

Ruido e interferencia en canales de comunicaciones por línea de distribución eléctrica

Hernán Paz Penagos

*Escuela Colombiana de Ingeniería JULIO GARAVITO, Bogotá-Colombia
e-mail: hernan.paz@escuelaing.edu.co*

(Recibido: Abril 24 de 2008- Aceptado: Noviembre 24 de 2008)

RESUMEN

Muchos son los desafíos que ha presentado la tecnología PLC a la Ingeniería de Comunicaciones, cuando se pretende ofrecer servicios de banda ancha. Uno de ellos es la dificultad para predecir la atenuación de la señal. La razón principal de esta dificultad esta dada por el hecho que el comportamiento del canal es variable en el tiempo y en la frecuencia, y la caracterización del mismo depende de las características físicas y eléctricas de la red la cual a menudo es desconocida.

Este artículo presenta una evaluación de los efectos del ruido e interferencia sobre un byte de información transmitido a través de un canal PLC. Las observaciones presentadas podrían ser ayuda adecuada para el diseño de redes PLC para interiores con mejor transferencia de datos y desempeño.

PALABRAS CLAVE: Comunicaciones por líneas de potencia, ruido, interferencia, modelo del canal.

Ruido e interferencia en canales de comunicaciones por línea de distribución eléctrica

ABSTRACT

Many are the challenges that the PLC technology has presented to the Communications Engineering, when it is intended to offer broadband services. One of them is the difficulty to predict the signal attenuation. The main reason of this difficulty is given by the fact that the behavior of the channel is time and frequency variant, and the characterization of itself depends on the physical and electrical properties of the network which is often unknown.

This article presents an evaluation of the noise and interference effects on an information byte transmitted over a PLC channel. The observations presented could be helpful in suitable design of the indoors PLC networks for a better data transfer and throughput.

KEYWORDS: Power line communications, noise, interference, attenuation, channel model.

1. INTRODUCCIÓN

Al evaluar la transmisión de señales de información, moduladas digitalmente, por canales PLC, el ruido y la interferencia limitan el ancho de banda, distorsionan y atenúan la señal transmitida. Estos factores deben examinarse y valorarse de acuerdo con el efecto que tengan sobre los datos transmitidos, y aquellos que se destaquen deben incorporarse en un modelo del canal con el fin de evaluar las limitaciones del medio para garantizar al usuario ancho de banda efectivo y calidad de servicio. La optimización de la transmisión de información por cualquier medio es posible siempre y cuando se disponga de un cuidadoso y razonable modelo del canal.

En este artículo se presentan los resultados de un estudio de caso sobre comunicaciones por líneas de potencia; así mismo se plantean algunas estrategias de soluciones para redes PLC. El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar el efecto del ruido y la interferencia sobre un byte de información transmitido, repetidas veces, por una línea eléctrica de baja tensión. Se consideraron como variables en las pruebas: la palabra de código transmitida, el esquema de modulación de portadora única, la longitud de la línea, el número y tipo de carga terminal. Este trabajo fue previo al desarrollo del proyecto de investigación titulado “Diseño e implementación de la red inmótica para el laboratorio de ingeniería electrónica G-204 de la ECI”, que tuvo como objetivo mejorar la calidad de servicio a los estudiantes para el desarrollo de sus prácticas libres en el laboratorio de la facultad de ingeniería electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería JULIO GARAVITO

2. MARCO TEÓRICO

En el pasado, las líneas de potencia eléctrica fueron utilizadas por algún tiempo para monitoreo y lectura de señales de energía eléctrica remotas; recientemente han sido propuestas como una infraestructura potencial para proveer servicios de comunicaciones de banda ancha (voz, datos e Internet). Las razones principales de este renovado interés son la ubicuidad de la red, el ahorro de dinero y la versatilidad. Un breve resumen de la historia de PLC se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 1. Resumen de la transmisión de señales de información utilizando las líneas de potencia.

Nombre	Periodo	Servicios	Tasas de transmisión	Especificaciones técnicas	Referencias
CTP: transmisión de portadoras por líneas de potencia	Década del 20.	Telemetría y control de supervisión	Bajas tasa de bits	Banda de frecuencia: 15 a 500KHz; Medio: líneas de alta tensión; Distancias < 900Km; Esquemas de modulación: AM, FM; Potencias de transmisión < 10W.	[1], [2], [3]
Ripple Control	Década del 30	Servicios telemétricos.	Bajas tasa de bits	Banda de frecuencia: 100 a 900KHz; Medio: líneas de media y baja tensión; Modo de transmisión simplex.	[4], [5]
RCS: señalización de portadora.	Década de los 70s.	Servicios de gestión de demanda eléctrica y lectura de contadores de energía: Datos.	Ligero aumento de las tasas de transmisión	Banda de frecuencia: 5 a 500KHz; Medio: líneas de media y alta tensión; Distancias < 4Km.	[6]
SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition	Finales de la década del 80 y principios de la década del 90.	Transmisión de voz.	Aumento de las tasas de transmisión	Banda de frecuencia: 5 a 1500KHz. Distancias < 4Km; Modo de transmisión dúplex; Esquemas de modulación: ASK, FSK; Potencias de transmisión < 10W.	[7]
PLC/PLT	En 1997, PLD: Digital Power Line, fue la antecesora de PLC/PLT. En los años posteriores al 2000 surgieron versiones mejoradas de "HomePlug".	Voz, datos e Internet (alternativa para solución de la última milla).	HomePlug v1: 14Mbps. HomePNA	Bandas de frecuencia: 100 a 2000KHz; Medio: líneas de media tensión; Distancias < 4Km; Modo de transmisión dúplex; Control de acceso al medio: CSMA/CA; Esquemas de modulación: Multiportadora en tiempo continuo (OFDM), Portadora Única, Espectro Ensanchado - Secuencia Directa (DSSS); Potencias de transmisión < 10W.	[5], [6], [7]
PLB: Power Line Communications of broadband. IEEE P1901 WG.	Años posteriores al 2005: "HomePlug-Turbo" y "HomePlug-AV".	Servicios triple play: Voz, Internet y video.	"HomePlug-Turbo": 85Mbps. "HomePlug-AV": 200Mbps.	Banda de frecuencia: 1 a 30MHz; Medio: líneas de baja tensión; Distancias < 200m; Modo de transmisión Half dúplex; Esquemas de modulación: BPSK, QPSK, 8, 16, 64, 256 y 4096 -QAM para multiportadora en tiempo discreto (FFT) OFDM PHY, y BPSK, 4, 8, 16 y 32_PAM para multiportadora en tiempo discreto Wavelet OFDM PHY.	[7], [8], [9], [10].

El ancho de banda del medio de transmisión y la relación señal a ruido son dos factores de interés en la tecnología PLC porque determinan la capacidad del canal. Claude Shannon demostró que se puede transmitir con una probabilidad de error tan baja como se quiera y a una velocidad binaria tan alta como se quiera, siempre y cuando la velocidad de los datos esté por debajo de la capacidad del canal; es por esto que el diseño de cualquier red de acceso o red local para interiores PLC debe poner especial atención en las características del medio y en los problemas de ruido e interferencia del canal.

