

Fundamentos teóricos para el cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas aéreas de baja tensión para su uso en telecomunicaciones

The theoretical foundations for calculating the technical parameters for low-tension overhead electricity lines for use in telecommunications

Henry Bastidas Mora¹

RESUMEN

Este artículo presenta las propiedades de las redes de energía eléctrica para su utilización como canales para la transmisión de señales de telecomunicaciones. Comienza explorando los principios y fundamentos teóricos para el cálculo de los parámetros técnicos críticos de las líneas eléctricas, por lo que trata con detalle lo referente a los parámetros primarios: inductancia, capacitancia, conductancia y resistencia, y, asociados a estos, los parámetros secundarios (más útiles desde el punto de vista de las telecomunicaciones): impedancia característica y constante de propagación; de esta última, su componente real, la constante de atenuación. Se verifican las diversas topologías y la estructura de los sistemas eléctricos de potencia para líneas de media y baja tensión aéreas y se propone un modelo matemático para analizar su comportamiento a altas frecuencias extensible a la mayoría de los sistemas de distribución aéreos de energía eléctrica colombianos. El trabajo incluye una parte de los resultados de la investigación denominada "Diseño de una solución a través de la tecnología PLT (*Power Line Telecommunications*) para acceso a Internet de banda ancha en regiones rurales de Colombia", realizada por el autor con la Universidad Piloto de Colombia. Mediante la utilización del modelo matemático propuesto se tiene una herramienta teórica de una parte de los cálculos aplicables a PLT.

Palabras clave: PLT, inductancia, capacitancia, conductancia, resistencia, impedancia característica, constante de propagación, atenuación.

ABSTRACT

This article presents the properties of electric power networks for use as a channel for transmitting telecommunications signals. It starts by exploring the principles and theoretical basis for calculating power lines' critical technical parameters, referring in detail to the following primary parameters: inductance, capacitance, conductance and resistance. It then deals with the secondary parameters (most useful from a telecommunications perspective): characteristic impedance and propagation constant (the attenuation constant being the latter's real component). Different topologies and low- and medium-tension aerial power line structures are verified; a mathematical model is then proposed to analyse their behaviour at high frequencies, extending to most aerial electric power distribution systems in Colombia. This work includes some of the results from previous research which was known as "Using power line telecommunications (PLT) technology for designing a solution for accessing the broadband internet in rural areas of Colombia" by the present author and the Pilot University of Colombia. The proposed mathematical model provides a tool for making theoretical calculations applicable to PLT.

Keywords: PLC, inductance, capacitance, leakage conductance, resistance, characteristic impedance, propagation constant, attenuation.

Recibido: agosto 31 de 2008

Aceptado: junio 16 de 2009

Introducción

La tecnología PLT (*Power Line Telecommunications*) permite la utilización de las redes de suministro de energía eléctrica para propósitos de telecomunicaciones y se ha venido implementando en Europa, Norteamérica y algunos países de América del sur como Chile y Brasil. En Colombia esta tecnología se está comenzando a explorar (Malaver, Moreno y Ramos, 2002; Cruz, Gijón y Ramos, 2005; Bastidas, 2005), y el Gobierno colombiano, a través de su plan de promoción y masificación de la banda ancha (Documento

"Promoción y masificación de la banda ancha en Colombia", Ministerio de Comunicaciones y CRT, Versión II, 2005) ha reconocido la importancia de PLT para el futuro del país.

Los países en vía de desarrollo deben masificar el acceso a los servicios de telecomunicaciones con el objetivo de permitir mejores posibilidades a su población, impulsar la competitividad disminuyendo la llamada "brecha digital" e incorporarse en la sociedad de la información y del conocimiento. En Colombia uno de los principales inconvenientes que se tiene es la deficiencia de cubrimiento

¹ Ingeniero electricista y M.Sc., en Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Colombia. Especialista, en Sistemas de Transmisión y Distribución de energía Eléctrica, Universidad de Los Andes, Colombia. Docente investigador, Universidad Piloto de Colombia. Director del grupo de investigación Redes e Interconexión. habastidas@hotmail.com, henry-bastidas@unipiloto.edu.co.

de infraestructura de telecomunicaciones, especialmente para quienes no se encuentran en las grandes urbes.

