

ADAPTACIÓN DEL MODELO LTI DE CANAL PLC A LAS CONDICIONES DE LA RED ELÉCTRICA COLOMBIANA

CONVERSION OF THE LTI MODEL CHANNEL PLC TO CONDITIONS OF THE COLOMBIAN ELECTRICAL NETWORK



AUTOR

JUAN CARLOS VESGA FERREIRA
Magíster en Ingeniería
*UNAD
Docente Asistente
Escuela de Ciencias Básicas
Tecnología e Ingeniería
juan.vesga@unad.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

GERARDO GRANADOS ACUÑA
Magíster en Telemática
*UNAD
Docente Asistente
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología
e Ingeniería
gerardo.granados@unad.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

JOSÉ ANTONIO VESGA BARRERA
Magíster en Potencia Eléctrica
**UNICIENCIA
Docente Investigador
Facultad de Ingeniería
juan.vesga@uniciencia.edu.co
COLOMBIA

*INSTITUCIÓN

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
UNAD
Universidad Pública
Carrera 27 Nro. 40-43
Bucaramanga
bucaramanga@unad.edu.co
COLOMBIA

**INSTITUCIÓN

Corporación Universitaria en Ciencia y
Desarrollo
UNICIENCIA
Universidad Privada
Carrera 12 Nro. 37-14
Bucaramanga
contacto@unicienciabga.edu.co
COLOMBIA

INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO: Los resultados expuestos en el presente artículo forman parte del proyecto de investigación *Red Multiservicios bajo arquitectura SmartGrid* patrocinado por la Vicerrectoría Académica y de Investigación de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

RECEPCIÓN: Mayo 5 de 2015

ACEPTACIÓN: Diciembre 8 de 2015

TEMÁTICA: Telecomunicaciones

TIPO DE ARTÍCULO: Artículo de Investigación e Innovación

Forma de citar: Forma de Citar: Vesga Ferreira, J. C. (2015) Adaptación del modelo LTI de canal PLC a las condiciones de la red eléctrica colombiana. En R, Llamosa Villalba (Ed.). Revista Gerencia Tecnológica Informática, 14(40), 31-41. ISSN 1657-8236.

RESUMEN ANALÍTICO

Actualmente se considera la red eléctrica como objeto de estudio con el fin de establecer procesos de comunicación a alta frecuencia, y por esta razón es importante tener un modelo de canal capaz de estimar su comportamiento en un contexto residencial. Aunque en la literatura es posible encontrar varias clases de modelo de canal PLC, ninguno de los documentos presenta un modelo que se ajuste completamente a las condiciones de la red eléctrica colombiana. En vista de lo anterior, éste artículo presenta una adaptación del modelo lineal e invariante en el tiempo (LTI), propuesto por el grupo PLC de la Universidad de Málaga (España), el cual es considerado en Europa como uno de los modelos más aceptados y capaz de estimar con gran precisión el comportamiento de un canal PLC en entornos residenciales. Además, para la propuesta del modelo de simulación del canal propuesto se usará la herramienta Generador de canal PLC (GC_PLC), desarrollada por el mismo grupo, la cual es adaptada a los parámetros eléctricos existentes en Colombia. Al final del documento se presentan los resultados obtenidos bajo el entorno de simulación para varias condiciones del canal, lo cual fomentará el desarrollo de nuevos proyectos de investigación relacionados con el uso de la tecnología PLC, dado que una de las mayores limitaciones para este tipo de estudios es la falta de una herramienta y un modelo para simular el canal PLC.

PALABRAS CLAVES: Comunicaciones por línea de Potencia, Modelo de canal PLC, Modelo Lineal e Invariante en el tiempo, Red Eléctrica

ANALYTICAL SUMMARY

The electrical network is currently considered object of study in order to establish communication processes at high frequency, and for this reason it is important to have a channel model capable of estimating their behavior in a residential context. Although in the literature it is possible to find several classes of PLC channel models, none of the papers presents a model that fully adjust to the conditions of the Colombian electrical network. In view of the foregoing, this article presents an adaptation to the Linear and time invariant (LTI) model proposed by the group PLC of the University of Málaga (Spain), which is considered in Europe as one of the most accepted models, capable of estimating with great approximation the behavior of a channel PLC in residential environments. In addition, for the purposes of model simulation of the proposed canal will be using the tool Generator of Channel PLC (GC_PLC), developed by the same group, which is adapted to the existing electrical parameters in Colombia. At the end of the paper are observed the results obtained under simulation environment for various conditions of channel, which will encourage the development of new research projects, related to the use of PLC technology, since one of the major limitations to this type of study is due to the lack of a tool and a model to simulate a channel PLC.

KEYWORDS: Electrical network, PLC channel model, Linear and time invariant model, Power Line Communications.

INTRODUCCIÓN

Uno de los medios de comunicación que hasta hace unas décadas no se había comenzado a explotar a plenitud son las líneas de potencia eléctrica, cuya función primaria ha sido el transporte de electricidad [1]. Las líneas de potencia, debido a sus características particulares y a los avances en tecnologías de comunicaciones, hoy representan un importante nicho de desarrollo para el transporte de información, debido a tecnologías emergentes como PLC (Power Line Communications / Comunicaciones por línea de potencia).

