

Generalidades sobre Power Line Communications.

José Antonio Vesga Barrera
Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo

Martha Fabiola Contreras Higuera
Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Fecha de Recepción: 17/07/15 – Fecha de Aceptación: 03/11/15

Resumen

El sistema de comunicación que hace uso de la red eléctrica como medio físico de transmisión PLC (*Power Line Communication*), apareció alrededor de los años 50 y había sido considerado durante muchos años como una alternativa para la transmisión de información a baja velocidad de transferencia; sin embargo, en la actualidad es posible alcanzar velocidades de transmisión cercanas a los 200Mbps gracias a los avances en los esquemas de modulación tales como OFDM (*Orthogonal frequency division multiplexing*).

Desde el punto de vista tecnológico, el hacer uso de la red eléctrica como medio físico de transmisión ha sido considerado como una excelente alternativa en la prestación de servicios de interconexión de última milla. El uso de adaptadores de red basados en PLC facilitan el diseño de redes LAN y las comunicaciones de banda ancha a través de la red eléctrica, convirtiendo cualquier toma corriente en un punto de conexión para el usuario, sin la necesidad de cableados adicionales a los existentes.

En éste artículo se presentan algunos aspectos generales relacionados con normatividad internacional, comportamiento y modelamiento de la red eléctrica como medio físico de transmisión para el uso de la tecnología PLC, los cuales servirán de base para otros artículos relacionados con la transmisión de datos y la implementación de redes LAN bajo el uso de esta tecnología emergente.

Palabras clave: *Throughput, PLC, Modelamiento, Canal, Ruido*

Abstract

System of communication that makes use of the electricity network as physical media transmission PLC (*Power Line Communication*), appeared around 50 years and had been considered for many years as an alternative for the transmission of information at low speed of transfer; However, nowadays it is possible to achieve close to 200Mbps thanks to advances in schemes such as OFDM

modulation transmission speeds (*Orthogonal frequency division multiplexing*).

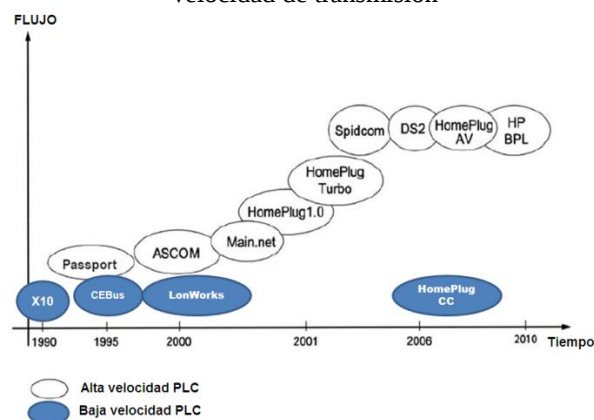
From the technological point of view, making use of the electricity network as physical means of transmission has been considered as an excellent alternative in last mile interconnection services. The use of PLC-based network adapters allow easily design LAN networks and broadband electric, making any current takes a connection point for the user, without the need for wired network communications additional to existing ones.

This article presents some general aspects related to international norms, behavior, and modelling of the electricity network as physical means of transmission for the use of technology PLC, which will form the basis for other articles related to the transmission of data and implementation of LAN networks under the use of this emerging technology.

Keywords: *Throughput, PLC, Modeling, Channel, Noise*

I. INTRODUCCION

Figura 1. Evolución de la tecnología PLC según la velocidad de transmisión



Fuente: CARCELE, Xavier. Power Line Communications in practice.P.21

Power Line Communications (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.

El uso de la red eléctrica como medio físico de transmisión de información no es una idea nueva. Hasta hace unos años, el uso de PLC se había limitado a la implementación de soluciones de control, automatización y monitoreo de sensores; las cuales no requerían de un gran ancho de banda para su funcionamiento.

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 200 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.

En la figura 1 se ilustra claramente los cambios que ha sufrido la tecnología PLC según la velocidad de transmisión bajo el uso de estándares internacionales a partir del año de 1990.

Diversas organizaciones a nivel mundial han demostrado interés en la tecnología PLC, bajo la creación de grupos de trabajo y foros que como el PLC forum apoyan y fomentan el desarrollo y la normalización de esta tecnología. Actualmente, los grupos más importantes que existen son: el PLC forum, la Universal Powerline Association (UPA), la PLC Utilities Alliance (UPA) y la Home Plug Alliance. Por otro lado, el creciente interés de la tecnología PLC en Colombia, desde el punto de vista académico y empresarial se ha ido consolidando a partir de los últimos años, donde se ha contado con el apoyo del Estado y la empresa privada

El uso de la tecnología PLC en el ámbito de las redes de datos, debe ser considerado como una solución complementaria en relación con las demás tecnologías de acceso existentes y no como una forma de reemplazarlas; ya que cada una de ellas brinda una solución característica acorde con el contexto y las necesidades del usuario.

Desde el punto de vista tecnológico, el hacer uso de la red eléctrica como medio físico de transmisión ha sido considerado como una excelente alternativa en la prestación de servicios de interconexión de última milla. El uso de adaptadores de red basados en PLC permiten fácilmente el diseño de redes LAN y comunicaciones de banda ancha a través de la red eléctrica, convirtiendo cualquier toma corriente en un punto de conexión para el usuario, sin la necesidad de cableados adicionales a los existentes. En la siguiente figura se muestra la apariencia de adaptadores PLC-Ethernet.

Figura 2. Adaptadores PLC - Ethernet



Fuente: <http://camyna.com/2007/01/16/xs102-netgear-plc/>

La red eléctrica es una estructura que hasta el momento ha sido utilizada exclusivamente para el transporte de energía eléctrica. Sin embargo, es posible hacer uso de esta gran red en procesos de comunicación y transmisión de información tales como: voz, datos y video; considerando que la red eléctrica no había sido concebida para tal fin.

