

Simulación de un canal PLC para AMI para empresas distribuidoras de energía eléctrica con fines didácticos y de investigación

Simulation of a PLC channel for AMI for distribution companies of electric energy for educational and research purposes

Jorge E. Veglia¹, David L. La Red Martínez¹, Reinaldo J. Scappini²

¹ Universidad Nacional del Nordeste, Argentina

² Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

jveglia@exa.unne.edu.ar , lrmdavid@exa.unne.edu.ar , rscappini@frre.utn.edu.ar

RESUMEN. Gran parte de las Infraestructuras Avanzadas de Medición (AMI, Advanced Measurement Infrastructures), desplegadas en los sistemas de distribución de energía eléctrica para el registro de los parámetros facturables y de calidad de servicio utilizan las mismas redes de energía como medio de comunicación (PLC, Power Line Communications). Para ello, utilizan la banda de frecuencias NB-PLC (Narrowband PLC, o PLC de banda estrecha, entre 90 y 500 KHz), con esquemas de modulación tales como la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Dado que las redes de distribución de energía no se diseñan como canales de comunicación, presentan serios desafíos para la obtención de comunicaciones confiables. En este trabajo se propone modelar en Matlab/Simulink® el canal PLC con fines de docencia e investigación, para una configuración típica de distribución en Baja Tensión.

ABSTRACT. A large part of the Advanced Measurement Infrastructures (AMI), deployed in electric power distribution systems for the recording of billable parameters and quality of service use the same energy networks as a means of communication (PLC, Power Line Communications). To do so, they use the NB-PLC frequency band (Narrowband PLC, between 90 and 500 kHz), with modulation schemes such as Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Since energy distribution networks are not designed as communication channels, they present serious challenges for obtaining reliable communications. In this paper we propose to model the PLC channel in Matlab/Simulink® for teaching and research purposes, for a typical configuration of Low Voltage distribution.

PALABRAS CLAVE: AMI, Redes inteligentes, Canales PLC, OFDM, Simulación.

KEYWORDS: AMI, Smart grids, PLC channels, OFDM.

1. Introducción

En todo sistema de comunicación es especialmente importante modelar el canal de comunicación, de modo de reflejar apropiadamente las características de éste que influyen en la señal transmitida. En el contexto de la implementación de NB-PLC en líneas eléctricas, esto significa que el modelo que se utilice debe reproducir efectos tales como la selectividad de frecuencia, la atenuación, el multirayecto, y el comportamiento de paso bajo.

No obstante, la tarea no resulta sencilla. En primer lugar, las topologías y los materiales utilizados en la red varían entre países y regiones. En segundo lugar, un modelo o un enfoque desarrollado para una banda de frecuencias de comunicación no resultará útil para otra (Masood, Ellahi, Khan, Akram, Usman & Gul, 2018). En este sentido, la mayoría de la investigación en PLC está orientada a las aplicaciones interiores en BB-PLC (internet y domótica), y aunque muchas conclusiones pueden resultar útiles, existen marcadas diferencias con NB-PLC. De este modo, como lo destaca (Zhu, 2014), el problema más importante del modelado de canales para las comunicaciones de redes inteligentes es la falta de modelos de canal de banda estrecha en la banda CENELEC A (3-95 KHz), ya que el conocimiento cuantitativo del canal en este rango de frecuencia es todavía impreciso, lo que se refleja claramente en las diferencias significativas entre los parámetros de la capa física de los últimos sistemas NB-PLC (Cortés, Sanz, Estopiñán & García, 2015).

Adicionalmente, y en particular en este tipo de canal en el cual el medio físico no ha sido concebido como una línea de transmisión de información, el ruido representa un elemento a ser modelado cuidadosamente, debido a sus variados orígenes, intensidades y duración. De hecho, existen numerosos trabajos de investigación basados en mediciones de campo y simulaciones que permiten clasificar y cuantificar tales fuentes y sus efectos sobre la información transmitida.

Por consiguiente, el presente trabajo se estructura de manera de presentar resumidamente los principales enfoques para el modelado del canal PLC, destacando sus ventajas e inconvenientes; en la sección 2 se describen trabajos previos, en la sección 3 se presenta la problemática del ruido, en la sección 4 se describe el modelo propuesto tanto para el canal PLC como para el ruido, en la sección 5 se muestran algunos resultados y en la sección 6 se indican las principales conclusiones, finalizándose con las referencias bibliográficas.

2. Trabajos previos

La naturaleza de la red eléctrica de potencia utilizada como canal de comunicación hace que la tarea de lograr un modelo que la represente resulte compleja, y no exista un modelo uniformemente aceptado. Las líneas de investigación para el modelado de los canales PLC hacen uso de cuatro enfoques principales (Masood & Baig, 2016): una aproximación top-down o estadística, una aproximación bottom-up o determinística, un modelado paramétrico y un modelado basado en mediciones de campo y simulación.

Siguiendo el resumen de (Masood & Baig, 2016), los enfoques top-down o estadísticos apuntan al desarrollo de modelos de canales mediante el ajuste de datos, a partir de las descripciones del comportamiento y los parámetros de alto nivel del canal (Cañete, Cortés, Díez & Entrambasaguas, 2011). El método, originalmente propuesto por Phillips (1999) y por Zimmerman y Dostert (2002), estima la atenuación según la longitud del cable y el tiempo de retardo que introduce cada camino de transmisión en la red, sumándose luego cada contribución. La función de transferencia de la red queda expresada por:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{peso}} \underbrace{e^{-(a_0+a_1 f^k)d_i}}_{\text{atenuación}} \underbrace{e^{-j2\pi f(d_i/v_p)}}_{\text{retardo}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde N representa el número de trayectorias consideradas; g_i el peso asociado a cada trayectoria; a_0 , a_1 y k son parámetros basados en el modelo del cable y en dimensiones geométricas; d_i la longitud y d_i/v_p el retardo de cada camino. Tanto la atenuación como el retardo dependen de la frecuencia f .



La ventaja de este enfoque es que resulta un modelo estadístico de baja complejidad. Además, con la ayuda de los resultados estadísticos derivados de las mediciones, el rendimiento del canal e incluso del sistema pueden estudiarse analíticamente. La desventaja más significativa es su baja flexibilidad. El modelo y los parámetros derivados para una red específica o una banda de frecuencia no pueden aplicarse a otras redes o bandas de frecuencia (Zhu, 2014).