PLC hace referencia a un grupo de tecnologías que permiten establecer procesos de comunicación bajo el uso de la red eléctrica como medio físico de transmisión. Durante finales de los años noventa, debido a los nuevos desarrollos tecnológicos y la necesidad de implementar nuevas alternativas para transferencia de información, fue posible alcanzar velocidades en el orden de los Mbps, estableciéndose la posibilidad de hacer uso de la red eléctrica como una red de acceso. El estado actual de la tecnología PLC permite alcanzar velocidades de

hasta 500 Mbps, lo que ha permitido la transformación de la red eléctrica en una auténtica red de banda ancha, capaz de soportar servicios de datos, voz y vídeo ofrecidos por un operador de telecomunicaciones.

La mayoría de planes del gobierno nacional y departamental de Colombia, contemplan el establecimiento y fortalecimiento de políticas públicas encaminadas a la difusión de la conectividad. Uno de los programas relevantes es el Plan Nacional de TICs donde se busca fortalecer los procesos de conectividad en las organizaciones y favorecer las oportunidades de acceso a tecnologías de punta como PLC [2].

Aunque es posible encontrar varias clases de modelos de canal PLC, en ninguna de las fuentes se encontró un modelo que se ajuste completamente a las condiciones de la red eléctrica colombiana. En vista de lo anterior, se decidió adaptar el modelo LTI propuesto por la Universidad de Málaga para entornos residenciales, el cual es considerado en Europa como uno de los modelos más aceptados, capaz de estimar con gran aproximación el comportamiento de un canal PLC en entornos residenciales. Sin embargo, es necesario realizar diversos ajustes relacionados con parámetros de impedancia y conductividad, acordes con las condiciones físicas y eléctricas comunes en el contexto colombiano. Para efectos de simulación del modelo de canal propuesto se hará uso de la herramienta "Generador de Canal PLC (GC_PLC)" [3] a simulator for indoor power-line channels is presented. Its behavioral model includes both the long-and short-time variation of the channel. The long-time variation is due to the electrical appliances switching and is modeled in a statistical way. The cyclic short-time variation is related to the presence of the mains voltage and is characterized modeling the channel response as a linear periodically time-variant (LPTV escrita en MATLAB y desarrollada por el PhD Francisco Javier Cañete, perteneciente al Grupo PLC de la Universidad de Málaga-España, la cual será adaptada a los parámetros eléctricos vigentes en Colombia.

1. METODOLOGÍA

1.1 MODELO LTI PARA UN CANAL PLC

La red eléctrica es considerada un medio hostil para la transmisión de información en donde se pueden presentar numerosos problemas en el momento de establecer un proceso de comunicación como: alto componente de ruido, impedancia variable y posibles atenuaciones significativas. Estos son algunos de los retos que se deben afrontar debido a las diversas conexiones presentes en la red eléctrica, y a los cambios constantes en la topología de la red a causa de apertura

o cierre de circuitos, lo cual genera la aparición de transitorios que causan reflexiones de señal y con ello cambios característicos en su impedancia y atenuación [4]. Esta situación de cambios constantes en la distribución de las redes PLC se presenta comúnmente en las redes PLC hogareñas en donde cada interruptor puede generar cambios eventuales en su topología.

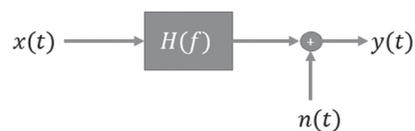
La eficiencia de una red bajo el uso de tecnología PLC depende de las características del canal. Un canal puede ser representado por un sistema que establece una relación entrada-salida, el cual permite estimar su comportamiento acorde con las condiciones físicas de los elementos que se encuentran conectados y representar las perturbaciones que se pueden llegar a obtener de forma estadística. Aunque se han propuesto diversos modelos de canal para representar el comportamiento de la red eléctrica, el modelo LTI surge como una propuesta que ha recibido una buena aceptación por parte de la comunidad científica [5].

Un sistema LTI tiene una respuesta al impulso $h(t)$, correspondiente a la transformada inversa de Fourier de la respuesta en frecuencia estimada del canal $H(f)$, la cual determina la relación de entrada-salida del sistema causal y puede ser expresada en (1) [5]:

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)x(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

El modelo de canal puede ser representado mediante un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI) y un ruido estacionario de tipo aditivo, como se presenta en la Fig. 1.

Figura 1. Representación de un sistema lti para un canal plc.



Debido a lo anterior, un sistema LTI puede ser considerado como una excelente alternativa para modelar un canal PLC en un contexto residencial acorde con la topología y estado de conexión y operación de equipos eléctricos que pueden formar parte de la red eléctrica [5].

1.2 MODELO ESTRUCTURAL DEL CANAL

Las instalaciones eléctricas residenciales están compuestas por un cableado y equipos eléctricos conectados como dispositivos terminales al final de cada tramo. En una red PLC es posible encontrar los siguientes elementos:

Cableado eléctrico: Corresponde a todo el conjunto de cables que constituye la red de baja tensión en el contexto residencial. Está conformado por diversos circuitos y esquemas de conexión, estableciendo puntos de conexión terminal para cada uno de los equipos eléctricos que posteriormente formarán parte de la carga eléctrica existente en la red eléctrica. A partir de la red de cableado es posible obtener un modelo representado como un bipuerto, el cual permite estimar la función de transferencia del canal PLC.

En un entorno de simulación es posible establecer las condiciones para el modelo de canal PLC de forma aleatoria, mediante el uso de distribuciones estadísticas de algunos elementos que forman parte de la topología existente como: la estructura de la red y los estados de conexión dinámicos de los equipos eléctricos que pueden llegar a estar conectados en la red eléctrica.

