

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**

**Instituto Costarricense de Electricidad**

**ICE**

**Diseño de un MODEM para transmitir y recibir información a través de las  
líneas de potencia en una red HAN**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el Grado de Bachiller en  
Ingeniería Electrónica**

**Rodrigo Vargas Sáenz**

**Cartago, Junio del 2002**

## DEDICATORIA

*A mis padres, por el amor y apoyo incondicional que me han brindado durante estos años de formación académica.*

*Que Dios les bendiga por siempre.*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco al Ing. Luis Moya y al Departamento de Investigación y Desarrollo del Instituto Costarricense de Electricidad, sector energía, por abrir el espacio para la realización de este proyecto y por el apoyo brindado durante el desarrollo del mismo.

## INDICE GENERAL

<b>CAPITULO 1: INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Descripción de la empresa</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1.1 Descripción general.</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1.2 Descripción del departamento</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 Definición del problema y su importancia</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>5</b>
<b>1.3.1 Objetivo General</b> .....	<b>5</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>5</b>
<b>CAPITULO 2: ANTECEDENTES</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Estudio del problema a resolver</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2 Requerimientos de la empresa</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3 Solución propuesta</b> .....	<b>10</b>
<b>CAPITULO 3: PROCEDIMIENTO METODOLOGICO</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1 Metodología</b> .....	<b>14</b>
<b>CAPITULO 4: DESCRIPCION DEL HARDWARE UTILIZADO</b> .....	<b>16</b>
<b>4.1 Módulo Adapt 812</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2 Modulador/demodulador ST7537</b> .....	<b>18</b>
<b>CAPITULO 5: DESCRIPCION DEL SOFTWARE DEL SISTEMA</b> .....	<b>20</b>
<b>5.1 Software del MODEM</b> .....	<b>20</b>
<b>5.1.1 Aplicaciones utilizadas</b> .....	<b>20</b>
<b>5.1.2 Protocolo de comunicación</b> .....	<b>22</b>
<b>5.1.3 Diseño del Software para el MODEM</b> .....	<b>25</b>

5.2	Software de evaluación PLCEVAL.....	39
<b>CAPITULO 6: ANALISIS Y RESULTADOS .....</b>		<b>47</b>
6.1	Explicación del diseño del MODEM.....	47
6.1.1	Módulo de control .....	48
6.1.2	El modulador/demodulador.....	51
6.1.3	El manejador de Línea .....	52
6.1.4	La interfaz de línea .....	54
6.1.5	Diseño del circuito impreso .....	56
6.2	Análisis de las mediciones y pruebas de comunicación.....	58
6.3	Análisis de costos del proyecto.....	64
6.4	Alcances y limitaciones .....	66
<b>CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>67</b>
7.1	Conclusiones.....	67
7.2	Recomendaciones.....	69
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>70</b>
<b>APENDICES Y ANEXOS.....</b>		<b>71</b>
Apéndice A.1	Características eléctricas de la red de potencia.....	71
Apéndice A.2	Fórmulas para el cálculo de la frecuencia de resonancia..	85
Apéndice A.3	Mediciones y pruebas de comunicación .....	87
A.3.1	Definición de términos y conceptos .....	87
A.3.2	Pruebas de comunicación para diferentes configuraciones de conexión .....	88

