-1)}{1 + \varphi^T(n)P(n-1)\varphi(n)} \quad (6)$$

Resolviendo estas ecuaciones en forma iterativa (para cada instante n) es posible obtener en forma dinámica la respuesta del canal si se conoce, la señal transmitida originalmente y la afectada por el canal. Una vez obtenida la respuesta del canal se debe calcular el ecualizador de modo de recuperar la señal transmitida originalmente.

En forma ideal, el ecualizador debería ser igual a la transferencia inversa del canal, siendo una señal afectada por el canal de la forma:

$$y(n) = h_n * u(n) \quad (7)$$

al ser afectada por la transferencia del ecualizador

$$\tilde{u}(n) = eq_n * y(n) = eq_n * h_n * u(n) \quad (8)$$

se recupera la señal original si eq_n es la transferencia inversa de h_n :

$$eq_n * h_n = \delta_n \quad (9)$$

Como paso previo al cálculo del ecualizador se debe analizar la respuesta del canal. En la Fig. 3 se muestra la respuesta al impulso del conjunto transmisor-canal-receptor utilizando un canal como el presentado en la sección II, donde puede notarse que el valor máximo de la respuesta no se encuentra en el instante $t=0$ de la transferencia, lo que dificulta el cálculo directo de la transferencia inversa. Como paso previo al cálculo del ecualizador se debe analizar la respuesta del canal.

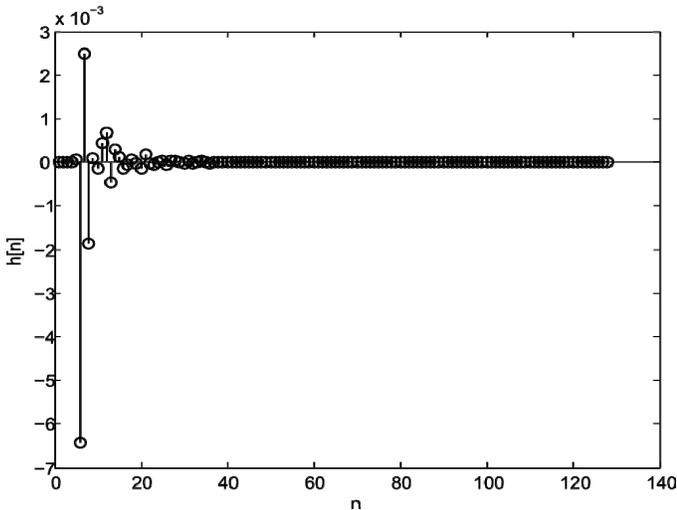


Figura 3: Respuesta al impulso $h[n]$ del conjunto transmisor-canal-receptor

A partir de un análisis estadístico realizado mediante la simulación de 100.000 funciones de transferencia de la red

PLC se puede observar que el pico de mayor amplitud de la respuesta en el tiempo se puede encontrar retrasado hasta 6 muestras. Esto se debe a la topología de la red eléctrica, que no solamente posee el retardo inherente de la comunicación sino también ecos y reflexiones. Por esta razón, el ecualizador debe retrasar mínimamente esa cantidad de muestras.

Teniendo esto en cuenta, se desea obtener un ecualizador con el que se obtenga una función transferencia que no distorsione la señal original, y además contenga un retardo mayor al de la transferencia h_n . El ecualizador debe cumplir con:

$$eq_n * h_n = D_n = \delta_{n-d} \quad (10)$$

donde d es el retardo fijado. Este sistema no posee una solución única por lo que se utiliza el criterio de mínimos cuadrados para el cálculo del ecualizador minimizando el error entre la estimación y los datos:

$$\sum_{i=0}^a (D_i - (h * eq)_i)^2 \quad (11)$$

Operando matricialmente se obtiene

$$eq_n = (A^T A)^{-1} A^T D_n \quad (12)$$

donde A es una matriz de convolución de $(2a+1)$ filas y a columnas, formada por los elementos de la transferencia del canal:

$$A = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ h_1 & h_0 & \dots & \vdots & 0 \\ \vdots & h_1 & \dots & h_{a-1} & \vdots \\ 0 & \vdots & \dots & h_a & h_{a-1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & h_a \end{bmatrix} \quad (13)$$

Una vez realizado el cálculo del ecualizador, éste es utilizado para compensar la influencia del canal. Los datos compensados son umbralizados utilizando la función signo para recuperar la señal original (la señal puede valer solo 1 o -1). Una vez recuperada, esta puede ser utilizada como la información de referencia del método RLS para actualizar el modelo de la red en tiempo real. Esto permite mantener un modelo actualizado utilizando los propios mensajes transmitidos por la red.