El generador de estructura de red involucra dos procedimientos: generación de cableado y asignación de dispositivos. El generador de cableado hace uso de patrones de distribución de cableado y tipos de cables comunes en ambientes residenciales. La longitud de cada uno de los tramos de cableado que forman parte de la arquitectura se genera mediante el uso de una variable aleatoria X con una distribución de Rayleigh (2) [6].

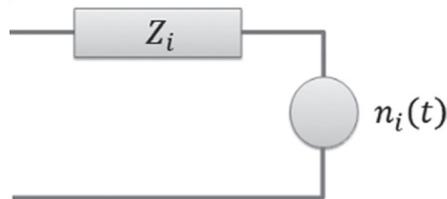
$$f_x(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

En [3] se ha comprobado que los equipos eléctricos pueden presentar un comportamiento dinámico en el dominio de la frecuencia, como generadores de ruido (estacionario o ciclo estacionario) y como cargas (activas o pasivas) al interior de la red eléctrica, lo cual es un aspecto de vital importancia en el proceso de modelamiento del canal PLC. Adicionalmente, se debe considerar en la estimación de la respuesta en frecuencia del canal PLC, la eventual conexión y desconexión de forma aleatoria de equipos eléctricos de la red de potencia, lo cual puede generar alteraciones en la respuesta del canal y los niveles de ruido que circulan por la red.

Equipos eléctricos: Es todo dispositivo que puede formar parte de la red eléctrica a través de un punto de conexión. Estos pueden ser representados como bipolos activos mediante un generador de señal de ruido $n_i(t)$, el cual se puede representar mediante una señal estacionaria y una carga $Z_i(f)$, la cual puede describir un comportamiento no lineal en función de

la frecuencia y dependiente de los niveles de tensión y corriente que pueden estar presentes en un instante determinado en el equipo i . Un equipo eléctrico puede ser representado de acuerdo con la Fig. 2.

Figura 2. Modelo de bipolo activo para un equipo eléctrico



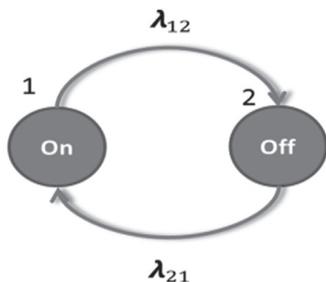
Uno de los beneficios que ofrece el modelo de bipolo activo es que permite representar diversos tipos de equipos eléctricos conectados (activos o pasivos), e incluso modelar tomas de corriente libres de equipos eléctricos conectados entre sus terminales mediante circuitos abiertos con un alto valor Ohmico de impedancia.

Por otra parte, el procedimiento relacionado con la asignación de dispositivos consiste en asignar en cada nodo terminal un tipo de equipo eléctrico, el cual es seleccionado de forma aleatoria de una base de datos que forma parte del GC_PLC. La distribución de probabilidad de cada uno de los equipos obedece a una estimación aproximada de su presencia en ámbitos residenciales, la cual se ha registrado de manera empírica en el GC_PLC.

Al interior de una red PLC es importante tener en cuenta el estado de conexión y operación dinámica de los equipos eléctricos, el cual puede cambiar en función del tiempo alternando en sus tres estados posibles: activo, inactivo y desconectado; afectando de manera directa la respuesta del canal PLC. El estado de conexión de equipos eléctricos se establece a partir de parámetros estadísticos en función de su comportamiento, en contextos de carácter residencial, en donde su estado de conexión y operación puede ser modelado como una cadena de Markov [7].

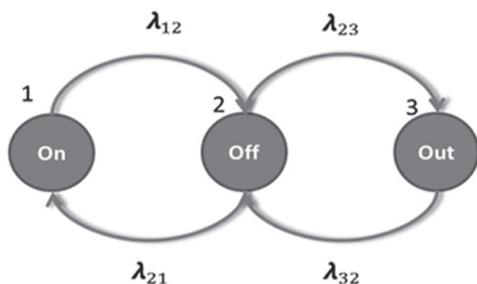
Como se ha mencionado anteriormente, todo equipo eléctrico puede ser representado mediante un bipolo, cuyos parámetros dependerán de su estado de conexión y operación sobre el canal PLC. La mayoría de los equipos eléctricos permanecen conectados a la red eléctrica durante largos periodos de tiempo, por lo cual pueden ser representados mediante un modelo markoviano bi-estado, el cual es representado en la Fig. 3.

Figura 3. Modelo markoviano bi-estado para dispositivos eléctricos



Sin embargo, existe un pequeño grupo de equipos eléctricos (licuadora, batidora, entre otros) que solo permanecen activos durante cortos periodos de tiempo y posteriormente son desconectados de la red eléctrica. Para este último grupo es necesario un modelo markoviano tri-estado, el cual es representado en la Fig. 4.

Figura 4. Modelo markoviano tri-estado para dispositivos eléctricos.



Sea t_i el tiempo de permanencia en el estado i y $\lambda_{i,j}$ corresponde a la tasa de transición del estado i al estado j , expresada en s^{-1} . Se considera que el modelo se ajusta a una distribución exponencial, debido a que el tiempo de permanencia en cualquier estado obedece a un proceso aleatorio sin memoria, y a que a la hora de determinar un estado futuro del proceso solo es necesario conocer el estado actual (3) [8].

$$f_{t_i}(t) = \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij}t}, (t > 0) \quad (3)$$

La función de distribución acumulativa será (4):

$$P(t_i \leq t) = \int_0^t \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij}u} du = 1 - \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij}t} \quad (4)$$

El tiempo promedio de permanencia en el estado $[\mu_i = 1/\lambda_i]$, y con varianza del tiempo de permanencia $[\sigma_i^2 = 1/\lambda_i^2]$.