<b>A.3.3 Pruebas de comunicación para diferentes fuentes de interferencia</b>	<b>102</b>
<b>Apéndice A.4 Glosario</b>	<b>110</b>
<b>Apéndice A.5 Lista de abreviaturas</b>	<b>111</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Diagrama general del sistema de comunicación a través de las líneas de potencia.....	11
<b>Figura 2.2</b>	Diagrama de bloques del MODEM de potencia utilizado para acoplar el puerto de comunicaciones con la línea de potencia.....	12
<b>Figura 4.1</b>	Fotografía del módulo Adapt 812 .....	17
<b>Figura 4.2</b>	Encapsulado del Modulador/demodulador ST7537.....	19
<b>Figura 4.3</b>	Diagrama de bloques interno del circuito integrado ST7537.....	19
<b>Figura 5.1</b>	Protocolo utilizado entre el MODEM y la PC.....	22
<b>Figura 5.2</b>	Protocolo utilizado entre el MODEM local y el MODEM remoto.....	24
<b>Figura 5.3</b>	Diagrama de flujo de la rutina principal del programa .....	27
<b>Figura 5.4</b>	Rutinas de interrupción para el SCI1 y SCI2.....	28
<b>Figura 5.5</b>	Subrutina para almacenar un caracter en el “buffer0” proveniente del puerto SCIO .....	30
<b>Figura 5.6</b>	Subrutina para almacenar un caracter en el “buffer1” proveniente del puerto SCI1 .....	32
<b>Figura 5.7</b>	Subrutina para enviar el “buffer0” por el puerto SCI1.....	33
<b>Figura 5.8</b>	Subrutina para enviar el “buffer1” por el puerto SCIO.....	35
<b>Figura 5.9</b>	Subrutina de conteo de ciclos de programa principal.....	36
<b>Figura 5.10</b>	Subrutina para evaluar el valor del contador de ciclos de programa.	37
<b>Figura 5.11</b>	Subrutina para generar la señal de “WatchDog” para el ST7537.....	38
<b>Figura 5.12</b>	Ventana principal del software de evaluación PLCEVAL .....	39
<b>Figura 5.13</b>	Procedimiento para enviar una línea de caracteres por el puerto de comunicaciones seleccionado.....	41
<b>Figura 5.14</b>	Procedimiento para limpiar el “buffer” de entrada e inicializar las variables.....	42
<b>Figura 5.15</b>	Diagrama de flujo del evento generado por el componente de comunicación al recibir un bloque de datos .....	43

<b>Figura 5.16</b>	Procedimiento para procesar del bloque de información recibido....	45
<b>Figura 5.17</b>	Procedimiento para definir el estado de “ModemReady” en función del código recibido. ....	46
<b>Figura 6.1</b>	Diagrama de bloques interno del MODEM de potencia. ....	47
<b>Figura 6.2</b>	Circuito eléctrico del modulador/demodulador .....	51
<b>Figura 6.3</b>	Circuito eléctrico del manejador de línea .....	53
<b>Figura 6.4</b>	Diagrama eléctrico de la interfaz de línea .....	54
<b>Figura 6.5</b>	Diagrama del alambrado físico de las diferentes etapas del MODEM en una tarjeta para prototipos Adapt12MAXPRO1.....	56
<b>Figura 6.6</b>	Fotografía del MODEM diseñado e implementado en una tarjeta para desarrollo de prototipos.....	57
<b>Figura A.1</b>	Impedancia de la línea de potencia en función de la frecuencia para líneas de transmisión europeas .....	74
<b>Figura A.2</b>	Gráfico de la distribución de la atenuación en una línea de potencia a 130 KHz .....	76
<b>Figura A.3</b>	Gráfico del impulso eléctrico en la línea de potencia, producido por un circuito de control de potencia (dimmer) ajustado al 50% de regulación .....	77
<b>Figura A.4</b>	Gráfico de comparación entre una onda diente de sierra y el ruido producido por la fuente conmutada.....	78
<b>Figura A.5</b>	Gráfico del espectro en frecuencia del ruido inyectado por una fuente conmutada .....	79
<b>Figura A.6</b>	Gráfico del espectro en frecuencia del ruido producido por un intercomunicador.....	80
<b>Figura A.7</b>	Gráfico de la señal de ruido en el dominio del tiempo producido por un cepillo eléctrico.....	81
<b>Figura A.8</b>	Gráfico de la distribución gaussiana del ruido producido por un cepillo eléctrico.....	82
<b>Figura A.9</b>	Gráfico del espectro en frecuencia del ruido producido por un cepillo eléctrico.....	82