2.2 Modelo de un canal de comunicaciones PLC

Existen varios métodos para establecer el modelo del canal; conocer el modelo del canal es de vital importancia para el diseño e implementación de cualquier aplicación porque la calidad de la transmisión estará influenciada por las características del canal. Hensen y Schulz [11] hicieron un primer acercamiento a la estimación de la función de transferencia del canal PLC y propusieron un modelo simple para una línea de transmisión directa; en ella se menciona la atenuación que se incrementa proporcionalmente con la frecuencia; pero no la atenuación debido a multitrayectoria.

Otros modelos de canal se basaron en la teoría de líneas de transmisión multiconductora para redes locales (interiores) [12], [13] y para redes de acceso (exteriores) [14] y [15]; dichos modelos tuvieron en cuenta la topología de la red, las características del cable y las condiciones de propagación.

Matthias *et al* [16], Pavlidov *et al* [17], Zimmermann y Dostert [10] desarrollaron estudios de modelamiento del canal PLC tomando como variables la impedancia de carga de la red, la longitud directa de la línea, el número de ramas o derivaciones de la red y la longitud de las mismas; según pruebas realizadas por Matthias *et al*, y Zimmermann y Dostert sobre canales PLC en alta frecuencia, 300 m. es la distancia aconsejable para la transmisión de señal sin pérdidas considerables.

Banwell y Gali [12] propusieron otro modelo de canal para una configuración de línea de transmisión multiconductora. Biglieri [18] y Pavlidov *et al* [17] modelaron el canal basados en las características del cable eléctrico; mientras que Longfeld [19] y Dostert [20] lo hicieron basados en las características de propagación. Fritchman, por su parte, presenta otra forma de caracterizar los canales de línea eléctrica de baja tensión, basados en la utilización de cadenas de Markov y representadas en dos estados; este método también es conocido con el nombre de Golbert-Elliot [21].

Philips [22] por su parte, propuso el modelo de canal eco, el cual se aplicó para topologías de redes

PLC en árbol con N ramas, y algunas de ellas conectadas a cargas terminales aleatorias. En este modelo de canal un impulso transmitido es recibido como la superposición de N pulsos de Dirac retardados y atenuados; éstos representan N señales que siguen diferentes trayectorias en la red. La ecuación compleja que representa la función de transferencia del canal PLC es:

$$F(f) = \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

N es el número de trayectos, ρ_i es un número complejo resultado del producto de la transmisión y el coeficiente de reflexión del pulso de Dirac a lo largo del camino del eco i y τ_i representa el retardo del mismo pulso.

Zimmermann y Dostert [10] complementaron el modelo de canal PLC propuesto por Philips incluyendo la atenuación del flujo de la señal; este es el modelo más difundido y usado por investigadores en PLC porque es fácil de aplicar y el más aproximado a la realidad. La función de transferencia propuesta en este modelo es:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_i f^k) d_i} e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (2)$$

i denota el número de derivaciones, g_i es el factor de peso del trayecto i (producto de la amplitud del pulso transmitido por el coeficiente de reflexión), d_i es la longitud del trayecto, a_0 y a_i son parámetros de atenuación experimentales obtenidos en pruebas de campo, k es el exponente de atenuación (son recomendados valores entre 0.2-1) y v_p es la velocidad de propagación. En la ecuación 2, el primer término describe la atenuación y el segundo el eco.

Anatory *et al* [23] propusieron un modelo de canal PLC basado en la teoría sobre líneas de transmisión que amplía el modelo de Zimmermann. Este fue aplicado a una red con un nodo y múltiples ramas. La función de transferencia del canal tienen las siguientes especificaciones:

$$H_m(f) = \sum_{M=1}^L \sum_{i=1}^N T_{Lm} \alpha_{mn} H_{mn}(f), \text{ para } n \neq m \quad (3)$$

n es el número de rama, m es el número de la carga terminal, M es el número de la reflexión, N_i es el número total de ramas conectadas al mismo nodo y terminadas en cargas arbitrarias, $H_{mn}(f)$ es la función de transferencia de la rama n terminada en una carga m , T_{Lm} es el coeficiente de transmisión para una derivación terminada en la carga m .

$\alpha_{mn} = P_{Ln}^{M-1} \rho_{nm}^{M-1} e^{-\gamma_n(2(M-1)l_n)}$ en la cual ρ_{mn} es el coeficiente de reflexión considerado en el nodo único y debido a la rama n que termina en carga m ; γ_n es la constante de propagación de la rama n que tiene una longitud l_n , P_{Ln} es el factor de reflexión terminal dado por: $P_{Ln} = \rho_s$ cuando $n = 1$, que corresponde al factor de reflexión de la fuente y $P_{Ln} = P_{Ln}$ en otros casos.

2.2 Ruido, interferencia de banda estrecha y atenuación

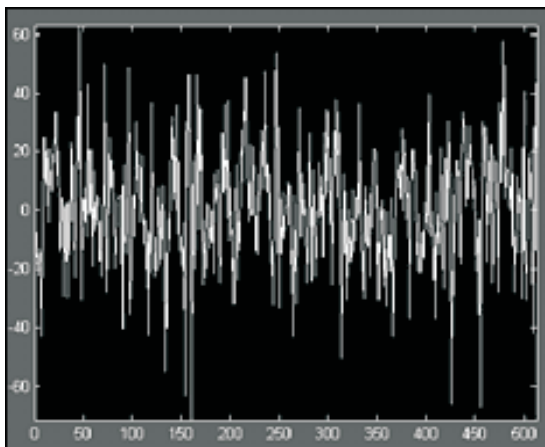
El ruido presente en los canales PLC es de naturaleza aleatoria y se presenta en un rango de decenas de KHz hasta 20MHz.

Ruido de fondo: Un oscilograma del voltaje de este tipo de ruido $n(t)$, puede ser semejante al de la figura 1; en particular: se asume que es un proceso Gaussiano de promedio cero, valores *rms* diferentes de cero ($\sigma^2 \neq 0$) y densidad espectral de potencia igual a $No/2$ [24].

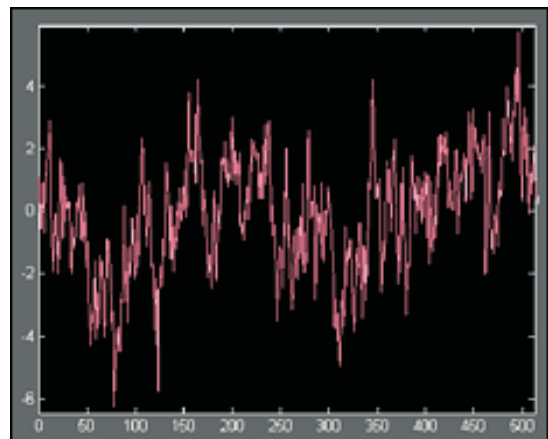
Como lo muestra la figura 2, el modelo de canal Gaussiano ó también llamado canal discreto equivalente, presenta como entrada una secuencia de símbolos (Palabra binaria) de un alfabeto de M símbolos $A[n]$ y como salida una secuencia analógica equivalente $A'[n]$. Transforma cada símbolo del código de entrada, de manera independiente, mediante la adición de ruido gaussiano en tiempo discreto, blanco y de media nula para obtener la salida.

La relación entre un símbolo de entrada y su correspondiente de salida habrá de determinarse en función de las probabilidades de acierto y error del dispositivo umbral.

