

CONSIDERACIONES TÉCNICAS SOBRE TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN A TRAVÉS DE LA RED ELÉCTRICA DOMICILIARIA

HERNÁN PAZ PENAGOS

Ingeniero Electricista Universidad Nacional de Colombia, Ingeniero Electrónico Universidad Distrital Francisco José de Caldas (F.J.C) y Filósofo de la Universidad Santo Tomás de Aquino. Magíster en Teleinformática Universidad Distrital F.J.C. Docente del área de comunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito".
hpaz@escuelaing.edu.co.

Fecha de recepción: septiembre 15 de 2003

Clasificación del artículo: Reflexión
Fecha de aceptación: diciembre 04 de 2003

Palabras clave: Línea bifilar, filtro, técnica de modulación, protocolo

Keywords: Bifilar line, filter, modulation technique, protocol

Resumen

La evolución de la red de telecomunicaciones se ha convertido en el motor del crecimiento económico y de la nueva economía de servicios basada en la sociedad de la información; el aprovechamiento de la capacidad excedente del bucle eléctrico local del abonado permitirá resolver el actual cuello de botella de la parte de acceso a la red de telecomunicaciones y fomentar la difusión de servicios de banda ancha y de telefonía. En este sentido, el propósito del artículo es analizar y describir algunos aspectos técnicos y de ingeniería aplicados en el diseño e implementación de sistemas de transmisión de datos por la red AC. De este modo se pretende compartir experiencias y enriquecer el queha-

cer experimental e investigativo de la academia e industria sobre aplicaciones integradas de la vivienda.

Abstract

The telecommunications net evolution has become the motor for the economic growth and for the new services economy based on the information society; the use of the exceeding capacity of the subscriber's local electric curl will permit solving the current bottle neck regarding the access to the telecommunications net and promote the diffusion of the wide band and telephony services. In this sense, the purpose of the article is to analyze and describe some technical and engineering aspects applied

in the design and implementation of data transmission systems through the AC net. In this way, it is pretended to share experiences and enrich the experimental and investigative task of the academy and the industry over integrated applications at home.

1. Introducción

El presente artículo se estructura en cuatro temas; el primero es una visión general sobre la tecnología PLC: *Power Line Communications*; el segundo se ocupa de los aspectos técnicos y de ingeniería, incluyendo entre otros: modulación, frecuencias de transmisión, topología de la red, arquitectura, protocolos, códigos para detección y control de errores, ancho de banda, modos de transmisión, interferencias, etc; el tercero está dedicado al modelamiento matemático de la línea de transmisión, filtros, circuitos de acondicionamiento de la señal de datos y demodulador. El cuarto y último tema aborda algunas aplicaciones de transmisión de información a través de la red eléctrica domiciliaria.

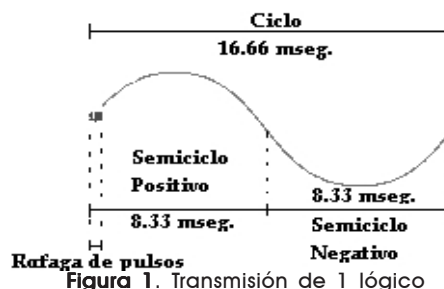
2. Visión General

• **PLC: *Power Line Communications*.** Es una tecnología de acceso que permite transmisión de información a través de la red de distribución eléctrica de baja tensión; por un canal distribuye la energía eléctrica de consumo y por otro transmite voz y datos. Los primeros proyectos fueron desarrollados entre los años 1976 a 1978, en Glenrothes (Escocia), por los ingenieros de *Pico Electronics Ltd.* y la empresa de sistemas de audio *BSR*; el propósito era controlar un dispositivo electrónico de forma remota. Como resultado de sus estudios y experimentación nació el protocolo X-10, que se ha convertido en un estándar internacional.

.....
¹ 60 bps en América y 50 bps en Europa.

• Especificaciones del protocolo X-10

- Permite la transmisión de datos a baja velocidad¹ por las líneas de baja tensión.
- La información a transmitir por la red AC es digitalizada.
- Las señales de control se sincronizan en el cruce por cero de la señal de 60 Hz.
- Las señales que representan la información digital se transmiten en ráfagas de pulsos de alta frecuencia: 120 kHz.
- Un 1 lógico es la presencia de una ráfaga de pulsos de 120 kHz durante un (1) milisegundo (mseg) del semiciclo positivo de la señal eléctrica de 60 Hz y la ausencia de la ráfaga en el semiciclo negativo (Ver Figura 1).



- Un cero lógico es lo contrario (Ver Figura 2).



Figura 2. Transmisión de 0 lógico

- Los bits 1 y 0 lógicos tiene en común la presencia y ausencia de ráfaga de pulsos en los semiciclos de la señal de 60 Hz; se diferencian en los tiempos de envío de la ráfaga de pulsos.

