

En español

## Modelo de cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas de baja tensión subterráneas e instalaciones internas para uso en telecomunicaciones

Henry Bastidas Mora<sup>1</sup>, Marlon Patiño Bernal<sup>2</sup>, Gilma Inés Ángel Castillo<sup>3</sup>

### RESUMEN

En este documento se presenta un análisis de la teoría de las líneas eléctricas de 60 Hz para baja tensión, en particular las líneas subterráneas y las de instalaciones internas residenciales y su comportamiento con la variación de la frecuencia, para considerar su aprovechamiento como medio de transmisión de señales de telecomunicaciones PLT. A partir de los parámetros primarios: inductancia, capacitancia, conductancia y resistencia se propone un método para el cálculo de los parámetros secundarios: impedancia característica y constante de propagación junto con su componente real, la constante de atenuación. Se verifican las configuraciones, aislamientos y calibres de conductor más usados en Colombia para estas líneas de baja tensión y se propone un modelo matemático como herramienta teórica a los fines de analizar y predecir el comportamiento de la impedancia característica y la atenuación en altas frecuencias, complementando trabajos previos. Las conclusiones se muestran al final junto con la perspectiva de aplicación y trabajos posteriores.

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

**Recibido:** julio 30 de 2010

**Aceptado:** noviembre 13 de 2011

### Introducción

La tecnología conocida como telecomunicaciones por líneas de potencia eléctrica (*Power Line Telecommunication*, PLT), también llamada comunicación mediante cable eléctrico (*Power Line Communication*, PLC) y más recientemente denominada banda ancha sobre líneas eléctricas (*Broadband Power Line*, BPL), posi-

In English

## Technical-parameter calculation model for underground low-power electrical lines and indoor installations used in telecommunications

Henry Bastidas Mora<sup>4</sup>, Marlon Patiño Bernal<sup>5</sup>, Gilma Inés Ángel Castillo<sup>6</sup>

### ABSTRACT

This article presents an analysis of electrical distribution theory for 60Hz-lines operating at low voltage, particularly underground lines and residential indoor installations. Such distribution lines' behaviour is observed as a function of frequency to consider any advantages regarding the potential use of power transmission lines (PTL) for transmitting telecommunication signals. A method for computing the secondary parameters is proposed which has been based on the primary parameters, namely inductance, capacitance, conductance and resistance. The secondary parameters so obtained were characteristic impedance, propagation constant (together with its real value) and the attenuation constant. Conductor configurations, insulation materials and gauges commonly used in Colombia were verified for such low-voltage lines. A mathematical model is proposed as a theoretical tool for analysing and predicting characteristic impedance pattern and the attenuations which occur at high frequencies, thereby complementing our group's previous work. Conclusions are drawn, together with a perspective regarding future work and applications.

**Keywords:** PLT, BPL, inductance, capacitance, leakage conductance, resistance, characteristic impedance, propagation constant, attenuation.

**Received:** July 30th 2010

**Accepted:** November 13th 2011

### Introduction

Power line telecommunication technology (PLT), also known as power line communication (PLC), more recently coined broadband power line (BPL), makes it possible to transmit telecommunication signals through the electrical grid, turning high voltage wiring into communication channels.

<sup>1</sup>Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia, Especialista en Sistemas de transmisión y subtransmisión, Universidad de los Andes, Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Colombia. Afiliación actual, Universidad Piloto de Colombia. henry-bastidas@unipiloto.edu.co

<sup>2</sup>Ingeniero Electrónico, Especialista en Telecomunicaciones móviles, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad nacional de Colombia. Afiliación actual: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. marlonpb@udistrital.edu.co

<sup>3</sup>Ingeniera electrónica, Especialista en Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Magíster en Ingeniería Electrónica y Computadores, Universidad de los Andes. Afiliación actual: Universidad de San Buenaventura. gangel@usbog.edu.co

<sup>4</sup>Electrical Engineer, Universidad Nacional de Colombia, Specialist in transmission systems and subtransmisión, Universidad de los Andes, Masters in Telecommunications Engineering, Universidad Nacional de Colombia.. Current affiliation: Universidad Piloto de Colombia. henry-bastidas@unipiloto.edu.co

<sup>5</sup>Electronic Engineer, Specialist in Mobile Telecommunications, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Masters in Telecommunications Engineering, Universidad Nacional de Colombia. Current Affiliation: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. marlonpb@udistrital.edu.co

<sup>6</sup>Electronic Engineer, Specialist in Tele-Information, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Master in Electronics and Computer Engineering, Universidad de los Andes. Current Affiliation: Universidad de San Buenaventura. gangel@usbog.edu.co

bilita la transmisión de señales de telecomunicaciones a través de las redes de energía eléctrica, convirtiendo los cables en canales de comunicaciones.

La ubicuidad de la red de baja tensión ofrece un gran potencial que permitirá, mediante la tecnología PLC/BPL, lograr telecomunicaciones en sitios urbanos y rurales. Esta tecnología se ha venido implementando en Europa, Estados Unidos y algunos países de América del Sur como Chile y Brasil y, más recientemente, Ecuador. En Colombia la PLT se ha venido analizando desde lo académico (Malaver, Moreno y Ramos, 2002; Cruz, Gijón y Ramos, 2005; Bastidas, 2005) y el Gobierno, por medio del “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 la PLT como alternativa de acceso a las telecomunicaciones en el país.