La segunda opción, los enfoques bottom-up o determinísticos se basan en la teoría de las Líneas de Transmisión Multiconductoras (Multiconductor Transmission Lines– MTL). Aquí, se busca un modelo físico con parámetros de bajo nivel que se ajusta a las características principales del canal. El método original, propuesto por Banwell y Galli (2005), consiste en la descomposición de la red en pequeños segmentos y la computación de sus respectivas matrices de transmisión; de este modo, la red queda representada por un modelo discreto que tiene en cuenta todo tipo de retrasos, atenuaciones y reflexiones. Así, cada segmento de la red puede representarse por una matriz de transmisión de una red de dos puertos que describe la relación de sus tensiones y corrientes (figura 1).

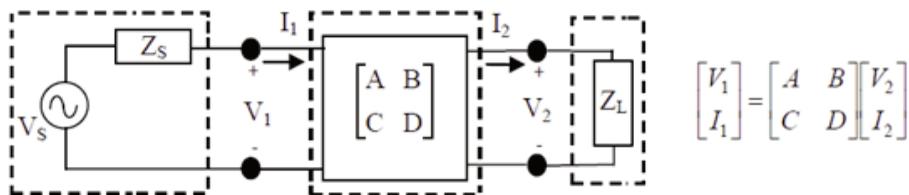


Figura 1. Matriz de transmisión de una red de dos puertos. Fuente: Adaptado de (Masood & Baig, 2016).

En tanto, su función de transferencia puede expresarse según la ecuación 2 (Masood & Baig, 2016):

$$H = \frac{V_2}{V_s} = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_s + DZ_s} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Esta aproximación requiere un acabado conocimiento de la red de energía en estudio, incluida su topología, tipos de cables y cargas. Los elementos de la red se modelan matemáticamente para generar modelos de canal. Para ello, en primer lugar, es necesario describir la propagación de la señal en la red en términos de voltaje, corriente o parámetros s (scattering). En segundo lugar, después de dividir la red en segmentos de líneas de transmisión, la realización del canal se puede obtener conectando en cascada el efecto de los mismos.

La ventaja de un enfoque ascendente es que puede aplicarse a diversas situaciones, siempre que la información de red esté disponible; además, este enfoque está estrechamente relacionado con la física de la propagación de la señal en las redes de energía. Sin embargo, también tiene varias desventajas. En primer lugar, suele ser complejo computacionalmente y esa complejidad crece con el tamaño de la red. En segundo lugar, la recopilación de los elementos de red antes mencionados es laboriosa y lleva mucho tiempo (Zhu, 2014).

Aunque la mayoría de los modelos propuestos en las investigaciones pueden clasificarse dentro de estos dos enfoques, se han desarrollado otras propuestas con características particulares. El modelado paramétrico, por caso, está basado en la caracterización de los parámetros de los elementos de red como una combinación de sus elementos resistivos (R), inductivos (L), capacitivos (C) y de conductancia (G). En el caso de (Bausch, Kistner, Babic & Dostert, 2006), las impedancias de las cargas se modelan como una combinación de cuatro tipos de circuitos resonantes RLC serie o paralelo (figura 2), con los cuales se implementan las características de impedancia o función de transferencia que se miden en la red para un rango de frecuencias dado.

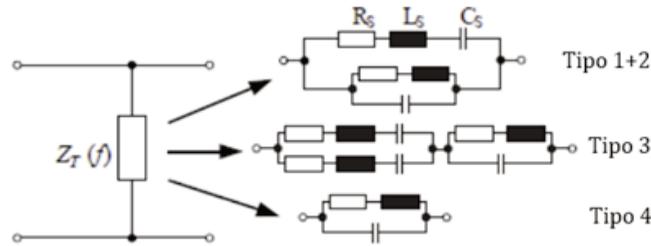


Figura 2. Modelado de impedancias con circuitos resonantes. Fuente: Adaptado de (Masood & Baig, 2016).

En el caso de (Cañete, Cortés, Díez & Entrambasaguas, 2011), las impedancias son caracterizadas como constantes, selectivas en frecuencia y variantes en el tiempo, con las que se implementa el modelo de canal; para el caso de (Masood, Haider & Baig, 2017), la selectividad en frecuencia de las cargas se modela con circuitos RLC paralelo, y las líneas de transmisión como líneas de parámetros distribuidos, los que se implementan en un software como Matlab/Simulink®.

Finalmente, puede considerarse un cuarto tipo de enfoque el realizado en trabajos como (Cortés, Sanz, Estopiñán & García, 2015), en el que el modelo del canal se deriva de un conjunto de mediciones sobre un gran número de canales reales, a partir de las cuales se caracteriza el canal con criterios estadísticos.

La tabla 1 sintetiza algunos de los principales modelos citados en la bibliografía, agrupados por tipo, autor(es) y sus principales características.

| Tipo de modelo PLC | Principal contribuyente | Características principales del trabajo propuesto | Referencias |
|-------------------------------------|--------------------------|---|--|
| Modelos determinísticos (bottom up) | Stefano Galli et al. | - Enfoque de teoría de líneas de transmisión multiconductora para circuitos acoplados. - Análisis del comportamiento de PLC para circuitos de modo diferencial y de par. - Propuesta de una técnica de modelo de red de dos puertos en cascada para un PLC eficiente. | (Banwell & Galli, 2005; Galli & Banwell, 2005) |
| | Andrés M. Tonello et al. | - Propone un simulador de canal PLC bottom-up. - Método de cálculo sofisticado para la función de transferencia de canales. | (Tonello & Versolato, 2009, 2010, 2011) |
| Modelos estadísticos (top-down) | H. Phillips | - Propone un modelo de eco para configurar el efecto de las reflexiones múltiples. - Propone el modelado de las impedancias con circuitos resonantes RLC serie. | (Phillips, 1999) |
| | Zimmermann et al. | - Modelo de camino múltiple. - Contempla la atenuación causada por reflexiones y bifurcaciones de las líneas eléctricas. - Incorpora los retardos debidos a la longitud de la línea. | (Zimmermann & Dostert, 2002) |
| | Justinian Anatory et al. | - Modela la función de transferencia del canal PLC para tres casos: bifurcaciones concentradas en un nodo; bifurcaciones distribuidas a lo largo de la red, y red con estructura de árbol. | (Anatory, Theghayi & Thottappillil, 2009a, 2009b) |
| Modelos paramétricos | Cañete et al. | - Contempla un modelo con tres tipos de impedancias: constantes, selectivas en frecuencia, y variables en el tiempo. - Propone un simulador (http://www.plc.uma.es/canales.htm). | (Cañete, Cortés, Díez & Entrambasaguas, 2011) |
| | Klaus Dostert et al. | - Modela de las impedancias de acceso mediante el uso de series y combinaciones paralelas de resistencia, inductores y condensadores. | (Bausch, Kistner, Babic & Dostert, 2006) |
| | Bilal Masood et al. | - Compara las funciones de transferencia obtenidas a partir de impedancias constantes con impedancias selectivas de frecuencia. - Propone un modelo basado en Matlab/Simulink®, y lo compara con los resultados de la Teoría de Líneas, y con resultados de mediciones en campo. | (Masood, Haider & Baig, 2017; Masood et al., 2018) |
| Modelos basados en mediciones | José Cortés et al. | - Caracteriza estadísticamente tres tipos de canales a partir de un gran número de mediciones de impedancia y de atenuación en la banda de frecuencias de interés. | (Cortés, Sanz, Estopiñán & García, 2015) |

