

Redes eléctricas de interiores como canal de comunicación

I. Velásquez | M. Zambrano | C. Medina

Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá
{iliana.velasquez, maytee.zambrano, carlos.medina}@utp.ac.pa

Resumen: *las comunicaciones a través de líneas de potencia (PLC) se han convertido en una tecnología de interés para tener acceso a la red de Internet y otros servicios de comunicación. PLC está siendo altamente competitiva con otras tecnologías por la extensión geográfica que cubre en la mayoría de las zonas que generan grandes demandas de transmisión de datos. Para incorporar sistemas PLC es necesario conocer las características del medio (líneas de potencia) como canal de comunicación. Este artículo brinda una descripción detallada acerca de las propiedades y características de las redes eléctricas de interiores en cuanto a sus topologías, escenario de ruido, comportamiento del canal y finalmente un análisis acerca de los estudios y modelos actuales para la caracterización del canal.*

Palabras claves: *caracterización de canal, modelo de canal, PLC, sistemas PLC de interiores*

Title: *Indoor power lines as communication channel*

Abstract: *communications over power lines (PLC) have become a technology of interest to access the Internet and other network communication services. PLC is highly competitive with other technologies due to the geographical spread that it covers in most areas that generate large data demands. To incorporate advance PLC systems is necessary to know the characteristics of the medium as a communication channel. This paper gives a detailed description about the properties and characteristics of indoor power line in regard to topologies, noise scenario, channel behavior and finally an analysis of actual studies and models for channel characterization.*

Key words: *channel characterization, channel model, PLC, indoor PLC system*

Tipo de artículo: original

Fecha de recepción: 11 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 28 de octubre de 2014

1. Introducción

Originalmente las líneas de distribución de potencia fueron diseñadas para transmitir energía eléctrica a un gran número de consumidores. Actualmente, con el interés de aprovechar este recurso y convertirlo en un sistema de comunicación competitivo, las

líneas de distribución de potencia son utilizadas también como medios de comunicación. Esta idea no es del todo nueva, ya que en los años 1970s las redes eléctricas, específicamente las redes de alta tensión, eran utilizadas para servicios de control y automatización entre las entidades distribuidoras y subestaciones de voltaje [1], [2]. Luego, en los sistemas de líneas de media tensión, también se desarrollaron diversas aplicaciones, tales como: sistemas de monitorización, servicios de operación y automatización.

Hoy en día, numerosos estudios se han realizado con el fin de lograr un amplio desarrollo en la materia y así contribuir a la generación de nuevas tecnologías como *Power Line Communications (PLC)*. La tecnología PLC propone servicios de comunicación de alta transferencia de datos a través de las líneas de transmisión de electricidad en todos los niveles de tensión: alto (mayores a 110 KV), medio (3 kV – 30 KV) y bajo (110 V - 220 V).

Los mayores esfuerzos de estudios de PLC se han enfocado en las redes de baja tensión, especialmente en las redes eléctricas de interiores o redes de distribución doméstica.

Las redes de potencia difieren considerablemente de los medios de comunicación convencionales en cuanto a su topología, propiedades físicas y función de transferencia [3]. Es por ello que el diseño de estas redes como medio de comunicación representa un desafío, donde se tiene como objetivo principal la aplicación de técnicas y métodos que permitan un desarrollo eficiente de un sistema de comunicación efectivo en este tipo de redes de potencia.

El objetivo de este artículo es describir las características y propiedades de un sistema de distribución de energía eléctrica en las líneas de baja tensión como medio de comunicación. Se basa en las redes eléctricas de interiores, y busca caracterizar el canal de comunicación, presentando modelos de canal propuestos que permitan implementar nuevas estrategias al momento de diseñar un sistema PLC interno.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe la topología general de las redes eléctricas de interiores; la Sección 3 desarrolla un análisis conceptual del escenario de ruido e interferencia, y luego en la Sección 4 se realiza un análisis del comportamiento del canal para conocer los parámetros influyentes en el mismo; en la siguiente sección se presentan modelos de canal determinísticos y probabilísticos propuestos, y finalmente se indican algunas conclusiones sobre la caracterización del canal PLC, así como posibles alcances futuros de esta tecnología.

2. Topología

El canal de una red típica PLC interna se caracteriza por una topología de bus (o troncal) con una distribución de ramas entre cada enlace de los extremos transmisor y receptor, como se muestra en la Figura 1. Esta estructura implica que el ancho de banda de que dispone la red esta compartido por todos los puntos conectados a ella.