Ruido coloreado: También se le conoce como ruido de fluctuación y es no-estacionario. Proporcionalmente tiene más energía en el extremo de frecuencias bajas del espectro respecto del ruido blanco; este ruido puede alcanzar niveles considerables de voltaje con el encendido de ciertos tipos de cargas eléctricas (motor universal, hornos microondas, dimmers, etc.). El modelamiento del ruido coloreado o rosa se hace similar al ruido aditivo blanco Gaussiano (AWGN), previa inserción del filtro pre-blanqueador delante de los circuitos de procesamiento del receptor.



a)



b)

Fig. 1. Voltaje de ruido $n(t)$: a) Ruido blanco, b) Ruido rosa.

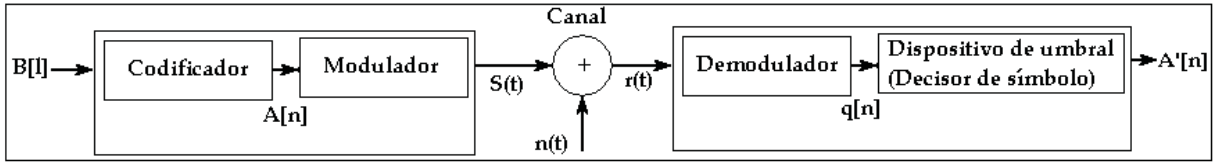


Fig. 2. Modelo del canal Gaussiano.

Ruido impulsivo: se manifiesta en el canal PLC a través de perturbaciones intermitentes causadas por la conmutación de cargas en la red eléctrica; la amplitud de los picos puede llegar a superar al ruido de fondo en niveles hasta de 50dB, y su ocurrencia es de eventos aislados y aleatorios.

El diseño inadecuado de sistemas de suministro de potencia conmutada induce ruido impulsivo en la línea con alto contenido armónico que puede causar errores de ráfaga en redes PLC.

Zimmermann y Dostert [25] distinguen dos tipos de ruido impulsivo, a saber: 1) Ruido impulsivo periódico sincronizado con la frecuencia de la red, causado por la conmutación de suministros de potencia y 2) Ruido impulsivo asíncrono, causado por transientes aleatorios con tiempos de duración del orden de microsegundos a milisegundos.

Middleton [26] propuso, en 1977, un modelo de ruido impulsivo, que es resultado de la superposición del ruido de fondo (AWGN) más el ruido impulsivo. En este modelo y según el ancho de banda del ruido, se diferencian tres clases generales de ruido: clase A, clase B y clase C.

El modelo de ruido impulsivo clase A es el más apropiado para medios de transmisión hostiles como es el caso del canal PLC. La función de densidad de probabilidad (FDP) normalizada de este tipo de ruido esta dado por:

$$F_z(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\alpha_m}{2\pi\delta_m^2} e^{-\left(\frac{z^2}{2\delta_m^2}\right)} \quad (4)$$

m es el número de la fuente del ruido impulsivo, caracterizado por la distribución de Poisson; distribución que tiene como parámetro medio A , llamado índice impulsivo, el cual es resultado del producto de la tasa promedio de ruido impulsivo por la duración media de un impulso típico.

$$\alpha_m = e^{-A} \left(\frac{A^m}{m!}\right) \quad (5)$$

δ_m^2 es la varianza de la componente del impulso que se calcula de la siguiente manera:

$$\delta_m^2 = \delta_g^2 \frac{\frac{m}{\Gamma} + \Gamma}{\Gamma}$$

es la razón de potencia impulsiva de Gauss, el cual representa la relación entre la varianza del ruido Gaussiano δ_g^2 y la varianza de la componente del impulso δ_m^2 . Más especificaciones sobre este modelo se pueden consultar en [27].

Interferencia de banda estrecha: es causada por el ruido del medio circundante, principalmente de emisiones de estaciones de radio difusión de banda media (AM) y banda corta. Este tipo de interferencias se puede modelar usando senoidales moduladas [18].

Atenuación: dada una señal de entrada $X(t)$, se dice que el canal PLC es un sistema lineal, si cumple: 1) Que la señal de salida $Y(t) = KX(t - t_d)$, y 2) La función de transferencia del canal

$$H(f) = Ke^{-j(\omega t_d \pm m\pi)}$$

(con K : constante de proporcionalidad, ω : frecuencia angular y t_d : tiempo de retardo); es decir, que la magnitud es constante con la

frecuencia e igual a K , y la fase tiene un comportamiento lineal con la frecuencia y es igual a

$$a - (\omega t_d \pm m\pi)$$

Cuando la magnitud de $H(f)$ no es constante, se produce distorsión de amplitud, y cuando la fase de $H(f)$ no es lineal con la frecuencia se produce distorsión o retardo de fase.

Con distorsión no-lineal, la amplitud y la fase cambian con el voltaje de entrada V_{in} de forma no lineal.

Algunos de los factores que influyen en la atenuación de la señal de información en un canal PLC son: la multitrayectoria debido al número y la longitud de las derivaciones (ramas) de la red, la presencia de cargas terminales variables en los extremos de las derivaciones y el desacoplamiento de la impedancia de carga. La atenuación por multitrayectoria ocurre debido a la reflexión y a la dispersión de la señal a través de las derivaciones. Para una señal en general, este efecto se va a traducir en una distorsión de su forma de onda.

Un canal PLC de trayectoria múltiple se puede caracterizar por la distribución de Rayleigh, ya que la naturaleza estadística variable en el tiempo de la envolvente de la señal recibida se describe bastante bien por medio de esta distribución, y de

la cual se conocen varios ejemplos en las comunicaciones inalámbricas.

Barmada *et al* [28] afirman que la atenuación del canal PLC depende de las características físicas y eléctricas de la línea, a saber: longitud, parámetros eléctricos primarios por unidad de longitud (R, L, C y G), frecuencia y valor de las cargas terminales en las ramas.

3. ESTUDIO DE CASO

El estudio de caso particular desarrollado en el laboratorio G-204 de la Escuela Colombiana de Ingeniería JULIO GARAVITO se hizo sobre la red eléctrica de baja tensión con configuración árbol que se muestra en la siguiente figura.

En Bogotá, los circuitos primarios (MV) de distribución urbana son trifásicos trifilares, con neutro puesto a tierra en la subcentral, señal seno, tensión y frecuencia nominal de 11.4 kV y 60 Hz respectivamente; el rango de variación de frecuencia puede estar entre 59.8 y 60.2 Hz en condiciones normales de operación. El nodo S_1 es el barraje de conexiones a cinco bancos de trabajo de dicho laboratorio (ver figura 4) con topología en estrella. Para cada banco figuran tres conexiones (una trifásica, una bifásica y una monofásica) para un total de 15 ramas.