El rendimiento es sin duda uno de los aspectos de mayor interés dentro del análisis global en las redes LAN, teniendo en cuenta el efecto que éste produce sobre el usuario final. El rendimiento puede ser definido según diversos puntos de vista, permitiendo con ello, incorporar otras formas de evaluación dependiendo del objeto de interés en particular. Básicamente, los parámetros más comunes para evaluar el rendimiento de una red son: *Throughput*¹, utilización del canal y diversas medidas de retardo.

En vista de lo anterior es muy importante comprender los diversos aspectos relacionados con el comportamiento, modelamiento y normatividad existente para la transmisión de información utilizando la red eléctrica bajo el uso de la tecnología PLC en ambientes residenciales y más concretamente bajo las condiciones existentes en la red eléctrica domiciliaria Colombiana.

II. ESTANDARIZACIÓN Y REGULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PLC

En la actualidad, debido a que no se cuenta con un estándar definitivo para la tecnología PLC, existe un buen grupo de instituciones a nivel mundial trabajando en ello. Los grupos más importantes a nivel mundial son: el PLCforum, la UPA (Universal Power line Association), la PUA (PLC utilities Alliance), IEEE P1901, la HomePlug Powerline Alliance, UPLC (United Power Line Council), PLC-J en Japón, APTEL en Brasil, entre otras compañías y grupos.²

¹Throughput, es la capacidad de un enlace de transportar información útil. Representa a la cantidad de información útil que puede transmitirse por unidad de tiempo y puede variar en una misma conexión de red dependiendo del protocolo usado para la transmisión, el tipo de datos de tráfico, entre otros factores.

² CARCELE, Xavier. Power Line Communications in practice. Paris. P.22

El PLCforum es una organización de carácter internacional encargada de representar los intereses de fabricantes, compañías eléctricas y desarrolladores relacionados con la tecnología PLC. Actualmente, PLCforum está conformado por más de 50 integrantes. Dentro de los miembros más destacados se encuentran: DS2, Mitsubishi Electric Corporation, ETSI, PLCA, PLC-J, PUA, y UPLC entre otros. Su trabajo está en su mayoría orientado al sistema europeo, posicionando a PLC como una tecnología muy importante en redes de acceso³.

La Universal PowerLine Association (UPA) es una organización internacional sin ánimo de lucro orientada al desarrollo de tecnología PLC, la cual debe estar certificada bajo los estándares internacionales y favorecer la interoperabilidad de los equipos entre diversos fabricantes, con el objetivo de fortalecer el mercado de la tecnología PLC a nivel mundial. Dentro de las compañías que forman parte de esta organización se encuentran: Ac Bel Poly tech Inc, Ambient Corporation, Toshiba, ST&T, Ascom, Corinex Communications, DS2 y Toyocom, entre otras.

Otra de las organizaciones es la PUA (PLC utilities Alliance), la cual busca conseguir un alto grado de cooperación entre las compañías eléctricas con el objetivo de promover e influenciar el desarrollo de la tecnología PLC en Europa. La misión principal de la PUA es crear un marco regulatorio y de estandarización que soporte el desarrollo de la industria PLC, estableciéndose como una de las políticas prioritarias para el despliegue de redes de banda ancha en la unión Europea. Entre sus principales miembros se pueden mencionar: Electricité de France (Francia), Endesa Network Factory (España), Enel Distribuzione (Italia), Energías de Portugal, Groupe E (Suiza), Iberdrola (España) y Unión FENOSA (España). Entre todas estas compañías suman más de 100 millones de consumidores de energía eléctrica en 23 países⁴.

La HomePlugPowerline Alliance es una asociación de industrias relacionadas con PLC. Sus miembros aportan la capacidad y financiación necesaria para el desarrollo de esta tecnología. En junio del año 2001 se lanzó al mercado el estándar Homeplug v1.0, el cual permite alcanzar velocidades de hasta 14 Mbps y está orientado sobre todo al *Home Networking*. El HomePlug 1.0 fue desarrollado para proveer conectividad y servicios de red a través de la red eléctrica. Posee un mecanismo de acceso al medio (MAC: *Medium Access Control*) en función de una coordinación distribuida (DCF: *Distributed Coordination Function*), basada en un protocolo de acceso aleatorio múltiple con detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA: *Carrier Sense Multiple Access with Collision*

Avoidance), [7] y es con base en este estándar sobre el cual se enfocará el presente proyecto de investigación, el cual es considerado como uno de los estándares más importantes en la tecnología PLC.

Un aspecto importante es que aún queda mucho trabajo por realizar en el campo de la normalización sobre la tecnología PLC. Entre las normas más importantes sobre las cuales se rige la tecnología PLC se pueden mencionar:

- EN50065-1 del CENELEC, que establece el uso del espectro para banda angosta.
- TS 101 867 del ETSI que aplica para el uso de banda ancha. Regula la utilización de la red eléctrica para la transmisión digital de datos a altas velocidades.
- TR 102 049 del ETSI que establece las calidades de servicio que deben implementar los equipos PLC instalados en el lado del abonado (CPE: *Customer Premises Equipment*).

III. CARACTERÍSTICAS DE LA RED ELÉCTRICA COMO CANAL DE TRANSMISIÓN

La red eléctrica no fue diseñada para realizar procesos de comunicación sino para el transporte de energía eléctrica. Aunque la red eléctrica no se especifica para establecer procesos de comunicación a alta frecuencia, actualmente es considerada objeto de estudio, debido a que estaba siendo subutilizada. Empresas de desarrollo tecnológico han visto en ella un gran potencial para ofertar servicios de telecomunicaciones tales como: telemetría, voz, datos y video, entre otros; lo cual constituye una gran ventaja competitiva en comparación con otras soluciones alternativas existentes en el mercado.

