

Análisis de sensibilidad al ruido en un sistema de comunicación sobre línea eléctrica para aplicaciones en Domótica empleando el protocolo X-10

Chan F.¹, Núñez K., Torres E., Ortigón J., Aguilar O., Toral H.

Fecha de recepción: 24 de febrero de 2011 – Fecha de aprobación: 22 de noviembre de 2011

RESUMEN.

La domótica se emplea para el control y automatización inteligente de la vivienda. Aporta confort, comunicación, seguridad y un uso eficiente de la energía. Promueve el ahorro de agua, electricidad y combustibles. Existe una diversidad de cargas que pueden ser controladas como son: sistemas de iluminación, aire acondicionado, sistemas de calefacción, bombas, motores, etc.

Este trabajo presenta el análisis de la sensibilidad al ruido en un sistema de comunicación sobre la red eléctrica (PLC) para una aplicación de Domótica. Se presentan los resultados experimentales de un sistema, basado en microcontrolador, así como el proceso de diseño e implementación del protocolo X-10.

Palabras clave: domótica, control, comunicaciones, microcontroladores, ruido

Noise sensitivity analysis in a communication system over powerline for home automation applications using the X-10 protocol.

ABSTRACT.

Home automation is used for control and smart management of housing. It provides comfort, communications, security, and an efficiently management of energy. In this way, it promotes water, electricity and fuel conservation. There are a variety of loads to be controlled such as: lighting, air conditioning, heating systems, pumps, motors, etc. This paper presents a noise sensitivity analysis in a Powerline Communications (PLC) system of a home automation application. There are shown the experimental results of a system with microcontroller, as well as the process of designing and implementing the X-10 protocol.

Keywords: automation, control, communications, microcontrollers, noise

¹ División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, freddy@uqroo.mx

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1º de julio de 2012. Este artículo de investigación es parte de **Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**, Vol. 15, No. 3, 2011, ISSN 1665-529X.

1 INTRODUCCIÓN

El origen de la domótica se sitúa en Europa en los años 70 con el surgimiento del protocolo X-10. A partir de ahí, comenzó su evolución y comenzaron a surgir los distintos estándares e infraestructuras.

En la actualidad existen diversos sistemas de comunicación domóticos, los cuales se clasifican dependiendo del canal utilizado para dicha transmisión, (Rómero *et al.* 2007, De Palencia *et al.* 2001):

1. Sistemas tradicionales donde emisor y receptor están unidos físicamente. Estas soluciones requieren infraestructura previa, debiendo ser previstos con anterioridad a la construcción del edificio, de forma que sea posible la introducción del cableado necesario.
2. Sistemas por radio frecuencia. Estos métodos presentan como ventaja el hecho de que no necesitan cableado. Sin embargo, tienen como inconveniente la limitación en el alcance, debido a su elevada susceptibilidad a las perturbaciones del medio, o simplemente causadas por la propia distribución de las paredes del edificio.
3. Sistemas basados en corrientes portadoras. Permiten comunicar los diversos elementos utilizando las líneas eléctricas existentes como soporte de información.

X-10 es uno de los protocolos más antiguos que se están usando en aplicaciones domóticas (Allen 2005). El objetivo era transmitir datos por las líneas eléctricas de baja tensión a bajo costo, aunque la velocidad fue muy baja (60 bps en EEUU y 50 bps en

Europa).

El formato de codificación X-10 es un estándar de transmisión por corrientes portadoras (Power Line Communication.) que, como tal, permite que todos los equipos que lo utilizan sean compatibles entre sí (Held 2006). El elemento básico y fundamental de la técnica de corrientes portadoras es el aprovechamiento doble de la instalación eléctrica ya existente como conductor de energía y de información.

La transmisión de señales se sincroniza con el punto de cruce en cero de la corriente eléctrica (de 50Hz a 60Hz). Se intenta transmitir lo más cerca del punto cero como sea posible, pero se acepta una variación de 200 microsegundos desde el cruce por cero. Un “1” binario del mensaje se representa por un pulso de 120 KHz durante 1 ms, en el cruce por cero de la señal de red, y el “0” binario del mensaje se representa por la ausencia de ese pulso de 120 KHz. Ver Figura 1.