- Para enviar un comando se genera una trama que contenga el código de inicio, el identificador del módulo y el número de la llave.
- El código de inicio o *start code* se transmite a través de ráfagas especiales que le informan a todos los módulos que se va a enviar una trama X-10.
- Los comandos pueden llegar a todos los módulos, pero solo actúa aquel módulo al que va dirigido y esto se reconoce mediante la comparación de los bits de identificación del módulo con el identificador de módulo o *house code*, que viene en la trama.
- En el espacio de la trama “número de la llave” se envían los comandos orientados al control de los dispositivos, también llamados *control strings*; ellos son: encender, apagar, reducir, aumentar, encender todo y apagar todo.
- Cada ráfaga de pulsos se envía en el cruce por cero de cada semiciclo de la señal eléctrica de 60 Hz; por lo tanto, se requieren 11 ciclos para transmitir un comando en su totalidad.
- El tiempo que demora la transmisión de un comando es: $T = 11 \text{ ciclos} * 16,66 \text{ mseg/ciclo}$.

Hoy en día X-10 es un estándar y a la vez fabricante.

• **Ventajas potenciales**

- Reducción de costos asociados a la construcción y/o readecuación de infraestructura para la transmisión de datos.

- Dispositivos *plug and play*, modularidad
- Universalidad del medio, optimización de recursos y bajo costo.
- Soluciones de control inteligente con altas prestaciones: gestión integrada, seguridad técnica, ahorro energético y confort.

• **Inconvenientes**

- Las tecnologías existentes ofrecen bajas tasas de transmisión de datos.
- La señal modulada se atenúa y distorsiona mucho, debido a las altas potencias y al ruido existente en el canal.
- La limitación en el ancho de banda de los pares de cobre que se encuentran en el tendido eléctrico domiciliario; además, el recurso debe compartirse entre los usuarios.

2. Aspectos técnicos relacionados con la transmisión de datos a través de la red eléctrica domiciliaria

- *Bandas de frecuencia.* Existen comisiones internacionales² que reglamentan y regulan la transmisión de señales de información a través de la red eléctrica. CENELEC EN50065-1³ es la norma más precisa sobre el uso de bandas de frecuencia. En la Figura 3 se muestra la designación de las bandas y sus rangos de frecuencias.

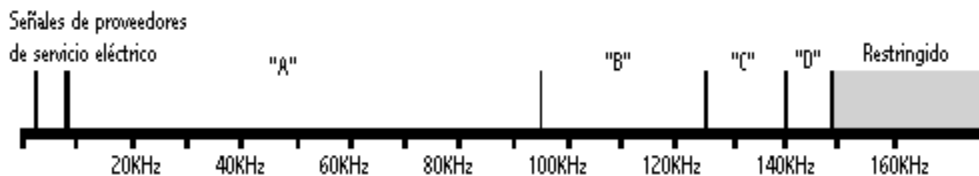


Figura 3. Designación y rangos de frecuencia para bandas de transmisión, según la norma CENELEC EN50065-1

² FCC (Federal Communications Commission), Industry Canadá, MPT Japón y CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica).

³ Rige en Estados Unidos, Europa y otros países del mundo.

Por debajo de la Banda A se encuentran todas las señales provenientes de los proveedores del servicio eléctrico, normalmente señales de 50Hz para Europa y 60Hz para América; en la Banda A se encuentran las aplicaciones de “utilidad eléctrica” (*electric utility*); la Banda B fue utilizada, inicialmente en Europa, para la transmisión de señales de comunicación, por sus numerosos beneficios en términos de seguridad, privacidad y ancho de banda; la Banda C es usada para aplicaciones de consumidor, en vivienda o industria. De acuerdo con la normatividad dictada por FCC, cualquier frecuencia en el rango de 100 kHz a 400 kHz, puede ser usada para la transmisión de información modulada por la red eléctrica.

- *Anchos de banda.* El tendido eléctrico domiciliario está constituido por pares de cobre que tienen capacidad en ancho de banda para guiar señales eléctricas desde el nivel DC hasta 300 kHz. Esta característica de la red eléctrica limita la transmisión de datos a velocidades bajas y medias, y de cierto tipo de información (únicamente voz, datos).
- *Interferencias entre la señal de 60 Hz y los datos.* En la red eléctrica domiciliaria, la señal eléctrica de 60 Hz puede estar distorsionada y causar interferencia a los datos. Las causas de la distorsión armónica⁴ son la presencia de cargas no lineales en el hogar y/o la contaminación de la señal procedente del suministro eléctrico debido a la industria (rectificadores, inversores, fuentes conmutadas de computadores, convertidores de frecuencia y cicloconvertidores). Otra causa de interferencia a los datos son los transitorios⁵. Sin embargo la interferencia se puede disminuir modulando los

datos a frecuencias entre 100 kHz y 500 kHz.

- *Topologías.* Son las configuraciones de interconexión que pueden tomar los módulos a comunicarse a través de la red eléctrica domiciliaria. Se clasifican en punto a punto y multipunto (topologías en bus, estrella, anillo y malla).
- *Modos de transmisión.* El sistema electrónico de comunicación a través de la red eléctrica domiciliaria se puede diseñar para transmitir los datos en una dirección: *modo simplex*; en ambas direcciones, pero no al mismo tiempo: *modo half duplex*; en ambas direcciones y al mismo tiempo: *modo full duplex*.
- *Transmisión asíncrona o síncrona.* En la transmisión asíncrona se agregan dos elementos de señal por cada palabra de código: un espacio de arranque o *start* y una marca de terminación o *stop*. Para enviar un dato se inicia la secuencia de temporización en el dispositivo receptor con el elemento de señal y al final se marca su terminación. La transmisión de datos por la red eléctrica domiciliaria también puede ser síncrona serial⁶ o paralela.
- *Transmisión a dos hilos: línea-tierra o línea-neutro.* En redes eléctricas domiciliarias en donde el conductor de tierra está presente y es accesible, se selecciona la transmisión línea-tierra; para este caso, las señales de comunicación son acopladas a la línea con referencia al conductor de tierra. La tierra es usada como la línea de retorno de la señal de comunicación. La ventaja que ofrece este procedimiento es la menor atenuación de las señales transmitidas, debido a que colisionan menos con la señal de

⁴ Los niveles de distorsión armónica, de las formas de onda de voltaje y corriente, se pueden clasificar en dos categorías: la primera, debido a la presencia de señales múltiples de la señal fundamental; la segunda, producida por señales con frecuencias menores (0,1 – 25 Hz) a la señal de 60 Hz.