La red eléctrica es considerada un medio hostil para la transmisión de información, donde se pueden presentar numerosos problemas al momento de establecer un proceso de comunicación tales como: alto componente de ruido, impedancia variable y posibles atenuaciones significativas; son algunos de los retos que se deben afrontar debido a las diversas conexiones presentes en la red eléctrica y cambios constantes en la topología de la red a causa de apertura o cierre de circuitos, generándose la aparición de transitorios, los cuales causan reflexiones de señal y con ello cambios característicos en la impedancia y atenuación de la señal. [12]. Esta situación de cambios constantes en la topología de las redes PLC se presenta comúnmente en las redes PLC hogareñas en donde cada interruptor puede generar cambios eventuales en su topología.

Las redes PLC se caracterizan por la propagación *multipath* debido a numerosas reflexiones causadas principalmente en las uniones de los cables, puntos terminales y ramificaciones, donde se presentan diversos valores de impedancias y pérdidas por reflexión. El resultado de esto

³http://www.plcforum.com/frame_members.html

⁴http://www.pua-plc.com/about_us

es la propagación de una señal *multipath*, con una frecuencia de desvanecimiento selectivo. [6], [21], [22].

La atenuación en las redes PLC depende de la longitud de las líneas y los cambios constantes de impedancia en las líneas de transmisión. Diversos estudios han demostrado que la atenuación en la red eléctrica es relativamente aceptable en tramos cortos de cable (aproximadamente hasta 200-300 m), pero es muy malo en los cables de mayor longitud. Por lo tanto, es importante considerar que si se desea implementar una red PLC de gran tamaño, esta debe contar con dispositivos repetidores conectados a partir de cierta distancia y en puntos estratégicos dentro de la red PLC [9].

Básicamente los impedimentos que se pueden presentar en un proceso de comunicación bajo el uso de tecnología PLC obedecen a las características del canal de comunicaciones, estas características afectan la calidad de las señales transmitidas y en general dificultan la prestación de un servicio de acceso eficaz.

Características del canal.

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_L y la constante de propagación γ . Según [1] y [7] estos dos parámetros pueden ser definidos por la resistencia primaria $R'(f)$ por unidad de longitud, la conductancia $G'(f)$ por unidad de longitud, la inductancia $L'(f)$ por unidad de longitud y la capacitancia $C'(f)$ por unidad de longitud; las cuales dependen de la frecuencia. Las expresiones para impedancia característica de las líneas de potencia Z_L y la constante de propagación γ son las siguientes:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R'(f) + j2\pi f L'(f)}{G'(f) + j2\pi f C'(f)}}$$

$$\gamma(f) = \sqrt{[R'(f) + j2\pi f L'(f)] * [G'(f) + j2\pi f C'(f)]}$$

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f)$$

La función de transferencia para una línea de transmisión de longitud l , considerando únicamente la propagación de la onda desde el origen hasta su destino, se puede representar de la siguiente forma:

$$H(f) = e^{-\gamma(f).l} = e^{-\alpha(f).l} \cdot e^{-j\beta(f).l}$$

Según [20], en diversas investigaciones realizadas en líneas de energía se ha concluido que $R'(f) \ll 2\pi f L'(f)$ y $G'(f) \ll 2\pi f C'(f)$ en el rango de frecuencias establecidas para PLC (1–30 MHz). En vista de lo anterior, se podría

considerar el valor de la impedancia característica y la constante de propagación de la siguiente forma:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

$$\gamma(f) = \frac{R'(f)}{2Z_L} + \frac{G'(f)Z_L}{2} + j2\pi f \sqrt{L'C'}$$

En donde:

$$Re\{\gamma(f)\} = \frac{R'(f)}{2Z_L} + \frac{G'(f)Z_L}{2}$$

$$Im\{\gamma(f)\} = j2\pi f \sqrt{L'C'}$$

Tomando la parte real de la constante de propagación y sustituyendo a $R'(f)$ por su valor real:

$$R'(f) = \sqrt{\frac{\pi\mu_o}{kr^2}} f$$

En donde μ_o (constante de permeabilidad), k (conductividad) y r es el radio del cable.

Por otro lado, $G'(f) \sim f$ según resultados obtenidos en estudios sobre PLC. [1]. En vista de lo anterior, reemplazando cada uno de los términos en la expresión se obtiene que:

$$\alpha(f) = Re\{\gamma(f)\} = \frac{1}{2Z_L} \sqrt{\frac{\pi\mu_o}{kr^2}} f + \frac{Z_L}{2} f$$

Si se resumen términos constantes, la expresión se puede representar de la siguiente forma:

$$\alpha(f) = Re\{\gamma(f)\} = k_1 \sqrt{f} + k_2 f$$

$$\beta(f) = Im\{\gamma(f)\} = k_3 f$$

La cual finalmente podría ser representada por:

$$\alpha(f) = a_0 + a_1 f^k \text{ con } a_0, a_1, k \text{ constantes}$$

Las mediciones de pérdidas de propagación a lo largo del espectro de PLC se pueden encontrar en [1]. Si las pérdidas se representan por unidad de longitud, y bajo una adecuada selección de los parámetros a_0 , a_1 y k sería posible calcular la atenuación de línea eléctrica, la cual corresponde a la amplitud de la función de transferencia del canal, definida por la siguiente ecuación: [2]

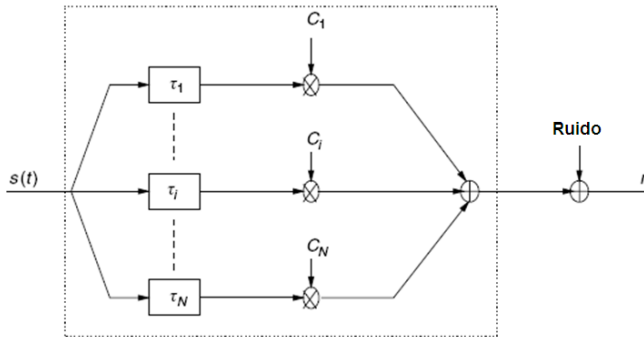
$$A(f, l) = e^{-\alpha(f).l} = e^{-(a_0 + a_1 f^k).l}$$

Modelamiento del canal PLC.

