

Artículos de revisión de tema

# Modelando algunas características de las redes eléctricas usadas como canal para proveer telecomunicaciones

## Modelling some characteristics of electrical networks used as channels for providing telecommunications

Henry Arturo Bastidas Mora<sup>1</sup>

### RESUMEN

Este artículo describe la topología de las redes eléctricas existentes en diferentes partes del mundo, incluidas las redes colombianas, y su desempeño para ser usadas como canales de telecomunicaciones. Se analiza la función de transferencia para redes de baja tensión y se considera adicionalmente la radiación originada por la tecnología PLC (Power Line Communications). Como la radiación originada por PLC no puede evitarse completamente, se describirá el efecto de la interferencia electromagnética con comunicaciones de radio frecuencia. Se propone el modelo del canal de PLC y al final se presentan las conclusiones.

**Palabras clave:** PLC, EMC, interferencia electromagnética, radiación, redes de distribución eléctrica.

### ABSTRACT

This article describes the topology of the existent electric nets in different parts of the world, included the Colombian nets, and there performance when used as telecommunications channels. The transfer function is analyzed for low tension nets and radiation originated by PLC (Power Line Communications) technology is also considered. Since the radiation originated by PLC cannot be avoided completely the effect electromagnetic interference will be described with radio frequency communications. Modeling of the PLC channel is proposed and at the end conclusions are presented.

**Key words:** PLC, EMC, electromagnetic interference, radiation, electric nets.

Recibido: diciembre 7 de 2004

Aceptado: octubre 1 de 2005

### Introducción

La necesidad de acceso fácil a internet y en general a telecomunicaciones con gran ancho de banda está creciendo en el mundo entero. Principalmente en medianas empresas, pequeñas oficinas y hogares, donde instalar nuevos cables no es rentable, existen de hecho suficientes salidas eléctricas diseminadas por cada uno de los salones, alcobas u oficinas, teniéndose la posibilidad de explotarlas como una red de área local. La red eléctrica puede entonces brindar la solución de última milla y también de últimos metros. Como las redes eléctricas son diferentes en su configuración interior y exterior, diferentes sistemas de PLC deberán ser implementados. Pero las redes eléctricas no se diseñaron para prestar servicios de telecomunicaciones

produciendo una amplia gama de ruidos, dificultad de acoplamiento etc., convirtiendo de esta manera el canal eléctrico en un importante desafío tecnológico para su uso como canal de telecomunicaciones.

Existen aplicaciones para PLC de banda angosta que emplean frecuencias del orden de los kHz para usos en monitoreo y control, pero también se pueden alcanzar tasas de transmisión de varios Mbps con frecuencias en el rango de 1.6 a 30 MHz (Cañete et al., 2002).

Este artículo comienza con una revisión de las configuraciones de redes de distribución de potencia usadas en diferentes partes del mundo. Se analizará seguidamente la función de transferencia para diferentes tramos en re-

<sup>1</sup> Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia; especialista en sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica, Universidad de los Andes; Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Colombia; coordinador de Investigaciones del programa de Ingeniería en Teleinformática, Universidad Piloto de Colombia; docente e investigador universitario, e-mail: habastidas@hotmail.com

des de baja tensión aisladas, se considerará la radiación originada por la tecnología PLC y el efecto de la interferencia electromagnética con comunicaciones de radio.frecuencia, especialmente en algunos anchos de banda específicos. Se propone también un modelo del canal de PLC que recoge algunas de sus principales características, y por último, el artículo cierra con las conclusiones pertinentes.

### Redes de distribución de potencia

Un sistema de potencia de energía eléctrica tiene cuatro componentes principales: generación, líneas de transmisión, las subestaciones o estaciones transformadoras y el sistema de distribución (Grainger y Stevenson et al., 2003).

Los avances en PLC usan actualmente las redes de distribución secundaria que operan a niveles de voltaje denominados de baja tensión (LV), pero también están explorando con sistemas de media tensión (MV), es decir, con circuitos primarios.