⁵ Son sobretensiones de corta duración (menos de 1 mseg.) y elevadas corrientes.

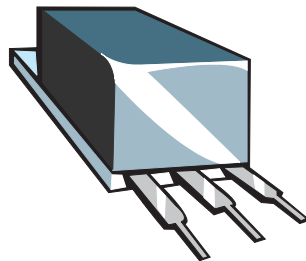
⁶ Esto significa que antes de transmitir una palabra de código se envía la señal de reloj.

suministro eléctrico que se transmiten entre línea-neutro. En redes de tendido eléctrico domiciliario en donde la conexión de tierra segura no existe, se utiliza la transmisión a dos hilos: línea-neutro.

- *Circuito de protección:* entre los módulos transmisor-red eléctrica y receptor-red eléctrica deben colocarse filtros de corriente y voltajes para proteger los módulos contra sobre corrientes y sobre voltajes provenientes de la red eléctrica.
- *Efectos secundarios de la conexión de cargas:* en el momento de conectar un electrodoméstico a la red eléctrica se generan gran cantidad de armónicos que llegan hasta una frecuencia de 1.250 Hz. Por ejemplo, la puesta en marcha de una licuadora genera muchos armónicos, mientras que el bajo consumo de potencia del motor de una batidora no induce niveles de ruido considerables a la red eléctrica.
- *Modulación.* La estrategia que utiliza la tecnología PLC para transmitir datos por la red AC consiste en enviar ráfagas de pulsos modulados en ASK a 120 kHz y con una potencia de 0,5 W. La transmisión se realiza en los cruces por cero para evitar el ruido y asegurar que en tales instantes de tiempo solo esté presente el dato.

Otras técnicas de modulación se pueden clasificar en:

- *Modulación con portadora única:* usa una frecuencia portadora para transmitir secuencialmente los símbolos; puede presentar interferencia intersímbolo en la transmisión.
- *Modulación FDM (Frequency Divided Modulation):* la idea básica es representar la señal a enviar como la suma de dos funciones linealmente independientes: seno y coseno; esto se logra mediante la transformada de Fourier.
- *Spread spectrum (espectro esparcido):* es un grupo de técnicas (secuencia directa: DSSS; por saltos de frecuencia: FHSS, etc.) que trabajan bajo CDMA; tienen las siguientes características: se puede cambiar los esquemas de modulación de QPSK a BPSK, presenta alta capacidad de usuarios debido a la extensa cantidad de códigos para cada usuario y permite variar el espectro ensanchado a causa de la demanda requerida en la transmisión.
- *GMSK:* es una técnica de modulación digital binaria simple. Consiste en aplicar un prefiltrado gaussiano para reducir los lóbulos secundarios que aparecen en el espectro MSK, limitando así el ancho de banda espectral ocupado en la transmisión.
- *Modulación con múltiple portadora.*
- *Modulación OFDM (Orthogonal Frequency Divided Multiplexing):* es una modulación por multiplexación de frecuencias ortogonales.



La señal de datos se divide en paquetes que se modulan en varias portadoras QAM y PSK (con un estudio previo del ruido en las subbandas de frecuencia), se adaptan a un régimen binario y se transmiten en forma paralela maximizando la tasa de bits y minimizando los errores por ruido.

- *Técnicas de detección y corrección de errores.* Se considera error al cambio de información que va en el medio y al acceso errático del dispositivo en la red de distribución. En la transmisión de datos sobre la red AC no se han desarrollado muchas innovaciones; se emplean

técnicas de codificación de canal como en cualquier red de datos punto a punto o multipunto, tales como: códigos de concatenación convolucional, código *reed-solomon*, distancias de *hamming* o distancias euclidianas (códigos diversificados o distribuidos) y paridad. Es importante tener en cuenta que la técnica de corrección de error también usa optimizadores⁷ para casos extremos de atenuación y pérdida de información debido a las condiciones del medio.

- *Arquitectura.* En la arquitectura de red existen dos subredes (ver Figura 4).