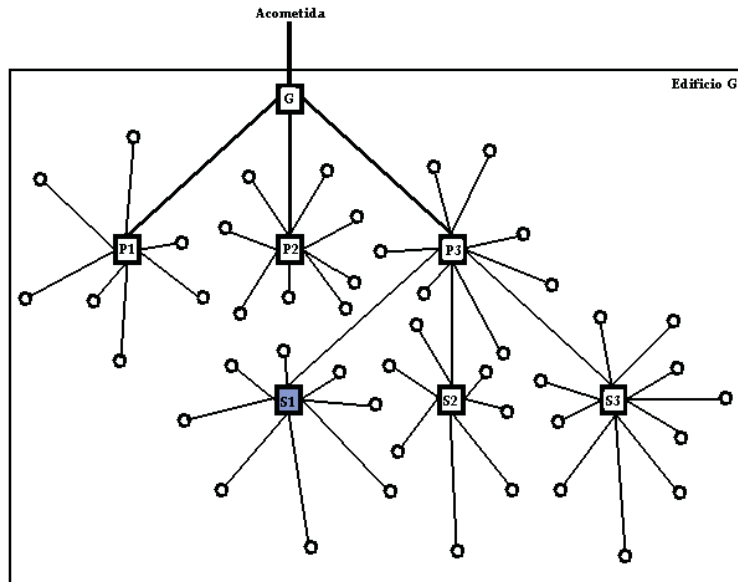


Fig. 3. Topología general de la red de distribución eléctrica de baja tensión del edificio G de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

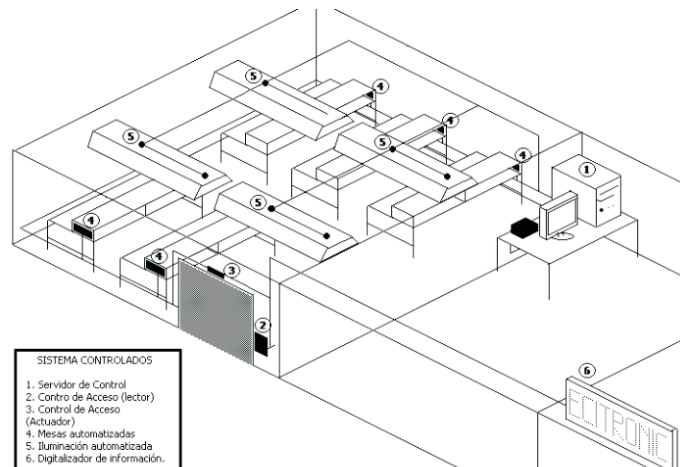


Fig. 4. Plano específico del laboratorio G-204.

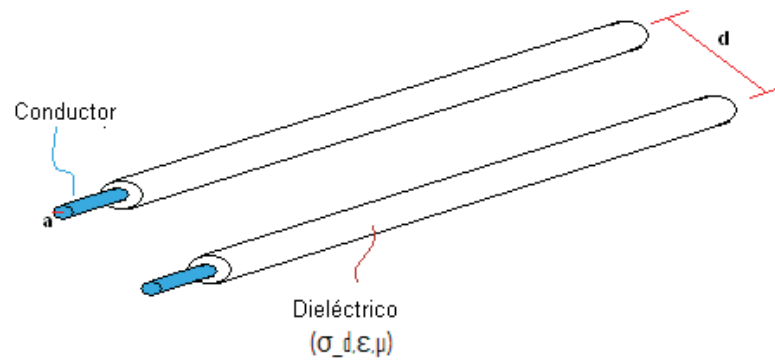


Fig. 5. Configuración de la línea bifilar.

Tabla 2. Propiedades físicas y eléctricas de la línea de potencia del laboratorio g-204.

Característica	Valor
Tipo de línea	Bifilar
Material del Conductor	Cobre
Tamaño nominal	12 (calibre 12)
Radio interno del Conductor (a)	2.03mm
Recubrimiento	Polietileno
Distancia entre centros (d)	2.01 cm
Antigüedad del edificio	10 años
Ancho de banda (BW)	300KHz
δ_c : conductividad del cobre	5.8×10^7 (s/m)
μ_o : Permeabilidad en el vacío	$4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)
l : Profundidad de penetración	$0,066/f^{1/2}$ (f: frecuencia)
$\epsilon \approx \epsilon_r \epsilon_o$	
ϵ_r : Permitividad relativa del aire	1,0005 (F/m)
ϵ_o : Permitividad del vacío	$8,8542 \times 10^{-12}$ (F/m)

El tendido de la red de distribución eléctrica del edificio G de la Escuela Colombiana de Ingeniería lo conforman pares paralelos con características físicas particulares (Ver figura 5).

Las especificaciones del par paralelo se resumen en la Tabla 2.

Los parámetros eléctricos primarios (R , L , C y G) y secundarios (Z_o y γ) de la línea fueron hallados a partir de las propiedades físicas y eléctricas de los cables bifilares, aplicando la teoría de líneas de transmisión [29]. Se obtuvo los siguientes valores:

Tabla 3. Valores calculados de los parámetros primarios y secundarios de la línea de potencia del laboratorio g-204.

f (KHz)	L (μ H/m)	C (pF/m)	R (m Ω /m)	Z_o (Ω)
40	0.9	27.3	4.2	182
100	0.9	27.3	5.3	182

Para el cálculo de R , L , C y G , se utilizó las fórmulas aproximadas para frecuencia alta, ya que se cumple que $a \ll d$:

$$L \cong \frac{\mu}{\pi} \text{Ln}\left(\frac{d}{a}\right) \quad (6)$$

$$C \cong \frac{\pi\epsilon}{\text{Ln}\left(\frac{d}{a}\right)} \quad (7)$$

$$R \cong \frac{1}{\pi a l \delta_c} \quad (8)$$

G es despreciable

Los parámetros secundarios se obtuvieron a partir de los parámetros primarios, calculándose inicialmente la impedancia Z y la admitancia Y :

$$Z = l(R + j\omega L), \quad Y = l(G + j\omega C)$$

La impedancia característica:

$$Z_o = \sqrt{Z/Y} \quad (\Omega),$$

en altas frecuencias se aproximó a

$$Z_o \cong \sqrt{L/C} \quad (\Omega),$$

y la constante de propagación:

$$\gamma = \sqrt{ZY}$$

en altas frecuencias se aproximó a

$$\gamma = j\omega \sqrt{LC}$$

Para el modelamiento del canal se siguió el estudio propuesto por Anatory *et al* [22]. Los ruidos de fondo y coloreado en el canal se asumieron como un proceso Gaussiano: $m=0$; $\sigma^2 \neq 0$ y $DEP=No/2$. Se siguió el modelo de ruido impulsivo clase A de Middleton (1977) que es el más apropiado para medios de transmisión hostiles como es el caso del canal PLC, y las interferencias de banda estrecha se modelaron usando senoidales moduladas [18], de AM y banda corta.

4. PRUEBAS REALIZADAS

Se hicieron veinticuatro secciones de prácticas y en cada una de ellas se desarrollaron tres pruebas para la estimación del canal PLC; en todas ellas se transmitieron señales binarias de pulsos codificadas NRZ-L, de manera reiterada, a una tasa de 1200 y 64000Kbps modulados en ASK, FSK y BPSK con frecuencias de portadoras de 40, 100, 230 y 1000KHz. La transmisión se hizo desde el punto A a B pasando por el nodo S_i de la red PLC (ver figura 6). La distancia del nodo B fue variable de 18m (distancia mínima) y 26m (distancia máxima) para experimentar la transmisión a diferentes distancias, según las posibilidades que ofrecía el laboratorio en el cual se hicieron las prácticas.