En un canal PLC se presenta un fenómeno conocido como “eco” el cual se presenta por las múltiples reflexiones

producidas por las diversas discontinuidades en la impedancia característica del canal. Por esta razón, una señal transmitida puede llegar por N caminos diferentes al receptor.

Figura 3. Representación de un modelo *multipath* en un canal PLC[22]



Cada camino i presenta un retardo τ_i y un cierto factor de atenuación C_i . El canal PLC se puede describir por medio de una respuesta al impulso h en un tiempo discreto (t), tal como se muestra en la figura 3 y se representa en la siguiente ecuación:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \delta(t - \tau_i) \rightarrow H(f) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}$$

La cual en el dominio de la frecuencia sería:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, l_i) \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}$$

Donde g_i es un factor de ponderación que representa el producto de la reflexión y otros factores de transmisión a lo largo del camino. La variable τ_i , representa el retardo producido por la ruta i y se calcula dividiendo la longitud del camino l_i por la velocidad de fase v_p ; [15].

Al sustituir la atenuación media $A(f, l_i)$ por su valor original, se obtiene la ecuación final del modelo de canal PLC, la cual reúne los parámetros de sus tres características (la atenuación, las fluctuaciones de impedancia y efectos *multipath*). Esta ecuación se compone principalmente de tres términos (ponderación, atenuación y retardo):

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{(a_0 + a_1 f^k) \cdot l} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}$$

Ponderación: g_i

Atenuación: $e^{(a_0 + a_1 f^k) \cdot l}$

Retardo: $e^{-j2\pi f \tau_i}$

Capacidad del canal PLC.

De acuerdo con la Ley de Shannon, la capacidad de un canal (cantidad máxima de información en bps que es

posible transferir) bajo condiciones de ruido se puede calcular a través de la siguiente expresión:[9]

$$C = B \cdot \log_2 \left[1 + \frac{S}{N} \right]$$

C = Velocidad máxima de transmisión de datos en bps

B = Ancho de banda del canal

S/N = Relación señal a ruido del mismo.

Esta expresión no es aplicable directamente a un canal de PLC, ya que la relación señal a ruido (SNR) no es constante en todo el ancho de banda B , la cual puede variar sustancialmente. Sin embargo, es posible en la práctica obtener la densidad de potencia de la señal transmitida $S_{rr}(f)$ y la densidad de potencia del ruido $S_{nn}(f)$, las cuales son factores que dependen de la frecuencia. En vista de lo anterior se pueden obtener estos valores dentro de un rango específico de frecuencia y con ello realizar un ajuste en la expresión de Shannon:[15]

$$C = \int_{f_u}^{f_0} B \cdot \log_2 \left[1 + \frac{S_{rr}(f)}{S_{nn}(f)} \right] df \quad \text{con } B = f_0 - f_u$$

La capacidad del canal generalmente decrece con la distancia debido al comportamiento de Filtro Paso Bajo de las líneas de potencia. Por otro lado, los esquemas de modulación pueden diferir mucho debido a la necesidad de explotar al máximo la capacidad del canal y a las condiciones existentes en la red eléctrica en un momento dado, las cuales varían constantemente.[7]

IV. RUIDO EN REDES PLC

Según diversos estudios realizados sobre PLC, se puede clasificar el ruido en cinco tipos según: su origen, tiempo de duración, lugar en el espectro e intensidad.[11].

El espectro del ruido en el rango de frecuencias de PLC por encima de los 145 KHz consiste de cuatro tipos de ruido.[9]

Ruido de fondo coloreado (tipo 1). Es la suma de fuentes de ruido como transformadores de distribución, sistemas de alumbrado público, entre otras. Este tipo de ruido presenta las siguientes características: una densidad de potencia espectral baja que disminuye con la frecuencia, origen debido a la superposición de diversas fuentes de ruido de baja intensidad, fuerte dependencia de la frecuencia y variación de sus parámetros en diversos momentos del día.

Ruido de banda angosta (Tipo 2). La mayoría de las veces tiene una forma sinusoidal, con amplitudes moduladas. Este tipo ocupa varias subbandas, que son relativamente pequeñas y continúan a lo largo del espectro de frecuencias. Este ruido es causado principalmente por la entrada de estaciones de radiodifusión en medio y las bandas de radiodifusión de onda corta. Su amplitud generalmente

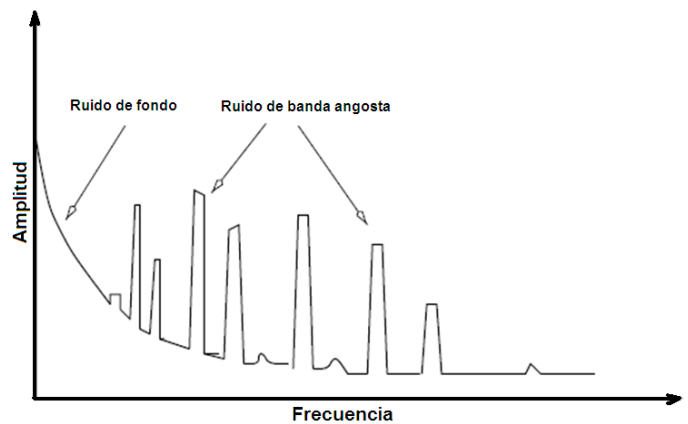
varía a lo largo del día, empezando a ser considerado por la noche, cuando las propiedades de reflexión de la atmósfera son más fuertes.