Un mensaje completo en X-10 está compuesto por el código de inicio 1110, seguido por *código de casa* y por un *código de control*. El código de control puede ser una dirección de unidad o un comando. El Protocolo X-10 puede utilizar hasta 16 unidades por cada dirección de casa lo cual nos daría un total de 256 unidades. En la Tabla 1 se pueden apreciar las direcciones de unidad con sus respectivos códigos de control de igual manera se muestra la dirección y el código de casa. Las 16 unidades que maneja el protocolo X-10 se pueden controlar con diversos comandos, estos se listan en la Tabla 1.

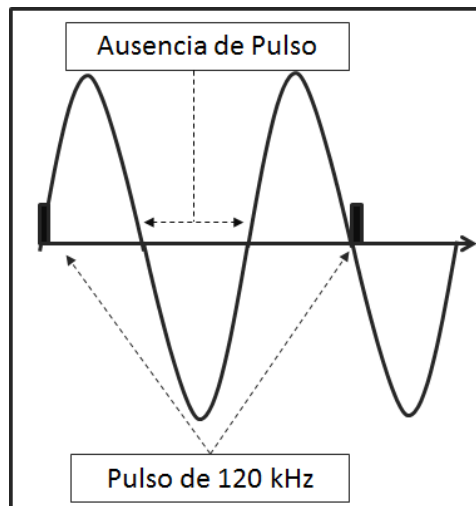


Figura 1. Envío de un “1” y un “0” binario.

Tabla 1. Elementos de una trama del protocolo X-10

Dirección y códigos de casa					Direcciones de unidad y códigos control					Comandos y códigos de control						
Dirección de casa	Códigos de casa				Dirección de unidad	Códigos de control					Comandos	Códigos de control				
	H1	H2	H4	H8		D1	D2	D4	D8	D16		D1	D2	D3	D4	D5
A	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	Encender todas las unidades	0	0	0	0	1
B	1	1	1	0	2	1	1	1	0	0	Apagar todas las unidades	0	0	0	1	1
C	0	0	1	0	3	0	0	1	0	0	Encender	0	0	1	0	1
D	1	0	1	0	4	1	0	1	0	0	Apagar	0	0	1	1	1
E	0	0	0	1	5	0	0	0	1	0	Atenuar la intensidad	0	1	0	0	1
F	1	0	0	1	7	0	1	0	1	0	Aumentar la intensidad	0	1	0	1	1
G	0	1	0	1	8	1	1	0	1	0	Apagar todas las luces	0	1	1	0	1
H	1	1	0	1	9	0	1	1	1	0	Código extendido	0	1	1	1	1
I	0	1	1	1	10	1	1	1	1	0	Petición de saludo	1	0	0	0	1
J	1	1	1	1	11	0	0	1	1	0	Aceptación de saludo	1	0	0	1	1
K	0	0	1	1	12	1	0	1	1	0	Atenuación preestablecida	1	0	1	X	1
L	1	0	1	1	13	0	0	0	0	0	Datos extendidos	1	1	0	0	1
M	0	0	0	0	14	1	0	0	0	0	Estado = On	1	1	0	1	1
N	1	0	0	0	15	0	1	0	0	0	Estado =Off	1	1	1	0	1
O	0	1	0	0	16	1	1	0	0	0	Petición de Estado	1	1	1	1	1
P	1	1	0	0												

Para construir una red de dispositivos X-10, a cada dispositivo se le asigna una identificación consistente de un código de 9 bits, donde los primeros 4 bits corresponden al “código de casa” y los otros 5 bits al “código de dispositivo”.

El “código de inicio” de la trama X-10 siempre es representada por el numero binario 1110, y puesto que cada dígito binario ocupa medio ciclo de la corriente eléctrica se requieren 2 ciclos completos para enviar el “código de inicio”.