Tabla 1. Resumen de modelos de canal PLC. Fuente: Adaptado de (Masood et al., 2018).



3. Consideraciones acerca del ruido

A diferencia de los otros canales de telecomunicaciones, el canal de la línea eléctrica no presenta un ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN), cuya densidad espectral de potencia es constante en todo el espectro de transmisión. Una descripción muy citada en la bibliografía se da en (Zimmermann & Dostert, 2000), que se sigue a continuación. El ruido en un canal PLC se clasifica como una superposición de cinco tipos, que se distinguen por su origen, duración, intensidad y ocupación del espectro, cuya forma de densidad espectral de potencia (Power Spectrum Density- PSD) aproximada se grafica en la figura 3, y cuya descripción individual se consigna seguidamente:

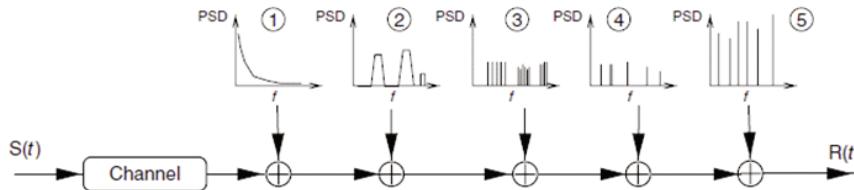


Figura 3. Tipos de ruido aditivo en entornos de PLC. Fuente: Tomado de (Hrasnica, Hadine & Lehnert, 2004).

- Ruido de fondo multifrecuencia (1): su densidad espectral de potencia es relativamente baja y disminuye con la frecuencia. Este tipo de ruido es causado por varias fuentes de ruido de baja intensidad. Permanece estacionario para largos periodos de tiempo.
- Ruido de banda estrecha (2): su forma de onda es sinusoidal con amplitudes moduladas. Es debido principalmente a la radiodifusión como la televisión y la radio y transmisiones de onda corta sobre el medio. Su intensidad y frecuencia varía con el tiempo y lugar.
- Ruido impulsivo periódico, asíncrono a la frecuencia principal (3): son impulsos con una frecuencia de repetición de entre 50 KHz y 2 MHz, causados por fuentes de alimentación conmutadas. Dichos impulsos tienen una duración corta, del orden de microsegundos, y tienen una densidad espectral de potencia que disminuye con la frecuencia.
- Ruido impulsivo periódico, sincrónico a la frecuencia principal (4): se presenta en forma de impulsos que generalmente tienen una frecuencia de repetición entre 50 y 100 Hz y son sincrónicos con la frecuencia principal de la línea eléctrica. Está causado principalmente por fuentes de alimentación de dispositivos que rectifican la señal de la red. Los impulsos tienen una duración corta, del orden de microsegundos, y tienen una densidad espectral de potencia que disminuye con la frecuencia.
- Ruido impulsivo asíncrono (5): causado por inserción de transitorios en la red, mayormente originados por el encendido y apagado de dispositivos de potencia conectados al suministro eléctrico y el disparo de semiconductores de potencia controlados. Los impulsos tienen una duración que varía de micro a milisegundos. La densidad espectral de potencia de este ruido puede alcanzar valores de más de 50 dB por encima del ruido de fondo, haciéndolo la principal causa de error en las comunicaciones sobre las redes PLC.

Los ruidos 1, 2 y 3 permanecen estacionarios sobre periodos relativamente largos, de segundos, minutos e incluso horas. Por esta razón, estos tres ruidos se pueden agrupar en una sola clase de ruido, denominado “ruido de fondo”. Por el contrario, los ruidos 4 y 5, varían en periodos de tiempo de milí y microsegundos, y son agrupados en una sola clase denominada “ruido impulsivo”.

El modelado del ruido de fondo, en la banda de frecuencias NB-PLC, responde a un ruido coloreado cuya expresión aproximada varía de acuerdo a las redes y lugares en que se desarrollaron las mediciones (Hrasnica, Hadine & Lehnert, 2004; Matanza, 2013). En todos los casos, su densidad espectral de potencia responde a una gráfica como la de la figura 4.

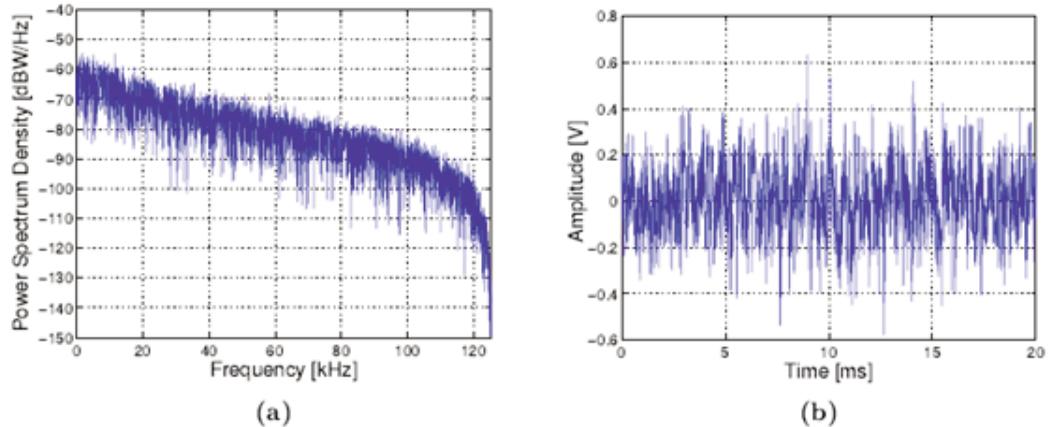


Figura 4. Densidad espectral de potencia (a) y amplitud temporal (b) del ruido de fondo. Fuente: Tomado de (Matanza, 2013).