Las pérdidas en las líneas de potencia crecen con el cuadrado de la corriente  $I^2$ . Es importante entonces mantener la  $I$  tan pequeña como sea posible especialmente en distancias grandes. Para transmitir una determinada potencia con una  $I$  pequeña, se debe mantener el voltaje tan alto como sea viable. Esta idea básica genera automáticamente una red jerárquica en términos de voltaje: para transportar a largas distancias se usa alto voltaje y se va bajando de voltaje a medida que la distancias se acorta. Entonces, se encuentran los siguientes niveles de voltaje en redes de potencia alrededor del mundo:

Extra. alto voltaje (EHV), que se utiliza en líneas de transmisión y cuyo nivel de voltaje es mayor de 300 kV. Alto voltaje (HV) también en líneas de transmisión y con voltajes mayores de 36 kV. Medio voltaje (MV), para circuitos de distribución y con voltajes comprendido en el rango de 1 a 36 kV. Y finalmente, redes de bajo voltaje (LV), con niveles de tensión menores de 1 kV (Figura 1).

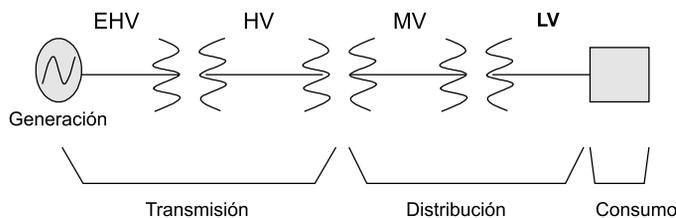


Figura 1. Sistema de transmisión y distribución de potencia.

La capacidad del transformador de MV/LV está determinada por la densidad de carga de los usuarios, y de la cantidad de usuarios por transformador dependerá el costo de las soluciones de PLC. LV puede alimentar a cada uno de los clientes con una acometida individual que

puede ser aérea o subterránea, o puede ir a un barraje situado en un tablero desde donde salen acometidas para cada usuario. En el predio del usuario hay un tablero general y desde allí van conductores eléctricos hacia el interior para las tomas e interruptores.

Las líneas de transmisión de EHV y HV ya tienen una enorme infraestructura de comunicaciones al usar cables de fibra óptica que sustituyeron los antiguos cables de guardia usados para la protección de las líneas contra descargas atmosféricas.

Los circuitos de MV y LV son los de mayor interés para soluciones de PLC y especialmente las instalaciones eléctricas interiores. Principalmente para países poco desarrollados, donde no haya infraestructura telefónica, PLC sería una oportunidad única obteniendo internet y servicio telefónico a la vez, pero incluso en países industrializados PLC sería otra alternativa para desarrollar comunicaciones con mínima inversión y tiempo de instalación.

El desarrollo de las redes eléctricas siguen básicamente dos modelos: el europeo o el norteamericano; sin embargo, adicionalmente a estos dos modelos en el presente artículo se incluirán las redes colombianas y el modelo japonés.

### El modelo europeo de redes eléctricas

Para la distribución de MV, se usan voltajes de 10 kV o 20 kV y se utilizan cables aéreos o subterráneos. En áreas urbanas el sistema es típicamente subterráneo, trifásico, con transformadores de hasta 630 kVA que pueden atender el orden de 300 hogares.

La conversión de MV/LV normalmente se hace con configuración en estrella y neutro aterrizado, resultando un voltaje de fase de 400 V y un voltaje de fase a neutro de 230 V (Figura 2). En el interior las señales de PLC pueden ser inyectadas entre fase y neutro.

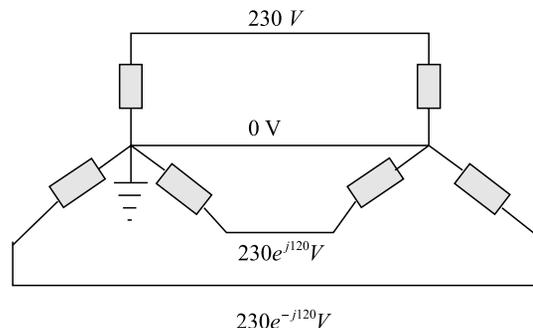


Figura 2. Red de distribución modelo europeo.