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, etcétera (Dostert, 2000; Zimmermann y Dostert, 2002; Kaparelitis y Drakakis, 2008), convirtiendo las redes eléctricas en un importante desafío tecnológico para su uso como canal de telecomunicaciones. Por otra parte, como las redes eléctricas son diferentes en su configuración: aéreas y subterráneas, con sus diferentes niveles de voltaje, exteriores a las edificaciones e instalaciones interiores residenciales y comerciales, diversos sistemas de PLT deberán ser implementados.

Una línea de energía eléctrica tiene cuatro parámetros — conocidos como primarios— que afectan su capacidad para cumplir su función como parte de un sistema de potencia: *resistencia*, *inductancia*, *capacitancia* y *conductancia*. Estos son de suma importancia para la determinación de las propiedades del canal de PLT usado con la finalidad de transportar señales de telecomunicaciones. Los valores de resistencia aumentan considerablemente con la frecuencia, en cambio los de inductancia y capacitancia son prácticamente independientes de la frecuencia. Adicional a los valores de resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia se definen otros dos parámetros de la línea de transmisión —llamados secundarios— (su impedancia característica es  $Z_L$  y la constante de propagación  $\gamma$ ); ambos parámetros son números complejos y son función de la frecuencia  $f$  y de los parámetros primarios.

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 (Neri, 2007).

La impedancia característica se puede calcular como

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = \sqrt{\frac{R' + j2\pi fL'}{G' + 2\pi fC'}} \quad (1)$$

y la constante de propagación

Low-power transmission lines' ubiquity offers great potential in terms of future achievements by using PLC/BPL technology to offer telecommunication services in urban and rural areas. This technology has been implemented in Europe, North America and some South American countries like Chile and Brazil and, until recently, Ecuador. PLT has been analysed in Colombia from an academic standpoint (Malaver, Moreno and Ramos, 2002; Cruz, Gijón and Ramos, 2005; Bastidas, 2005), and so the Colombian government, whose policies currently attempt to promote the widespread use of broadband services (official scheme called “Promoción y masificación de la banda ancha en Colombia”, Ministerio de Comunicaciones and CRT, Version II, 2005), has recognised the importance of PLT as an alternative for facilitating telecommunication access around the country.

Because the electrical grid was not designed to provide telecommunication-associated services, its conventional operation creates a whole range of noise types, attenuations, coupling difficulties, etc. (Dostert, 2000; Zimmermann and Dostert, 2002; Kaparelitis and Drakakis 2008), which makes electrical power networks an interesting challenge in terms of technology allowing the use of power transmission lines (PTL) as a communication channel. It is expected that different PLT systems will be implemented according to specific conditions since electrical power networks have different configurations, namely overhead lines and underground lines handling different voltage levels distributed both outdoors and indoors (for residential and commercial use).

An electrical transmission line involves four parameters (known as primary parameters) affecting its ability to fulfil the requirements of its functions as part of a whole power system: *resistance*, *inductance*, *capacitance* and *conductance*. These parameters are essential in determining the properties of a particular PLT channel which will be used for transmitting telecommunication signals. Resistance levels rise significantly as frequency increases; on the contrary, inductance and capacitance levels are not so dependent on frequency. In addition to *resistance*, *inductance*, *capacitance* and *conductance* another two parameters are associated with transmission lines called secondary parameters, namely characteristic impedance  $Z_L$  and propagation constant  $\gamma$ . Both these parameters are represented by complex numbers and are also a function of frequency ( $f$ ) and the primary parameters.

Secondary parameters are not frequently used when dealing with power transmission lines since their very formulation is based on transmission lines for telecommunications (Neri, 2007)

A transmission line's characteristic impedance can be calculated as follows:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = \sqrt{\frac{R' + j2\pi fL'}{G' + 2\pi fC'}} \quad (1)$$

and the propagation constant is expressed by the following equation:

En español

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (2)$$

donde:  $R'$  (resistencia por unidad de longitud),  $G'$  (fugas de conductancia por unidad de longitud),  $L'$  (inductancia por unidad de longitud),  $C'$  (capacitancia por unidad de longitud).  $\omega = 2\pi f$ :  $\omega$  = velocidad angular y  $f$  es la frecuencia. Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  son llamados *constante de atenuación* y *constante de fase*, respectivamente. Las unidades de la constante de atenuación  $\alpha$  son nepers<sup>7</sup> por unidad de longitud y las de la constante de fase  $\beta$  son radianes 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:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{R'}{2Z_L} + \frac{G'Z_L}{2} \quad \text{y} \quad \beta \approx \omega\sqrt{L'C'} \quad (4)$$

## Niveles de bajo voltaje

Las redes de bajo voltaje (LV) utilizan normalmente niveles de tensión entre 110 y 440 voltios, aunque ocasionalmente pueden existir voltajes distintos.<sup>8</sup> 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 subterráneas de bajo voltaje

Existe una gran diversidad de conductores aislados usados en las redes de distribución de LV con características mecánicas y eléctricas de muy diversos tipos, lo cual significa que los parámetros de interés para este estudio, específicamente la atenuación y la impedancia característica, tienen un alto grado de dispersión. En este artículo se ha identificado una de las principales topologías de cables usada en muchas partes del mundo (incluso en Colombia): se trata de la configuración de cables que presenta una estructura de tres fases aisladas y rodeadas por el conductor de neutro.