Los bits del “código de casa” y del “código de control”, se transmiten en *forma de complemento* en los ciclos de la corriente alterna; es decir, para enviar el 1, se envía un 1 en el primer medio ciclo y un 0 en

el segundo medio ciclo; para enviar el 0 se envía un 0 en el primer medio ciclo y un 1 en el segundo medio ciclo. El código de inicio es el único que no se envía en complemento. Ver Tabla 2.

La trama X-10 se divide en dos paquetes de datos los cuales deben enviarse como mínimo dos veces para garantizar que los datos sean correctos; antes de enviar el segundo paquete es necesario esperar tres ciclos de corriente alterna sin transmisión, correspondientes a seis cruces por cero; la diferencia entre los dos paquetes es que en el primer paquete el código de control se refiere a una dirección de unidad y en el segundo bloque se refiere a un comando.

Tabla 2. Complemento del código X-10

	Código de inicio		Código de casa				Código de control				
Código X-10	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
Complemento	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0

2 MODELADO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN A TRAVÉS DE LA RED ELÉCTRICA

La línea de transmisión es cualquier sistema de conductores, semiconductores, o la combinación de ambos, que puede emplearse para transmitir información, en la forma de energía eléctrica o electromagnética entre dos puntos. Las características de una línea de transmisión están determinadas por sus propiedades eléctricas¹ y de sus propiedades físicas² (Neri 1999).

¹ Conductividad de los alambres y la constante dieléctrica del aislamiento

² Diámetro del Alambre y distancia entre conductores

En la red eléctrica doméstica se encuentra una línea de transmisión con las siguientes especificaciones:

Línea Bifilar, conductor de cobre, tamaño nominal del conductor: calibre 12, diámetro del cobre desnudo: 2.03mm., conductores recubiertos polietileno 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.

a) *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 2.

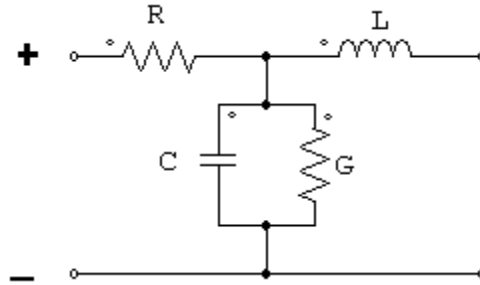


Figura 2. Línea de transmisión de dos cables paralelos. Circuito eléctrico equivalente.

Cálculo de las constantes eléctricas primarias: Los parámetros R, L, C y G, por unidad de longitud, se encuentran a partir de la permisividad-conductividad del dieléctrico y del conductor.

b) *Constantes secundarias:* son la impedancia característica y el coeficiente de propagación. Éstas se

calculan a partir de las cuatro constantes primarias.

Impedancia característica Z_o : 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. Ver Ecuación 1.

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} (\Omega) \quad (1)$$

Coefficiente de propagación γ : se usa para expresar la atenuación y el desplazamiento de fase por unidad de longitud de una línea de transmisión. El coeficiente de

propagación o constante de propagación es una cantidad compleja y se define por la Ecuación 2.

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

A frecuencias intermedias (como es el caso del protocolo X-10), se tiene que $\omega L \gg R$ y $\omega C \gg G$, entonces la parte real α e imaginaria β , del

Coefficiente de propagación para la red eléctrica γ , quedan definidos por:

$$\alpha = \frac{R}{2Z_o} + \frac{GZ_o}{2} \quad (3)$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad (4)$$

3 DISEÑO DEL CIRCUITO TRANSMISOR X-10

Los microcontroladores pueden ser utilizados para implementar un sistema domótico; en combinación con el protocolo X-10. En este caso se utiliza un microcontrolador de MICROCHIP, el PIC 16F84A (Angulo et al. 2006). El hardware para la funcionalidad del circuito transmisor está dividido en los bloques que muestra la Figura 3.

En el protocolo X-10 la información que se transmite es sincronizada con los cruces por cero de la línea de corriente alterna. Un detector de cruce por cero es fácil de implementar utilizando el pin RB0 (con una resistencia de 5 M Ω en serie), el cual es capaz de detectar alguna interrupción externa al PIC; en este caso se logra utilizando los flancos de subida o de bajada.