### El modelo norteamericano (USA) de redes eléctricas

La distribución de MV se hace con voltajes entre 4 y 34 kV y con longitudes entre 15 y 50 kilómetros. La conver-

sión MV/LV se hace a través de un transformador con tap central que suministra voltajes de 120 V o 220 V dependiendo del tipo de carga. Los 120 V alimentan las cargas normales en tomas y alumbrado y los 240 V suplen requerimientos de aire acondicionado o calor. Las longitudes típicas de redes secundarias es de 300 metros con un promedio de 10 usuarios por transformador. PLC puede ser inyectado entre fase y neutro a 120 V ( Figura 3).

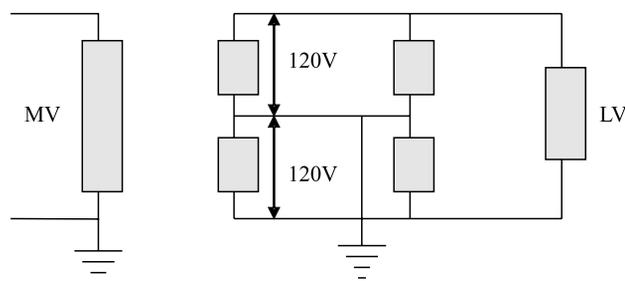


Figura 3. Red de distribución modelo norteamericano (USA).

### Modelo japonés de redes eléctricas

El esquema que utiliza el modelo japonés es similar al modelo norteamericano con la diferencia de que MV es de 6.6 kV y que en baja tensión se tienen 100 V para cargas estándar o 200 V de tensión línea a línea. Las longitudes típicas de los circuitos de LV están entre 100 y 200 metros y cada transformador alimenta en promedio 30 usuarios. Pero es importante anotar que en la mayoría de las líneas de media tensión existe una gran infraestructura de fibra óptica instalada y disponible.

### Modelo colombiano de redes electricas

Los circuitos primarios (MV) de distribución urbana son trifásicos trifilares, con neutro sólidamente puesto a tierra en la subcentral, y con una tensión nominal para Bogotá de 11.4 kV, 60 Hz. Para otras zonas del país y para circuitos rurales, la tensión nominal es de 13.2 kV, 60 Hz. También existen circuitos primarios a 34.5 kV que se utilizan en zonas industriales dentro del área urbana, radiando de una subcentral o uniendo en algunas ocasiones dos subcentrales por medio de circuitos dobles desde los cuales se derivan las acometidas a los diferentes usuarios industriales.

Los circuitos secundarios o de LV son trifásicos tetrafilares, conectados en estrella con neutro puesto a tierra en los transformadores cada tercer poste y en los terminales de circuito.

Los voltajes de suministro son los siguientes:

- Monofásicos bifilar a 120 voltios  $\pm$  5% mediante acometida de dos conductores conectados a fase y neutro.
- Monofásicos trifilar a 110/120 voltios  $\pm$  5% o 120/240 voltios  $\pm$  5% o tomado de un sistema trifásico a 208/120 voltios  $\pm$  5%.

c. Trifásico a 120/208 voltios  $\pm$  5% mediante acometida de cuatro conductores conectados a las tres fases y el neutro.

La Figura 4 muestra la configuración de las redes en Colombia para los diferentes voltajes de suministro.

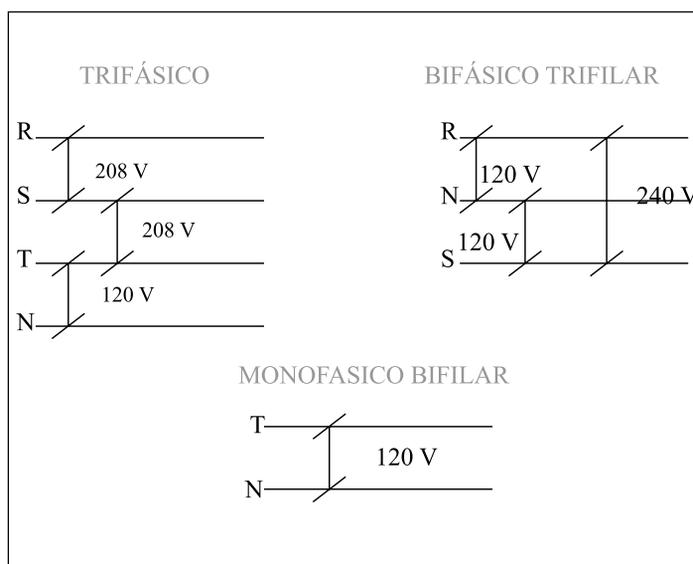


Figura 4. Redes de distribución colombianas: voltajes de suministro.