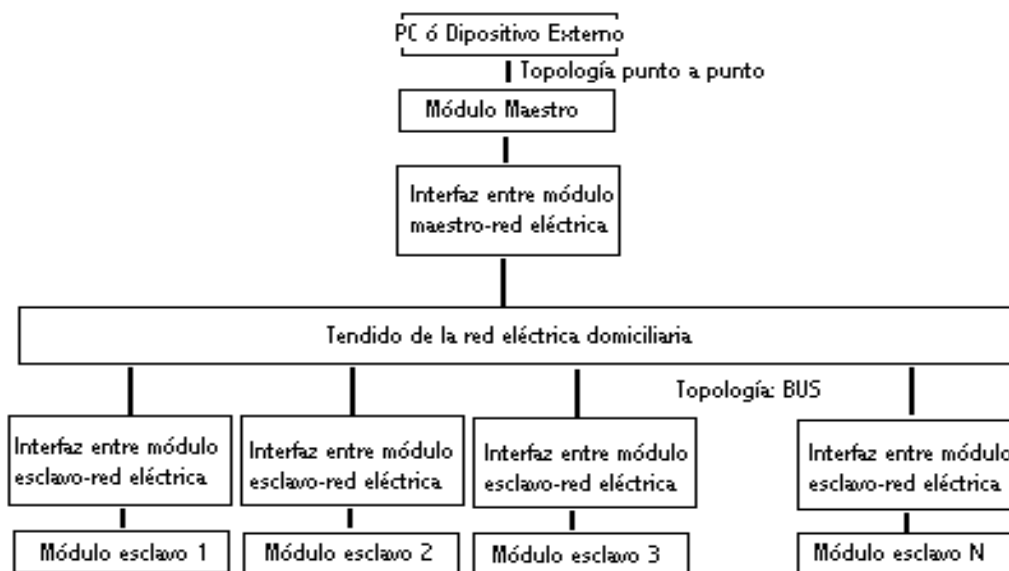


Figura 4. Arquitectura básica

La primera subred interconecta dos entidades: computador (dispositivo externo) con el módulo maestro; la configuración es serie punto a punto, el modo de transmisión es *half-duplex* y la comunicación cumple con la norma RS-232. La segunda subred tiene una configuración punto-multipunto, con topología bus; el medio que permite la interconexión es la línea bifilar del

tendido eléctrico domiciliar; el protocolo X-10 o protocolo propietario define la norma de comunicación en esta subred con un modo de transmisión *half-duplex*.

Un sistema de transmisión de información a través de un medio hostil, como la red eléctrica domiciliar, debe tener una capa física robusta

.....
⁷ Son también llamados optimizadores los repetidores y algunas técnicas de modulación mejoradas, como OFDMA.

que especifique la modulación, la codificación y los formatos básicos de los paquetes, y un protocolo eficiente de control de acceso al medio (MAC), que regule el acceso a los clientes.

El diagrama de bloques que representa el acople entre los módulos transmisor/receptor con la red eléctrica (fase-neutro) se puede observar en la Figura 5.

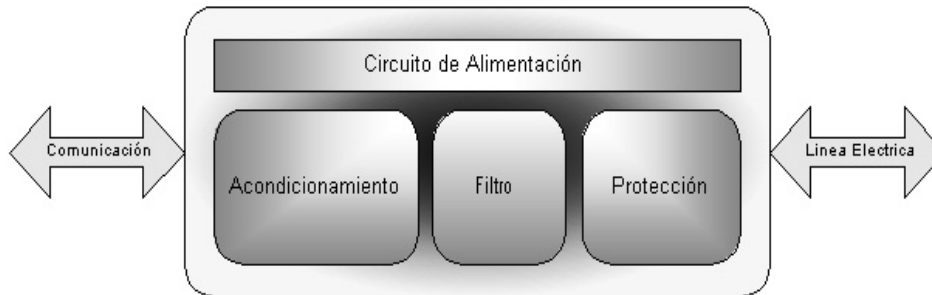


Figura 5. Modelo de bloques del acople

En este esquema se propone un modo de transmisión bidireccional; el bloque de alimentación polariza los circuitos que así lo requieran; el bloque de protección evita la destrucción de los módulos transmisor/receptor por señales de sobre tensión o sobre corriente; el filtro elimina la señal de 60 Hz que proceda de la red eléctrica y permite la inyección de la señal de datos modulada hacia dicha red; los circuitos de acondicionamiento amplifican los niveles de señal que arriban y adecúa los datos modulados de salida.

• *Protocolos:*

- *CEBus*: usa un protocolo *peer-to-peer*, con el cual cada elemento de la red tiene acceso al medio en cualquier instante. Aplica CSMA/CDCR (modificación del tipo acceso múltiple con detección de portadora CSMA) para resolver las colisiones que suelen ocurrir en el acceso al medio. La ventaja de CSMA/CDCR es la optimización del canal, permitiendo usar el medio por varios nodos, simultáneamente, sin interferencias; los paquetes de datos se transmiten a 10 kbps, empleando una técnica de espectro ensanchado (SS)

patentada; cada paquete contiene las direcciones de emisor y receptor.

- *LonWorks*: es un protocolo *peer-to-peer* desarrollado por *Echelon Corporation*; implementa técnicas CSMA, permite tasas de transmisión de 4 kbps y emplea esquemas de modulación por espectro ensanchado (125-140 kHz, en BPSK).

La ventaja de *LonWorks* sobre *CEBus* es su universalidad de uso, debido a las frecuencias que emplea.

3. Modelamiento matemático de un sistema de transmisión de datos a través de la red eléctrica domiciliaria

3.1 Caracterización de la línea de transmisión.

Las características de una línea de transmisión están determinadas por sus propiedades eléctricas⁸ y físicas⁹. En la red eléctrica domiciliaria se encuentra una línea de transmisión con las siguientes especificaciones: línea bifilar, conductor de cobre, tamaño nominal del conductor: 12 (calibre 12), diámetro del cobre desnudo: 2,03

⁸ Conductividad de los alambres y la constante dieléctrica del aislamiento.