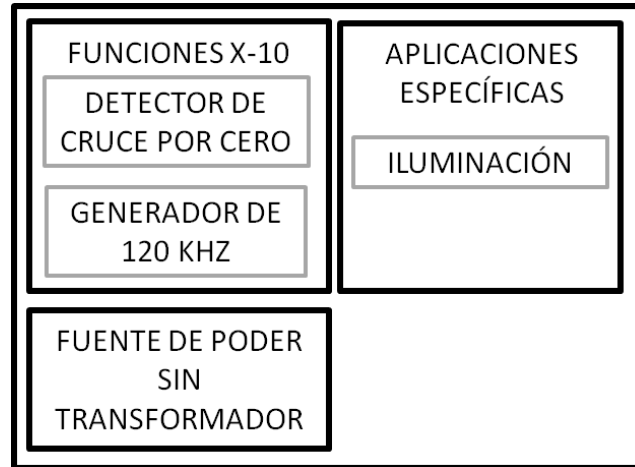


Figura 3. Diagrama a bloques del circuito transmisor X-10.

El PIC tiene un circuito de protección en las terminales de entrada/salida. Este circuito está formado por diodos. El protocolo X-10 envía pulsos de 120 KHz con una duración de 1 ms, sobre la línea de Corriente Alterna que tiene una frecuencia de 60 Hz. El PIC 16F84A puede programarse para generar dichos pulsos de 120 KHz con duración de 1 ms de

transmisión cada pulso y sincronizados con el cruce por cero. Se recomienda emplear lenguaje de bajo nivel como ensamblador para lograr los tiempos requeridos. La salida del micro se conecta a un filtro pasa altas formado por una resistencia R y un capacitor C como se observa en la Figura 4.

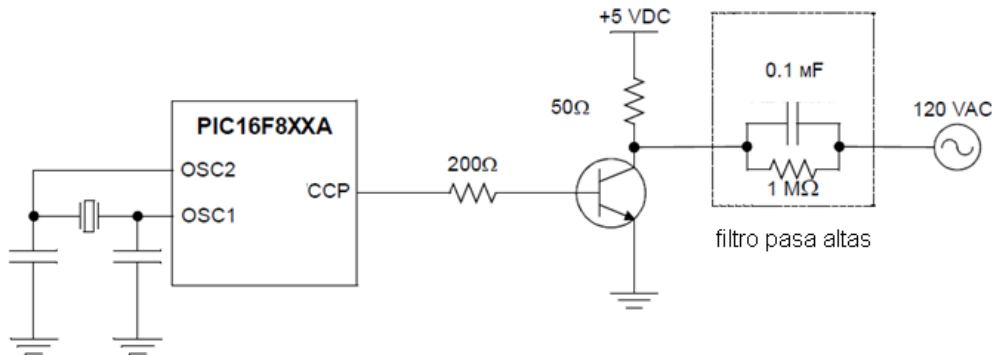


Figura 4. C-ircuito transmisor X-10.

El filtro pasa-altas pasivo es requerido para acoplar el transmisor con la red eléctrica y su función es atenuar la señal de 60 Hz y dejar pasar la señal de datos

modulados a 120 kHz. La reactancia capacitiva X_c que presenta el capacitor C a una señal de corriente alterna de frecuencia f , es:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (5)$$

El comportamiento en frecuencia del filtro se puede examinar en su función de transferencia:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{RC}{RC+1} \quad (6)$$

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el protocolo X-10. Para poder realizar las mediciones se empleó un osciloscopio MS06032A de Agilent Technologies a

300 MGHz con una velocidad de muestreo de 2 G muestras /s, lo que nos permite medir tanto la señal de baja frecuencia (60 Hz) como la señal de alta frecuencia (120 KHz) simultáneamente.