Un canal PLC se puede analizar por medio del modelo de una línea de transmisión. En todo medio de comunicación cableado se cuenta con un extremo transmisor y un extremo receptor, cada uno caracterizado por una fuente generadora (VG), y su impedancia de

fuente (Z_G) y por una impedancia de carga (Z_L), respectivamente. Además, cuenta con la línea de transmisión principal (bus) y de una serie de ramas distribuidas por todos los nodos presentes en la línea. Estas ramificaciones de los nodos se caracterizan por su impedancia característica y por su impedancia terminal de carga, tal como se ilustra en la Figura 1.

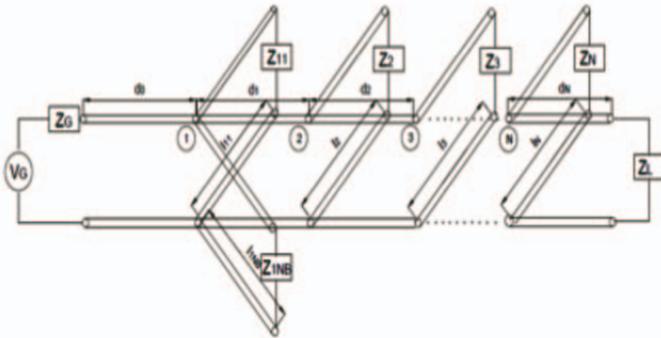


Figura 1. Topología de redes eléctricas de interiores.

Observe en el nodo 1 de la figura que la red eléctrica es un punto de transmisión compartido, lo que significa que varios usuarios pueden utilizar el mismo punto de distribución. Esto implica, desde el punto de vista de la línea de transmisión, que se pueden tener múltiples cargas conectadas en un solo nodo.

La red eléctrica puede tener diversas topologías, puede ser aérea o subterránea, y también puede diferir dependiendo de algunos otros factores como densidad urbana, longitud de la red, localización, entre otros.

3. Escenario de ruido

Uno de los factores que afecta severamente a las líneas de potencia no sólo como líneas de distribución de energía, sino como líneas de comunicación es el escenario del ruido, ya sea generado por los componentes de los equipos de la red, por perturbaciones naturales o provocado por otras fuentes de ruido adyacentes a la red.

El ruido como señal indeseable en los servicios de comunicaciones para las redes de potencia interna es clasificado en tres tipos distintos: ruido de fondo o ruido de color, ruido de banda angosta y ruido impulsivo.

El ruido de color es una perturbación al sistema producido por las diferentes fuentes de baja energía interconectadas en la red; el ruido de banda angosta es un ruido caracterizado por señales de amplitud modulada que se originan por la inducción de señales de estaciones de difusión, y el ruido impulsivo es producido por efectos transitorios debido a fenómenos de relámpagos y conmutación interna en la red de potencia. Este último puede ser clasificado en tres diferentes tipos: ruido impulsivo periódico asincrónico, ruido impulsivo periódico sincrónico y ruido impulsivo asincrónico [2].

En la literatura se describen detalladamente los efectos del ruido, y se determina que el nivel de ruido de fondo es alrededor de -145 dBm/Hz y el ruido de banda angosta sobrepasa 30 dB al ruido de color;

asimismo, el ruido impulsivo excede a una amplitud máxima de 40 dBm/Hz mayor que los otros dos tipos de ruido anteriores.

4. Comportamiento del canal

Las redes eléctricas como canal de comunicación se pueden caracterizar por ser sistemas lineales pero periódicamente variables en el tiempo (LPTV) [4]. Esta propiedad de variación en el tiempo es producto de los equipos conectados en la línea de transmisión. Muchos de los equipos están compuestos por elementos no lineales; y otros, que pueden no contener no-linealidades, presentan cambios continuos cuando se encuentran operando a elevados niveles de frecuencia. La variación en el tiempo conlleva a su vez a una variación en la impedancia de carga, lo que implica que el canal sea LPTV.

De la topología de una red eléctrica, mostrada en la Figura 1., se tiene que numerosas reflexiones pueden ser ocasionadas debido a las ramas interconectadas en la línea de transmisión, es por ello que se determina, en términos generales, que un canal PLC es un canal de múltiples trayectorias, lo cual causa pérdidas por atenuación y distorsión de la señal propagada.