⁹ Diámetro del alambre y distancia entre conductores.

mm, conductores recubiertos con caucho¹⁰ y separación entre centros de 1 cm.

Las propiedades eléctricas y físicas de una línea de transmisión determinan las constantes eléctricas primarias y las constantes secundarias.

- *Constantes eléctricas primarias:* se distribuyen uniformemente en toda la línea y son: R (resistencia de corriente directa en serie), L (inductancia en serie), C (capacitancia en paralelo) y G (conductancia en paralelo) (ver Figura 6).

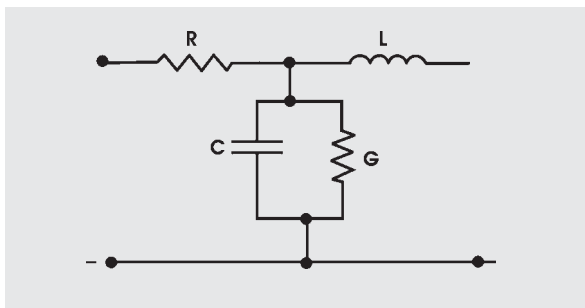


Figura 6. Constantes eléctricas primarias por unidad de longitud

Para el cálculo de las constantes eléctricas primarias, los parámetros R, L, C y G por unidad de longitud, se encuentran a partir de la permitividad-conductividad del dieléctrico y del conductor. Los fabricantes de material aislante establecen que el coeficiente de permitividad eléctrica relativa “ ϵ_r ” para el polietileno es de 2,27.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (\text{Ecuación 1})$$

La permitividad eléctrica “ ϵ ” para el polietileno es 20×10^{-12} C/m.

La conductividad del dieléctrico “ σ_d ” está determinada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_d \approx \omega \times \epsilon \times \tan \delta \text{ (S | m)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

.....

¹⁰ Material plástico que se obtiene por polimerización del etileno, es decir, polietileno.

En la anterior ecuación:

- ω : frecuencia; ϵ : permitividad;
- $\tan \delta$: tangente - pérdidas

En la práctica, para un rango de frecuencias de 50 Hz a un 1 GHz se tiene que:

$$0,2 \times 10^{-3} \leq \tan \delta \leq 0,3 \times 10^{-3}$$

Puede asumirse que la tangente de pérdidas es constante e igual a $0,2 \times 10^{-3}$, a una frecuencia de portadora de 100 kHz a 200 kHz.

La conductividad eléctrica “ σ ” para el cobre es de $5,8 \times 10^7$ S/m y el coeficiente de permitividad magnética “ μ ” es $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Si la profundidad de penetración “ l ” es menor que el radio del conductor (1 mm), los cálculos de los parámetros para la línea de transmisión se realizan con las expresiones para alta frecuencia; de lo contrario, se usan las fórmulas para baja frecuencia.

$$l = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

- *Constantes secundarias:* son la impedancia característica y el coeficiente de propagación, y se calculan a partir de las cuatro constantes primarias. La *impedancia característica* es la impedancia vista hacia una línea de longitud infinita, o la impedancia vista hacia una línea de longitud finita que termina en una carga puramente resistiva igual a la impedancia característica de la línea.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El *coeficiente de propagación* se usa para expresar la atenuación¹¹ y el desplazamiento de fase¹² por unidad de longitud de una línea de transmisión. El coeficiente de propagación o constante de propagación es una cantidad compleja y se define como sigue.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

A frecuencias intermedias y de radio, $\omega L > R$ y $\omega C > G$, entonces:

$$\alpha = \frac{R}{2Z_0} + \frac{GZ_0}{2}; \quad \beta = \omega\sqrt{LC} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

3.2 Propagación de ondas en líneas de transmisión

- *Velocidad de propagación*: es la velocidad con la que se propaga una onda electromagnética por la línea eléctrica domiciliaria; varía de acuerdo con su inductancia y capacitancia.

Al aumentar la frecuencia de transmisión, la velocidad de fase tiende al valor que tendría la velocidad de propagación en un medio con $\epsilon_r = 2,27$ y sin pérdidas.

$$V_{fase} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\beta} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Si la distancia se normaliza a un metro, la velocidad de propagación de un bit modulado en un hertz, en una línea bifilar sin pérdida es:

$$V_{propagación} = \frac{1m}{\sqrt{L * C}} (m | s) \quad \text{(Ecuación 8)}$$

.....

¹¹ Hay varias formas en las que se pierde la energía en una línea de transmisión: pérdidas en el conductor, por radiación, por calentamiento del dieléctrico y por acoplamiento. La atenuación "a" aumenta con la frecuencia.

¹² Indica la rapidez del cambio de fase de la onda conforme se propaga.

¹³ Es conveniente utilizar en el acople filtro pasivos con el fin de evitar fuentes de polarización duales.