Para las pruebas experimentales de las interferencias electromagnéticas (EMI's), se utilizó un analizador de EMC HP8591EM con un espectro de frecuencia de 150 kHz-30 MHz; también se utilizó una red artificial (LISN) EMCO3810/2 de 110Vca, 10 A y con un rango de frecuencia de 9 kHz-30 MHz. Este analizador se programa mediante una tarjeta de límites y factores de configuración (ROM), con la

cual se establece la norma a utilizar y automáticamente se compara la medición con los límites establecidos por la norma seleccionada.

En la Figura 5 se observa el código de inicio 1110. Es importante recordar que el código de inicio es el único que no se envía en complemento.

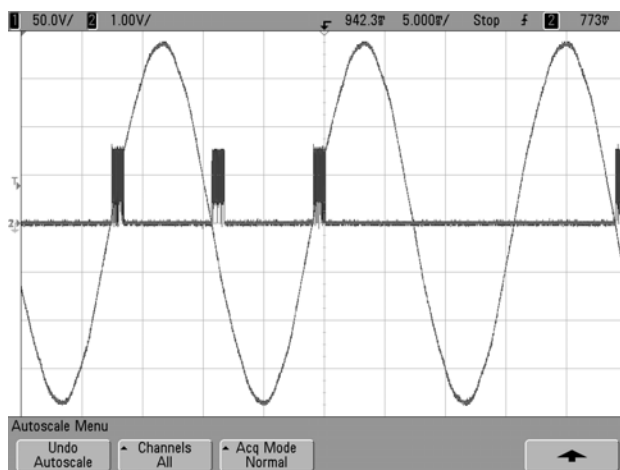


Figura 5. Código de inicio.

La trama X-10 es enviada en dos paquetes, en la Figura 6 se observa el primero; el cual está compuesto por el código de inicio (1110), código de comando (0000) y código de unidad (01100). El último pulso se encuentra subrayado porque es con el que se identifica si es un código de unidad o de comando.

Este paquete es enviado a la casa M unidad 1 (ver Tabla 1). Los pulsos son enviados en el cruce por cero; en la Figura 6 se muestran los pulsos sin la portadora de 120 KHz para permitir visualizar los códigos.

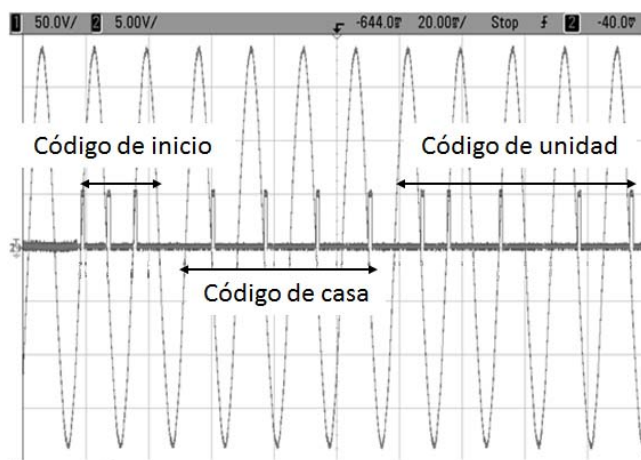


Figura 6. Primer paquete de la trama X-10.

Antes de enviar el segundo paquete, es necesario esperar seis cruces equivalentes a 3 ciclos de la onda senoidal.

A continuación se observa el segundo paquete de la trama, éste se envía a la casa M con el comando encender. El último pulso indica que es un código de

comando. Ver Figura 7.

El retraso en el flanco de subida que se obtuvo al programar el protocolo X-10 fue de 60 μ s y el retraso en el flanco de bajada fue de 19 μ s.