En el nodo C se ubicó la carga Terminal o elemento distorsionador; inicialmente se dejó en circuito abierto, sin carga; después se conectó una, dos y tres cargas simultáneamente, en el mismo nodo o en nodos aleatorios. Se seleccionaron deliberadamente el motor, el taladro y la fuente conmutada del PC, como elementos generadores de ruido e interferencia, porque son las cargas típicas usadas por los

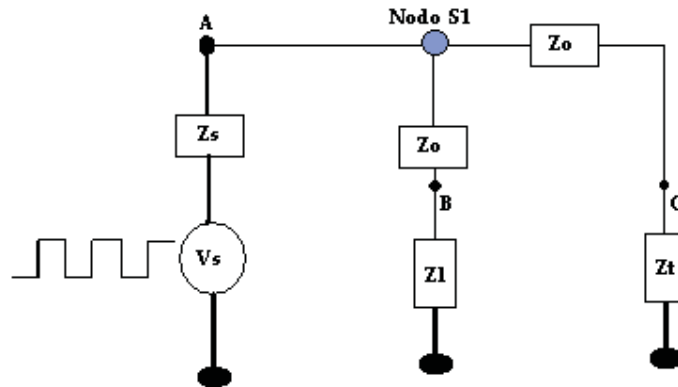


Fig. 6. Circuito eléctrico simple (con una rama) de red PLC.

estudiantes de la Escuela Colombiana de Ingeniería en sus prácticas libres; y además, son causa de gran cantidad de ruido y armónicas en la red eléctrica. Al transmitir el byte modulado, las cargas conectadas estaban encendidas o conmutaban de encendido-apagado o viceversa. Se pretendía modelar el canal en uno de los estados más adversos de operación.

Prueba 1 de la sección 1: El transmisor se ubicó en A de la figura 6. En este punto se inyectó el byte de prueba a una tasa de 1200bps modulado en ASK con frecuencia de portadora de 40KHz; en el punto B se conectó el receptor y su impedancia de entrada fue considerada carga para el canal PLC, a la cual se buscó acoplar con la impedancia de la línea. En C se puso un factor distorsionador con carga terminal arbitraria (motor, taladro y fuente conmutada de computador) y las restantes ramas se dejaron en circuito abierto;

Las especificaciones de los elementos del circuito fueron:

$$Z_s = 600\Omega, \quad Z_o = 182\Omega \text{ y } Z_L = 150\Omega$$

$Z_t = RL$ (No especificado, se comportan generalmente como circuitos abiertos en alta frecuencia).

El voltaje de salida teórico en el dominio de la frecuencia se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$V_m(f) = H_m(f) \left(\frac{Z_{Ln}}{Z_{Ln} + Z_s} \right) V_s(f) \quad (9)$$

En el receptor se recibió señal de información más ruido; en algunos casos el ruido provocó errores en la decodificación de la señal y el grado de afectación fue del orden de un BER de 10^{-2} .

Las figuras 7a, 7b y 7c muestran los resultados de la primera prueba; en las figuras se identifican diferentes niveles de atenuación y distorsión del byte transmitido, en condiciones de la red con carga, como consecuencia del ruido impulsivo por conmutación o superposición de armónicos introducidos por las mismas.

Tabla 4. Especificaciones de la primera prueba con ask.

Orden	Dato transmitido y recibido a 20m de distancia	Características de la señal transmitida	Estado de la red con respecto a la cargas	Nivel de atenuación en dB $A=20\log(V_{TX}/V_{RX})$
1	10101000 más el byte de sincronismo	Portadora modulada digitalmente en ASK: $F_c=40\text{KHz}$, $R_b=1200\text{bps}$.	Sin carga	32.04
2	10101000 más el byte de sincronismo	Amplitud de señal original = 8 V, Amplitud de señal recibida ≈ 200 mV	Con carga inductiva: Motor trifásico.	34.17
3	10101000 más el byte de sincronismo	Separación entre derivaciones equidistante, Trayecto A-B= 20m, A-C=24m	Con carga: Fuente de computador.	33.68
4	10101000 más el byte de sincronismo		Con carga inductiva: Taladro.	34.52

Según la tabla IV, la atenuación promedio del dato recibido con presencia de carga terminal en la red está alrededor de 2.08dB más que la atenuación del dato sin carga.

Así mismo, cuando se transmite el byte de información modulado en ASK con la conexión simultánea de un motor trifásico como carga terminal (Figura 7a), que conmuta On/Off o viceversa repetidas veces en la red, se observan varios fenómenos: 1) Distorsión y atenuación de la señal modulada, 2) Presencia de ruido impulsivo debido al frenado y arranque del motor con niveles de voltaje que van desde 1.2 voltios a -0.8 voltios, durante tiempos muy cortos, 3) Superposición del ruido de fluctuación al nivel de amplitud de la portadora digital.

Prueba 1 de la sección 24: El transmisor se ubicó en A de la figura 6. En este punto se inyectó el byte a 64Kbps, modulado en ASK a frecuencia de portadora de 1000KHz; en el punto B se conectó el receptor y en C se puso un factor distorsionador con carga terminal arbitraria. Las especificaciones de la prueba se muestran en la Tabla V.

$$Z_s = 600\Omega, \quad Z_o = 182\Omega, \quad \text{y} \quad Z_L = 150\Omega,$$

$$Z_t = RL \quad (\text{no especificado})$$

En las figuras 8a, 8b y 8c se presentan información de la portadora digital recibida, modulada con la misma técnica de modulación y transmitida a la misma distancia de la prueba 1/sección 1; pero a diferente tasa de bits y frecuencia de la portadora para poder establecer la comparación. Las figuras 8b y 8c no muestran sobre picos de la portadora

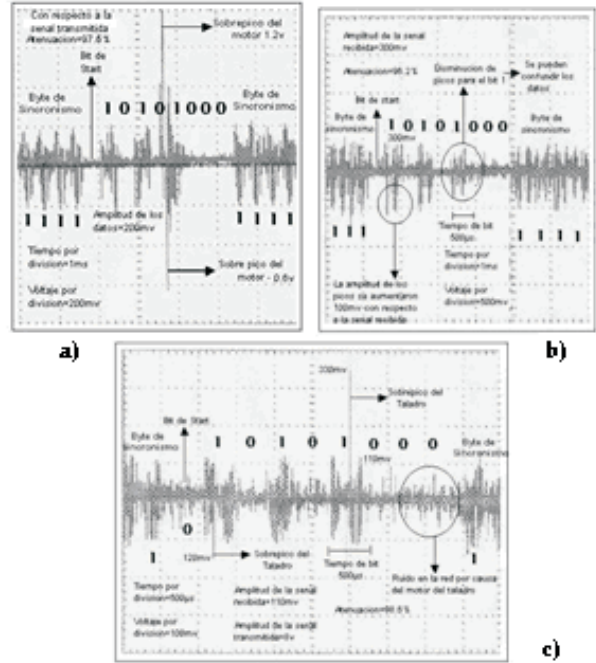


Fig. 7. Efecto de las cargas no lineales sobre el dato de información transmitido: a) Con motor trifásico, b) Con fuente conmutada, c) Con taladro.

digital cuando están conectadas la fuente conmutada y el taladro al nodo C; sin embargo, se presenta un ruido de fondo generalizado que atenúa la señal modulada; el ruido es aditivo y afecta principalmente la amplitud de la portadora digital ASK.

En la figura 8a la portadora digital se ve afectada con ruido impulsivo por la presencia del motor como factor de distorsión; en ella aparecen sobre picos; sin embargo, el número y la magnitud de dichas fluctuaciones son pequeñas comparadas con los resultados de la prueba 1/sección 1.