En cuanto al ruido impulsivo, se compone de impulsos periódicos sincrónicos con la frecuencia principal y el ruido impulsivo asincrónico. De acuerdo a (Hrasnica, Hadine & Lehnert, 2004), las mediciones muestran que esta clase está dominada en gran medida por el último tipo de ruido (tipo 5). Por esta razón, el modelado de esta clase se basa en las investigaciones y las mediciones de tipo (5), de las cuales se muestra un ejemplo en la figura 5. El objetivo de estas investigaciones y mediciones es conocer las características estadísticas de los parámetros de ruido, como la distribución de probabilidad del ancho de los impulsos y su distribución de tiempo entre llegadas, que representa el tiempo entre dos impulsos sucesivos (figura 6).

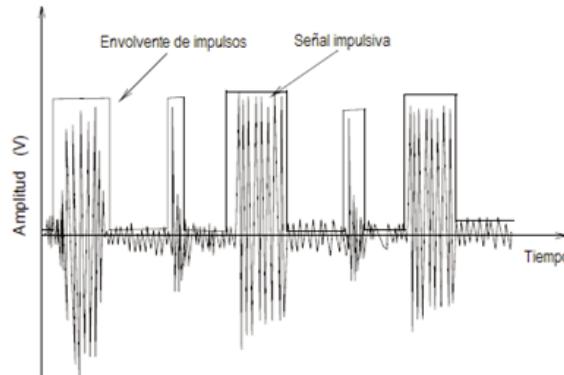


Figura 5. Envolvente de impulsos y señal impulsiva. Fuente: Adaptado de (Hrasnica, Hadine & Lehnert, 2004).

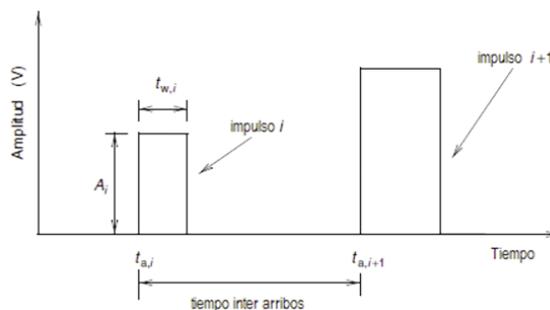


Figura 6. Tiempo entre dos impulsos sucesivos. Fuente: Adaptado de (Hrasnica, Hadine & Lehnert, 2004).

Un enfoque para modelar estos impulsos es un tren de pulsos con ancho de pulso t_w , amplitud de pulso A , tiempo de llegada entre arribos t_a y una función de pulso generalizada $p(t/t_w)$ con amplitud de unidad y

ancho de impulso t_w ; (Zimmermann & Dostert, 2000).

$$n_{\text{imp}}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i \cdot p\left(\frac{t - t_{a,i}}{t_{w,i}}\right) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Los parámetros $t_{w,i}$, A_i y $t_{a,i}$ del impulso i son variables aleatorias, cuyas propiedades estadísticas se miden e investigan en (Zimmermann & Dostert, 2000). Los impulsos medidos han demostrado que el 90% de sus amplitudes están entre 100 y 200 mV. Solo menos del 1% excede una amplitud máxima de 2V. Las medidas del ancho de impulso t_w también han demostrado que solo alrededor del 1% de los impulsos medidos tienen un ancho superior a 500 μ s y solo el 0,2% de ellos excedió 1 ms. Finalmente, el tiempo entre llegadas que separa dos impulsos sucesivos está por debajo de 200 ms para más del 90% de los impulsos registrados. Otras mediciones muestran que aproximadamente el 30% de los pulsos detectados tenían un tiempo entre arribos de 10 o 20 ms, que representa el ruido impulsivo sincrónico con la frecuencia de suministro de red, tipo de ruido 3. Los tiempos de llegada entre arribos de más de 200 ms, tienen una distribución exponencial.

4. Modelo propuesto

El modelo de canal propuesto y su ruido asociado se representan en la figura 7. Tanto el canal físico como el ruido se implementan en Matlab/Simulink®.

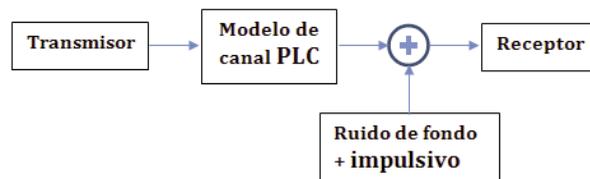


Figura 7. Esquema del canal y ruido asociado. Fuente: Elaboración propia.

4.1. Modelo del canal

La representación del canal físico es una configuración simplificada de una línea de distribución trifásica en baja tensión (LBT) (figura 8). Para el objeto del presente trabajo, se optó por modelar un esquema de distribución urbana típica, con dos salidas desde los bornes de baja tensión de un transformador de distribución. En cada una, se conectan a una misma fase de la red suministros domiciliarios monofásicos separados entre sí por tramos de treinta metros¹ (los intermedios conectados a las otras fases no se consideran). En el final de cada línea, se conectan cargas trifásicas que representan el resto de los suministros conectados a la red, o bien suministros trifásicos puntuales de alta demanda. La cantidad de suministros modelados es la mínima necesaria a los efectos de analizar el efecto de la red sobre el sistema de comunicación, como se verá más adelante.

Los conductores de la LBT se modelan con los parámetros de un cable preensamblado de aluminio grado eléctrico 1350 (AAC) para las fases y aleación de aluminio (AAAC) para el neutro, de 3x70/50 mm². Para los cables monofásicos de las acometidas domiciliarias, se utiliza un cable concéntrico de Cu 6/6 mm². Los parámetros de ambos conductores se ilustran en la tabla 2.a). Para su representación en Simulink, siguiendo trabajos como (Masood, Haider & Baig, 2017) y (Masood et al., 2018), se utilizan líneas de parámetros distribuidos. Si bien para las distancias y las frecuencias en juego la LBT no alcanza a comportarse como una línea de transmisión² (Cortés, Sanz, Estopiñán & García, 2015), resultan útiles para el modelado de sus

¹ En una topología típica, los suministros físicamente consecutivos se conectan alternativamente a las tres fases de la red por lo que, considerando una separación de 10 m entre ellos, dos consecutivos conectados a una misma fase estarán separados por 30 m.