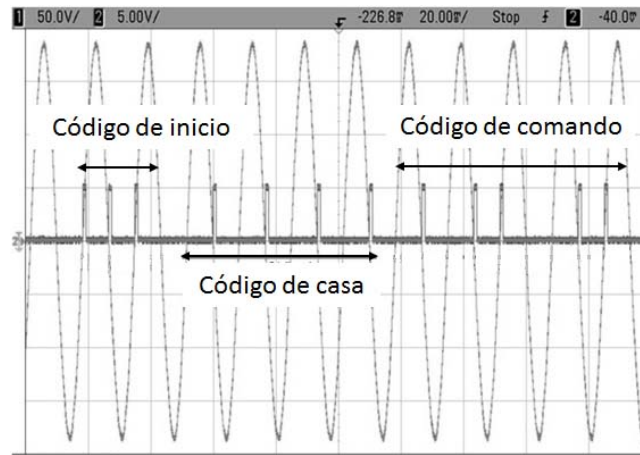


Figura 7. Segundo paquete de la trama X-10.

Para el proceso de recepción es necesario tener un circuito de desacoplamiento, un filtro pasa-altas con amplificación y un detector de envolvente que elimine

a la portadora de 120KHz, tal como se muestra en la Figura 8.

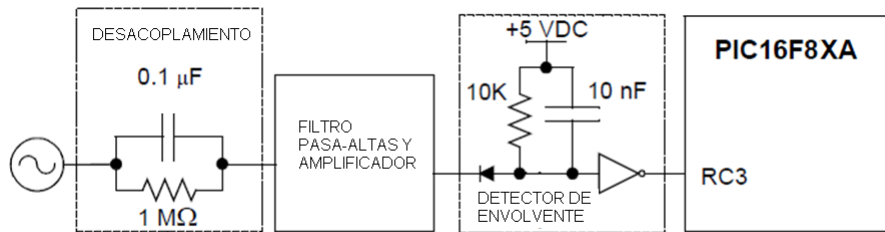


Figura 8. Circuito receptor X-10.

La Figura 9 presenta la señal recibida en el detector del envolvente; se observa la portadora de 120 kHz en dicha señal. Posteriormente, al pasar la señal por el detector de envolvente e invertir la señal se obtiene

una forma de onda de entrada en el microcontrolador en la cual se comienzan a notar perturbaciones. Ver Figura 10.

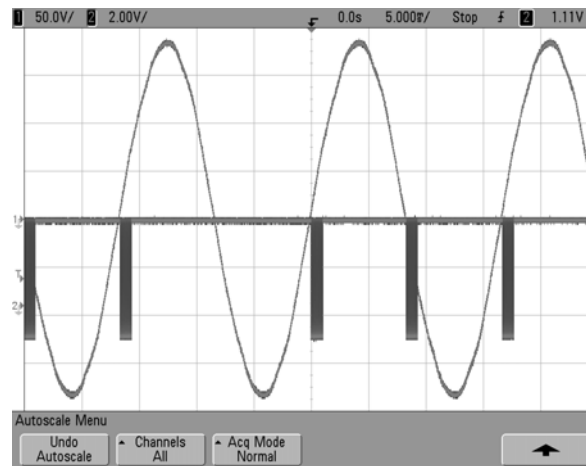


Figura 9. Señal en el receptor posterior al filtrado y amplificación.

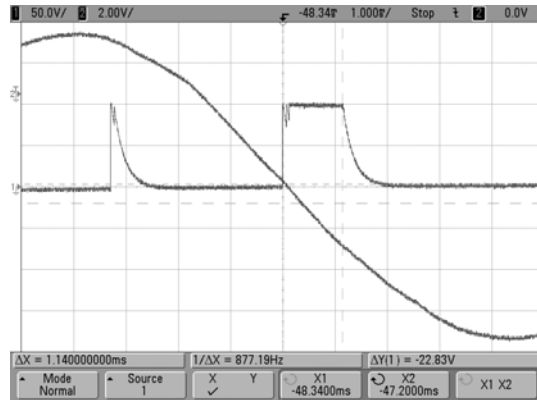


Figura 10. Detalle de perturbaciones cercanas en el cruce por cero.

Las perturbaciones detectadas (intermitentes), se generaban en puntos distintos del cruce por cero, por lo que no eran causadas por el transmisor, sino por las perturbaciones de la red.

La operatividad del sistema es dependiente de la

contaminación electromagnética (EMI) conducida que se tenga sobre la red eléctrica. En la Figura 11 se muestran las condiciones en la red eléctrica (ruido ambiental), se observa que la magnitud de las EMI conducidas no sobrepasan la norma (en este caso se usó la EN014).