<sup>7</sup> Un neper es igual a 8,686 decibelios.

<sup>8</sup> Según el *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Retie)*, son consideradas redes de bajo voltaje aquellas entre 25 y 1.000 voltios.

In English

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (2)$$

where  $R'$  represents resistance per unit length,  $G'$  is the leakage conductance per unit length,  $L'$  represents inductance per unit length and  $C'$  is capacitance per unit length.  $\omega = 2\pi f$ :  $\omega$  = angular velocity and  $f$  is the frequency. The values corresponding to  $a$  and  $b$  are called *attenuation constant* and *phase constant* respectively. Attenuation constant  $a$  units of measurement are nepers<sup>9</sup> per unit length and the units are on radians per unit length in the case of the phase constant  $b$ .

Transmission lines intended for distributing electrical power with minimum losses can normally be calculated in a simple fashion by using expressions for low-loss transmission lines as follows:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{R'}{2Z_L} + \frac{G'Z_L}{2} \quad \text{And} \quad \beta \approx \omega\sqrt{L'C'} \quad (4)$$

## Low-voltage levels

Low-voltage networks (LV) normally use 110 to 440 volts, although different voltages may occasionally be found. The impedance of an electrical power line operating at low voltage is strongly connected to the current demanded by a particular load. Impedance will never be constant because a load is constantly varying due to different types of electrical equipment being plugged in and also unplugged all the time. When impedance changes, there is a slight variation in voltage; such impedance variation (caused by load variations) means that filters must be used which respond to fluctuations, representing an evident issue which does not affect "normal" telecommunication channels. LV networks can be either overhead or underground: overhead lines can be built using either bare conductors or insulated conductors; lines are insulated for underground networks.

## Underground low-voltage (LV) transmission lines' behaviour

Many insulated conductors are used in LV distribution networks, having all sorts of mechanical and electrical characteristics. This means that the parameters of interest for the present study, specifically in terms of attenuation and characteristic impedance, exhibit a high degree of dispersion. One of the main cable topologies used in many countries (and also in Colombia) has been identified in the present article. Such topology is represented by a cable configuration that uses a three-insulated-phase structure surrounded by the neutral conductor.

<sup>9</sup> A neper equals 8.686 dB

<sup>10</sup> According to the *Electrical Installations Technical Manual (RETIE)* power distribution networks operating in the 25–1,000 volts range are considered low-voltage.

### Configuración de tres conductores de fase con neutro concéntrico externo

Esta configuración consiste en tres conductores circulares con aislamiento individual y envueltos por un cable de neutro. A los efectos de analizar la disposición y forma de los campos magnéticos y eléctricos, en la figura 1 se muestra su representación, que incluye las fases indicadas con L1, L2 y L3, mientras que el conductor externo funciona como protector tierra-neutro.

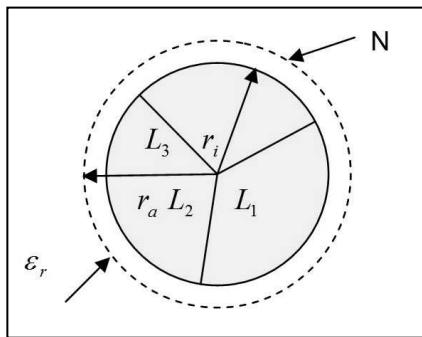


Figura 1. Esquema de una estructura con tres conductores de fase y un neutro concéntrico externo.

Con alimentación simétrica la diferencia de voltaje entre cada fase y el neutro es cero. Debido al arreglo simétrico y a la terminación simétrica, la diferencia de voltaje entre los conductores de fase a lo largo de la línea permanece sin cambios; como consecuencia, el espacio entre conductores es un área libre y un campo radial eléctrico se forma hacia el conductor externo. Esto significa que el campo eléctrico está radialmente orientado entre conductores igual al de un cable coaxial funcionando a frecuencias altas, y se asume un pequeño espacio entre los conductores en comparación con los radios  $r_a$  y  $r_i$ . De esta manera la capacitancia por unidad de longitud  $C'$ , y la inductancia por unidad de longitud  $L'$ , se propone calcularse usando las expresiones propias para cables coaxiales, como sigue:

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \quad (5)$$

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r_i} \quad (6)$$

En (5) y (6)  $r_a$  es el radio interno del conductor exterior y  $r_i$  el radio de los conductores de fase,  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica del aire,  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre y  $\epsilon_r$  la constante dieléctrica relativa.

A altas frecuencias la resistencia por unidad de longitud,  $R'$ , es esencialmente determinada por el efecto piel, porque la corriente fluye solamente en una capa relativamente delgada de la superficie exterior del conductor. La depresión piel, o profundidad de penetración  $a$ , depende de la frecuencia  $f$  y de la conductividad específica  $\sigma$  del alambre, y puede ser calculada como:

### Three-phase-conductor configuration with external concentric neutral

This configuration consists of three individually-insulated circular conductors surrounded by a neutral cable. Figure 1 shows a magnetic-field representation (to analyse magnetic fields' layout and shape) that includes the aforementioned phases L1, L2 and L3, while the external conductor works as ground-neutral protection.