² Como regla general, esto ocurre cuando la longitud de onda de la señal transmitida es, por lo menos, diez veces mayor que las distancias implicadas. En la banda de frecuencia empleada (40 a 91 kHz), esto se traduce en 5,25 y 2,33 km respectivamente, muy superiores a la longitud de una LBT normal.

parámetros característicos.

En cuanto a las cargas de los suministros, se han seguido los trabajos citados en lo referido a su modelado, básicamente como circuitos RLC paralelos (figura 9.b), bloque (1)), cuyos parámetros de potencias activas y reactivas (inductivas y capacitivas) a la frecuencia de red (50 Hz), se representan en la tabla 2.b). Sin embargo, a efectos de reproducir en forma aproximada las características de la función de transferencia para la banda de frecuencias en las que se utilizará el modelo (40-90 KHz) medidas en (Masood et al., 2018), se han agregado impedancias constituidas por circuitos RLC serie (figura 9.b), bloque (2)). Éstas, que no tienen influencia a la frecuencia de operación de la red, poseen sin embargo frecuencias de resonancia en el rango de las frecuencias NB-PLC, cuya elección, junto con el Q del circuito, contribuyen a moldear las formas medidas de la función de transferencia (Phillips, 1999). Desde el punto de vista físico, representan el efecto de impedancias no lineales de las cargas constituidas por elementos electrónicos de conmutación.

Finalmente, las cargas de los suministros se conectan a la red a través de medidores que poseen la funcionalidad de la comunicación PLC. Los mismos se representan en la figura 10. Su diagrama circuital (en lo que hace a la comunicación) se muestra en la parte b) de la figura, en la que se incluyen el elemento de inserción (shunt) en el circuito representado en un bloque RL_{shunt} y el circuito de acoplamiento capacitivo para el modem. En él, los parámetros han sido elegidos de manera de proveer un filtrado adecuado para la frecuencia de red principal (50 Hz), al tiempo que la menor atenuación posible en la banda de frecuencias de comunicación (-3,2 dB a -3,7 dB).

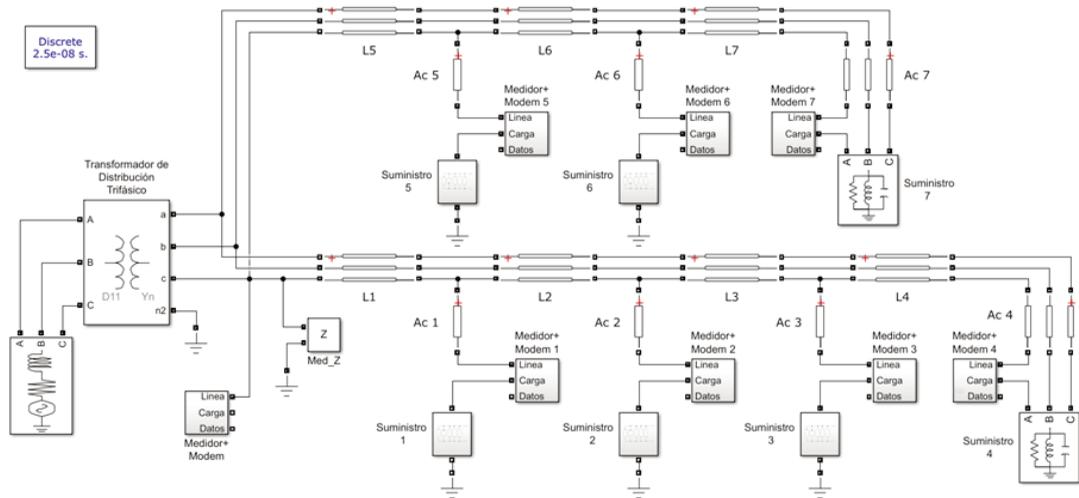


Figura 8. Modelo del canal. Fuente: Elaboración propia.

| | Línea | Acometida | Suministro | P (W) | Q ind (Var) | Q cap (Var) |
|----------------------|---------------|-------------|------------|---------|-------------|-------------|
| Conductor | Preensamblado | Concéntrico | 1 | 8.000 | 6.170 | 170 |
| | Al/Al-Ac | Cu | 2 | 6.000 | 5.442 | 150 |
| Sección (mm2) | 3x70/1x50 | 6/6 | 3 | 4.000 | 4.211 | 130 |
| R (ohm/km) | 0,515/0,745 | 0,2911 | 4 | 100.000 | 72.868 | 40.000 |
| L (H/km) | 8,60E-04 | 1,39E-08 | 5 | 7.000 | 5.868 | 160 |
| C (F/km) | 4,45E-08 | 3,67E-08 | 6 | 5.000 | 4.890 | 140 |
| | | | 7 | 75.000 | 56.651 | 32.000 |

a)

b)

Tabla 2. a) Parámetros de los conductores utilizados; b) Potencias activas y reactivas de las cargas conectadas al modelo. Fuente: Elaboración propia.



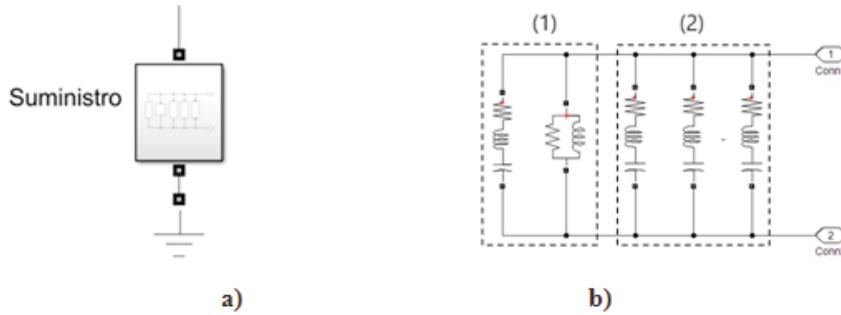


Figura 9. a) Bloque de carga en la Figura 8; b) Diagrama circuital. Fuente: Elaboración propia.