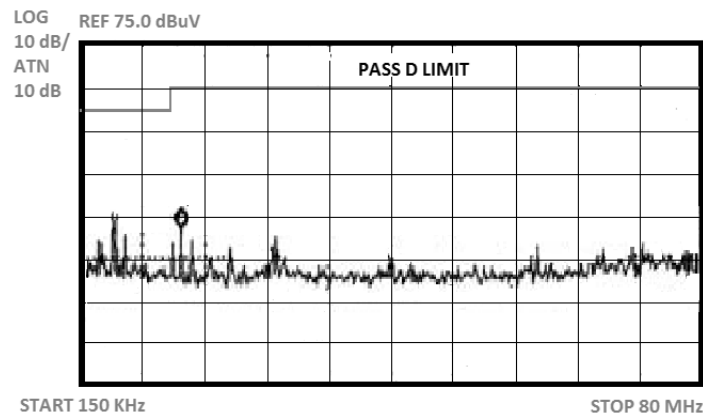


Figura 11. Ruido ambiental conducido en la red de alimentación.

En la Figura 12 se muestran las mediciones realizadas de EMI's conducidas. Se encontró que las computadoras inyectan este tipo de interferencias

sobre la red pero dado que estos no sobrepasan los límites permitidos, no afectaban al sistema.

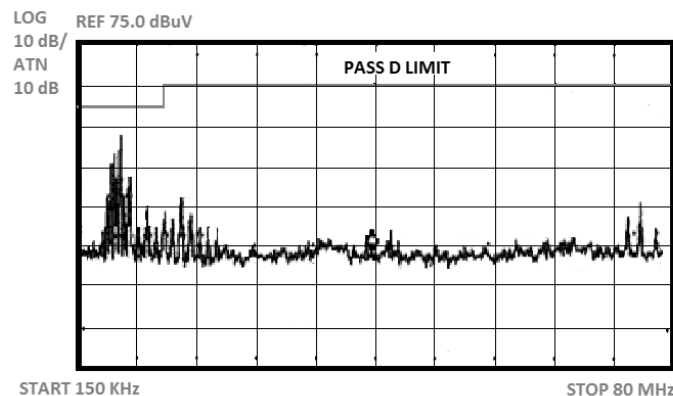


Figura 12. Interferencias electromagnéticas inyectadas a la red por un CPU.

Sin embargo, cuando se conectaba a la red algún equipo como un taladro, éste inyecta a la red una gran cantidad de EMI's conducidos que sobrepasan los

límites permitidos e interfieren con el sistema, no permitiendo la comunicación entre los micro controladores. Ver Figura 13.

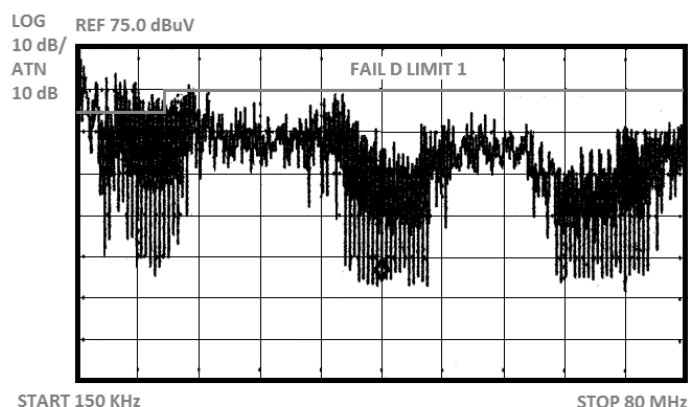


Figura 13. Interferencias electromagnéticas inyectadas a la red por un taladro.

En la Figura 14 se observa una trama más extensa en el receptor. Se puede notar en la señal recibida varias interferencias asociadas con la red. Pese a la gran cantidad de perturbaciones, el sistema es capaz de

funcionar siempre y cuando la perturbación no coincida con el cruce por cero ya que al hacerlo altera el protocolo y se tiene un funcionamiento errático.