- *Tiempo de retardo*: está dado por la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{\ell}{V_{propagación}} [s] \quad \text{(Ecuación 9)}$$

La velocidad de transmisión de ciclos por bit es el cociente entre la frecuencia de la portadora (Hz) y la velocidad de los datos (bps); en consecuencia el retardo es:

$$t_{d-ciclos|bit} = \frac{fc}{bps} * t_d [s] \quad \text{(Ecuación 10)}$$

El tiempo de retardo total se encuentra con la siguiente fórmula:

$$t_{dtotal} = n_{bits} * t_{d-ciclos|bit} * d [s] \quad \text{(Ecuación 11)}$$

El módulo transmisor de datos sobre la red eléctrica domiciliaria tendrá que esperar dos veces el tiempo de retardo total por razones de ida de la señal y confirmación de respuesta.

3.3 Justificación matemática del acople a la línea de transmisión

El acople es un circuito que adapta la señal de datos modulada por el transmisor para que sea inyectada a la red eléctrica, y a la vez le permite detectar señales de retorno. Para acoplar el módulo transmisor con la red eléctrica domiciliaria se requiere un filtro pasa altas pasivo¹³, con el fin de atenuar la señal de 60 Hz y dejar pasar la señal de datos modulada.

La reactancia capacitiva que opone el condensador¹⁴ a una señal de corriente alterna se calcula así:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Con una resistencia de carga baja¹⁵ se puede simular en Spice la repuesta del filtro para las señales eléctrica de 60 Hz y de datos modulada. Conocido el nivel de voltaje de la señal de salida se puede encontrar la atenuación del filtro con la siguiente fórmula:

$$A = 20 \text{Log} \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

El comportamiento en frecuencia del filtro se puede examinar en la gráfica de su función de transferencia.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\tau_s}{\tau_s + 1} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\tau_s = R * C$$

3.4 Circuito de acondicionamiento de la señal de datos modulada-recuperada

Se utiliza un amplificador lineal con transistor para regenerar la señal de datos modulada que fue transmitida por la red eléctrica domiciliaria.

3.5 Demodulación de la señal de información

El circuito de demodulación depende de la técnica de modulación utilizada en el otro extremo. Para demodular una señal FSK¹⁶ se requiere un lazo de fase cerrada: PLL (Couch, 1997:

.....

¹⁴ Se diseña el circuito con un condensador con impedancia mínima a frecuencia de los datos; el voltaje de ruptura del condensador comercial debe ser superior al nivel de voltaje de la señal de 60 Hz.

¹⁵ Se comprobó en la simulación que con una resistencia de carga del filtro de 80 W pasaba buena parte de la señal de 60 Hz; No obstante se utilice una resistencia de carga baja es recomendable hacer doble filtrado.

¹⁶ Modulación digital por desplazamiento de frecuencia.

¹⁷ Modulación digital por desplazamiento de amplitud o On-Off Keying (OOK) es una las técnicas más empleadas.

269); para demodular ASK¹⁷ es conveniente utilizar un filtro pasa bajos. Los datos recuperados atenuados y distorsionados se pueden regenerar a través de un conmutador con transistor trabajando en corte y saturación.

4. Aplicaciones de transmisión de información a través de la red eléctrica domiciliaria

- *Internet en alta tensión.* Fue un proyecto desarrollado por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia (Malaver y Moreno, 2001), vinculados al grupo de investigación en teleinformática GITUM. El acceso a Internet mediante la red AC consiste en construir una Intranet con los usuarios que se encuentran del otro lado del transformador de distribución, reutilizando la red de tendido eléctrico domiciliario. Esta idea es aplicada en países de Europa, logrando velocidades de 1,6 a 30 Mbps.
- *Proyecto PLC.* ENDESA, a través de su filial especializada en nuevas tecnologías, *Endesa Net Factory*, ha puesto en marcha el proyecto PLC, para impulsar el desarrollo de esta tecnología y de sus aplicaciones. Inicialmente realizó dos pruebas piloto en Barcelona y Sevilla transmitiendo a 50 familias y negocios servicios de telefonía y acceso a Internet banda ancha con resultados satisfactorios. En el 2002 validó el funcionamiento y la viabilidad tecnológica en entornos reales a gran escala en la ciudad de Zaragoza. Actualmente ENDESA lleva a cabo pruebas piloto de transmisión de voz y datos por la red AC en Chile y México.

- *Monitoreo de alarmas.* Consiste en la transmisión de datos sobre la red eléctrica domiciliar; a cada dispositivo conectado a la red tipo bus se le asigna una dirección IP, como si fuera una red *ethernet*; los datos se modulan en ASK y la transmisión se controla mediante un microcontrolador.
- *Power Line Communications: PLC.* Algunas compañías electrificadoras utilizan la tecnología PLC para recoger datos de consumo y facturación, con la desventaja de la baja velocidad (60 bps) y la unidireccionalidad de la transmisión (hacia la compañía); sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías y dispositivos ha permitido la transmisión de información a tasas de 2, 5, 10 y 100 Mbps, permitiendo la transmisión de multimedia y la implementación de redes privadas virtuales: VPN
- *Interconexión de los sistemas telefónico y eléctrico.* La aplicación consiste en tomar las señales telefónicas que llegan a una vivienda y retransmitirlas a través de la red eléctrica de la misma, dándole la facilidad de ubicuidad al usuario: utilizar el teléfono en cualquier sitio de la vivienda en donde se encuentre una toma eléctrica (ver Figura 7).