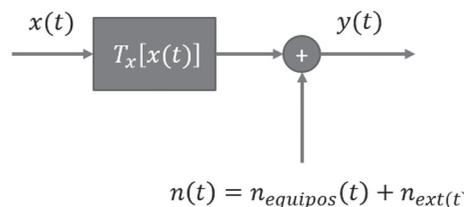
Adaptador PLC: Dispositivo que cumple el papel de transmisor o receptor al interior de la red PLC. En el

modo de transmisor puede ser representado como un bipolo que consiste en el equivalente Thévenin de un generador de señal $x(t)$ y una carga lineal constante Z_T . Por otro lado cuando el adaptador se comporta como un receptor, puede ser representado como un bipolo pasivo representado por una carga lineal constante Z_R .

Ruido externo: Corresponde al ruido generado por fuentes externas, el cual se superpone a la señal de entrada del receptor y se representará como $n_{ext}(t)$.

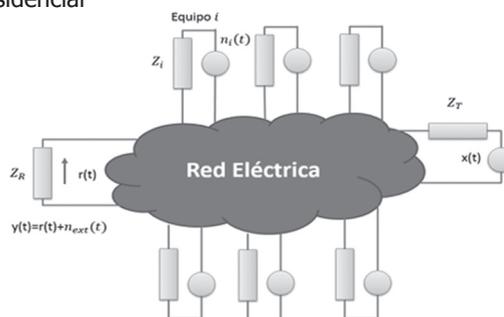
El modelo propuesto, desde el punto de vista de transmisión de señales, puede ser representado como un sistema, en donde la señal de salida es el resultado del proceso de transformación genérica de la señal de entrada superpuesta a una señal de ruido. La señal de ruido será el resultado de la transformación del ruido generado por cada uno de los equipos eléctricos conectados a la red eléctrica $n_{equipos}(t) = T_n[n_1(t), n_2(t), \dots, n_i(t)]$ y el ruido externo $n_{ext}(t)$. En vista de lo anterior, la transformación $T_x[\cdot]$ corresponde a la respuesta del canal PLC y $n(t)$ obedece al ruido recibido, como se presenta en la siguiente Fig. 5.

Figura 5. Modelo general del comportamiento del canal



Finalmente y teniendo en cuenta cada uno de los elementos descritos anteriormente, la representación de una red PLC en un entorno residencial se puede visualizar de acuerdo con la Fig. 6.

Figura 6. Representación de una red plc en un entorno residencial

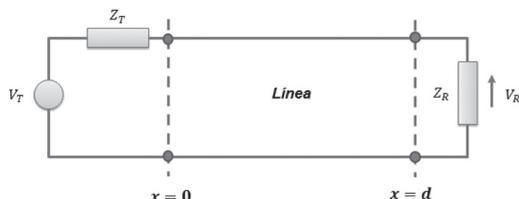


1.3 PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA RESPUESTA DEL CANAL PLC

Es posible modelar la red eléctrica mediante el uso de líneas de transmisión, el cual es un tema ampliamente

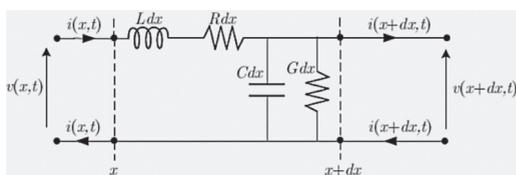
abordado en diversas referencias bibliográficas. Se entiende por línea de transmisión aquella estructura capaz de soportar la propagación de campos TEM (Transversales eléctricos y magnéticos), la cual puede ser representada en función de la relación existente entre niveles de corriente y voltaje.

Figura 7. Línea de transmisión terminada



En la Fig. 7, se observa la representación de la línea terminada, en la cual se incluye en sus extremos el equivalente Thévenin del transmisor y receptor, acorde al modelo de bipolo mencionado anteriormente. Por otro lado, la línea de transmisión de longitud d está conformada por una sucesión de elementos distribuidos acorde con la Fig. 8, los cuales determinan el comportamiento de la línea de transmisión y por lo tanto es de gran importancia el estimar el valor de cada elemento.

Figura 8. Representación diferencial de una línea de transmisión



Los elementos representados en la Fig. 8 se denominan parámetros primarios de una línea de transmisión:

- R : Resistencia incremental (Ω/m)
- L : Inductancia incremental (H/m)
- G : Conductancia incremental (S/m)
- C : Capacitancia incremental (F/m)

Se debe realizar un análisis en régimen permanente de la línea, evaluando el comportamiento de cada uno de los parámetros en el dominio de la frecuencia. En vista de ello, las expresiones de tensión y corriente a lo largo de la línea representadas como fasores en función de la frecuencia ω y en el dominio del tiempo son (5) (6):

$$v(x,t) = V_1 e^{-\gamma x} e^{j\omega t} + V_2 e^{\gamma x} e^{j\omega t} \quad (5)$$

$$i(x,t) = \frac{V_1}{Z_o} e^{-\gamma x} e^{j\omega t} + \frac{V_2}{Z_o} e^{\gamma x} e^{j\omega t} \quad (6)$$

Donde:

V_1 y V_2 corresponden a la amplitud de la onda incidente y reflejada en la entrada de la línea de transmisión.