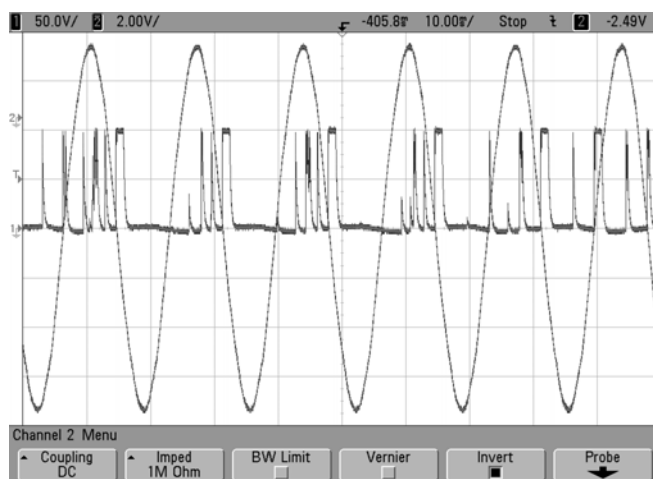


Figura 14. Recepción con perturbaciones de Línea.

5 DISCUSIÓN

Surgen una gran cantidad de aspectos a considerar, principalmente durante la implementación. Aspectos como son el ruido, las perturbaciones, retardos y demás, nos enseñan que el diseño de un sistema conlleva una complejidad, marcando una gran diferencia entre un proceso de simulación de un sistema y la implementación del mismo. Este trabajo puede servir de base para sistemas más complejos.

El diseño de un sistema de comunicación por la línea eléctrica permitió utilizar la instalación eléctrica ya existente, dando como resultado que se pueda

controlar y automatizar los aparatos que se conectan a la línea eléctrica. Durante la revisión del estado del arte se encontró fuertes críticas a este tipo de comunicación, destacando la susceptibilidad al ruido externo.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el estudio, diseño e implementación de un sistema de comunicación y control empleando la línea de CA (PLC) basado en un microcontrolador.

El protocolo X-10 es susceptible al ruido externo; de hecho en ambientes con alto grado de contaminación electrónica es prácticamente imposible que funcione el sistema. Tener cerca fuentes de ruido (taladros, licuadoras, máquinas de soldar), contaminan la red de tal manera que los datos se pierden.

- El manejo de tiempos en el protocolo, (100 μ s) es crucial para poder enviar datos. Por ello, la selección

del lenguaje de programación de bajo nivel es un aspecto relevante durante la etapa del diseño

-Los esquemas electrónicos son sencillos pero se debe tener cuidado en el manejo de señales (amplificación y filtrado) para lograr una comunicación.

-Este esquema no es recomendable para cargas críticas, dada su susceptibilidad de fallo.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Allen S., (2005). *Easy X10 Projects for creating a Smart Home*, Indy-Tech Publishing

Angulo Usategui J. M., Romero Yesa S., Angulo Martinez I. (2006). *Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones segunda parte*, II edición. Madrid, Mc Graw Hill.

De Palencia L. F., Angulo J. M., Romero S. (2001). *Domótica: Comunicaciones por red eléctrica*. Revista Española de Electrónica.

Held G. (2006) *Understanding Broadband over Power Line*, Auerbach Publications, Taylor & Francis Group.

Neri Vela R., (1999). *Líneas de Transmisión*, I edición. Mc Graw Hill.

Romero Morales C., Vázquez Serrano F., de Castro Lozano C., (2007), *Domótica e Inmótica. Viviendas y Edificios Inteligentes*, II edición. Madrid, España: RA-MA.

Este documento debe citarse como:

F. Chan, K. Núñez, E. Torres, J. Ortegón, O. Aguilar, H. Toral (2011). **Análisis de sensibilidad al ruido en un sistema de comunicación sobre línea eléctrica para aplicaciones en Domótica empleando el protocolo X-10**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 15-3, pp 147-156, ISSN: 1665-529-X.