### Caracterización del canal eléctrico

Una línea de transmisión tiene cuatro parámetros que afectan su capacidad para cumplir su función como parte de un sistema de potencia: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia. Estos mismos parámetros son de suma importancia para la determinación de las propiedades del canal de PLC usado para transportar señales de telecomunicaciones.

Adicional a los valores de resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia llamados también parámetros primarios de las líneas, se definen otros dos parámetros de la línea de transmisión: su impedancia característica  $Z$  y la constante de propagación  $\gamma$ . Ambos parámetros son números complejos y son función de la frecuencia  $f$  y de los parámetros primarios (Neri, 2002).

El análisis detallado de cada uno de estos parámetros no es objeto de estudio en el presente artículo.

Interesa, sin embargo, el análisis de la magnitud de la función de transferencia que entre dos puntos de una línea de potencia está básicamente determinada por tres parámetros: la longitud del cable, el tipo del cable y la configuración de los alimentadores. Considerándose estos parámetros es fácil deducir que para altas frecuencias la función de transferencia para redes de media tensión, de baja tensión, de interior, o de exterior, van a resultar bien diferentes.

Las líneas tienen una resistencia  $R'$ , inductancia  $L'$ , capacitancia  $C'$ , conductancia  $G'$  por unidad de longitud, y todas aumentan con la longitud de la línea.  $G'$  tiene una fuerte dependencia por tipo de aislamiento del cable.

En países europeos se ha efectuado un significativo número de medidas para cables con aislamiento de PVC con diferentes longitudes y para diferentes frecuencias (Banwell, 2003) cuyos resultados se muestran en la Figura 5.

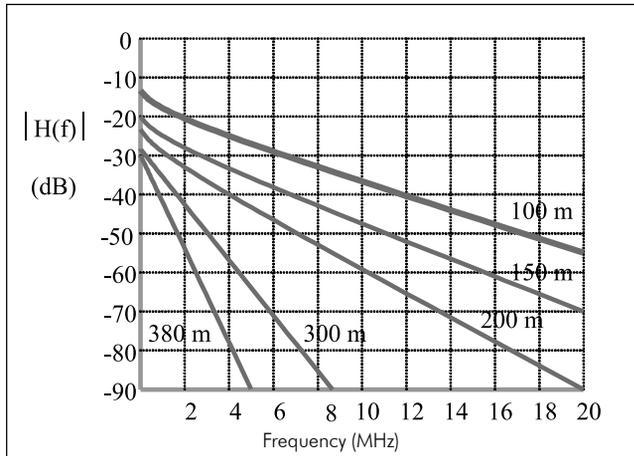


Figura 5. Magnitud de la función de transferencia para diferentes longitudes y frecuencias. Fuente: T.C. Banwell and S. Gall, "Transfer Function and Channel Properties", Submitted IEEE Trans. Commun., Jan. 2003.

Se observa que la atenuación aumenta rápidamente al aumentar la longitud de los conductores y que también aumenta con el incremento de la frecuencia. Adicionalmente a esta característica desfavorable de atenuación hay que sumar los diferentes efectos de la interferencia electromagnética.

### Compatibilidad electromagnética

El PLC utiliza frecuencias entre 9 kHz y 30 MHz. A altas frecuencias los cables presentan fugas emanadas en forma de radiación electromagnética, comportándose como antenas de baja eficiencia (Zimmermann y Dostert, 2002). Esta forma de radiación produce interferencia con las comunicaciones de radio principalmente en las frecuencias entre 1 a 20 MHz, bandas asignadas a AM y radionavegación. Existe entonces una crucial dificultad por compatibilidad electromagnética (EMC) con este tipo de comunicaciones.