γ : Se defina como la constante de propagación. La expresión para calcular γ es (7):

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} [m^{-1}] \quad (7)$$

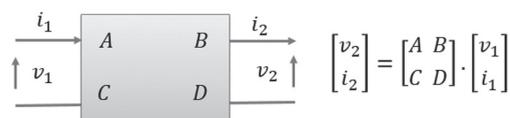
Z_o : Corresponde a la impedancia característica. La expresión para calcular Z_o es la siguiente (8):

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} [\Omega] \quad (8)$$

La propagación de señales sobre la red eléctrica introduce una atenuación, la cual se incrementa con la longitud de la línea y la frecuencia de la señal. Esta atenuación es una función de la impedancia característica de las líneas de potencia Z_o y la constante de propagación.

Una línea de transmisión puede ser evaluada como una red de dos puertos soportado en la teoría de circuitos eléctricos. Para ello, es necesario estimar los parámetros de transmisión ($ABCD$), los cuales pueden ser calculados de acuerdo con la Fig. 9:

Figura 9. Matriz de parámetros de transmisión o abcd



El modelo permite combinar etapas conectadas en cascada representadas cada una mediante el uso de los parámetros $ABCD$, facilitando el cálculo del esquema total de la red PLC mediante la multiplicación entre sí de las matrices que representan cada una de las etapas. En la Fig. 10 se presenta la estimación de los parámetros $ABCD$ para el caso de impedancias conectadas en serie o paralelo.

La Fig. 11, representa una línea de transmisión terminada como una impedancia equivalente, mediante el uso de la propiedad de traslación de impedancias.

Las expresiones para los parámetros $ABCD$ acorde con los parámetros secundarios de una línea de transmisión son las siguientes (9) (10) (11):

$$A = D = \cosh(\gamma d) \tag{9}$$

$$B = Z_o \text{Senh}(\gamma d) \tag{10}$$

$$C = Z_o^{-1} \text{Senh}(\gamma d) = B Z_o^{-2} \tag{11}$$

Figura 10. Matriz abcd para una impedancia en serie o paralelo.

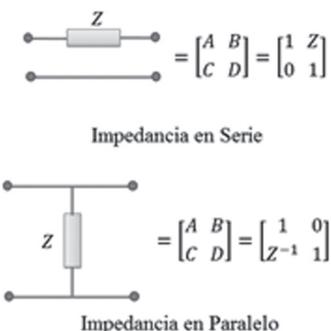
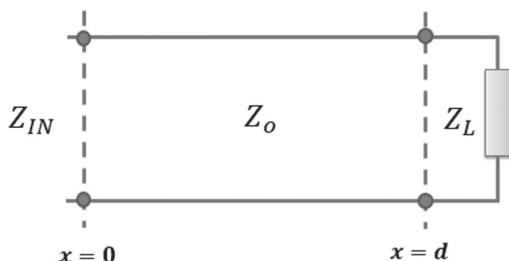


Figura 11. Traslación de impedancia en una sección al interior de una línea de transmisión



El valor de Z_{IN} en función de los parámetros presentados en la Fig. 11, puede ser estimado de la siguiente forma (12):

$$Z_{IN} = Z_o \frac{Z_L \cosh(\gamma d) + Z_o \text{Senh}(\gamma d)}{Z_o \cosh(\gamma d) + Z_L \text{Senh}(\gamma d)} \tag{12}$$

$$= \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D}$$

Con base en las expresiones anteriores, la matriz ABCD que representa la línea terminada propuesta es (13):

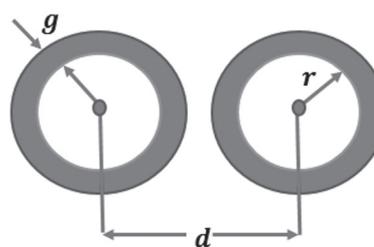
$$\begin{bmatrix} V_G \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_G \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ I_L \end{bmatrix} \tag{13}$$

Teniendo en cuenta que $V_L = I_L \cdot Z_L$, la respuesta del sistema $H(f)$ que obedece a la línea terminada es (14):

$$H(f) = \frac{V_L}{V_G} = \frac{1}{A' + B' / Z_L} \tag{14}$$

Para establecer un modelo de canal PLC cercano a la realidad, se ha adoptado el uso de la línea bifilar como modelo electromagnético para las líneas de transmisión [9]. Una línea bifilar simétrica puede ser representada de acuerdo con la Fig. 12.

Figura 12. Sección transversal de una línea bifilar asociada al cableado eléctrico en ambientes residenciales



En donde:

r : Radio del conductor eléctrico

g : Grosor del dieléctrico que envuelve cada conductor

d : Distancia entre los ejes de los dos conductores que constituyen la línea bifilar

Para evaluar los parámetros de transmisión de una línea bifilar, es necesario definir el factor de forma K , el cual puede ser calculado mediante el uso de la siguiente expresión (15):

$$K = \ln \left[\frac{d}{2r} + \sqrt{\left[\frac{d}{2r} \right]^2 - 1} \right] \tag{15}$$

La permitividad compleja de una material dieléctrico en el dominio de la frecuencia obedece a la siguiente expresión: $\epsilon(f) = \epsilon'(f) - j\epsilon''(f)$. Para el caso particular de considerar el uso de materiales sin pérdidas (buenos dieléctricos) la permitividad puede ser representada como una constante de valor ϵ , la cual puede ser calculada en función de la permitividad del vacío $\epsilon_0 \approx 10^{-9} / 36\pi [F/m]$ y la permitividad relativa en donde $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$.