Además del número de ramas distribuidas por todo el medio, la longitud de las ramas interconectadas y el tamaño de las cargas en ellas, pueden causar efectos negativos en el desempeño del sistema de comunicación.

Por consiguiente, la causa de fenómenos como reflexión, atenuación, distorsión, variación de impedancia, longitud de la línea, entre otros, resultan en un rendimiento pobre en los sistemas de líneas de potencia como canal de comunicación. En éstas, se producen ráfagas de errores y/o pérdidas de información en la transmisión de datos, por lo que es necesario implementar técnicas robustas al entorno de propagación de la señal, tanto de modulación para la transmisión de datos, como de codificación para detección y corrección de errores.

La Multiplexión por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) y otras técnicas como Espectro Expandido por Secuencia Directa (DSSS) son utilizadas comúnmente como técnicas de modulación. Varios estudios han comprobado que OFDM resulta ser un candidato eficiente para mitigar los efectos de interferencia intersímbolos e interferencia entre portadoras [5], [6]. Esta técnica además, presenta muchas más ventajas que aportan a su gran eficiencia para sistemas de múltiples trayectos.

Por otro lado, se han implementado técnicas de codificación como códigos de comprobación de paridad de baja densidad (LDPC), que resultan ser eficientes para las condiciones de un canal PLC. Además, se han propuesto técnicas de intercalado entre códigos de bloque y códigos convolucionales con resultados beneficiosos, mejorando así, el desempeño del sistema [6]. Esta técnica de intercalado se ha desarrollado en sistemas de media tensión y baja tensión, y también se han propuesto para redes de alta tensión.

5. Modelos propuestos

Muchos estudios se han realizado para dar a conocer las características existentes en una red de potencia de baja tensión para

uso de transmisión de datos, y así plantear modelos que caracterizan las redes eléctricas como canal de comunicación.

Las redes PLC de baja tensión están clasificadas en dos categorías: redes externas (outdoor) que comprenden desde la estación de transformación a baja potencia hasta el medidor principal de energía (acometida) en la localidad del usuario, y redes internas (indoor), que comprenden toda la red de distribución de interiores.

La Figura 2. ilustra un esquema general como modelo del canal de comunicación en las redes eléctricas de interiores.



Figura 2. Modelo general del canal PLC de interiores.

Normalmente se han descrito dos formas de llegar a conocer las características de un canal de línea de potencia: mediante la estructura física del medio o mediante el comportamiento externo.

Un análisis de la estructura física de la red considera los parámetros físicos de ella y está basado en un análisis teórico de una línea de transmisión típica.

Modelos matemáticos basados en la estructura física se han propuesto para la estimación de la función de transferencia $H(f)$ que describe el comportamiento de un canal PLC de baja tensión. Philipps en [7] propone un modelo determinístico que describe la respuesta al impulso del canal, donde sólo es considerado el factor del producto de la transmisión y reflexión de cada trayecto (factor de peso) y el retardo de propagación; posteriormente, Zimmermann en [8] propone un modelo de eco adaptado (1), donde además de los parámetros del modelo de Philipps, se considera un factor de atenuación

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f v_p d_i} \quad (1)$$

donde i es el número de trayectos; g_i es el factor de peso; a_0 , a_1 son parámetros de atenuación; k es el exponente del factor de atenuación; d_i es la longitud de los trayectos, y v_p es la velocidad de fase.

Este modelo matemático es muy utilizado, ya que representa las bases de muchos otros modelos; el mismo describe una forma simplificada de la función de transferencia de una red PLC típica.

El análisis del comportamiento externo se refiere más bien a un análisis estadístico o basado en pruebas de mediciones. El mismo requiere de un elevado nivel de muestras; y a pesar de ser considerado fundamental, ha ganado detractores ya que este método resulta bastante difícil de comparar con otros debido a la

diversidad del medio de transmisión en diferentes localidades y por las características físicas de los cables. En [9] se describen los parámetros de caracterización de un canal PLC de interiores, entre ellas la respuesta en frecuencia del canal, ganancia del canal promedio, retardo de propagación cuadrático medio, ancho de banda coherente, razón máxima alcanzable y correlación espacial. Todos estos parámetros fueron analizados de manera probabilística, donde y cada uno presentaba una tendencia similar a una distribución específica; por consiguiente, los autores optaron por una forma de proveer información nueva acerca del comportamiento de un canal PLC y a su vez comprobar resultados presentados por otras contribuciones.