Ruido impulsivo periódico, asincrónico a la frecuencia fundamental de la red eléctrica (tipo 3). Presenta una forma de impulsos con una tasa de repetición entre 50 y 200 kHz. Este tipo de ruido se debe principalmente a fuentes de alimentación conmutadas.

Ruido impulsivo periódico sincrónico a la frecuencia fundamental de la red eléctrica (tipo 4). Son impulsos con una frecuencia de 50 o 100 Hz y son sincrónicos con la frecuencia fundamental de la red eléctrica. Estos impulsos tienen una corta duración, en el orden de microsegundos, y tienen una densidad de potencia espectral que disminuye con la frecuencia. Este tipo de ruido es generalmente causado por un suministro de energía que operan en sincronismo con la frecuencia principal, tales como los convertidores de potencia conectados a la red eléctrica.

Ruido impulsivo asincrónico (tipo 5). Son impulsos causados principalmente por el cambio transitorio en las redes. Estos impulsos tienen una duración de algunos microsegundos hasta unos pocos milisegundos con un tiempo entre llegadas arbitrario. Su densidad espectral de potencia puede alcanzar valores de más de 50 dB por encima del nivel del ruido de fondo, haciendo que la principal causa de aparición de error en la comunicación digital a través de redes PLC.

Los tipos de ruido 1,2 y 3 son los que presentan un comportamiento estacionario por largos periodos de tiempo (segundos, minutos e incluso horas). Por tal razón, estos tres niveles fueron resumidos en un solo tipo de ruido denominado “Ruido de fondo generalizado”. Los tipos 4 y 5 por el contrario, se presentan en unos cuantos milisegundos o microsegundos y son clasificados en un tipo de ruido denominado “Ruido impulsivo”, porque debido a la amplitud que estos pueden presentar en un momento dado, pueden llegar a producir errores en un proceso de comunicación dentro del rango promedio de frecuencias utilizado en aplicaciones de PLC.



La expresión matemática que describe el comportamiento del ruido de fondo generalizado correspondiente a la siguiente ecuación[11] :

$$N_{CBN}(f) = N_0 + N_1 \cdot e^{-\frac{f}{f_1}} [dB\mu V/Hz^{1/2}]$$

En donde N_0 corresponde a una constante de densidad de ruido, y los parámetros N_1 y f_1 son parámetros de la función exponencial.

Posteriormente, a través de diversas investigaciones y mediciones en ambientes residenciales e industriales, fue posible encontrar los valores aproximados de cada uno de los parámetros propuestos en el modelo anterior. Las expresiones para cada uno de los casos son: [6]

$$N_{CBN}(f) = -35 + 35 \cdot e^{-\frac{f[MHz]}{3,6}} [dB\mu V/Hz^{1/2}] \text{ Para desarrollos residenciales}$$

$$N_{CBN}(f) = -33 + 40 \cdot e^{-\frac{f[MHz]}{8,6}} [dB\mu V/Hz^{1/2}] \text{ Para desarrollos industriales}$$

Entre los aspectos que se deben tener en cuenta para establecer las características estadísticas de los parámetros de ruido, se encuentran la distribución de probabilidad del ancho del pulso y su distribución entre llegadas tiempo; lo cual representa el tiempo entre dos impulsos sucesivos, tal como se ilustra en la figura 6. figura 5. Ejemplo de ruido impulsivo en el dominio del tiempo en una red PLC[8]

Figura 4. Modelo de densidad espectral para ruido de fondo generalizado.[2]

Figura 5. Ejemplo de ruido impulsivo.[11]

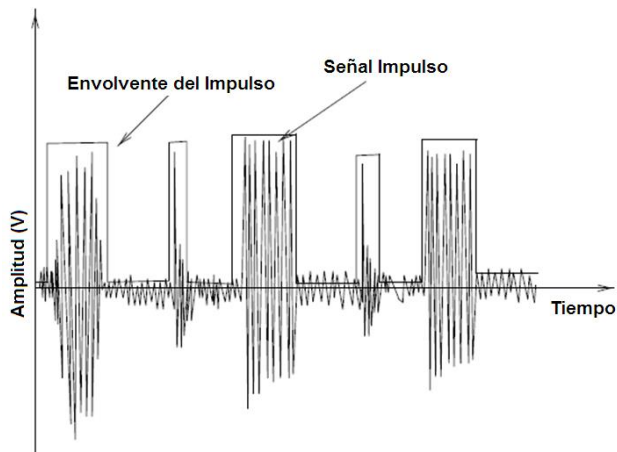
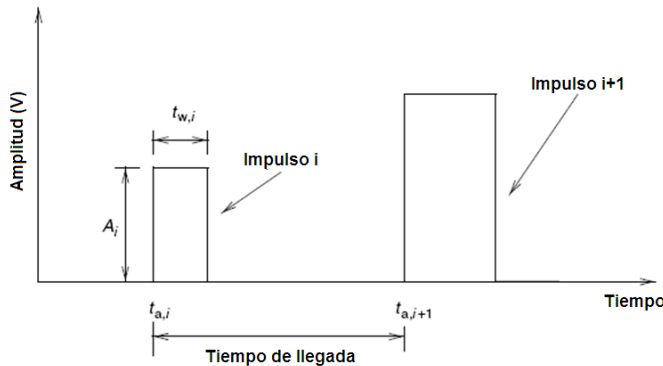


Figura 6. Modelo del impulso utilizado para establecer el ruido impulsivo.[11]



La expresión matemática para representar el tipo de ruido impulsivo es la siguiente:

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

Una aproximación de este modelo corresponde a un tren de pulsos con un ancho de pulso t_w , amplitud de pulso A , tiempo de llegada t_a tiempo y una función generalizada de pulso $p(t/t_w)$ por unidad de amplitud. [7] Los parámetros $t_{w,i}$, A_i y $t_{a,i}$ son variables aleatorias y sus valores estimados se encuentran en [8].