La ubicuidad de la red de baja tensión ofrece un gran potencial que permitirá mediante la tecnología PLT lograr servicios de telecomunicaciones (voz, datos, video, Internet, telefonía IP, servicios de información, entre otros) en sitios urbanos y rurales. De aquí la gran importancia que tiene para Colombia explorar esta nueva posibilidad tecnológica, que se constituirá en una solución inmediata para aquellos usuarios a los que otras tecnologías de acceso no han llegado aún por motivos de rentabilidad económica.

Con la realización de este trabajo se busca efectuar una caracterización de las redes eléctricas aéreas de baja tensión, que son las que típicamente existen en las zonas rurales y más apartadas de Colombia, para modelar sus principales parámetros técnicos y verificar su posible utilización como canal de telecomunicaciones.

Dado que las redes eléctricas en su funcionamiento convencional no se diseñaron para prestar servicios de telecomunicaciones, producen una amplia gama de ruidos, atenuación, dificultad de acoplamiento etc. (Dostert, 2000; Dostert, 1987; Dostert, 1985; Zimmermann y Dostert, 2002), convirtiendo de esta manera el canal eléctrico en un importante desafío tecnológico para su uso como canal de telecomunicaciones. Como las redes eléctricas son diferentes en su configuración, es oportuno abrir espacios para el desarrollo de nuevos estudios que consideren otros aspectos adicionales, por ejemplo, la modelación en caso de redes subterráneas que son típicamente usadas en las zonas urbanas.

El sistema de potencia de energía eléctrica

Un sistema de potencia de energía eléctrica tiene cuatro componentes principales: generación, líneas de transmisión, subestaciones y el sistema de distribución (Grainger y Stevenson, 2003). Los avances en PLT 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.

Una línea de energía eléctrica 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 PLT usado para transportar señales de telecomunicaciones. Los valores de resistencia aumentan considerablemente con la frecuencia; en cambio, los valores de inductancia y capacitancia son prácticamente independientes de la frecuencia.

Resistencia. La resistencia de los conductores es la causa más importante de la pérdida de potencia en las líneas de transmisión. Cuando se habla de resistencia se hace referencia a la resistencia efectiva. La resistencia efectiva de un conductor es

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (1)$$

donde P es la pérdida de potencia en el conductor en watts e I es la corriente efectiva o rms en amperios. La resistencia efectiva es igual a la resistencia de corriente directa del conductor, solo si la distribución de corriente a través del conductor es uniforme, de tal manera que a altas frecuencias la resistencia de un conductor es mucho más grande que en el caso cd. La distribución de la corriente es función de la profundidad de penetración a , a la frecuencia de operación, que está dada por la relación siguiente:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (2)$$

donde: $\omega = 2\pi f$ = frecuencia angular
 μ = permeabilidad del medio
 σ = conductividad del material
 f = frecuencia de trabajo

Para el caso donde los conductores están separados por aire, o sea en líneas aéreas, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H / m$ y la conductividad del aluminio, que es el material más usado en líneas aéreas, es $\sigma = 3,53 \times 10^7 S / m$.

Por lo tanto, la profundidad de penetración para las líneas aéreas de aluminio, reemplazando por los valores anteriores en (2), se calcula como:

$$a(cm) \approx \frac{8.47}{\sqrt{f(Hz)}} \quad (3)$$

Para una línea bifilar la resistencia se puede calcular con variadas expresiones (Neri, 2002), dependiendo de si se manejan bajas frecuencias o frecuencias altas, así:

Para bajas frecuencias:

$$R = \frac{2}{\sigma_c \pi r^2} \quad (4)$$

Para altas frecuencias:

$$R = \frac{1}{\sigma_c \pi a} \quad (5)$$

Siendo r el radio interno del conductor y a la profundidad de penetración.