Las expresiones que permiten estimar los parámetros primarios de una línea bifilar son (16):

$$C = \frac{\pi \varepsilon'}{K} \approx \frac{\pi \varepsilon}{K}$$

$$L = \frac{\mu K}{\pi}$$

$$G = \frac{\pi \varepsilon''}{K} \approx 0 \quad (16)$$

$$R = \frac{d/2r}{\pi r \sigma \delta \sqrt{\left[\frac{d}{2r}\right]^2 - 1}}$$

Dónde: μ es la permeabilidad magnética, σ es la conductividad del medio y δ es la profundidad de penetración en el conductor, el cual depende de la frecuencia y puede ser calculado mediante el uso de la siguiente expresión (17):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma \mu f}} \quad (17)$$

En vista de lo anterior, y teniendo en cuenta cada uno de los parámetros primarios calculados, la impedancia característica estaría dada por (18):

$$Z_o = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu K}{\varepsilon}} \quad (18)$$

Con el fin de calcular cada uno de los parámetros que describen el comportamiento de una línea de transmisión, es necesario hacer uso de las características de los cables eléctricos que comúnmente son utilizados en los procesos de instalación de cableado en ambientes residenciales. Para ello, se tomarán en cuenta las especificaciones establecidas para conductores tipo THW-LS/THHW-LS autoextinguibles referencia NMX-J-010, los cuales se ajustan al tipo de cableado utilizado en Colombia para la implementación de instalaciones eléctricas residenciales.

- Tipo de metal para el conductor: Cobre
- Material aislante: PVC (Cloruro de Polivinilo)
- Constante dieléctrica relativa del material aislante $\varepsilon_r = 3$

$$\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ (S/m)}$$

$$\mu = \mu_o \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (H/m)}$$

$$\delta = 6,6 \cdot \frac{10^{-2}}{\sqrt{f}} \text{ (m)}$$

Teniendo en cuenta la Fig. 12 (sección transversal de una línea bifilar), es necesario hacer una estimación de la permitividad relativa equivalente presente entre los dos conductores, la cual depende de la permitividad

relativa del material dieléctrico y la separación entre los conductores d (19).

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2b(\varepsilon_r - 1) + d - 2a}{d - 2a} \quad (19)$$

Debido a que la distancia d puede variar ya que los conductores se encuentran sueltos, se puede estimar un valor promedio de 10mm, tomando en cuenta que éste valor corresponde al radio de un tubo PVC utilizado convencionalmente en las instalaciones eléctricas.

En la tabla 1 se resumen los valores calculados para diversos tipos de calibre acorde con la referencia NMX-J-010.

TABLA 1. Parámetros primarios de una línea bifilar según el calibre del conductor

Calibre	10	12	14
Sección [mm^2]	5,26	3,31	2,08
Diámetro interno r [mm]	2,6	2,05	1,63
Grosor del aislante g [mm]	0,76	0,76	0,76
Permitividad equiv. ε_{eq}	1,63	1,51	1,45
Factor de forma K	1,27	1,54	1,79
C [pF/m]	35,68	27,33	22,56
L [$\mu H/m$]	0,51	0,61	0,71
R [Ω/m]	$37,44 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$	$44,47 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$	$53,96 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$
Z_o [Ω]	105,87	120,97	133,14

1.3 RUIDO EN UN CANAL PLC

De acuerdo con la literatura analizada, comúnmente se encuentra que, sin la debida protección electromagnética, las líneas eléctricas son sensibles a los ruidos externos generados por múltiples dispositivos de radiofrecuencia y por equipos electromecánicos, lo cual ocasiona diversos problemas de interferencia electromagnética. El ruido en los sistemas PLC puede ser clasificado en cuatro clases: ruido de fondo, ruido de banda estrecha, ruido impulsivo y ruido armónico [1] (ver tabla 2).

La densidad de potencia espectral para el ruido de fondo está alrededor de -145 dBm/Hz y esto es casi 30dB por encima del ruido térmico del piso.

El ruido impulsivo tiene una amplitud máxima de 40 dBm/Hz y es bastante más alto que los ruidos de fondo y banda estrecha. Estas conclusiones se basan en el modelo de ruido desarrollado por Walter Y. Chen [10], el cual fue obtenido a partir de mediciones de un típico canal residencial. En la Fig. 13 se aprecia el registro de

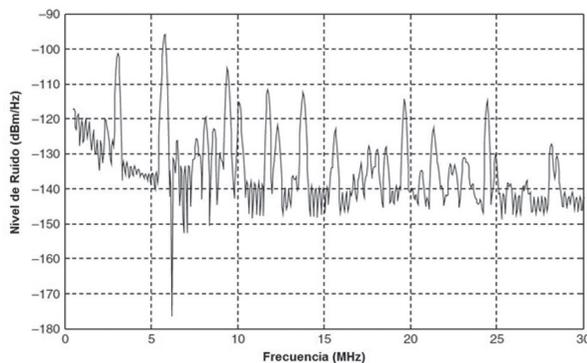
un ruido típico en una red PLC. Es posible resumir los diversos tipos de ruido presentes en un canal PLC en tres categorías:

- Ruido estacionario: obedece a ruido de fondo e interferencias de banda estrecha.
- Ruido Cicloestacionario: corresponde a ruido impulsivo periodico, cuyo comportamiento varia de manera periodica y sincronizada con la frecuencia de red (60Hz).
- Ruido no estacionario: hace referencia al ruido asincronico

TABLA 2. Tipos de ruido asociados a canales plc

Tipo de Ruido	Descripción
Ruido de fondo	Es la sumatoria de varias fuentes de ruido de baja potencia.
Ruido de banda estrecha	Caracterizado por señales de amplitud modulada causadas por la inducción de señales de radio en las bandas media y de onda corta.
Ruido impulsivo	Causado por transitorios debido a fenómenos de iluminación o interruptores dentro de la red eléctrica.
Ruido armónico	Compuesto de múltiples frecuencias utilizadas por equipos eléctricos conectados a la red y que son múltiplos de la frecuencia de la línea (50 / 60 Hz).