Tabla 5. Especificaciones de la primera prueba de la sección 24.

Orden	Dato transmitido y recibido a 24m de distancia	Características de la señal transmitida	Estado de la red con respecto a las cargas	Nivel de atenuación en dB $A=20\log(V_{TX}/V_{RX})$
1	10101010 más el byte de sincronismo	Portadora modulada digitalmente en ASK: $F_c=1000\text{KHz}$, $R_b=64000\text{bps}$. Amplitud de señal original = 12 V Amplitud de señal recibida $\approx 180\text{ mV}$. Separación entre derivaciones equidistante, Trayecto A-B= 20m, A-C=24m	Sin carga	35.10
2	10101010 más el byte de sincronismo		Con carga: Motor trifásico.	37.03
3	10101010 más el byte de sincronismo		Con carga: Fuente de computador.	36.90
4	10101010 más el byte de sincronismo		Con carga: Taladro.	37.45

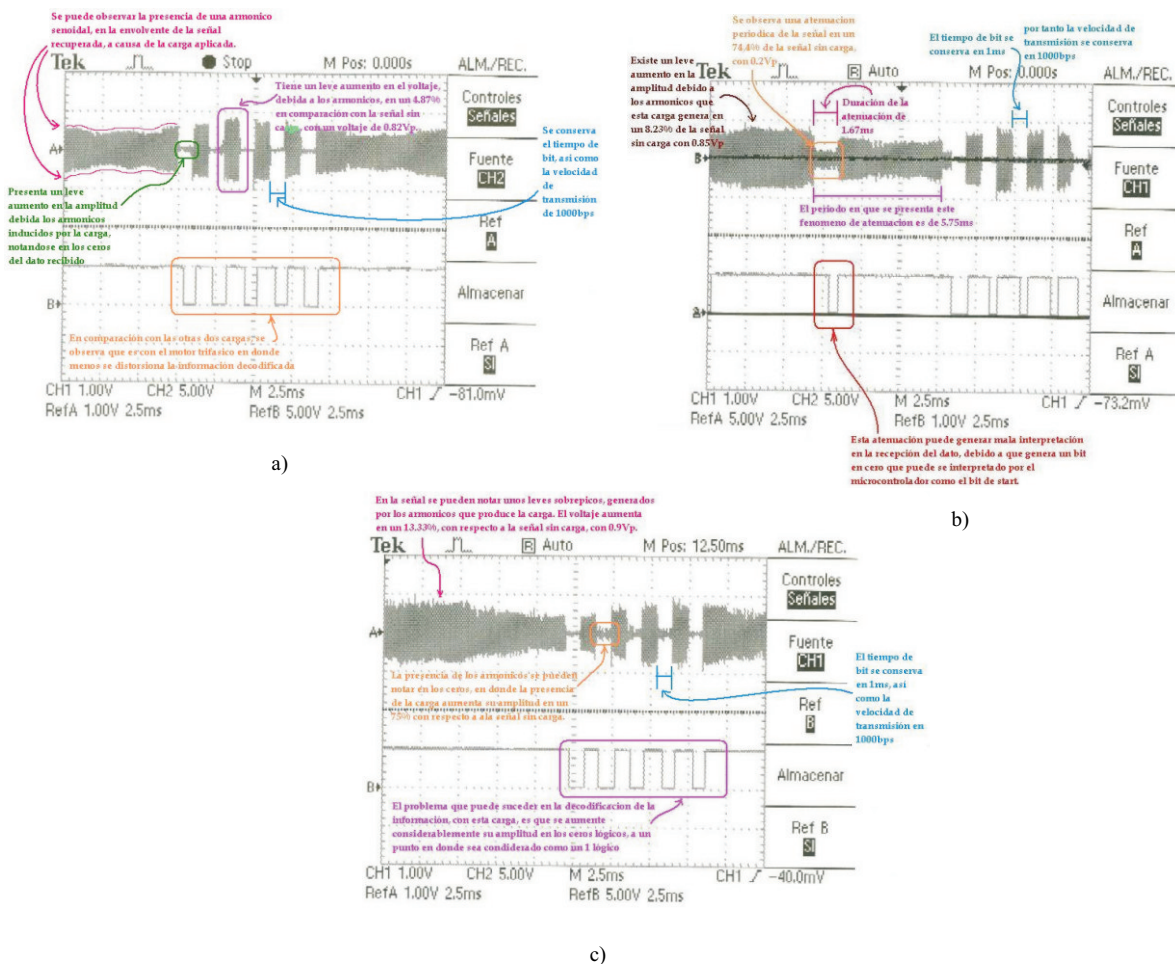


Fig. 8. Efecto de las cargas sobre el dato de información transmitido: a) Con motor trifásico, b) Con fuente conmutada, c) Con taladro.

Se concluye que el ruido que más afecta la portadora digital que modula el dato es de naturaleza impulsiva y es causado por la conmutación de las cargas. En las pruebas se comprobó la mayor inmunidad al ruido de esquemas digitales que modulan la información binaria en la frecuencia (FSK) o en la fase (BPSK), respecto del esquema que modula los datos en la amplitud (ASK), debido a las características aditivas del ruido impulsivo; además, este ruido se incrementa en la transmisión con portadoras digitales de bajas frecuencias o a tasas de bits altas.

Con respecto a la eficiencia de la transmisión del byte modulado digitalmente por el canal PLC, se pudo observar que existen diversas características de la red que hacen que este se atenúe, ellas son: la longitud del trayecto A-B, el número de ramas y la longitud de las mismas en la red por el efecto de

multitrayectoria [10], la influencia de las cargas terminales (tipo de carga y número de cargas conectadas simultáneamente), etc.

De las observaciones realizadas se concluye que en la medida en que disminuyan las cargas terminales conectadas a las ramas de la red o cese la conmutación de las mismas, la transmisión se puede hacer a largas distancias (en las pruebas realizadas en el laboratorio G-204 se logró transmitir de un extremo del salón a otro cubriendo una distancia de 24m) sin observar atenuación y distorsión significativa del byte.

Respecto al grado de afectación de la portadora digital, cuando están conectadas simultáneamente como cargas terminales en tres ramas diferentes, tres cargas generadoras de ruido se observa el efecto del ruido y la atenuación sobre la misma en la siguiente figura.

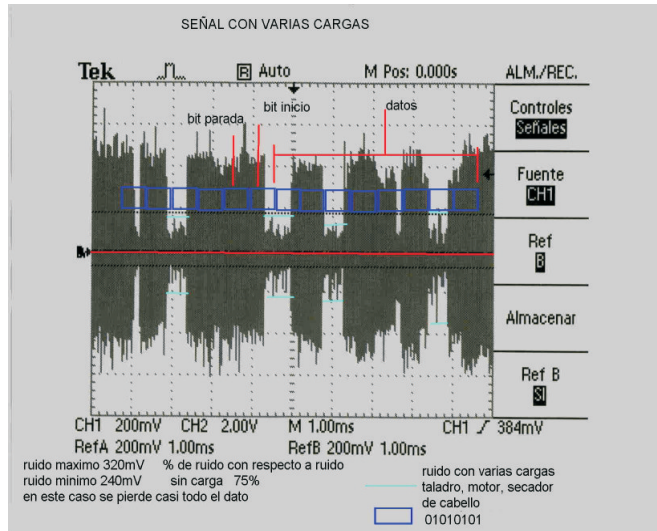


Fig. 9. Características eléctricas del dato recibido con presencia de varias cargas simultáneas en la red eléctrica

En la forma de la señal de ruido superpuesto a la energía de la portadora digital que modula el dato no es posible predecir el efecto indeseable de una fuente singular de ruido en un tiempo particular, debido a que son señales no correlacionadas. En tal caso, los voltajes y las corrientes totales se determinan calculando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada uno de los voltajes ó las corrientes de las fuentes de ruido independientes.