Conductancia. Las pérdidas de fuga o por conductancia dependen de la calidad y diseño de los aisladores y se producen por pequeñas corrientes que circulan entre conductores o entre conductores y tierra. Generalmente no se considera la conductancia entre conductores de una línea aérea, porque la fuga en los aisladores llega a ser despreciable. Sin embargo las pérdidas de fuga varían fuertemente con las fluctuaciones atmosféricas y con las propiedades conductoras de la contaminación que se deposita en los aisladores. En altos voltajes existen adicionalmente las pérdidas por efecto corona, originadas por la ionización del aire que rodea el conductor que produce descargas debidas al alto campo eléctrico. Las descargas se producen cuando el campo eléctrico excede aproximadamente los 15 kV/cm. Las descargas corona no solamente causan pérdidas de energía sino que son fuente de interferencia a altas frecuencias. Para cables aislados la conductancia G es función de la frecuencia y de las propiedades del material aislante y su formulación deberá desarrollarse cuando se trate de redes subterráneas y conductores aislados.

Inductancia. Con base en la teoría y la formulación corrientemente conocidas para análisis de sistemas de potencia y particularmente para cálculos de líneas de transmisión, la inductancia total de una línea aérea monofásica por unidad de longitud, conocida como *inductancia por milla de malla*, se puede calcular como sigue:

$$L' = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{re^{-1/4}} \quad (6)$$

Donde r es el radio externo del conductor y D es la distancia de separación entre centros de los conductores.

Capacitancia. La capacitancia para una línea de transmisión aérea por unidad de longitud se puede calcular como:

$$C' = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} F/m \quad (7)$$

Donde k es la permitividad del material que rodea el conductor y $k_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m es la permitividad para el espacio libre². La separación entre conductores es D , y r es el radio exterior del conductor.

Parámetros secundarios de las líneas de transmisión

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 γ . Ambos parámetros son números complejos y función de la frecuencia f y de los parámetros primarios, siendo de la mayor importancia para consideraciones de su uso en telecomunicaciones.

Los parámetros secundarios no son de uso frecuente en líneas de transmisión de potencia eléctrica, por lo que su formulación tiene como base la teoría sobre líneas de transmisión para telecomunicaciones (Nery, 2002).

La impedancia característica se puede calcular como:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = \sqrt{\frac{R' + j2\pi f L'}{G' + 2\pi f C'}} \quad (8)$$

y la constante de propagación,

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (9)$$

Los valores de α y β son llamados *constante de atenuación* y *constante de fase*, respectivamente. Las unidades de la constante de atenuación α son nepers por unidad de longitud, y las de la constante de fase β son radianes por unidad de longitud³. Los parámetros primarios tienen el subíndice "primo" para indicar que son valores por unidad de longitud.

Normalmente las líneas de transmisión que se diseñan para que transmitan energía eléctrica con bajas pérdidas, pueden calcularse de manera simplificada usando las expresiones para líneas de bajas pérdidas, así:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{R'}{2Z_L} + \frac{G'Z_L}{2} \quad \text{y} \quad (11)$$

$$\beta \approx \omega\sqrt{L'C'}$$

² La permitividad relativa kr , es la relación entre la permitividad real k del material y la permitividad del espacio libre. Así, $kr = k/k_0$. Para el aire seco, kr es 1,00054 y se supone igual a 1,0 en los cálculos de líneas aéreas.

³ Un neper es igual a 8,686 dB.

Niveles de medio y bajo voltaje

Las líneas de medio voltaje (MV) se consideran aquellas cuyo nivel de voltaje está comprendido entre 1 y 36 kV. Existe una gran variedad de topologías de redes de MV que usan diferentes tipos y calibres de cables, por lo que realizar una descripción teórica que cubra todas las posibilidades no es conducente. En Colombia, y particularmente para cubrimiento en zonas rurales, se emplean líneas a 34,5 kV con conductores desnudos de aluminio o de aleaciones de aluminio y acero (ACSR). Las líneas de MV a 34,5 kV se construyen en longitudes aproximadas promedio de entre 5 y 50 km, y los cálculos de los parámetros primarios y secundarios pueden efectuarse empleando las ecuaciones (1) a (9). Las redes de medio voltaje (MV) también pueden construirse con cables aislados subterráneos, en cuyo caso el modelo para una línea aérea no aplica. Tendrá que desarrollarse algún otro modelo. En zonas urbanas las líneas de MV pueden ser de 34,5, 13,2 y 11,4 kV, este último nivel de tensión específicamente usado en Bogotá, y en todos los casos los circuitos pueden construirse como líneas aéreas o subterráneas. En este artículo no se muestra un resultado de cálculos para líneas de MV porque el PLT en media tensión apenas comienza a estudiarse.