El grado de interferencia depende de la potencia de transmisión, de la distancia y de la configuración de los cables. Más exactamente, la fracción de potencia radiada está determinada por la simetría de la red, y esta simetría está definida en términos de la impedancia entre conductores: si en un par de conductores la impedancia entre conductor y tierra es de igual magnitud, la red es simétrica. A su vez, para que se presente simetría entre conductores se requiere que ambos lleven la misma corriente (I). Conectar neutro y tierra en la acometida pue-

de ser una buena alternativa para lograr una alta simetría en la línea. En orden a valorar el verdadero impacto de la interferencia de PLC con las comunicaciones de radio se hace necesario efectuar mediciones con sistemas que se encuentren operativos. Este es un trabajo que ya se ha comenzado hacer en algunos países.

### Un esquema del canal PLC

Un esquema básico del canal PLC es el que se muestra en la Figura 6. Representa un transmisor, con su respectiva impedancia de salida, un receptor con su correspondiente impedancia de entrada, la línea eléctrica (canal) y los circuitos de acople. Son los circuitos de acople los que permiten el ingreso y salida de las señales de telecomunicaciones e impiden la llegada de las señales eléctricas de LV. En esencia son filtros pasa bajas y filtros pasa altas que separan las señales de electricidad de las señales de telecomunicaciones.

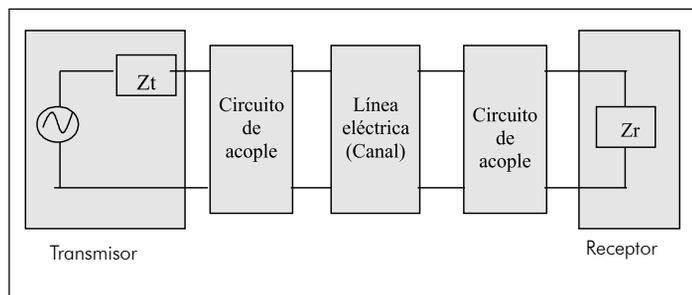


Figura 6. Esquema básico del canal PLC. Fuente: H. Philipps; "Modeling of Powerline Communications Channels", Proc. Int'l. Symp Power-line Commun. And its Apps., Lancaster, U.K, Mar. 30-Apr. 1, 1999.

En los canales convencionales de telecomunicaciones las impedancias de salida del transmisor ( $Z_t$ ) y de entrada al receptor ( $Z_r$ ) son valores estables, permitiendo un acople sencillo de los circuitos. El canal PLC presenta impedancias que varían no sólo con la carga (I) del circuito eléctrico sino también con la frecuencia, es decir, que es un canal variante con el tiempo y con la frecuencia.

Si a esto se le suma una diversidad de tipos de ruido presentes en las líneas eléctricas, el modelamiento del canal representa un verdadero reto de ingeniería.

### Un esquema detallado de canal PLC

La optimización de un esquema de transmisión puede hacerse solamente después de disponer de un modelo exacto del canal, y para PLC no se dispone aún de un modelo adecuado y estándar. Se propone, sin embargo, considerar el canal de PLC que se presenta en la Figura 7 (Haring y Vinck, 2001). Se incluyen en este esquema las siguientes importantes consideraciones:

- La atenuación es variante con el tiempo y con la frecuencia.

- . Existe dependencia del canal respecto a la localización, topología de la red y tipo de carga.
- . Alta interferencia por el ruido producido por el tipo de cargas conectadas.
- . Varias formas de ruido impulsivo.
- . Mediciones de EMC que limitan la potencia de transmisión.

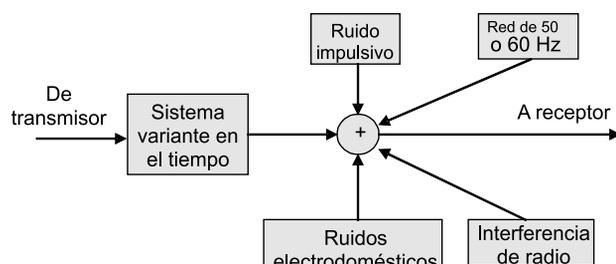


Figura 7. Esquema detallado del canal PLC. Fuente: Ezio Bigleri Politécnico de Torino

## Conclusiones

En este artículo se examinaron algunos modelos de redes eléctricas instaladas en diferentes países del mundo, con énfasis en las redes colombianas, y sus propiedades para prestar servicios de telecomunicaciones.