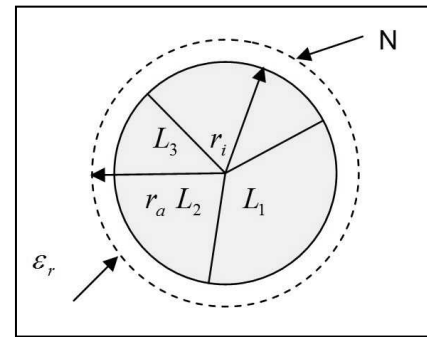


Figure 1: A diagram of a three-phase-conductor structure and an external concentric neutral

When using symmetric power supply, the difference in voltage between each phase and the neutral equals zero. The difference in voltage between phase conductors along a transmission line remains unchanged due to the symmetrical array and the symmetric terminals; consequently, the gap between conductors is a free area, and there is also electrical radial field formation towards the external conductor. This means that the electric field is radial-orientated between conductors, resembling a coaxial cable operating at high frequency. A small gap between conductors is assumed in comparison with radii  $r_a$  and  $r_i$ . It was thus proposed calculating both capacitance per unit length,  $C'$ , and inductance per unit length,  $L'$ , by using the expressions associated with coaxial cables, as follows:

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \quad (5)$$

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r_i} \quad (6)$$

In (5) and (6),  $r_a$  was the exterior conductor's internal radius and  $r_i$  was the phase conductors' radius,  $\epsilon_0$  represented the air's dielectric constant,  $\mu_0$  represented free space permeability and  $\epsilon_r$  was the relative dielectric constant.

The resistance per unit length  $R'$  at high frequency was essentially determined by the skin effect since current only flows over a relatively thin layer on the conductor's external surface. Penetration depth  $a$  depended on frequency  $f$  and also on the wire's specific conductivity  $\sigma$ ; this was calculated as follows:

En español

$$a = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu_0}} \quad (7)$$

De acuerdo con la teoría para cable coaxial, se puede calcular la resistencia por unidad de longitud, de la siguiente manera:

$$R' = \frac{1}{\sigma a} \left( \frac{1}{2\pi r_a} + \frac{1}{2\pi r_i} \right) \Rightarrow R' = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f \mu_0}{\sigma \pi}} \left( \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_i} \right) \quad (8)$$

Las pérdidas en conductancia por unidad de longitud  $G'$  de una línea pueden ser calculadas si se multiplican las pérdidas de capacitancia por el factor  $\tan \delta$ :

$$G' = 2\pi f C' \tan \delta \quad (9)$$

Se conoce que  $R' \ll \omega L'$  para altas frecuencias porque  $R'$  aumenta proporcionalmente con la raíz cuadrada de la frecuencia  $f$ . Adicionalmente, si el factor de pérdidas es  $\tan \delta \ll 1$  para los materiales de aislamiento más frecuentemente utilizados tales como el PVC, y para altas frecuencias, también es posible asumir que  $G' \ll \omega C'$ . Esto significa que un cable subterráneo típico puede modelarse como de pérdidas bajas. La impedancia característica  $Z$ , la constante de atenuación  $\alpha$  y la constante de fase  $\beta$  pueden calcularse apropiadamente con las ecuaciones (3) y (4). La atenuación  $L(f, l)$  puede ser calculada a partir del factor de atenuación  $\alpha(f)$ , en función de la longitud  $l$  en dB:

$$L(f, l) \text{ dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( e^{\alpha(f) \ell} \right) = 8.686 \cdot \alpha(f) \cdot \ell \quad (10)$$

Es importante aclarar que la constante dieléctrica  $\epsilon_r$  depende también de la frecuencia, pero su variación no es muy grande, ya que aplicada sobre una escala logarítmica en el eje de frecuencias da directamente una curva con valor  $\epsilon_r \approx 3,8$  a 1 MHz, con una disminución de  $\epsilon_r \approx 2,9$  a 20 MHz. Las pérdidas por el factor  $\tan \delta$  del PVC muestran también una aproximación lineal sobre el eje en escala logarítmica con un valor de 0,05 a 1 MHz y va decreciendo hasta aproximadamente 0,01 a 20 MHz.

Se efectuaron los cálculos utilizando las anteriores ecuaciones para determinar la impedancia característica y la atenuación en función de la frecuencia. El conductor utilizado como ejemplo de cálculo tiene un radio interno  $r_i$  de 1 cm<sup>11</sup>, la relación  $r_a/r_i$  es de 1,2 y se considera el aislamiento en PVC.

Las figuras 2 y 3 muestran las curvas resultantes de la impedancia característica  $Z_L$  y de la atenuación  $L(f)$  para una longitud  $l = 1$  km y para frecuencias entre 1 y 20 MHz.