Figura 13. Nivel de ruido en un canal plc



Un aspecto importante es que el ruido estacionario y el ciclo estacionario presentan características invariantes durante largos periodos de tiempo, ocasionando alteraciones en su comportamiento durante procesos de conexión y desconexión de dispositivos. Este complejo asunto es conocido como compatibilidad electromagnética (EMC). Desde el punto de vista de la EMC, cada dispositivo alimentado eléctricamente genera perturbaciones eléctricas, las cuales pueden ser conductivas (transportadas en el cableado eléctrico) o inductivas (emitidas en el entorno de radio del dispositivo).

El ruido que emiten los equipos eléctricos puede ser caracterizado como señales de tipo estacionario, las cuales pueden ser representadas mediante la estimación individual de su densidad espectral de potencia (DEP). Aunque pueden presentarse otros tipos de ruido, por simplicidad del modelo únicamente será considerado este tipo de ruido. Para calcular la DEP total en el receptor se debe realizar la sumatoria de la componente de ruido generada por los equipos eléctricos conectados a la red $S_{Nequ}(f)$ y el ruido externo $S_{Next}(f)$ (20).

$$S_N(f) = S_{Nequ}(f) + S_{Next}(f) \quad (20)$$

Considerando la contribución de m equipos eléctricos conectados a la red, la DEP total producto de los equipos eléctricos es (21):

$$S_{Nequ}(f) = \sum_{i=1}^m S'_{Ni}(f) \quad (21)$$

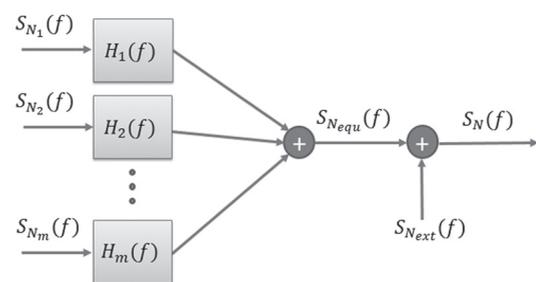
La contribución de ruido por cada equipo eléctrico i dependerá de la respuesta en frecuencia del sistema LTI equivalente $H_i(f)$ vista desde cada dispositivo. Por tratarse de un sistema LTI, la $S'_{Ni}(f)$ puede calcularse mediante el uso de la siguiente expresión (22) [11].

$$S'_{Ni}(f) = S_{Ni}(f) \cdot |H_i(f)|^2 \quad (22)$$

Donde $S_{Ni}(f)$ corresponde a la DEP del equipo eléctrico i .

Tomando en cuenta cada uno de los elementos anteriores, se presenta en la Fig. 14 el esquema general correspondiente al ruido total que influye en el receptor.

Figura 14. Esquema general del ruido en el receptor.



2. RESULTADOS

2.1 ESTIMACIÓN DEL CANAL PLC

Con el fin de evaluar el comportamiento del modelo propuesto, bajo un escenario real, se hizo uso de la herramienta GC_PLC, escrita en MATLAB y desarrollada por el PhD Francisco Javier Cañete, perteneciente al Grupo PLC de la Universidad de Málaga-España. La

herramienta fue ajustada de acuerdo con los valores registrados en la tabla 1, adaptando el modelo LTI al contexto Colombiano. Este ajuste permite estimar el comportamiento de un canal PLC, acorde con los parámetros asociados a la topología de una red PLC, en un ambiente residencial típico. Adicionalmente, la evaluación del canal se realiza por debajo de la banda de los 30MHz, considerando el hecho de que los adaptadores de red PLC bajo el estándar HPAV operan en esta banda de frecuencia. En [12] se presenta toda la información para el uso de la herramienta GC_PLC.

Figura 15. Respuesta de un canal plc en excelentes condiciones

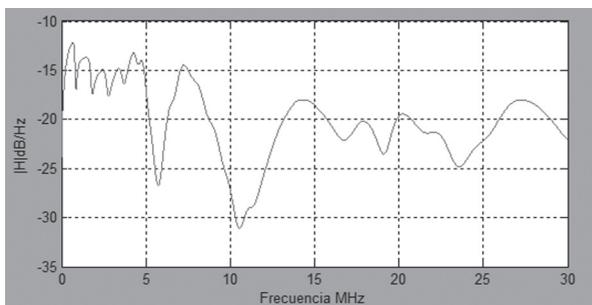


Figura 16. Respuesta de un canal plc en condiciones típicas

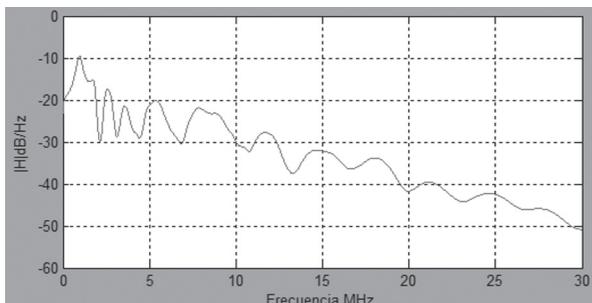
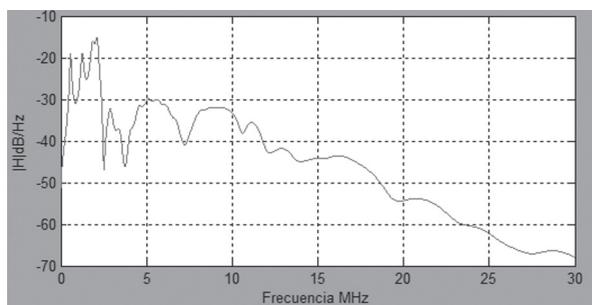