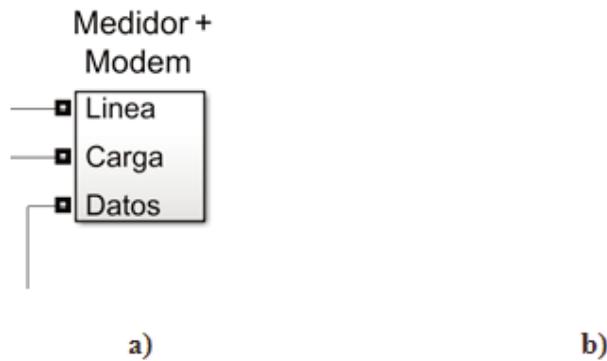


Figura 10. a) Bloque de medidor + modem en la Figura 8; b) Diagrama circuital. Fuente: Elaboración propia.

La impedancia del sistema, medida desde el transformador, responde en líneas generales a lo esperado de acuerdo a la bibliografía (Hosseinpournajarkolaei, 2015). La figura 11.a) ilustra el comportamiento de la impedancia y la fase en la banda 0 - 30 Mhz, en tanto que la b) ilustra hasta los 500 KHz.

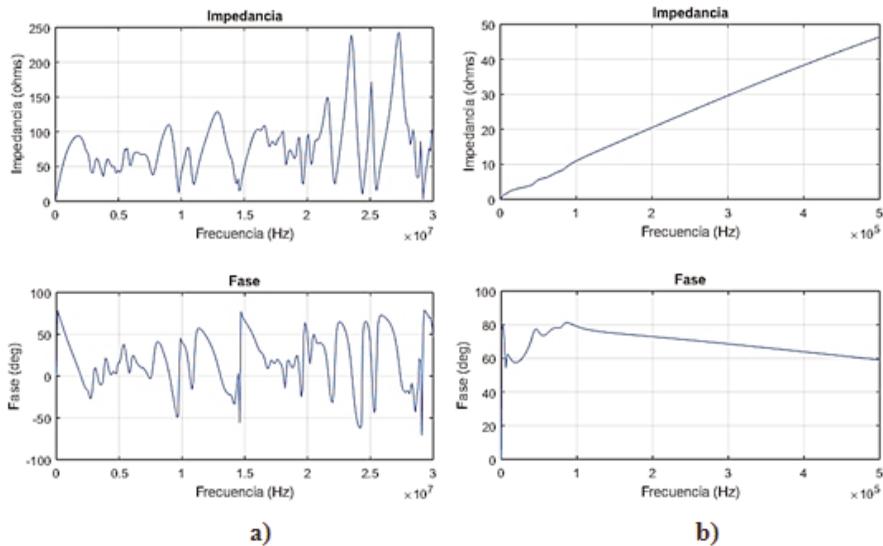


Figura 11. Respuesta en frecuencia (amplitud y fase) del modelo desde el concentrador a) 0 a 30 MHz (banda BB) y b) 0 A 500 KHz (NB). Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 ilustra la respuesta en frecuencia en la banda CENELEC-A. De las formas obtenidas, se observa que la impedancia está dominada por las características inductivas de los conductores de la red en el primer caso, y por las características modeladas en la carga en el segundo.

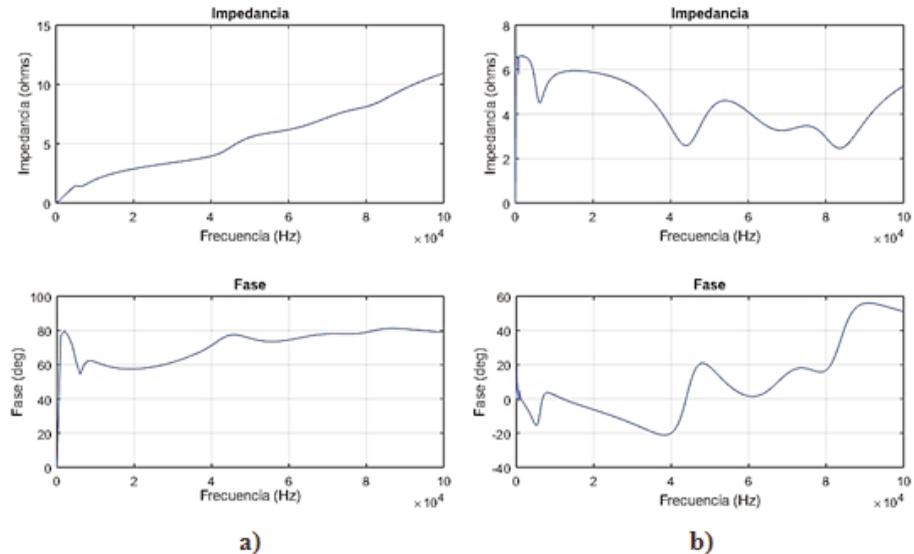


Figura 12. Respuesta en frecuencia (amplitud y fase) del modelo para la banda CENELEC-A a) desde el Transformador y b) desde el Suministro 1. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Modelo del ruido

En concordancia con el análisis efectuado en el punto 3, se modelan dos tipos de ruido (figura 13): fondo (bloque 1) e impulsivo asincrónico (bloque 2).

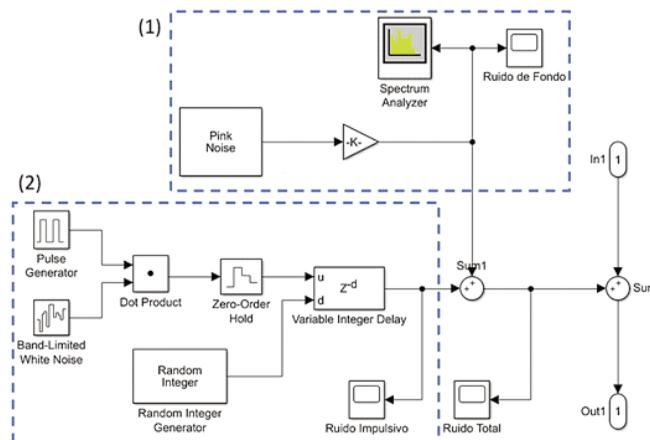


Figura 13. Modelo de ruido de fondo e impulsivo. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del ruido de fondo, se utilizó el módulo Colored Noise del Toolbox “DSP System”, parametrizando el color de ruido como “rosa”, es decir, con una densidad espectral de potencia inversamente proporcional a la frecuencia (figura 14). Si bien esta figura de ruido no se corresponde exactamente con la obtenida en base a mediciones de la figura 4.a), se considera una buena aproximación para la simulación.