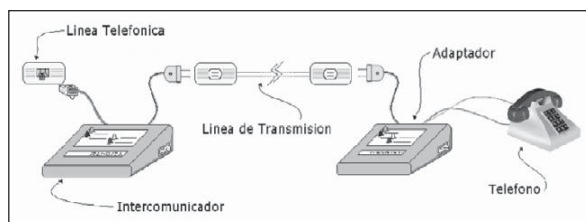


Figura 7. Diagrama de conexiones de la línea telefónica con la red eléctrica.

- *Sistema domótico de altas prestaciones y baja inversión.* En el área de comunicaciones del programa de Ingeniería Electrónica de la *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito* se realizan estudios teóricos y experimentales sobre aspectos técnicos de instalación y configuración de aplicaciones domóticas escalables,

flexibles y seguras que ofrezcan un amplio abanico de funciones.

Una experiencia desarrollada en laboratorio fue el análisis y modelamiento del ruido en la infraestructura eléctrica de los laboratorios del edificio G de la Universidad citada; en la Figura 8 se observa la transmisión de un byte de información por la red AC sin presencia de cargas.

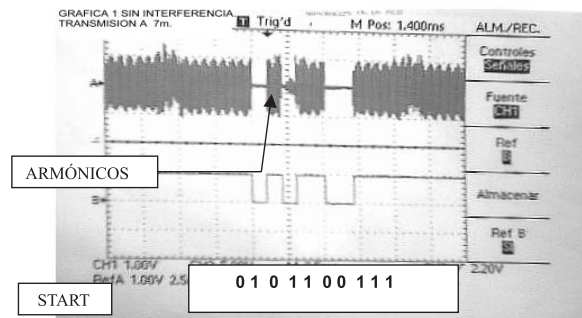


Figura 8. Transmisión de un byte de información por la red eléctrica del laboratorio del edificio G sin presencia de cargas

Posteriormente se transmitió el mismo byte de información en presencia de varias cargas: motor universal de un taladro eléctrico (carga no sincrónica con la frecuencia de la red AC), fuentes de computadores, licuadoras, rectificadores trifásicos y otros transmisores.

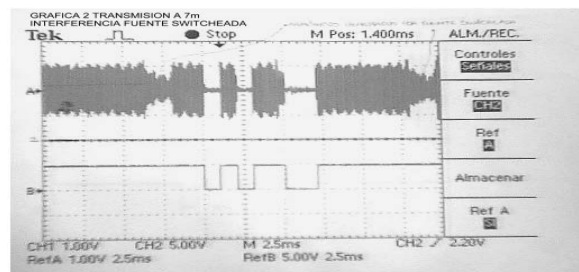


Figura 9. Interferencias por fuente switchcada del computador

La conmutación de la iluminación y de otras cargas generan ruido impulsivo no sincrónico.

En las Figuras 8, 9 y 10 se destaca el ruido aditivo al canal cuando se transmite un byte de información. Las características del ruido permiten deducir tres componentes: a) ruido impulsivo: definido como aquellas perturbaciones presentes en la red eléctrica durante un fracción de tiempo pequeña. La amplitud de dichos impulsos llegaron a alcanzar hasta 56 Vp y eran eventos aislados generados por el encendido y apagado de dispositivos eléctricos que sucedían a la frecuencia de la red (60 Hz) ó armónicos superiores; b) ruido tonal: fue observado en el dominio de la frecuencia y caracterizado por ser de banda estrecha produciendo una ligera desviación de frecuencia de los datos modulados; c) ruido de fondo: es el remanente de la eliminación del ruido impulsivo y tonal, se destaca porque su potencia decrece con el aumento de la frecuencia.

Modelamiento del ruido: el ruido impulsivo se caracteriza por la amplitud, ancho y tiempo entre llegadas; el ruido tonal genera intermodulación y el ruido de fondo es típicamente gaussiano.

El modelado del ruido aditivo se basa en un proceso ciclo estacionario de valor medio nulo y varianza periódica (período igual al semiciclo de la señal de 60 Hz); el valor cuadrático medio del ruido puede aproximarse a la siguiente expresión:

$$\sigma^2(t) = \sum_{K=0}^{K-J} A_K |\sin(2\pi f_{AC} t + \theta_K)|^{A_{K-J}}$$

(Ecuación 15)

El valor de los parámetros presentes en la ecuación se determina a partir de las medidas experimentales realizadas con la ayuda del osciloscopio digital.

Cuando una fuente de ruido está situada cerca del receptor y la señal modulada se atenúa, por causa de otras señales interferentes en fase o fre-

cuencia, o por la presencia de cargas de baja impedancia en la línea, la fuente de ruido local puede exceder la tolerancia de la relación señal a ruido y degradar la transmisión generando datos erróneos.