Es de anotar que la impedancia característica  $Z_L$  para este calibre y disposición de conductor específicos se mantiene en el rango de los 5,6 – 6,4  $\Omega$ . Esto confirma la presunción de que el medio tiene bajas pérdidas y que la impedancia característica no presenta una variación alta por el cambio de frecuencias. Como se esperaba, la atenuación  $L(f)$  se incrementa al aumentar la fre-

In English

$$a = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu_0}} \quad (7)$$

According to coaxial cable theory, resistance per unit length can be calculated as follows:

$$R' = \frac{1}{\sigma a} \left( \frac{1}{2\pi r_a} + \frac{1}{2\pi r_i} \right) \Rightarrow R' = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f \mu_0}{\sigma \pi}} \left( \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_i} \right) \quad (8)$$

Las pérdidas en conductancia por unidad de longitud  $G'$  de una línea pueden ser calculadas si se multiplican las pérdidas de capacitancia por el factor  $\tan \delta$ :

$$G' = 2\pi f C' \tan \delta \quad (9)$$

Se conoce que  $R' \ll \omega L'$  para altas frecuencias porque  $R'$  aumenta proporcionalmente con la raíz cuadrada de la frecuencia  $f$ . Adicionalmente, si el factor de pérdidas es  $\tan \delta \ll 1$  para los materiales de aislamiento más frecuentemente utilizados tales como el PVC, y para altas frecuencias, también es posible asumir que  $G' \ll \omega C'$ . Esto significa que un cable subterráneo típico puede modelarse como de pérdidas bajas. La impedancia característica  $Z$ , la constante de atenuación  $\alpha$  y la constante de fase  $\beta$  pueden calcularse apropiadamente con las ecuaciones (3) y (4). La atenuación  $L(f, l)$  puede ser calculada a partir del factor de atenuación  $\alpha(f)$ , en función de la longitud  $l$  en dB:

$$L(f, l) \text{ dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( e^{\alpha(f) \ell} \right) = 8.686 \cdot \alpha(f) \cdot \ell \quad (10)$$

It should be stated that dielectric constant  $\epsilon_r$ , also depended on frequency but its variations were not so relevant since, when applied using a logarithmic scale on the frequency axis, the graph yielded a curve whose value was  $\epsilon_r \approx 3.8$  (at 1 MHz), with  $\epsilon_r \approx 2.9$  reduction (at 20 MHz). Loss due to the PVC's  $\tan\delta$  factor gave a 0.05 at 1MHz linear approximation on the logarithmic-scale axis, gradually decreasing down to about 0.01 at 20 MHz.

Calculations were performed using the aforementioned equations to determine both characteristic impedance and attenuation as a function of frequency. The conductor used as an example of the calculations had a  $r_i$  1 cm<sup>12</sup> internal radius. The ratio  $r_a/r_i$  was 1.2 and PVC insulation was also considered.

Figures 2 and 3 show the resulting curves for characteristic impedance  $Z_L$  and attenuation  $L(f)$  for length  $l = 1$  km and for a 1 and 20 MHz frequency range.

It is worth noting that the characteristic impedance  $Z_L$ , for this specific layout and conductor gauge remained in the 5.6 - 6.4  $\Omega$  range. This confirmed the assumption that the medium itself causes low losses and also that characteristic impedance does not exhibit significant fluctuations associated with frequency changes. As expected, attenuation  $L(f)$  rose as frequency in-

<sup>11</sup> Los calibres de conductores utilizados en Colombia para redes subterráneas de baja tensión están entre 1 AWG y 500 MCM, correspondiendo 1 cm a un radio intermedio entre ellos.

<sup>12</sup> The conductor gauges used in Colombia (for underground low-voltage distribution networks) range from 1 AWG to 500 MCM, with a 1-cm intermediate radius between them.

En español

In English

cuencia, con valores calculados de 16,4 dB a 1 MHz, hasta 60,5 dB a 20 MHz.

created, having calculated values of 16.4 dB at 1 MHz, up to 60.5 dB at 20 MHz.

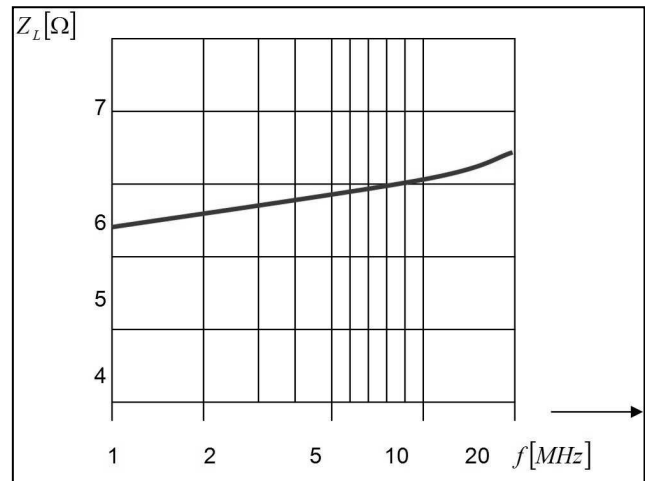
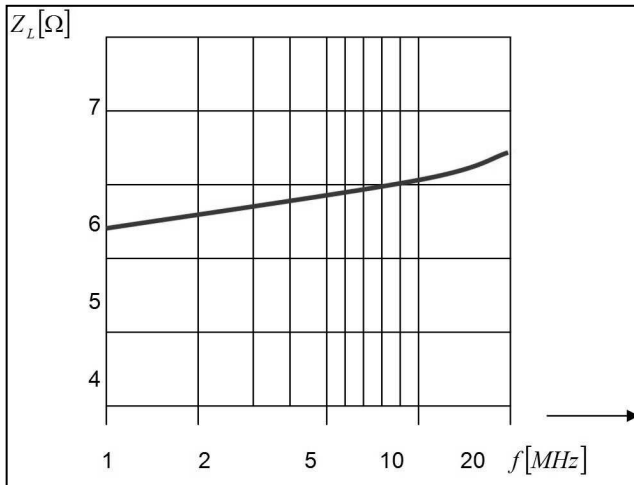


Figura 2. Impedancia característica en función de la frecuencia para estructura con tres conductores de fase y un neutro concéntrico externo.