Las redes de bajo voltaje (LV) utilizan normalmente niveles de voltaje entre 110 y 440 voltios, aunque ocasionalmente pueden existir voltajes diferentes. La impedancia de una línea eléctrica en bajo voltaje está fuertemente determinada por la corriente de carga. La impedancia no es constante porque la carga está variando en la medida en que se conecten o no equipos eléctricos de cualquier tipo. Al cambiar la impedancia se produce a su vez una leve variación de voltaje. Esta variación de la impedancia que es determinada por la variación de las cargas conectadas debe conducir a la necesidad de utilizar filtros que respondan a dicha varianza, evidenciando una dificultad que los canales "normales" de telecomunicaciones no presentan.

Las redes de LV pueden ser aéreas o subterráneas: las líneas aéreas pueden construirse con conductores desnudos o aislados, las redes subterráneas son aisladas.

Comportamiento de las líneas aéreas de bajo voltaje a altas frecuencias

Una línea aérea de bajo voltaje urbana está conformada usualmente por cinco conductores, tres fases, neutro y tierra. Para zonas rurales es mucho más frecuente que existan las líneas monofásicas compuestas por dos hilos conductores, una fase y tierra que conforman una típica línea bifilar. Las líneas aéreas de baja tensión comienzan normalmente en el transformador y luego recorren consistentemente todo el camino hasta encontrar la acometida al usuario. Estas redes de baja tensión generalmente no exceden los 1.000 m de longitud a partir del punto de instalación del transformador.

Los sistemas de PLT usan dos líneas para el transporte de señales de telecomunicaciones, de tal manera que para líneas aéreas de bajo voltaje, cuando se usan los acopladores en dos fases se puede utilizar el modelo básico de dos hilos.

Una línea aérea en bajo voltaje típica está separada por aisladores ubicados en perchas con una separación entre conductores $D = 25$ cm. Los calibres de conductor más frecuentemente utilizados

de acuerdo con las normas de construcción⁴ son: 4/0, 2/0, 1 y 4. Para los dos calibres extremos los radios de conductor correspondientes son de 0,586 cm para el 4/0 y de 0,252 cm para el calibre 1⁵. Con estos valores se pueden calcular la inductancia por unidad de longitud, la capacitancia por unidad de longitud y la impedancia característica, empleando las ecuaciones (6), (7) y (10), de la siguiente manera:

Para el conductor calibre 4/0:

$$L' = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{25}{0,586e^{-1/4}} = 1,60 \times 10^{-6} H/m \quad (12)$$

$$C' = \frac{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{25}{0,586}} = 1,4815 \times 10^{-11} F/m \quad (13)$$

$$Z_{LF} = \sqrt{\frac{1,60 \times 10^{-6}}{1,48 \times 10^{-11}}} \approx 328,63\Omega \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que estas líneas pueden considerarse de pérdidas bajas, se pueden emplear las fórmulas aproximadas para las constantes de atenuación y de fase. Para una frecuencia de 1 MHz:

$$R = \frac{1}{\sigma_c \pi r a} = 0,018167\Omega/m \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{R'}{2Z_L} = \frac{0,018167'}{2 \times 328,63} = 2,7641 \times 10^{-5} \text{ nepers } / m \quad (16)$$

Se conoce por la teoría de circuitos eléctricos que en una red lineal la máxima transferencia de potencia se presenta cuando la impedancia de carga es igual al conjugado de la impedancia compleja de Thvenin (Alexander y Sadiku, 2006). En otras palabras, una línea de transmisión finita que esté terminada con una carga igual a su impedancia característica le entregará toda la potencia incidente disponible a la carga. Cuando esto ocurre, se dice que la línea está acoplada. En una línea acoplada no pueden ocurrir sobrevoltajes a lo largo de ella línea, porque esta opera libre de reflexiones. El valor efectivo de voltaje $V(l)$ a lo largo de la línea, decrece conforme se aleja del generador hacia la carga, y se puede calcular con la ecuación de la onda incidente:

$$V(\ell) = V_E e^{\alpha \ell} e^{j\beta \ell} \quad (17)$$

La atenuación para un tramo de cable y una frecuencia determinados $D(f, l)$ puede ser calculada a partir del factor de atenuación $\alpha(f)$, en función de la longitud l en dB de la siguiente manera:

$$D(f, l)dB = 20 \cdot \log_{10} (e^{\alpha(f)\ell}) \quad (18)$$

Y dado que 1 neper es igual a 8,686 dB, la otra forma de calcular la atenuación se da en la expresión siguiente:

$$D(f, l)dB = 8,686 \alpha(f) \cdot \ell \quad (19)$$

De manera que para el presente cálculo:

$$D(f, l)dB = 8,686 \alpha(f) \cdot \ell = 2,7641 \times 10^{-5} \text{ nepers } / m \\ \times 8,686 \times 1.000 = 0,24 \text{ dB} \quad (20)$$

Para el conductor calibre 4:

$$L' = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{25}{0,252e^{-1/4}} = 1,9888 \times 10^{-6} H/m \quad (21)$$

$$C' = \frac{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{25}{0,252}} = 1,2095 \times 10^{-11} F/m \quad (22)$$

$$Z_{LF} = \sqrt{\frac{1,9388 \times 10^{-6}}{1,2095 \times 10^{-11}}} \approx 400,36\Omega \quad (23)$$

$$R = \frac{1}{\sigma_c \pi r a} = 0,04222\Omega/m \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{R'}{2Z_L} = 5,2760 \times 10^{-5} \text{ nepers } / m \quad (25)$$

$$D(f, l)dB = 8,686 \alpha(f) \cdot \ell = 0,458 \text{ dB} \quad (26)$$

Finalmente, y considerando que el PLT usa un rango de frecuencias de hasta 20 MHz, utilizando las mismas ecuaciones y procedimiento anteriores se obtienen los siguientes valores de atenuación para esta última frecuencia y para una línea de 1.000 m:

Para el conductor calibre 4/0:

$$D(f, l)dB = 8,686 \alpha(f) \cdot \ell = 1,07 \text{ dB} \quad (27)$$

Para el conductor calibre 4:

$$D(f, l)dB = 8,686 \alpha(f) \cdot \ell = 2,047 \text{ dB} \quad (28)$$

Los valores resultantes de atenuación sorprendentemente bajos de solamente 0,24 dB para calibre 4/0 y de 0,458 dB para calibre 1, operando a una frecuencia de 1 MHz, y de 1.07 y 2.047 dB respectivamente para 20 MHz y para una longitud de 1.000 m para una línea de bajo voltaje, hacen prever que estas líneas aéreas se puedan considerar como guías de onda aisladas, con excelentes condiciones para la transmisión de señales de telecomunicaciones siempre y cuando haya un buen acople de impedancias.

Conclusiones

El estudio muestra que la atenuación no alcanza valores críticos para las frecuencias de hasta 20 MHz en longitud de 1 km en líneas aéreas, lo que permite concluir que estas redes podrían emplearse sin mayores dificultades para el transporte de señales de telecomunicaciones.

Hay necesidad de desarrollar bases teóricas para cálculos de cables subterráneos, principalmente para aplicaciones de PLT en zonas urbanas. De esta manera se tendrían modelos matemáticos completos tanto para líneas aéreas como para redes subterráneas.

La fundamentación teórica desarrollada en el presente artículo permite calcular los parámetros técnicos primarios y secundarios para cualquier disposición de líneas aéreas, ya sean de MV o LV, para bajas o altas frecuencias, y en todo caso pueden ser extensibles a líneas aéreas de alto voltaje.

⁴ Normas para el diseño y construcción de sistemas de subtransmisión y distribución, volumen IV, Instituto Colombiano de Energía Eléctrica, ICCEL, 1998.

⁵ Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Retie, 2007.

Para el caso de implementación de los diversos sistemas disponibles de PLT tanto a nivel urbano como rural, los resultados de este estudio tienen relevancia y son un primer paso en el tratamiento adecuado de fenómenos tales como la variación de la atenuación con el tiempo y la frecuencia, la interferencia y ruido producidos por el tipo de carga conectada, la compatibilidad electromagnética, + etcétera.