5. ANÁLISIS

Al analizar los resultados de dos secciones de prácticas sobre el canal PLC, utilizando el esquema de modulación más susceptible al ruido, se comprobó que la palabra de código se recupera en el receptor, en el mejor de los casos, con una probabilidad de error no nula, del orden de 10^{-2} ; también se verificó que esta probabilidad de error aumenta cuando se disminuye la relación señal a ruido.

En la implementación de tecnologías de acceso o redes locales utilizando canales altamente ruidosos, como es el caso de PLC, son importantes tres aspectos a la hora de escoger un esquema de modulación robusto: 1) conseguir una alta eficiencia espectral de transmisión, 2) requerir la menor potencia de transmisión posible, y 3) obtener una tasa de error de bit (BER) pequeña.

OFDM mediante transformada rápida de Fourier y transformada Wavelet es un esquema de

modulación multiportadora eficiente para la transferencia de datos sobre canales dispersivos porque ofrecen facilidad de implementación (Aplica algoritmos de carga de bits), bajas probabilidades de error y tasas de transmisión superiores a las ofertadas por otros esquemas [30], [31] y [32]. Así mismo, el estudio de técnicas avanzadas de codificación del canal pretenden alcanzar de manera práctica los límites de Shannon mediante los códigos RA (Repeat and Acumúlate), ó códigos LDPC (Low-Density parity Check) [33], [34], [35] y [36].

Influencia de la longitud de la línea: no desfasa ni distorsiona el byte transmitido; sin embargo según los resultados de atenuación en las pruebas y otras experiencias registradas en [23], se incrementa el desvanecimiento selectivo de frecuencia de la señal propagada; es decir, limita el ancho de banda disponible en el canal. De tal manera, que en la propagación de señales de banda ancha sus componentes espectrales pueden sufrir diferentes tasas de desvanecimiento; esto causa distorsión severa y alta probabilidad de error.

Influencia del número de ramas en la red: atenúa la potencia promedio de la señal; sin embargo, no modifica la respuesta de la señal en el espectro.

Influencia de las cargas terminales en las ramas: afectan menos la atenuación del byte transmitido cuando las ramas terminan en circuito abierto;

mientras que se incrementa la atenuación y la respuesta en frecuencia del canal cambia cuando las cargas terminales conectadas en las ramas de la red conmutan. Con impedancias de cargas terminales menores a la impedancia característica de la línea mejoran el nivel de la señal y también la respuesta en frecuencia del canal.

La distorsión del byte de información se presenta debido a la presencia de cargas locales, de tipo no lineal (fuentes conmutadas presentes en computadoras personales, máquinas de copiado y fax, entre otras), que a pesar de suministrarles en voltaje sinusoidal, la corriente que requieren para su funcionamiento es no sinusoidal [37]. Esta corriente con componentes armónicas al circular por la red de distribución eléctrica distorsionan cualquier forma de onda de señal que se propague por la misma red. Otra causa de distorsión es la contaminación armónica de la señal procedente del suministro eléctrico debido a la conexión de cargas industriales predominantemente inductivas y a la generación de transitorios por la conmutación de las mismas; así mismo, la portadora modulada digitalmente y transmitida por la red AC también es interferida por comunicaciones de radio frecuencia de las bandas MF, HF y UHF.

6. RECOMENDACIONES

En redes eléctricas para interiores en las cuales el conductor de tierra está presente y es accesible, se selecciona la transmisión Línea-Tierra; para este caso, las señales de información moduladas son acopladas a la línea con referencia al conductor de tierra, que es usada como la línea de retorno de la señal de comunicación [38]. La ventaja que ofrece este procedimiento es menor atenuación de las señales transmitidas debido a que colisionan menos con la señal de suministro eléctrico que se transmiten entre Línea-Neutro.

Para el control del ruido, la distorsión y la interferencia se recomienda el uso de filtros de línea y un adecuado blindaje de los módulos; en el diseño de estos circuitos se utilizó [24]; sin embargo, la efectividad de esta solución depende de la localización, de la topología, del número de derivaciones, de la longitud de la línea y de las cargas terminales conectadas simultáneamente a la red; así mismo, es importante conocer la

antigüedad y deterioro de la infraestructura física de la red de distribución eléctrica, porque estas condiciones afectan directamente el rendimiento del sistema de transmisión, limitando el ancho de banda e incrementando la probabilidad de error.

Para el diseño e implementación de cualquier sistema de acceso PLC es preciso evaluar y caracterizar el canal físico para conocer sus prestaciones y limitaciones, tales como: tasa de datos, rangos de frecuencias de la portadora, fluctuación temporal y con la frecuencia de la impedancia característica del canal, niveles de ruido tolerables, etc., que permitan garantizar una calidad de servicio en el sistema de acceso.

Algunas estrategias para el control del ruido en sistemas de acceso PLC son: a) En los transmisores: aislar las fuentes de ruido mediante encapsulado o blindaje, filtrar el ruido, sumar las fuentes ruido para cancelar sus efectos, garantizar conexiones de fuentes y cargas balanceadas a tierra para suprimir la interferencia radiada, etc. B) En los **receptores**: usar filtros selectivos con alto Q (los pasos para el diseño se pueden consultar en [37] y [38]), desacoplar fuentes de alimentación (polarización de circuitos receptores), diseñar acoples de impedancias para máxima transferencia de potencia, etc.

7. CONCLUSIONES

Las pruebas de estimación del canal previas al desarrollo de la red PLC para interiores implementado sobre la red de distribución eléctrica del laboratorio G-204 permitieron evaluar el potencial de las infraestructuras de baja tensión, la incompatibilidad electromagnética con otros usos del espectro y su viabilidad técnica; así mismo, sirvieron para ganar experiencia en las provisiones del servicio PLC a pequeña escala, aprovechar la tecnología para impulsar los activos de la Escuela Colombiana de Ingeniería JULIO GARAVITO, comprobar que puede llegar a ser una solución de red local de fácil implantación, de baja inversión, de gestión integrada de terminales cuya actuación sea encendido/apagado.

El ruido impulsivo es el que más afecta las comunicaciones por canales PLC, incrementando la

probabilidad de error; este se presenta en bajas frecuencias y se debe fundamentalmente a la conmutación aleatoria de cargas. El ruido de fondo y rosa atenúan la señal pero su efecto sobre la relación señal a ruido es menor. La interferencia de banda estrecha de emisiones de radio difusión (LF y MF) pueden afectar las comunicaciones por canales PLC cuando el cableado de distribución eléctrica está expuesto fuera de canaletas debido a que se convierten en antenas.