Figure 2. Characteristic impedance as a function of frequency for the three-phase-conductor structure with an external concentric neutral

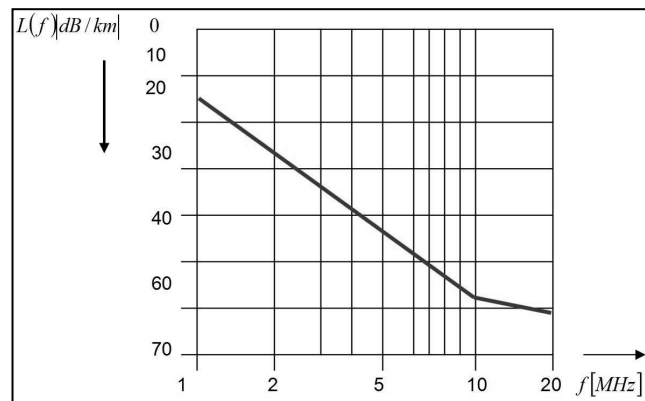
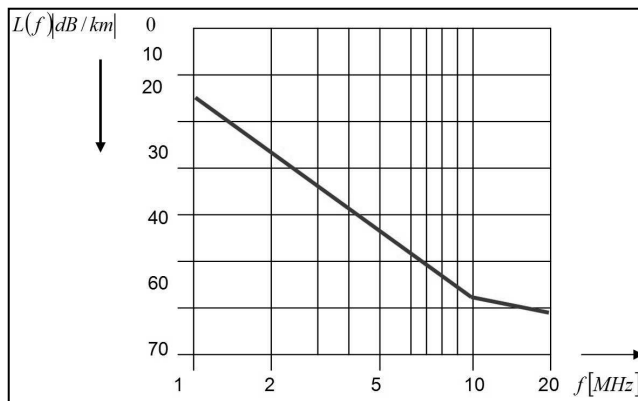


Figura 3. Atenuación por unidad de longitud en función de la frecuencia para estructura con tres conductores de fase y un neutro concéntrico externo.

Figure 3. Attenuation per unit length as a function of frequency for the three-phase-conductor structure having an external concentric neutral

### Cables para instalaciones internas

El diseño de las instalaciones eléctricas residenciales en Colombia se hace de conformidad con la norma NTC 2050. Los calibres de cables utilizados son: 6, 8, 10, 12 y 14 AWG. El calibre de cable más utilizado en las tomas eléctricas normales (que serían utilizadas para PLT) es el de 14 AWG, tanto para la fase como para neutro, y se instalan a lo largo de una tubería de PVC de media pulgada de diámetro. Esta configuración de cables corresponde sin duda a una línea bifilar clásica. En este caso, y a los fines de mayor precisión, tomando en cuenta que la distancia de separación entre cables es menor de diez veces el radio de los conductores, se tomarán las ecuaciones de *cosh* a cambio de aquellas que involucran *ln*, (Vela, 2007) así:

$$C' = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\text{Cosh}^{-1} \frac{D}{2.r}} \quad (14)$$

### Indoor installation wiring

The design of residential electric installations in Colombia complies with the NTC 2050 standard; 6, 8, 10, 12 and 14 AWG wire gauge are used. The most common wire gauge found in typical electrical outlets (that would be used for PLT) is 14 AWG, which is used for phases as well as for the neutral. This wire gauge is normally installed throughout a half an inch (1/2 in) diameter PVC pipeline. Such wiring configuration certainly corresponds to a traditional bifilar line. In this particular case, taking into account that the gap between cables is less than 10 times the radius of the conductors, and for the sake of precision, *cosh* equations would be applied instead of using those involving *ln*, (Vela, 2007) then:

$$C' = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\text{Cosh}^{-1} \frac{D}{2.r}} \quad (14)$$

En español

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \text{Cosh}^{-1} \frac{D}{2.r} \quad (15)$$

$$R' = \frac{1}{\pi r \sigma_c a} \quad (16)$$

Reemplazando en (16), la profundidad de penetración a dada en (7) y tomando en cuenta que para las instalaciones internas el material más utilizado para el conductor es el cobre, cuyo valor

de conductividad es  $\sigma_c = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ , se tiene que:

$$R' = \frac{1}{\pi r \sigma_c \times 0.066} \sqrt{f} \quad (17)$$

Utilizando estas expresiones para un conductor calibre 14 AWG, que corresponde a 0,8 mm de radio y asumiendo una separación  $D = (1,25 \times 2r)$ , junto con (3) y (4) se obtienen los valores calculados que se resumen en las figuras 4 y 5.