La amplitud, presenta un 90% de sus valores entre 100 y 200mV, menos del 1% alcanza un voltaje máximo de 2V. El tiempo t_w presenta valores inferiores a 500μs y el tiempo de separación entre pulsos es inferior a 200ms.[5]

El ruido es un aspecto muy común en las redes PLC, generado por diversas fuentes y puede ser de diversos tipos, tal como se ha mencionado. Estas fuentes de ruido pueden derivarse de la actividad de cualquier equipo eléctrico en el momento de encendido y apagado. En el cuadro 1 se muestran algunas de las variaciones que se presentan en la red eléctrica al momento de accionar dispositivos comunes en las viviendas.

Cuadro 1. Variaciones en la línea de potencia[8]

Equipo eléctrico	Amplitud (mV)		Duración (s)	
	Valor Promedio	Desviación estándar	Valor Promedio	Desviación Estándar
(pulso sencillo)				
Horno eléctrico	329.2	431.2	1015.8	505.2
Plancha eléctrica	369.3	585.8	760.2	347.9
(pulso periódico)				
Televisor	197.2	311.3	722.4	34.3
Dimer de luz	670.8	1199.3	140.0	7.5
(pulso continuo)				
Aspiradora	1457.5	2155.5	siempre	...
Secadora	87.9	119.7	105.3	56.0

V. ARQUITECTURA DE LA RED PLC

La tecnología PLC utiliza la red de distribución de Media y Baja tensión como medio de transmisión, accediendo así finalmente a hogares o empresas. En este caso, el tema de investigación se encuentra centrado en la red de acceso, la cual se encuentra ubicada en la red de baja tensión domiciliar, en donde se hace uso de adaptadores de red, los cuales permiten acceder a la información que viaja a través de la red eléctrica.

Normalmente el diseño de una red PLC depende de algunas variables tales como: la topología de la red eléctrica y la topología de la red de acceso a los servicios basados en IP. Generalmente en PLC, se puede presentar la combinación entre las topologías anillo y árbol o topologías bus y árbol; sin embargo, la más factible de desarrollar es la primera.

La topología física de la red eléctrica es tipo árbol y una red PLC también se estructura de esa forma. [13] La topología del sistema PLC corresponde a la topología que se encuentre presente en un momento dado acorde con el suministro de energía eléctrica, la cual es usada como medio físico de transmisión, y dependerá de algunos factores como son:[18],[19]

- **Ubicación.** Depende del tipo de sector ya sea comercial, residencial o industrial, lo cual está relacionado con el tipo de usuarios y sus

requerimientos.

- **Densidad de uso.** Corresponde al número de usuarios de la red.
- **Longitud.** Distancia entre usuario y transformador, que depende de la clase de red o de la zona (si es urbana o rural).
- **Latencia.** Obedece a los retardos presentes en la red PLC en el momento de realizar un proceso de comunicación.

Por otra parte, la topología lógica en redes PLC se denominada “bus lógico”, en la cual cada uno de los dispositivos existentes en la red PLC podrá interactuar con otros dispositivos bajo alguno de los siguientes modos: [5] [17]

- **Modo Maestro-Esclavo:** Puede ser comparado con el modo cliente-servidor en redes IP, en el cual un dispositivo maestro administra la información entre los diversos dispositivos PLC existentes en la red. Los dispositivos esclavos solo pueden intercambiar información entre ellos acorde a los parámetros establecidos por el dispositivo maestro.
- **Modo Par a Par:** puede ser comparado con una red IP par a par en donde todos los dispositivos de la red tienen los mismos roles y el mismo nivel jerárquico. Estos dispositivos puede intercambiar información entre sí sin ser monitoreados por un dispositivo maestro. Este es el modo utilizado por el estándar HomePlug 1.0, en donde los dispositivos PLC intercambian información entre sí localmente.
- **Modo Centralizado:** Este modo consiste en una mezcla de los dos modos anteriores, en donde existe un dispositivo encargado de centralizar la red y los intercambios entre los dispositivos PLC; sin embargo, los otros dispositivos también podrán intercambiar información entre sí sin pasar por el dispositivo centralizador.

VI. LIMITACIONES TÉCNICAS DE PLC

La red eléctrica representa un medio hostil para la transferencia de datos debido a que esta no ha sido diseñada para transmitir información. PLC al ser una tecnología emergente se enfrenta a varios inconvenientes que afectan considerablemente su óptimo desempeño y limitan su implementación. Dos de los problemas más importantes que enfrenta esta tecnología son: los niveles excesivos de ruido y la atenuación de la señal a las frecuencias de interés [3].

Por otro lado, la atenuación que sufre la señal de datos en las líneas de potencia es alta e impredecible en la mayoría de los casos. Adicionalmente, es muy difícil obtener un

modelo significativo de este canal, debido a su drástica variación con el tiempo, por la constante conexión y desconexión de dispositivos [10][11].