El sistema de caracterización y ecualización completo realiza las siguientes operaciones:

- Caracterización de la red con el método RLS a partir de un preámbulo de transmisión conocido: Al iniciar la transmisión, se envía un mensaje conocido y se compara la señal recibida con el mensaje de modo de hallar la transferencia del canal.
- Cálculo del ecualizador: A partir de la transferencia obtenida mediante el método RLS se realiza el cálculo del ecualizador.
- Recuperación de la señal transmitida mediante el ecualizador y la umbralización: Las señales recibidas

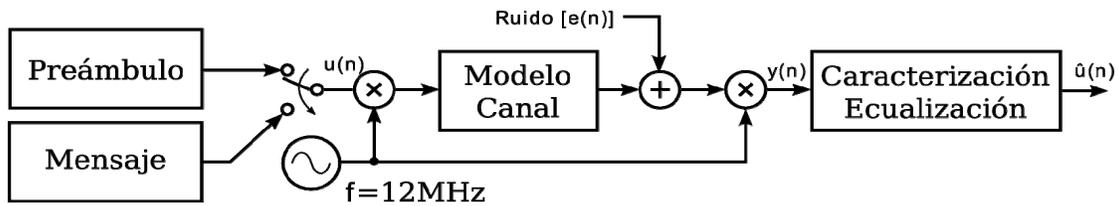


Figura 5: Diagrama en bloques del sistema utilizado para las simulaciones

son procesadas por el ecualizador y son umbralizadas de modo de recuperar la señal originalmente transmitida.

- Actualización de la función transferencia de la red: A partir del dato recuperado y el dato recibido se actualiza la transferencia mediante el método RLS.

Repitiendo las últimas tres operaciones para cada bit de mensaje recibido se logra ecualizar el canal en forma dinámica. En la Fig. 4 se muestra el diagrama en bloques del sistema de caracterización y ecualización, donde se pueden observar cada una de las operaciones realizadas.

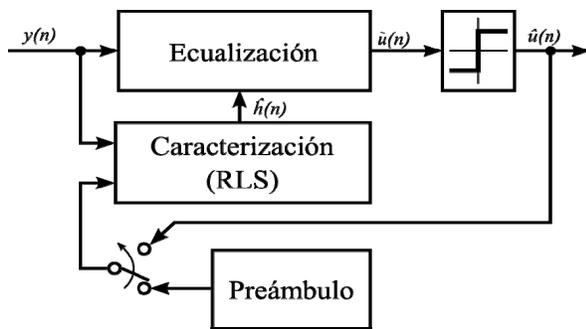


Figura 4: Diagrama en bloques del sistema de caracterización y ecualización.

IV. RESULTADOS.

El correcto funcionamiento del método de estimación y ecualización puede comprobarse en esta sección realizando una serie de ensayos mediante simulaciones. El modelo de canal fue simulado utilizando las funciones de transferencia variantes en el tiempo obtenidas a partir del generador propuesto en [12]. En la Fig. 5 se muestra el diagrama en bloques del sistema utilizado para las simulaciones compuesto por un modulador y demodulador BPSK con una portadora de 12MHz, el modelo del canal y el sistema de ecualización dinámica, compuesto por la caracterización (RLS) y el cálculo dinámico del ecualizador.

Como primer ensayo se realizó una simulación sin adicionar ruido utilizando un canal variante en el tiempo como el de la Fig. 2 en el que se observó la estimación de la respuesta en el canal a lo largo de un ciclo de red. En las Fig. 6 y 7 se muestran los primeros 5 términos de $\hat{h}(n)$ distintos de cero, en función del tiempo, para dos canales distintos. En las

figuras se puede observar que el sistema ajusta la función transferencia siguiendo las variaciones del canal.

El siguiente ensayo es la evaluación de la tasa de error binario (BER) lograda luego de ecualizar. Para ello, el sistema fue ensayado mediante la simulación de una serie de transmisiones de 10^6 bits de información utilizando 20 canales distintos y distintas relaciones señales a ruido. A modo ilustrativo, los resultados fueron contrastados con los obtenidos por La-Gatta *et al.* [14], los cuales a su vez fueron obtenidos por el autor utilizando un modelo de canal estático y técnicas de modulación y ecualización en frecuencia. En la Fig. 8 se muestra la comparativa entre el BER obtenido con el método propuesto y el reportado por La-Gatta *et al.*. En esta figura se observa que el sistema se comporta como es esperado, obteniendo menores BER incluso sometido a condiciones más adversas tal como es un sistema variante en el tiempo.