Bibliografía

- Alexander, C., Sadiku, M., Fundamentos de Circuitos Eléctricos., Mc Graw Hill editores, México, D.F., 2006.
- 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.
- Banwell, T., Galli, S., 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.
- Barnes, J. S., A Physical Multy-Path Model for Power Distribution Network Propagation., Proc. 1998 International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Tokyo, Japan, 1998.
- Bastidas, H., Modelando algunas características de las redes eléctricas usadas como canal para proveer telecomunicaciones., Ingeniería e Investigación, Vol. 25, No. 3, diciembre, 2005, pp.111-115.
- Biglieri, E., Coding and Modulation for a Horrible Channel., IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No 5, May, 2003, pp. 92-98.
- Cañete, F. J., Broadband Modeling of Indoor Power-line Channels., IEEE Trans. Consumer Elect. Vol. 48, no.1, Feb. 2002.
- Cruz, J, Gijón, C., Ramos Z., Determinación Experimental de la Impedancia Presente en una Instalación de Baja Tensión., GITUN, Bogotá D.C., 2005
- Carlson, A. B., Sistemas de Comunicación., Mc Graw Hill, 5ª Edición, 2007.
- Chan, M., Donaldson, R., Attenuation of communication signals on residential and commercial intrabuilding power-distribution circuits., IEEE Trans. of Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-28, No. 4, Nov., 1986.
- Chen, Y., Baseband Transceiver Desing of a 128-Kbps Power-line Modem for Household Applications., IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, No.2, apr., 2002, pp. 338-44.
- Couch, II, León, W., Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicos., Prentice Hall, Quinta Edición, México, 2004.
- Dai, H., Poor, V., Advanced Signal Processing for Power Line Communications., IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No 5, May 2003, pp. 100-107.
- Dorf, S., Circuitos Eléctricos Introducción al Análisis y Diseño., Alfaomega editores, 3ª Edición, México, D.F., 1999
- Dostert, K., EMC Problems in data transmission over indoor power line using spread spectrum techniques., Proc. of the 6th EMC-Symposium, Zurich, 1985.
- Dostert, K., Zimmermann, M., Waldeck, T., Arzberger, M., Fundamental properties of the low voltage power distribution grid used as a data channel., European Transactions on Telecommunications (ETT), Vol. 11, No. 3, May/June, 2000.
- Dostert, K., Telecommunications over the power distribution grid-possibilities and limitations., Proceedings of the 1997 International Symposium on Power Line communications and Its Applications, Essen, Germany, April 1997.
- Gebhardt, M., Weinmann, F., Dostret, K., Physical and Regulatory Constraints for Communication over the Power Supply Grid., IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No 5, May 2003, pp. 84-90.
- Grainger, J., Stevenson, W., Jr., Análisis de Sistemas de Potencia., Mc Graw-Hill Editores, México D.F., 2003.
- Hensen, C., Schulz, W., Time dependency of the channel characteristics of low voltage power-lines and its effects on hardware implementation., Int. Journal of Electronics and Communications (AEU), 54, No. 1, 2000.
- Instituto Colombiano de Energía Eléctrica- ICEL., Normas para el diseño y construcción de sistemas de subtransmisión y distribución., Volumen IV, 1998.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación- ICONTEC., Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas- RETIE, 2007.
- Liu, W., Widmer, H., Raffin, P., Broadband PLC Acces Systems and Field Deployment in European Power Line Networks., IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No 5, May 2003, pp. 114-118.
- Malaver, H., Moreno, A., Ramos Z., Análisis y Diseño del Modelo de Interconexión de una Red de Telecomunicaciones que Presta el Servicio de Valor Agregado Internet con una Red Eléctrica Tradicional en Colombia., GITUN, Bogotá D.C, 2002.
- Neri, R., Líneas de Transmisión., Mc Graw-Hill Editores, México D.F., 2002.
- Zimmermann, M., Dostert, K., Mutipath Model for the Powerline Channel., IEEE Trans. Commun, Vol. 50, No. 4, Apr., 2002, pp. 553-59.
- Zimmermann, M., Dostert K., Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broadband Powerline Communications., IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 44, 1, Feb., 2002, pp. 249-58.