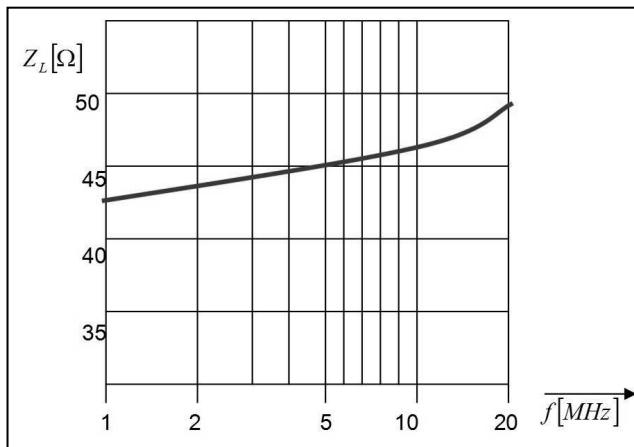


Figura 4. Impedancia característica en función de la frecuencia para un cable de instalaciones internas.

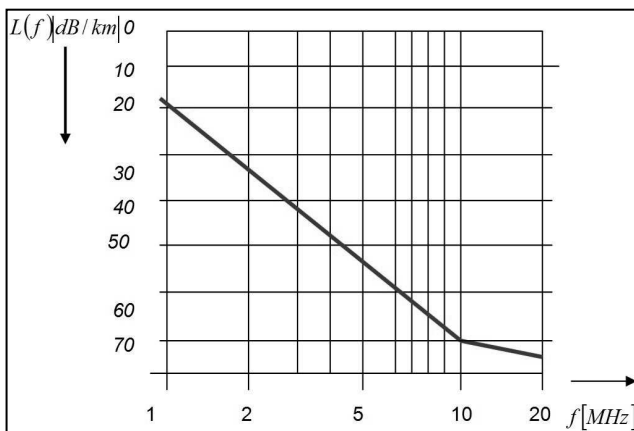


Figura 5. Atenuación por unidad de longitud en función de la frecuencia para un cable de instalaciones internas.

Nótese que el valor de la impedancia característica es un poco

In English

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \text{Cosh}^{-1} \frac{D}{2.r} \quad (15)$$

$$R' = \frac{1}{\pi r \sigma_c a} \quad (16)$$

By substituting the penetration depth,  $a$ , found in (7) in (16), and considering that copper is the most common conductor for indoor installations, whose conductivity value is

$\sigma_c = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ , then:

$$R' = \frac{1}{\pi r \sigma_c \times 0.066} \sqrt{f} \quad (17)$$

Using these expressions for a 14-AWG gauge conductor, corresponding to a 0.8-mm radius, and also assuming distance  $D = (1.25 \times 2r)$ , together with (3) and (4), the calculated values summarised in Figures 4 and 5 were obtained:

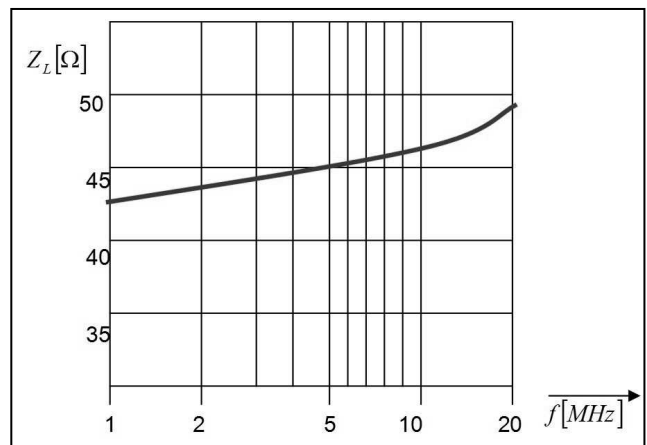


Figure 4. Characteristic impedance as a function of frequency for a particular indoor-installation cable

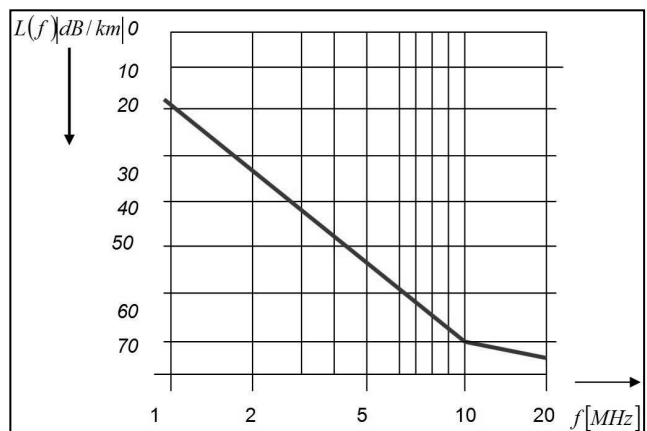


Figure 5. Attenuation per unit length as a function of frequency for a particular indoor-installation cable

It is worth mentioning that characteristic impedance values were

mayor que la obtenida para las otras dos configuraciones de cables anteriores, con un valor calculado para la frecuencia de 1 MHz de 42,64  $\Omega$  y de 48,88  $\Omega$  para 20 MHz. La atenuación por unidad de longitud resultante fue de 19,45 dB/km a 1 MHz y de 72,34 dB/km para una frecuencia de 20 MHz.