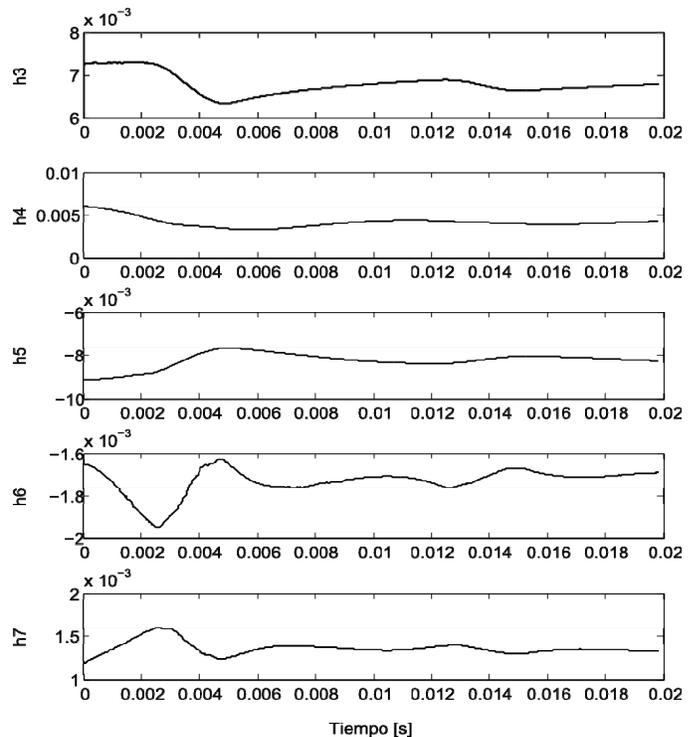


Figura 6: Variación en el tiempo de los primeros términos distintos de cero de la respuesta estimada de un canal aleatorio

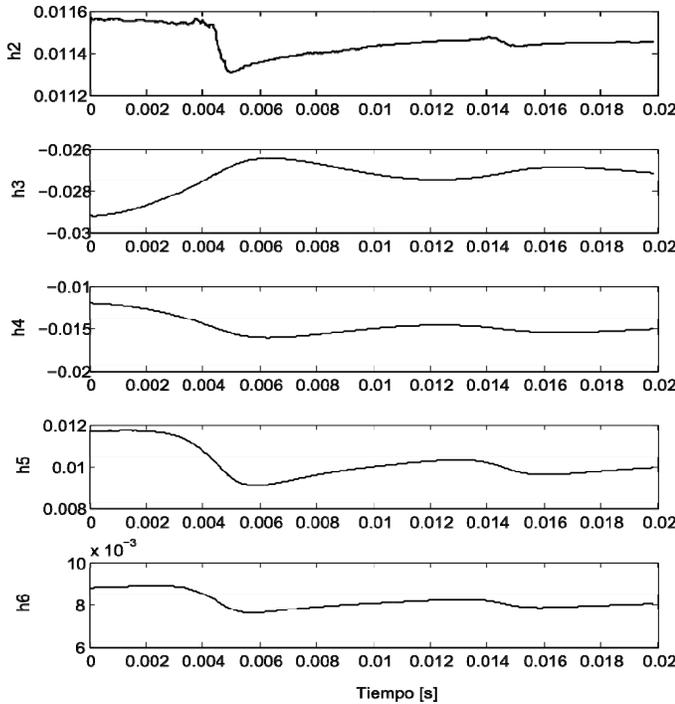


Figura 7: Variación en el tiempo de los primeros términos distintos de cero de la respuesta estimada de un canal aleatorio

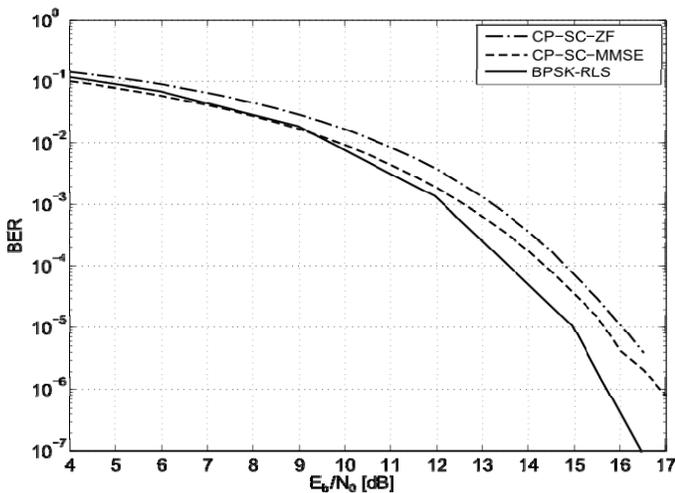


Figura 8: Comparación de tasas de error binaria entre distintos métodos de ecualización. CP-SC-ZF y CP-SC-MMSE [14]. BPSK-RLS, método propuesto.