El éxito de cualquier sistema de transmisión de información a través de un medio hostil, como lo es la red de distribución eléctrica, exige el diseño y desarrollo de una capa física robusta que controle las fluctuaciones en el tiempo y la frecuencia de la impedancia de la línea, de la atenuación, el ruido y la interferencia presentes en el canal.

El canal PLC exhibe en todo tiempo alinealidades debido a las reflexiones de señal por desacoplamiento de cargas terminales y derivaciones de la red, que cancelan algunas componentes frecuenciales del espectro de la señal limitando su ancho de banda.

8. Referencias Bibliográficas

- [1] Fink, D.G. *Standard Handbook for Electrical Engineers*, Chapter 13-24, McGraw-Hill, 2000.
- [2] Dostert, K. *Powerline Communications*, Prentice-Hall, 2001.
- [3] Cheek, R.C. *Electrical Transmission and Distribution*, Chapter 12, Westinghouse Electric Corporation, 1999.
- [4] Platt, G. *Domestic Powerline Carrier Communications*, Thesis Bachelor of Engineering in Electrical Engineering, October 1999.
- [5] Selander, L. *Powerline Communications-Channel Properties and Communications Strategies*, PhD thesis, Lund University, 1999.
- [6] Zuberi, K.H. *Powerline Carrier Communications Systems*, MS Thesis, Department of Microelectronics and Information Technology, Royal Institute of Technology, KTH, 2003.
- [7] Dostert, K. *EMC Aspects of High Speed Powerline Communications*, Proceedings of 15th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Wroclaw, Poland, June 27-30, 2000.
- [8] Dostert, K. *Frequency hopping Spread Spectrum modulation for Digital Communications over Electrical Powerlines*, IEEE Journal on Selected areas in Communications, vol. 9, N° 3, May 1990, Págs. 700-710.
- [9] Hooijen, O.G. *A Channel model for residential Power Circuit Used as a Digital Communication Medium*, IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. 40, N° 4, Nov. 1998, Págs. 331-336.
- [10] Zimmermann, M. & Dostert, K. *A Multipath Model for Powerline Channel*, IEEE Transactions on Communications, vol. 50, N° 4, April 2002, Págs. 553-559.
- [11] Hensen and W. Schulz, *Time Dependence of the Channel Characteristics of Low Voltage Power-Lines and its Effects on Hardware Implementation*, AEÜ Int'l. J. Electronics and Commun., 2000, 54 (1), pp. 23–32.
- [12] T. Banwell and S. Galli, *A novel approach to the modeling of the indoor power line channel—Part 1: Circuit analysis and companion model*, IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 655–663, Apr. 2005.
- [13] S. Galli and T. Banwell, *A novel approach to the modeling of the indoor power line channel—Part 2: Transfer function and its properties*, IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 3, pp. 1869–1878, Jul. 2005.

- [14] T. Sartenaer and P. Delogne, "Powerline cables modeling for broadband communications," in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Appl.*, Malmö, Sweden, Apr. 2001, pp. 331–338.
- [15] F. Issa and T. Sartenaer *et al.*, "Analysis of power line communication networks using a new approach based on scattering parameters matrix," in *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compatibility*, Minneapolis, MN, Aug. 2002, pp. 1043–1047.
- [16] Matthias G, Manuel R, and Dostert, K, University of Karlsruhe, *Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design*, IEEE Communications Magazine, 2004, pp.78-86.
- [17] N. Pavlidou, A.J. H. Vinck, J. Yazdani and B. Honary, *Power Line Communications: State of the Art and Future Trends*, IEEE Communications Magazine, April 2003. pp. 34-40.
- [18] E. Biglieri, *Coding and Modulation for a Horrible Channel*, IEEE Commun. Mag., vol. 41, no. 5, May 2003, pp. 92–98.
- [19] P. Langfeld, *The capacity of typical powerline reference channels and strategies for system design*. International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Malmö, Suecia, apr. 2001, pp. 271.278.
- [20] K. Dostert, *Power lines as high speed data transmission channels modelling the physical limits*, IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, vol. 2, sep. 1998, pp. 585.589
- [21] Frichman, B.D. *A Binary Channel Characterization using partitioned Markov Chains*, IEEE Transactions Information Theory vol. IT-13, April 1967.
- [22] H. Philipps, *Modelling of Powerline Communication Channels*, *Proc. 3rd Int'l. Symp. Power-Line Communications and its Applications*, Lancaster, U.K., Mar. 30–Apr. 1, 1999, pp. 14-21.
- [23] J. Anatory, M.M. Kissaka and N.H. Mvungi, *Channel Model for Broadband Powerline Communication*, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 1, January 2007, pp. 135-141.
- [24] Paz, H. *Sistemas de comunicaciones digitales*, primera edición, Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería JULIO GARAVITO, Marzo 2009.
- [25] Zimmermann, M. & Dostert, K. *Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broadband Powerline Communications*. IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility. Vol.44, No.1, Feb. 2002. Págs. 249-58.
- [26] Middleton, D. *Canonical Non-Gaussian Models: Their Implications for Measurement and for Prediction Receiver Performance*; IEEE Transactions of Communications, vol. COM-21, No. 3, August 1979, pp. 20-220.
- [27] Yamauchi, K. & Takahashi, N. *Parameter measurements of class A interferente on powerline*, Transactions IICE, vol.72, N°1, January 1989, Págs. 7-9.
- [28] S. Barmada, A. Musolino, and M. Raugi, *Analysis of integrated circuit systems by an innovative wavelet based scattering matrix Approach*, *IEEE Trans. Adv. Packag.*, submitted for publication.
- [29] J. Kraus y D. Fleisch, *Electromagnetismo*, Ed. Mc Graw Hill, quinta edición, 2000.
- [30] O.J. Hoojean & A.J. Han Vinck, *On the Channel Capacity of a European - style Residential Power Circuit*. Japan. ISPLC-1998, pp. 31-44.
- [31] J.G. Proakis, *Digital communications*. McGraw-Hill, New York, EEUU, 4th Edition, 2001.

- [32] D.V. Sarwate & M.B. Pursley, *Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences*. Proceedings of the IEEE, 68(5), 1980. pp. 593-619.
- [33] S. Verdú, *Multiuser detection*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 1998.
- [34] R.G. Gallager, *Low Density Parity Check Codes*, Number 21 in Research monograph series, MIT Press, Cambridge Massachusetts. 1963.
- [35] M.C. Davey & D.J. Mackay, *Low density parity check codes over $GF(q)$* , Proceedings of 1998 IEEE Information Theory Workshops, June 1998.
- [36] M.G. Luby & M.A. Shokrollahi, *Improved low density parity check codes using irregular graphs and belief propagation*, Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Information Theory, Boston, U.S.A, p. 117.
- [37] H. Paz, G.D. Castellanos, R.F. Alarcón, V.L. Weiss, A.R. Laverde, J.C. Rodríguez, J.C. y L.A. Rincón. *Diseño e implementación de la red domótica para un laboratorio de ingeniería electrónica*. Revista de Ingeniería y universidad, Pontificia Universidad Javeriana – Bogotá, Vol. 10, N° 2, Julio-Diciembre de 2006, pp. 223 – 231.
- [38] H. Paz, *Sistema de Comunicación de Datos a través de la Red Eléctrica*. Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería (Indexada C), N° 18, Noviembre 2003, pp. 136 – 147.