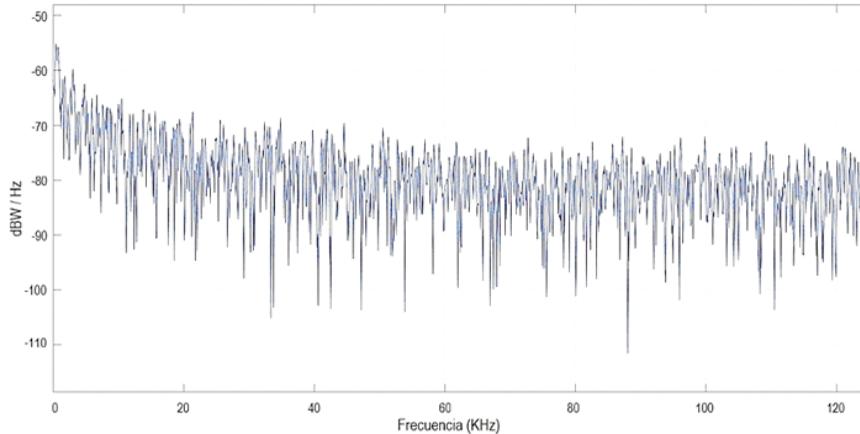


Figura 14. Densidad espectral de potencia del Generador de ruido de la figura 13 (1) en la banda 0 – 120 KHz. Fuente: Elaboración propia.

Para simular el ruido impulsivo asincrónico se utilizó el esquema mostrado por la figura 13 (2). Una señal impulsiva periódica de 2 voltios de amplitud se retarda aleatoriamente para producir un ruido impulsivo asincrónico. El retraso máximo utilizado en el bloque de retardo fue de 1000 y el rango del generador de enteros aleatorios se estableció en 100 con un tiempo de muestreo de 1/1000. La señal resultante se grafica en la figura 15.

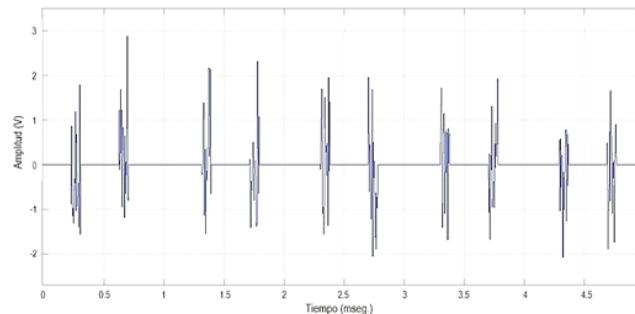


Figura 15. Ruido impulsivo asincrónico generado por el bloque (2) de la figura 13. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, ambos bloques se suman para arrojar una señal como la graficada en la figura 16, que a su vez se suma a la señal proveniente del canal PLC.

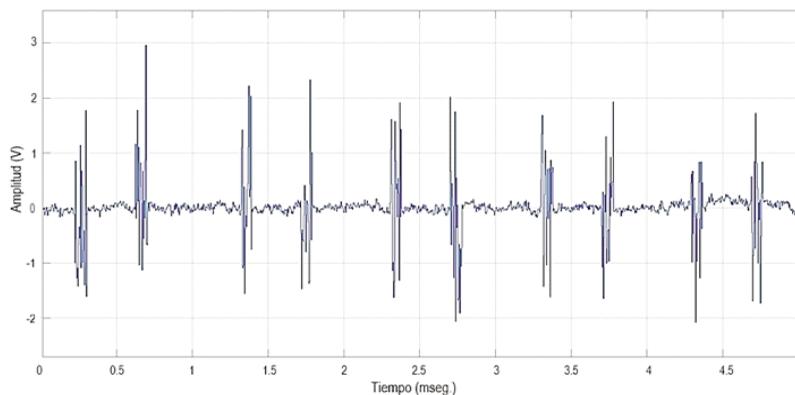


Figura 16. Señal de ruido añadida al canal. Fuente: Elaboración propia.

5. Resultados

El modelo de canal fue simulado inyectando una señal senoidal de amplitud 1 voltio pico a pico y frecuencia variable entre 40 KHz y 89 KHz en el modem de la salida del transformador (“concentrador”) y midiendo su salida en el modem del Suministro 1. Esto se realizó para dos situaciones de carga del suministro, 8 KW y 4 KW, respectivamente. La respuesta en amplitud en función de la frecuencia se grafica en las líneas de trazo de trazo continua de la figura 17.

De la misma manera, se midió la misma respuesta para ambas condiciones de carga, pero inyectando la señal en el modem del suministro 1, y midiendo la salida en el concentrador. El resultado se grafica en las líneas trazos discontinuos en la figura 17.

Se observan atenuaciones del orden de los -32 dB a -49 dB aproximadamente y de -38 a -51 dB aproximadamente para cada caso, esto es, una diferencia de entre 2 dB (mínimo) y 6 dB (máximo) entre ambos estados de carga.

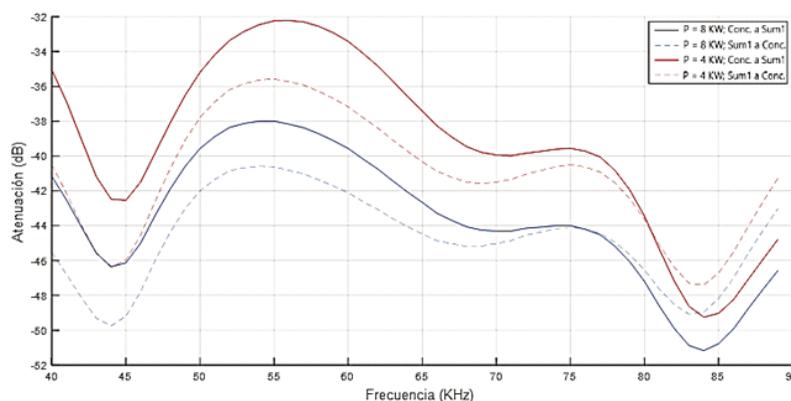


Figura 17. Atenuación en función de la frecuencia del canal entre diferentes estados de carga entre concentrador y suministro 1, en ambos sentidos. Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la misma simulación, pero inyectando la señal de prueba en el concentrador y midiendo las salidas en los suministros 1, 2 y 3 respectivamente, con las cargas establecidas en la tabla 2.b). Los resultados se grafican en la figura 18.