La mayoría de los trabajos realizados sobre describir un modelo del canal asumen que es un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI), de modo que ignoran la naturaleza de la red eléctrica de ser un sistema LPTV.

No obstante, en [10] se propone una estrategia híbrida que permite generar un canal realístico, mediante un topología simplificada y modelos de cargas con pocos parámetros, lo que conlleva a decir que el modelo está basado en las características de un modelo estructural, que cubre todas las propiedades comunes de un canal PLC tales como atenuación, sistema variante en el tiempo y frecuencia selectiva. Los resultados de este modelo presentan un significativo comportamiento similar a los modelos estadísticos actuales en los parámetros de retardo de propagación, longitud efectiva, ancho de banda coherente. Por consiguiente, esta estrategia propuesta ayuda a la evaluación en el desempeño de la red y al mismo tiempo permite implementar algoritmos de procesamiento de señales para la tecnología PLC.

Otras contribuciones importantes en el desarrollo de modelado de la red eléctrica como canal de comunicación se indican a continuación.

En [11] se diseña un modelo matemático y de simulación de un sistema de comunicación a través de línea eléctrica con OFDM como esquema de modulación, el cual presenta buenas prestaciones en este canal. Se analiza el efecto de cambiar el número de ramas, la longitud de la línea y el número de cargas. Por simplicidad se considera que las cargas son continuamente lineales. La ecuación utilizada para caracterizar la función de transferencia del canal de comunicación a través de red eléctrica es la de Zimmermann. El modelo de eco en cual se basó la simulación se ilustra en la Figura 3.

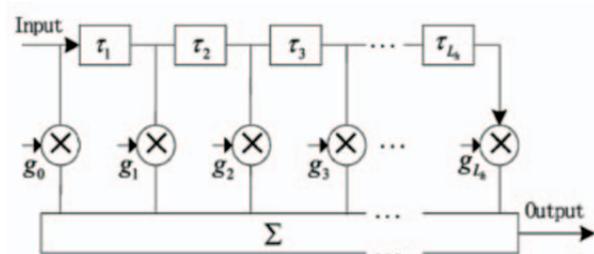


Figura 3. Modelo de eco en las líneas de potencia [11].

Tal como se indicó en los parámetros de la ecuación (1) g_i representa el factor de peso y T_i el retardo de propagación de cada uno de los trayectos.

Los resultados obtenidos fueron que al incrementar el número de ramas en una línea eléctrica se incrementa la razón de error de bit (BER) debido al número de reflexiones que ocurre en cada una de ellas. Estas reflexiones interfieren con la onda transmitida y causa atenuación; para compensarlo se requiere incrementar la potencia transmitida la cual está restringida a un valor máximo establecido, también se puede reducir la distancia entre repetidores o utilizar otros esquemas de codificación más poderosos. Por otro lado, resultó que un incremento de la BER se da a causa del incremento de la carga; sin embargo, se demostró que mientras más ramas existan, menor será el efecto de las cargas sobre el sistema; esto se debe a que el número de cargas en el sistema lo ve como una sola carga en paralelo. Además se demostró que a medida que aumenta la longitud, la probabilidad de error aumenta; al llegar a una longitud mayor a 500 m la señal será casi completamente atenuada, es por ello que los repetidores deben colocarse a una distancia mucho menor para evitar este fenómeno.

Un análisis similar se tiene en [12]. Los efectos de variación del tamaño de la carga con el incremento de número de ramas a un rango de frecuencia hasta de 100 Mhz es descrito para determinar el perfil de parámetros de retardo como el *mean excess delay*, *root means square (rms) delay spread* y el *excess delay spread*. Como resultado, el retardo de propagación incrementa al aumentar el número de ramas y por consiguiente se da un decremento en el ancho de banda coherente; sin embargo, se comprueba que estos resultados se consideran buenos para el diseño de redes PLC de interiores, ya que los decrementos obtenidos son mucho menores a los que se dan en sistemas que operan a una banda de frecuencia de hasta 30 MHz.

También fue evaluada la capacidad del canal para distintos números de ramas y se determinó que es mucho mejor a los análisis comúnmente realizados a 30 MHz.