5. Conclusiones

- La transmisión de datos por la red eléctrica es interferida por las señales armónicas de 60 Hz y por otras señales indeseables; además, la impedancia de la red eléctrica varía temporalmente con el encendido y apagado de dispositivos sobre la línea y por el uso de elementos no lineales (diodos, transistores, etc.) en los módulos de transmisión y recepción.
- La modulación digital por desplazamiento de fase diferenciada DPSK mejora el funcionamiento de un sistema de transmisión de datos en redes eléctricas AC donde suceden cambios rápidos de fase.
- La transmisión de señales de información (voz, datos, video, etc.) que requieren transmisión en tiempo real o gran ancho de banda en el medio, implica técnicas eficientes de codificación, compresión y modulación; la ingeniería de comunicaciones debe explorar otras técnicas de modulación que permitan la transmisión de datos a través de la red eléctrica domiciliaria con altas tasas de transmisión y sin problemas de ruido, interferencia y distorsión a la señal de 60 Hz y de ésta a los datos modulados.
- En las comunicaciones *powerline* existen dos factores importantes que deben ser considerados: conseguir una alta eficiencia espectral de transmisión a la hora de escoger un esquema de modulación, y obtener una tasa de error de *bit* (BER) pequeña. Para lograr estos objetivos se pueden utilizar las técnicas de modulación p/4-DPSK y GMSK, que son robustas en canales altamente ruidosos, como es el caso de las comunicaciones por la red AC.

- El mercado colombiano para este tipo de desarrollos tecnológicos es muy limitado; la única opción que existe es la importación directa de elementos con protocolo X-10. Es importante que la academia se interese por este tema e involucre a asociaciones de constructores, industria eléctrica y electrónica, informática, compañías suministradoras de energía, etc., para que se puedan crear sistemas domóticos y otras aplicaciones de altas prestaciones y baja inversión.
- La implementación de un protocolo propietario para la transmisión de datos por la red eléctrica domiciliaria debe tener en cuenta las siguientes consideraciones, entre otras: identificar el módulo esclavo que se encuentra conectado a la red, controlar errores, evitar desbordamientos, controlar flujo, direccionar datos, establecer límites de las tramas, evitar congestión en la red, garantizar una calidad de servicio mínima, etc.
- El diseño y construcción de un sistema de comunicación de datos a través de la red eléctrica domiciliaria involucra la electrónica, la electricidad y la informática; la velocidad de los datos está limitada por el ancho de banda del cable bifilar y por las técnicas de codificación y modulación empleadas; las frecuencias de transmisión se seleccionan según la norma CENELEC EN50065-1, la cobertura es local domiciliaria, la inmunidad frente a ruido e interferencias depende de la frecuencia de transmisión y de la utilización de un tipo de transmisión a dos hilos: línea-tierra o línea-neutro; en cuanto a costos, el sistema es una alternativa económica y de rápida instalación para la transmisión de datos.

TE



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CUEVAS M. Juan Carlos, et al; *El protocolo X10: una solución antigua a problemas actuales*. Simposio de Informática y Telecomunicaciones, 2002; Sevilla-España
- [2] DAVID prop, et al; *Interoperability of consumer control and monitoring networks over the AC power line*; Vol. 6, N° 6, agosto de 1996
- [3] GUSMAO, A. et al; *Comparison of two modulation choices for Broadband wireless communication*, IEEE vehicular technology, conference 2000 (VTC'2000), Tokio Japan, Vol 2
- [4] JOEL H., LAURENT H., *Application Note, ST7537 Power Line MODEM Application*, SGS-Thomson, 1995
- [5] MALAVER, H., MORENO, A. *Internet en alta tensión*. Universidad Nacional de Colombia, 2001
- [6] NERI VELA, Rodolfo. *Líneas de Transmisión*, Ed. Mc Graw-Hill, 1ª. ed., 1999
- [7] Norma UNE-EN 50065-1, *Transmisión de señales por la red eléctrica de baja tensión en la banda de frecuencia de 3 KHz a 148.5 KHz, Parte 1: reglas generales, bandas de frecuencia y perturbaciones electromagnéticas*, Versión en español de la norma europea EN 50065-1, enero de 1991

- [8] OSAMU Ohno, et al; *A simple model of cyclostationary Power Line Noise for communications system*, Proceedings of 1998 International Symposium on Power Line Communications and its Applications, March 24-26, 1998, Soka University, Tokio, Japan
- [9] PROAKIS, J.G., *Digital Communications*, McGraw-Hill, New York, 1995
- [10] SAVANT, C. J. et al, *Diseño Electrónico. Circuitos y Sistemas*, Ed. Pearson Educación, 3ª. ed., 2000
- [11] SHWEHDI M. H. et al; *A power line data communication Interface using spread spectrum technology in home automation*, Vol. 11, N° 3, July de 1996
- [12] TANENBAUM, Andrew S. *Redes de Computadoras*, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, 3ª. ed., 1997
- [13] TOMASI, WAYNE. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, 2ª. ed. 1996
- [14] *Line interface circuit for power line communication*. International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT). International Publication Number: WO 03/023990 A1.
- [15] *Power line communication circuit*. International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT). International Publication Number: WO 03/028227 A1.
- [16] WEILIN Liu, et al; *Broadband PLC access systems and field deployment in European power Line Networks*, Vol 41, N° 5, May 2003

INFOGRAFÍA

- [17] Domotica.Net (junio del 2003), Sistema X-10 (en línea), disponible en: <http://www.domótica.net/511%27i.htm>
- [18] Casa inteligente.com (junio del 2003), ¿Qué es X-10? (en línea), disponible en: <http://casainteligente.com/x10/x10.htm>
- [19] Domótica soluciones integrales (junio del 2002), HomePlug (en línea), disponible en: <http://www.domótica.net/HomePlug.htm>
- [20] Automatización de edificios y residencias (agosto del 2002), Protocolo de transmisión PLC X-10 (en línea), disponible en: <http://www.electrodepot.com/x10/disposit.htm>