Figura 17. Respuesta de canal plc en condiciones deficientes



En las Fig. 15,16 y 17 se presenta la magnitud correspondiente a la respuesta de canal PLC ($|H|$) en unidades de dB/Hz , para tres condiciones de canal posibles: excelente, típica y deficiente; bajo el uso de

la herramienta (GC_PLC) ajustada, en un rango de frecuencia por debajo de los 30MHz y coherente con una topología de red establecida en un ámbito residencial.

Es posible considerar la respuesta de canal típica, como un escenario real, acorde con las condiciones existentes en la red eléctrica colombiana, debido a que en este contexto, la red eléctrica aún no ha sido acondicionada para ofrecer un escenario óptimo para el uso de la tecnología PLC en el ámbito residencial.

La expresión para calcular el total de bits/seg que pueden ser transmitidos en el canal PLC, está dada por (23):

$$BW_{TOTAL} = \frac{1}{T_s} \sum_{k=1}^{N_{sp}} \log_2 \left[1 + \frac{SNR_k}{\Gamma} \right] \quad (23)$$

Donde:

N_{sp} : Número de subportadoras (917)

T_s : Tiempo de un símbolo OFDM. ($T_s=40,96 \mu s$) para el caso particular de HPAV [13].

SNR_k : Relación Señal a Ruido presente en la subportadora k

Γ : Se conoce como SNR gap, el cual representa la pérdida en SNR en la que se incurre por el hecho de utilizar un esquema de codificación discreto específico. En [14] se sugiere que el valor de Γ puede ser calculado para efectos prácticos de la mediante la siguiente expresión (24):

$$\Gamma = -\frac{1}{1,6} \ln \left[\frac{BER_{obj}}{0,2} \right] \quad (24)$$

Donde el BER_{obj} corresponde al En procesos de simulación de canales PLC el valor de VER sugerido es 10^{-3} .

El resultado obtenido para estimar el número de bits/seg de acuerdo con las condiciones de canal se resume en la tabla 3.

TABLA 3. BW_{TOTAL} vs. Condición del canal PLC

Condición del canal PLC	BW_{TOTAL} [Mbps]
Excelente	159,72
Típica	120,65
Mala	83,58

3. CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron los resultados de la adaptación del modelo lineal e invariante en el tiempo (LTI) y la aplicación de la herramienta Generador de canal PLC (GC_PLC), desarrollados por el grupo PLC de la Universidad de Málaga (España), el cual fue ajustado a las condiciones específicas más comunes en

las redes eléctricas domésticas en Colombia. El modelo presentado, busca fomentar el desarrollo de nuevos proyectos de investigación, relacionados con el uso de la tecnología PLC, teniendo en cuenta que una de las mayores limitaciones para este tipo de estudios, obedece al desconocimiento de una herramienta y un modelo para simular un canal PLC.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Anatory, J. & Theethayi, *Broadband Power-Line Communication Systems: Theory and Applications.*, 1a ed. Southampton, England: WIT Press, 2010.
- [2] Ministerio de las Tecnologías de la información y comunicaciones de Colombia, "Plan Nacional de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. 2008-2019," 2008.
- [3] S. Sancha, F. J. Canete, L. Diez, and J. T. Entrambasaguas, "A Channel Simulator for Indoor Power-line Communications," in *2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 2007, pp. 104–109.
- [4] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, pp. 553–559, Apr. 2002.
- [5] F. J. Cañete, "Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha," Universidad de Málaga, 2005.
- [6] P. Jeruchim, M.C.; Balaban, *Simulation of Communication Systems*. New York, USA: Plenum Press, 2000.
- [7] A. Allen, *Probability, statistics, and queueing theory: with computer science applications*. Academic Press, 1990.
- [8] L. Kleinrock, *Queueing systems, volume I: theory*. New York, USA: Wiley, 1975.
- [9] F. Canete, J. Cortes, L. Diez, and J. Entrambasaguas, "A channel model proposal for indoor power line communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 12, pp. 166–174, Dec. 2011.
- [10] W. Y. Chen, *Home Networking Basis: Transmission Environments and Wired/Wireless Protocols*, 1ed. ed. Saddle River, NJ: Pearson-Prentice Hall, 2004.
- [11] S.L. Marple Jr., *Digital spectral analysis with applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987.
- [12] F. Canete, "User guide for PLC channel generator v. 2," Universidad de Málaga, 2011.
- [13] H. Latchman, K. Srinivas, L. Yonge, and S. Gavette, *Homeplug AV and IEEE 1901: A Handbook for PLC Designers and Users*, 1a ed. New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press, 2013.
- [14] J. A. Cortés, "Modulation and Multiple Access Techniques for Indoor Broadband Power-Line Communications," Universidad de Málaga, 2007.