V. CONCLUSIONES.

En éste trabajo se ha presentado un algoritmo de ecualización dinámica que emplea el método RLS para la caracterización del canal a partir de los datos transmitidos. El sistema propuesto evita además la necesidad del envío de preámbulos en forma dinámica. En este contexto, se ha descrito la problemática del canal variante en el tiempo donde se verificó que existen variaciones del orden de 20dB

dentro de la banda de interés para la comunicación y se evidenció la necesidad de una caracterización dinámica del medio. La propuesta fue ensayada mediante simulaciones basadas en modelos físicos del canal y validada estadísticamente en función de la variación de los parámetros de estos modelos. Los resultados demuestran que el BER obtenido es inferior al reportado por otros autores sobre canales invariantes en el tiempo.

REFERENCIAS

- [1] S. Galli, A. Scaglione, and Z. Wang, "For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 998–1027, 2011.
- [2] H. C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, and T. G. Swart, *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*. Wiley, 2010.
- [3] E. Biglieri, "Coding and modulation for a horrible channel," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 5, pp. 92–98, 2003.
- [4] G. Laguna and R. Barron, "Survey on indoor power line communication channel modeling," in *Proc. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conf. CERMA '08*, pp. 163–168, 2008.
- [5] Y. H. Ng and T. C. Chuah, "Single-carrier cyclic prefix-assisted plc systems with frequency-domain equalization for high-data-rate transmission," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1450–1457, 2010.
- [6] D. Falconer, S. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 40, no. 4, pp. 58–66, apr 2002.
- [7] F. J. Cañete, J. A. Cortes, and J. T. Diez, L. y Entrambasaguas, "A channel model proposal for indoor power line communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 12, pp. 166–174, 2011.
- [8] M. Lei and Y. Huang, "Time-domain channel estimation of high accuracy for ldpc coded sc-fde system using fixed point decoding in 60-ghz wlan," in *Proc. 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conf. CCNC 2009*, pp. 1–5, 2009.
- [9] M. Morelli, L. Sanguinetti, and U. Mengali, "Channel estimation for adaptive frequency-domain equalization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 2508–2518, 2005.
- [10] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 4, pp. 553–559, 2002.
- [11] F. Versolatto and A. M. Tonello, "An mtl theory approach for the simulation of mimo power-line communication channels," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1710–1717, 2011.
- [12] http://www.plc.uma.es/channel_generator/PLC_channel_generator_v2.zip.
- [13] T. Söderström and P. Stoica, *System Identification*. Prentice Hall, 2001.
- [14] F. A. La-Gatta, M. V. Ribeiro, A. P. Legg, and R. Machado, "Coded cp-sc communication scheme for outdoor power line communications," in *Proc. IEEE Int Power Line Communications and Its Applications (ISPLC) Symp*, pp. 160–165, 2010.



Matias N. Hadad received the B.S. degree in Electronics Engineering by the Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), Mar del Plata, Argentina, in 2010, and a PhD from UNMDP in 2013. His research interests include signal processing, power line communications and programmable logic devices.



Marcos A. Funes received the B.S. degree in Electronics Engineering by the Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), Mar del Plata, Argentina, in 1999 and his PhD. in Electronics by UNMDP, Mar del Plata, Argentina, in 2007. In 1999, he joined the Department of Electronics, Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), as Assistant Professor and Research Assistant. Since 2009 he joined the Consejo Nacional de Investigaciones

Científicas y Técnicas (CONICET) as research assistant. His current research interests include high density programmable logic devices and digital signal processing.



Patricio G. Donato received the B.S. degree in Electronics Engineering by the Universidad Nacional de la Patagonia "San Juan Bosco", Patagonia, Argentina, in 2000, and his PhD degree in Electronics by the Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Spain, in 2005. Presently he works for the Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), Mar del Plata, Argentina. His main research interests include digital signal processing, local

positioning systems (LPS), power line communications and synchronism methods. Dr. Donato is a member of the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.



Daniel O. Carrica received the B.S. degree in Engineering from the Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina, in 1984 and the M.Sc. degree in electronics from the Universidad Politécnica de Madrid, Spain, in 1992. In 1984, he joined the Department of Electronics, Universidad Nacional de Mar del Plata, as a Research Assistant. From 1990 to 1991, he was an Associate Scientist at the European Organization for

Nuclear Research (CERN), Geneva, Switzerland. From 1994 to 1996, he was Head of the Department of Electronics, UNMDP where he is currently an Associate Professor. His current research interests include motion control and power electronics.