Posteriormente en [6], el mismo modelo propuesto en [12] se considera para describir el desempeño de un sistema OFDM aplicado a una red PLC de baja tensión utilizando códigos de control de errores intercalados, RS concatenados con códigos Viterbi.

Los códigos intercalados tienden a ser lo suficientemente largos para romper ráfagas largas de errores y corregirlos, de modo que si se utilizan técnicas de codificación, éstas ayudan a mejorar el desempeño significativamente, tanto por la influencia de los tipos de ruidos ya mencionados, como por los efectos del número de ramas interconectadas en un mismo nodo o de todo el enlace de transmisión, la variación de carga y la longitud de la línea.

Los estudios mencionados en conjunto describen el comportamiento de manera general de las líneas de potencia de interiores como canal de comunicación. En otras referencias se han planteados resultados similares; sin embargo, las características y propiedades del canal descritas durante todo el artículo, son las que mayormente se consideran al momento de realizar un análisis del canal o para modelar sistemas de PLC en redes eléctricas.

6. Alcances futuros

Utilizar las redes eléctricas como canal de comunicación resulta un gran reto debido a que para poder lograr responder a las grandes

demandas por parte de los usuarios y que estos puedan tener acceso a redes de transmisión de datos a alta velocidad, es necesario superar las condiciones adversas del medio y el entorno al que está expuesto el canal.

Muchos estudios desarrollan modelos determinísticos y probabilísticos para conocer las características del canal, sin embargo aún se pueden desarrollar nuevas estrategias para crear o mejorar los modelos ya propuestos; como por ejemplo, desarrollar un modelo matemático considerando la naturaleza del sistema, además de considerar una aproximación del escenario de ruido y de buscar nuevas metodologías para que la red pueda operar en otras bandas de frecuencias. También es posible lograr combinaciones de ambos tipos de modelos desde puntos de vista no desarrollados hasta el momento.

Esta contribución da una apertura a nuevas visiones en el desarrollo de la tecnología PLC, no sólo para tener un sencillo y mejor entendimiento de la caracterización del canal, sino también de poder desarrollar nuevos modelos de canal que contribuyan a mejoras de los modelos actuales.

Referencias

- [1] A. Cataliotti, A. Daidone, and G. Tine, "A medium-voltage cables model for power-line communication," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.1, no. 1, pp. 129-135, Jan. 2009.
- [2] M. Gotz, M. Rapp, and K. Dostert, "Power line channel characteristics and their effect on communication system design," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, pp. 78-86, Apr. 2004.
- [3] P.J. Langfeld, and K Dostert, "The capacity of typical powerline reference channels and strategies for system design," in *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, 2001, pp. 271-278.
- [4] F. C. Corripio, J. C. Arrabal, L. D. del Río, and J. E. Muñoz, "Analysis of the cyclic short-term variation of indoor power line channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 4, no.7, pp. 1327-1338, Jul. 2006.
- [5] J. A. Cortés, L. Díez, F. J. Cañete, J. J. Sánchez-Martínez, and J. T. Entrambasaguas, "Performance analysis of OFDM modulation on indoor broadband PLC channels," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol.2011, pp. 1-12, 2011.
- [6] J. Anatory, N. Theethayi, and R. Thottappillil, "Performance of underground cables that use OFDM systems for broadband power-line communications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1889-1897, Oct. 2009.
- [7] H. Philipps, "Modelling of powerline communication channels," in *Proc. 3rd Int'l. Symp. Power-Line Commun. and its Applications*, 1999, pp. 14-21.
- [8] M. Zimmermann, and Dostert, "A multipath model for the powerline channel. *IEEE Transactions on Communications*," vol. 50, no. 4, pp. 553-559, 2002.
- [9] A. M. Tonello, F. Versolatto, and A. Pittolo, "In-Home Power Line Communication Channel: Statistical Characterization." To appear in *IEEE Transactions on Communications*.
- [10] F. J. Canete, J. A. Cortés, L. Díez, and J. T. Entrambasaguas, "A channel model proposal for indoor power line communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 12, pp.166-174, Dec. 2011
- [11] V. K. Chandna, and M. Zahida, "Effect of varying topologies on the performance of broadband over power line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2371-2375, Oct. 2010.
- [12] J. Anatory, N. Theethayi, and R. Thottappillil, "Channel characterization for indoor power-line networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24 no. 4, pp. 1883-1888, Oct. 2009.