## Conclusiones

Han sido estudiadas las propiedades de las líneas más usadas en redes de distribución subterráneas tanto de exterior como de interior, para bajas y altas frecuencias hasta los 20 MHz. El estudio demuestra que la atenuación de los cables está esencialmente determinada por las propiedades de los dieléctricos. Se utilizan diversos tipos de materiales para aislamiento, lo que dificulta hacer una precisión universal. El estudio se centró en un aislamiento de PVC, que es probablemente el más usado y cuyos datos están disponibles. El estudio muestra que la atenuación no alcanza valores críticos para las frecuencias hasta de 20 MHz en longitud de 1 km, lo que permite concluir que estas redes podrían emplearse sin mayores dificultades para el transporte de señales de telecomunicaciones. Esta conclusión, unida a la gran ubicuidad de las líneas eléctricas, pone de manifiesto el altísimo potencial de desarrollo de la PLT en Colombia, tal y como ha ocurrido en varios países.

Las bases teóricas aquí desarrolladas para cables subterráneos e instalaciones interiores son aplicables a la mayoría de disposiciones de conductores existentes ya sea en instalaciones urbanas o rurales para bajas tensiones en el rango de frecuencias mostrado.

Trabajos posteriores podrán realizar mediciones que permitan comparar sus resultados con los cálculos presentados, junto con un levantamiento de los tipos de cableado existentes en los sitios para determinar, por ejemplo, el efecto de otros materiales de aislamiento diferentes al PVC.

Igualmente, parece viable realizar pruebas piloto de transmisión de señales de telecomunicaciones vigentes hoy a través de las líneas de suministro eléctrico que funcionen dentro del rango de frecuencia de este trabajo, como por ejemplo ADSL u otro servicio similar.

## Referencias / References

- Alexander, C., Sadiku, M., Fundamentos de Circuitos Eléctricos., Mc Graw Hill editores, México, D.F., 2006.
- Amirshahi, P., Navidpour, S., Kavehrad, M., Performance Analysis of OFDM Broadband Communications System Over Low Voltage Powerline with Impulsive Noise., IEEE ICC 2006 proceedings.
- Anatory, J., Theethayi, N., Kissaka, M., Mvungi, N., Broadband Power Line Communications: Performance Analysis., International Journal of Applied Science, Engineering and Technology 3;3 © www.waset.org Summer 2007
- 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.

slightly higher than those obtained when using the other two prior wiring configurations; the values so calculated were 42.64  $\Omega$  at 1MHz and 48.88  $\Omega$  at 20 MHz. The results for attenuation per unit length were 19.45 dB/km at 1 MHz and 72.34 dB/km at 20 MHz.

## Conclusions

The properties of the most common transmission lines used in underground power distribution networks have been studied (considering indoor and outdoor use as well as low and high frequency up to 20 MHz). The present study has shown that cable-associated attenuation is essentially determined by the properties of the dielectric materials employed. A whole range of materials are used for insulation, thereby hampering precise generalisation. This article has been focused on studying PVC insulation which is probably one of the most widely-used materials for which data is readily available. It has been shown that attenuation did not reach critical values at frequencies up to 20 MHz over a 1-Km length line, suggesting that such distribution networks might be used for transmitting telecommunication signals without running into considerable difficulties. These concluding remarks, together with the ubiquity of electrical power lines, clearly show the great potential for PLT development in Colombia, as already seen in other countries.

The theoretical basis presented in this article for underground wiring and indoor installations applies to most existing conductor layouts (whether urban or rural) operating at low-voltage within the aforementioned frequency range.

Future work should attempt to take accurate measurements allowing comparison with the results in this study, and also contribute towards keeping a record of the various types of existing wiring at different locations which, for example, may help to determine the effects of using insulating materials different to PVC.

Likewise, it seems plausible that pilot tests should be conducted on up-to-date telecommunication signal transmissions over the electrical distribution lines available. All these tests should be carried out within the frequency range suggested here to implement technologies like ADSL, for example.

- Bastidas, H., Modelando algunas características de las redes eléctricas usadas como canal para proveer telecomunicaciones., Ingeniería e Investigación, Vol. 25, No. 3, diciembre de 2005, pp.111-115.
- Bastidas, H., Fundamentos teóricos para el cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas aéreas de baja tensión para su uso en telecomunicaciones., Ingeniería e Investigación, Vol. 29 No. 2, agosto de 2009, pp. 107-111.
- Cañete, F., 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. 3ªEdición. 2003.



## En español

- Couch II, León W., *Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicos*. Prentice Hall, Quinta Edición, México, 2004.
- Dorf, S., *Circuitos Eléctricos Introducción al Análisis y Diseño.*, Alfaomega editores. 5ª Edición, México, D.F., 2007
- 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.
- García-Hernández, J., A Survey on BPL Communications Standards., *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 8 No. 10, October 2008
- 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.
- IEEE P1901 Draft Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications., February 2006
- 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-

## In English

- ICONTEC., *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas-RETIE*, 2007
- Kaparelitis, E., Drakakis, K., Dimitriades, H., Capsalis, C., Throughput Analysis on BPL Networks., *Microwave Review*, September 2008.
- 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.
- Misurec, J., Interference in data communication over narrow-band PLC., *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, VOL.8 No.11, November 2008.
- Neri, V., *Líneas de Transmisión.*, McGRAW-HILL editores. 5ª Edición, México, D.F., 2007.
- Tsakiris, S., Salis, A., Uzunoglu, N., Performance of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Low Signal Strength., *Microwave Review* December, 2009.
- Zimmermann, M., Dostert, K., A Mutipath Model for the Power line 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.