Se llama la atención sobre las dificultades de la tecnología PLC por la interferencia con comunicaciones de radio AM y radionavegación.

Se efectuó la caracterización de un canal de PLC y se propuso un modelo que recoge con bastante detalle las variables que afectan su funcionamiento.

Eventualmente se podría demostrar que, dada la ubicuidad de las redes eléctricas, la tecnología PLC será una interesante alternativa de comunicación de gran ancho de banda, y que en la medida en que esta tecnología madure y la regulación progrese, será un importante competidor de xDSL, fibra óptica y comunicaciones inalámbricas.

## Bibliografía

- D. Welsh, I. Flintoft, and A. Papatsoris, "Cumulative Effect of Radiated Emissions from Metallic Data Distribution Systems on Radio-Based Services", Agency, London, U.K., 2000.
- Y.F. Chen and T.D. Baseband, "Transceiver Design of a 128-Kbps Power-line Modem for Household Applications", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, No.2, Apr.2002, pp. 338-44.

H. Philipps, "Modeling of Powerline Communications Channels", Proc. Int'l. Symp. Power-line Commun. And its Apps., Lancaster, U.K, Mar. 30-Apr. 1, 1999.

M. Zimmermann and K. Dostert, "A Mutipath Model for the Powerline Channel", IEEE Trans. Commun, Vol. 50, No. 4, Apr. 2002, pp.553-59.

T.C. Banwell and S. Galli, "A Novel Approach to Accurate Modeling of the Indoor Power Line Channel. Part I: Fundamental Analysis and Circuit Models, and Part II: Transfer Function and Channel Properties", Submitted IEEE Trans. Commun., Jan. 2003.

Proc. 2001 Int'l. Symp. Power-line Commun. And its Apps., Malmo, Sweden, April 4-6, 2001.

Proc. 2002 Int'l. Symp. Power-line Commun. And its Apps. Athens, Greece, Mar, 27-29, 2002.

F. J. Cañete et al., "Broadband Modeling of Indoor Power-line Channels", IEEE Trans. Consumer Elect. Vol. 48, No.1, Feb. 2002, pp. 175-83.

M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broadband Powerline Communications", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. 44, 1, Feb. 2002, pp. 249-58.

J. Haring and A.J.H. Vinck, "Coding for Impulsive Noise Channels", Oric 2001 Int'l. Symp. Power-line Commun. And its Apps., Malmo, Sweden, Apr. 4-6 2001.

J.M. Cioffi et al., "MMSE Decision-feedback Equalizers and Coding" IEEE Trans. Commun. Vol. 43, Oct. 1995, pp. 2.582-2.604.

C.A. Belfiore and J. H. Park, "Decision Feedback Equalization", Proc. IEEE, Vol. 67, Aug. 1979, pp. 1143-50.

P.K. Van der Gracht and R. W. Donaldson, "Communication Using Pseudonoise Modulation on Electric Power Distribution Circuits", IEEE Trans. Commun., Vol 33, No.9, Sept. 1985, pp.964-74.

W. Hachem et al., "Multiple Access Communication Over the Power Line Chnnel: A CDMA Approach", Proc. IEEE GLOBECOM 01, San Antonio, TX, Nov. 25-29, 2001, pp. 420-24.

Alexander, Charles y Sadiku, Matthew. "Fundamentos de circuitos eléctricos", Mc Graw - Hill Editores, México, D.F., 2001.

Anderson, J.B., "Digital Transmission Enginnering", IEEE Press, 1998.

Arzberger, M., "Fundamental properties of the low voltage power distribution grid. Proceedings of the 1997 International Symposium on Power Line Communications and Its Applications", Essen, Germany, April, 1997.

Neri, Rodolfo, "Líneas de transmisión", Mc Graw-Hill Editores, México, D.F., 2002.

Grainer, John y Stevenson, William, "Análisis de sistemas de potencia", Mc Graw-Hill Editores, México, D.F., 2000.