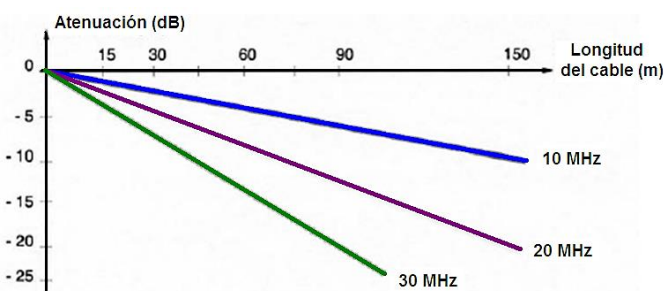
Entre los aspectos técnicos que dificultan el desarrollo de un sistema de comunicaciones PLC se destacan:

- El mal estado de las instalaciones eléctricas
- La distancia entre dispositivos PLC
- La Impedancia de la red eléctrica
- Atenuación de la señal
- Relación Señal-a-ruido (SNR)
- Número de hogares por transformador
- Problemas de Interferencia

Propagación de la señal PLC.

Uno de los aspectos más atractivos en el uso de la tecnología PLC es la propagación de las señales sobre el cableado eléctrico. Sin embargo, debido a las propiedades resistivas del cableado, la propagación de la señal está sujeta a una atenuación proporcional a la longitud del cable. Se han realizado algunos estudios por fabricantes de dispositivos PLC, en donde se han establecido algunas cifras relativas en relación con la propagación de las señales sobre el cableado eléctrico. En la figura 9 se observa claramente un aumento en la atenuación de la señal a medida que aumenta la frecuencia. En el estudio se utilizaron tres frecuencias (10MHz, 20MHz y 30MHz) a través de un cableado eléctrico que oscila entre 1,5mm y 2,5mm.[12]

Figura 9. Atenuación de una señal PLC según longitud del cable y la frecuencia de la señal [1]



Por lo general en una vivienda la atenuación en la línea está entre 20dB y 60dB, la cual depende de la carga. [16] ,[6]

Interferencia en redes PLC.

La interferencia es un aspecto esencial en las redes PLC. La propagación de las señales PLC produce una emisión electromagnética en el rango de 1 a 30MHz (rango en el que opera convencionalmente la tecnología PLC), generándose disturbios por los diversos dispositivos conectados al cableado eléctrico. Adicionalmente, un enlace entre dos estaciones no presenta las mismas características

eléctricas en ambos sentidos, en donde las características físicas del medio de transmisión (impedancia, carga, capacitancia) pueden cambiar según la dirección de propagación de la señal.[8]

Por otro lado, los diversos organismos nacionales e internacionales como la CISPR (international special committee on radio interference) de la (International Electrotechnical Commission), han establecido una reglamentación para determinar los límites de las emisiones electromagnéticas por dispositivos PLC que operen sobre la red eléctrica. Para el caso de dispositivos PLC, la potencia de la señal transmitida no debe ser superior a los 20dBm (100mW) en el rango de 1 a 30MHz y presenta un límite de emisiones electromagnéticas correspondiente a la densidad de potencia espectral PSD de -50 dBm/Hz definido en la norma IEC CISPR 22.[14]

Las condiciones de interferencia pueden cambiar durante el transcurso del día, debido a la cantidad y tipo de dispositivos eléctricos conectados a la red eléctrica, los cuales modifican permanentemente la topología y las condiciones físicas y eléctricas de la red.[18]

VII. CONCLUSIONES

La red eléctrica representa un medio hostil para la transferencia de datos debido a que esta no ha sido diseñada para transmitir información. PLC al ser una tecnología emergente se enfrenta a varios inconvenientes tales como: niveles excesivos de ruido, la atenuación de la señal a las frecuencias de interés, discontinuidades en la impedancia característica del canal, efecto *multipath*, entre otros aspectos; afectando considerablemente su óptimo desempeño. Adicionalmente, es muy difícil obtener un modelo significativo de este canal, debido a la constante conexión y desconexión de dispositivos.

Uno de los aspectos de mayor relevancia en los resultados obtenidos, es el comportamiento de la tecnología PLC bajo las condiciones de la red eléctrica Colombiana, considerando que la eficiencia de la red PLC depende de las condiciones en que se encuentre la red eléctrica. En Colombia y en muchos países, el cableado eléctrico no ha sido modificado, ni adaptado para el uso adecuado de esta tecnología, tal como ha ocurrido en países como Alemania, en donde se han realizado diversos estudios y ajustes a su infraestructura en las redes de potencia con el fin de optimizar su comportamiento y eficiencia de transmisión, garantizando niveles de confiabilidad y seguridad.

La implementación de redes PLC no debe ser considerado como un reemplazo de las tecnologías existentes, sino como una solución complementaria que trabaja en conjunto con otras tecnologías de acceso. PLC ofrece una instalación simple y rápida en donde solo es necesario conectar un adaptador o MÓDEM PLC, convirtiendo cualquier toma de corriente en un punto de acceso a la red; permitiendo la

transmisión simultánea de voz, datos y video sobre un mismo medio; originando la prestación de múltiples servicios, tales como: acceso a Internet de Banda Ancha, telefonía vocal con protocolo de IP, aplicaciones multimedia (videoconferencia, televisión interactiva, video y audio bajo demanda, juegos en red), entre otros servicios.

Una red PLC está sujeta a limitaciones relacionadas con la tecnología utilizada. Estas limitaciones hacen referencia a la velocidad de transmisión la cual, en la mayoría de los casos, no corresponde a la tasa esperada, debido a que la red PLC trabaja bajo el uso de un medio compartido, en donde el ancho de banda entre los usuarios disminuye a medida que aumenta la cantidad de estaciones activas en la red PLC. Un aspecto importante es que las estaciones que formarán parte de la red PLC deben estar en la misma fase de la red eléctrica.

PLC surge como una alternativa tecnológica viable económicamente, la cual hace uso de la red eléctrica domiciliaria, brindando la posibilidad de implementar una red de área local a bajo costo y utilizar infraestructura de cableado ya existente, lo cual es una gran ventaja frente a otras tecnologías; permitiendo llegar a diferentes sitios donde otros medios de transmisión no llegarían tan fácilmente.