Para este caso, se observa un marcado aumento de los valores de atenuación, que van de los -53 dB a -81 dB en el caso del suministro 2, y de -67 dB a -110 dB en el caso del suministro 3.

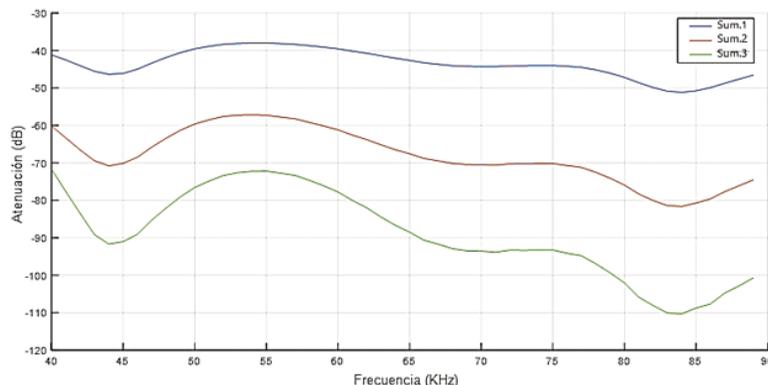


Figura 18. Atenuación en función de la frecuencia del canal para los suministros 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

Se obtuvo un modelo de relativa simplicidad que incluye las características más incidentes del canal PLC en banda NB-PLC, ajustado para la especificación CENELEC-A, y se modelaron las fuentes de ruido más incidentes en la comunicación. Al estar implementado sobre una utilidad de amplia difusión como Matlab/Simulink®, sus parámetros son fácilmente reconfigurables, y su topología modificable, de manera de ajustar la herramienta de simulación a escenarios más realistas, dados por resultados de medición o mejores técnicas de modelado de la red, las cargas o el ruido asociado.

Para el objetivo del trabajo, se considera que el modelo presentado permite una razonable reproducción de un canal PLC en la banda NB-PLC, sobre el que es posible probar mejoras en las técnicas de modulación y de corrección de errores que permitan incrementar la performance general del sistema de comunicación en diferentes situaciones de los parámetros del canal y su ruido asociado.

A la vez, se considera relativamente simple producir optimizaciones del modelo, mediante su ajuste a través de la obtención de características más realistas de la topología y los parámetros de la red y la caracterización de sus cargas, obtenidas de campañas de medición en escenarios reales o por la incorporación de los resultados de otros trabajos de investigación.

Cómo citar este artículo / How to cite this paper

Veglia, J. E.; La Red Martínez, D. L.; Scappini, R. J. (2018). Simulación de un canal PLC para AMI para empresas distribuidoras de energía eléctrica con fines didácticos y de investigación. *International Journal of Information Systems and Software Engineering for Big Companies (IJISEBC)*, 5(2), 73-86. (www.ijisebc.com)

Referencias

- Anatory, J.; Theethayi, N.; Thottappillil, R. (2009a). Power-Line Communication Channel Model for Interconnected Networks Part I: Two-Conductor System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(1).
- Anatory, J.; Theethayi, N.; Thottappillil, R. (2009b). Power-Line Communication Channel Model for Interconnected Networks Part II: Multiconductor System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(1).
- Banwell, T.; Galli, S. (2005). A Novel Approach to the Modeling of the Indoor Power Line Channel Part I: Circuit analysis and Companion Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2).
- Bausch, J.; Kistner, T.; Babic, M.; Dostert, K. (2006). Characteristics of indoor power line channels in the frequency range 50-500 kHz.. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*.
- Cañete, F. J.; Cortés, J. A.; Diez, L.; Entrambasaguas, J. T. (2011). A channel model proposal for indoor Power Line Communications. *IEEE Communications Magazine*.
- Cortés, J.; Sanz, A.; Estopiñán, P.; García, J. (2015). Analysis of narrowband power line communication channels for advanced metering infrastructure. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*.
- Galli, S.; Banwell, T. (2005). A novel approach to the modeling of the indoor power line channel part II: Transfer function and its properties. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(3).
- Hosseinpournajarkolaei, A. (2015). Investigation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing based Power Line Communication Systems. University of East London.
- Hrasnica, H.; Hadine, A.; Lehnert, R. (2004). *Broadband Powerline Communication Network Design*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Masood, B.; Baig, S. (2016). Standardization and deployment scenario of next generation NB-PLC technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1033-1047.
- Masood, B.; Ellahi, M.; Khan, W.; Akram, W.; Usman, M.; Gul, M. (2018). Characterization and Field Measurements of NB-PLC for LV Network. *Journal of Electric Engineering & Technology*; 13(1), 521-531.
- Masood, B.; Haider, A.; Baig, S. (2017). Modeling and Characterization of Low Voltage Access Network for Narrowband Powerline Communications. *Journal of Electric Engineering Technologies*; 12(1), 443-450.
- Matanza, J. (2013). Improvements in the PLC Systems for Smart Grids Environments. Universidad Pontificia Comillas.
- Philipps, H. (1999). Modelling of powerline communication channels. *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*.

- Tonello, A. M.; Versolatto, F. (2009). New Results on Top-down and Bottom-up Statistical PLC Channel Modeling. In Third Workshop on Power Line Communications.
- Tonello, A. M.; Versolatto, F. (2010). Bottom-Up Statistical PLC Channel Modeling Part II: Inferring the Statistics. IEEE transactions on Power Delivery, 25(4), 2356-2363.
- Tonello, A. M.; Versolatto, F. (2011). Bottom-Up Statistical PLC Channel Modeling Part I: Random Topology Model and Efficient Transfer Function Computation. IEEE Transactions on Power Delivery, 26(2).
- Zhu, W. (2014). Power Line Communications over Time-Varying Frequency-Selective Power Line Channels for Smart Home Applications. University of Liverpool.
- Zimmermann, M.; Dostert, K. (2000). An Analysis of the Broadband Noise Scenario in Powerline Networks. In Proceedings of the Fourth International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC'2000) (pp. 131-138).
- Zimmermann, M.; Dostert, K. (2002). A Multipath Model for the Powerline Channel. IEEE Transactions on Communications, 50(4).