El creciente interés de la tecnología PLC en Colombia, desde el punto de vista académico y empresarial se ha ido consolidando a partir de los últimos años, donde se ha contado con el apoyo del Estado y la empresa privada.

Actualmente, los avances en la tecnología PLC en Europa y Estados Unidos permiten hoy en día alcanzar altas velocidades de transmisión y mayor ancho de banda sobre líneas de bajo y medio voltaje, lo cual facilita la transformación de la red eléctrica en una auténtica red de banda ancha, capaz de soportar servicios de datos, voz y video, además de cualquier otro servicio que ofrezca un operador de telecomunicaciones. “Fabricantes como Toyocom (www.toyocom.co.jp/english/) y Corinex (www.corinex.com) disponen ya de productos comerciales que utilizan la nueva generación de la tecnología PLC capaces de alcanzar velocidades de hasta 200 Mbps, incorporados en los últimos diseños desarrollados por DS2(tecnología Wisconsin)”¹.

REFERENCIAS

[1] ANDREOU G., MANITSAS E., LABRIDIS D., Finite element characterisation of LV power distribution lines for high frequency communications signals. Proceedings of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Kyoto, Japan, 109–119 March 26–28, 2003.

¹TECNOCOM, en: <http://www.tecnocom.biz/docs/plctecnocom.pdf>, 2007

- [2] BANWELL T., GALLI S., A new approach to the modelling of the transfer function of the power line channel, Proceedings of the 5th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Malmö, Sweden, 319–324 April 4–6, 2001.
- [3] BENYUCEF D., A new statistical model of the noise power density spectrum for powerline communications, Proceedings of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Kyoto, Japan, 136–141 March 26–28, 2003.
- [4] BROWN PA, Power line communications - past, present, and future. Proceedings of International Symposium on Power-line Communications and its Applications, September 1999, 1-8.
- [5] BUMILLER G., System architecture for power-line communication and consequences for modulation and multiple access. 7 th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC2003), Kyoto, Japan, March 26–28, 2003.
- [6] CARCELE, Xavier. Power Line Communications in practice. Paris: Artech House. 2006. 376 p. ISBN 978-1-59693-335-4
- [7] ETSI, Power Line Telecommunications (PLT) Channel Characterization and Measurement Methods, Technical Report ETSI TR 102 175 v1.1.1 (2003-03), European Telecommunications Standards Institute, 2003. Available online under www.etsi.org.
- [8] GUILLEN, Edward P., LÓPEZ Julián J., BARAHONA Cesar Y., Throughput Analysis over Power Line Communication Channel in an Electric Noisy Scenario. World Academy of Science, Engineering and Technology Volume 33 September 2008 ISSN 2070-3740
- [9] HELD Gilbert. Understanding Broadband over Power Line. NJ USA: Taylor & Francis Group, 2006. 191 p. ISBN 0-8493-9846-0
- [10] HomePlug 1.0 Specification, HomePlugPowerline Alliance, June 2001.
- [11] HRASNICA Halid, HAIDINE Abdelfatteh, LEHNERT Ralf. Broadband Powerline Communications Networks. NJ USA: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 273 p. ISBN 0-470-85741-2
- [12] KAIZAWA Y, MARUBAYASHI G., “Needs for the power line communications,” Proceedings of International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1998, 153-157.
- [13] LIN Yu, LATCHMAN HA, LEE MK, KATAR S.A power line communication network infrastructure for the smart home. IEEE Wireless Communications, Dec 2002; 9(6): 104–111.
- [14] MENG, H. E GUAN, Y. L. Modeling and Analysis of Noise Effects on Broadband Power-Line Communications”, In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.
- [15] O. G. HOOIJEN, “A channel model for the low voltage power line channels; measurement and simulation results,” in Proc. 1997 Int. Symp. Power-Line Communications and Its Applications, pp. 51–56.
- [16] TANG L. T., SO P. L., GUNAWAN E., CHEN S., Characterization of in-house power distribution lines for high-speed data transmission. in Proc. Int. Power Eng. Conf., vol. 1, Singapore, 2001, pp. 7–12.
- [17] ZIMMERMANN M., DOSTERT K. An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks. International Symposium on Powerline Communications and its Applications (ISPLC2000), Limerick, Ireland, April 5–7, 2000.
- [18] ZIMMERMANN M., DOSTERT K. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume 44, Issue 1, Feb. 2002, pp 249 - 258
- [19] ZIMMERMANN M., DOSTERT K. The low voltage distribution network as last mile access network – signal propagation and noise scenario in the HF- range. AEÜ International Journal of Electronics and Communications, (1), 13–22 2000.
- [20] ZIMMERMANN M., DOSTERT K., A multipath model for the powerline channel. IEEE Transactions on Communications, 50(4), 553–557 April 2002.
- [21] JENSEN Bente, SLAVENSKY Henning, KJÆRSGAARD Søren, Benchmarking and QoS of In-House Powerline Equipment under Noisy Conditions. IEEE Proceedings of ISPLC2006, Orlando, pp. 150-155, (2007).
- [22] JUNG M., CHUNG M., LEE T., MAC Throughput Analysis of HomePlug 1.0. IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 2, pp. 184–186, feb 2005

BIOGRAFÍA



José Antonio Vesga Barrera. Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander, Especialista en docencia universitaria de la Universidad Cooperativa de Colombia, Magíster en Potencia Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Actualmente, se desempeña como Docente Investigador de la Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo UNICIENCIA.



Martha Fabiola Contreras H. Ingeniera Electrónica (Universidad de Pamplona), Especialista en Telecomunicaciones (Universidad Industrial de Santander) y Magister en Ingeniería área Telecomunicaciones (En curso con la Universidad Pontificia Bolivariana). Docente e Investigadora desde el año 2010.