<b>Figura A.10</b>	Espectro en frecuencia del ruido producido por un cepillo eléctrico dentro del rango utilizado para comunicación PLC.....	83
<b>Figura A.11</b>	Gráfico de la distorsión de frecuencia en una línea de potencia .....	84
<b>Figura A.12</b>	Diagrama de bloques para la conexión 1 .....	88
<b>Figura A.13</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 1 .....	88
<b>Figura A.14</b>	Diagrama de bloques para la conexión 2 .....	89
<b>Figura A.15</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 2 .....	89
<b>Figura A.16</b>	Señal de información modulada transmitida por el MODEM 1 para la conexión 2.....	90
<b>Figura A.17</b>	Señal de información modulada recibida por el MODEM 1 para la conexión 2.....	90
<b>Figura A.18</b>	Diagrama de bloques para la conexión 3 .....	91
<b>Figura A.19</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 3 .....	92
<b>Figura A.20</b>	Diagrama de bloques para la conexión 4 .....	92
<b>Figura A.21</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 4 .....	93
<b>Figura A.22</b>	Señal de información modulada transmitida por el MODEM 1 para la conexión 4.....	93
<b>Figura A.23</b>	Señal de información modulada recibida por el MODEM 1 para la conexión 4.....	94
<b>Figura A.24</b>	Diagrama de bloques para la conexión 5 .....	95
<b>Figura A.25</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 5 .....	95
<b>Figura A.26</b>	Señal de información modulada transmitida por el MODEM 1 para la conexión 5.....	96
<b>Figura A.27</b>	Señal de información modulada recibida por el MODEM 1 para la conexión 5.....	96

<b>Figura A.28</b>	Diagrama de bloques para la conexión 6 .....	97
<b>Figura A.29</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 6 .....	98
<b>Figura A.30</b>	Diagrama de bloques para la conexión 7 .....	98
<b>Figura A.31</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 7 .....	99
<b>Figura A.32</b>	Diagrama de bloques para la conexión 8 .....	99
<b>Figura A.33</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 8 .....	100
<b>Figura A.34</b>	Diagrama de bloques para la conexión 9 .....	100
<b>Figura A.35</b>	Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 9 .....	101
<b>Figura A.36</b>	Conexión utilizada para evaluar las diferentes interferencias .....	102
<b>Figura A.37</b>	Porcentaje de error de comunicación sin fuente de interferencia ..	102
<b>Figura A.38</b>	Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a una secadora de pelo de 1300 watts.....	103
<b>Figura A.39</b>	Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un ventilador de 65 watts.....	104
<b>Figura A.40</b>	Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un cepillo eléctrico de 400 watts.....	105
<b>Figura A.41</b>	Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un regulador de voltaje (dimmer) ajustado al 50% con carga resistiva de 50 Watts .....	106
<b>Figura A.42</b>	Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un regulador de voltaje (dimmer) ajustado al 50% con carga reactiva de 65 Watts.....	107
<b>Figura A.43</b>	Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un horno de microondas de 1400 watts.....	108

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b>	Características del módulo Adapt812 .....	17
<b>Tabla 5.1</b>	Aplicaciones utilizadas para edición, compilación y descarga .....	21
<b>Tabla 5.2</b>	Códigos utilizados en la comunicación MODEM-PC .....	23
<b>Tabla 6.1</b>	Descripción de señales de entrada/salida en módulo de control. ....	50
<b>Tabla 6.2</b>	Materiales adquiridos para el desarrollo del proyecto .....	64
<b>Tabla 6.3</b>	Equipo utilizado en el desarrollo del proyecto.....	65
<b>Tabla 6.4</b>	Servicios personales para el desarrollo del proyecto .....	65
<b>Tabla 6.5</b>	Costos de construcción de un MODEM .....	65
<b>Tabla A.1:</b>	Características eléctricas de varios tipos de líneas de transmisión ..	73
<b>Tabla A.2:</b>	Cargas de baja impedancia en una línea de transmisión , a 100 KHz .....	73
<b>Tabla A.3</b>	Registro de comunicación para la conexión 1 .....	89
<b>Tabla A.4</b>	Valores de voltaje y atenuación de la señal para la conexión 2 .....	91
<b>Tabla A.5</b>	Registro de comunicación para la conexión 2.....	91
<b>Tabla A.6</b>	Registro de comunicación para la conexión 3.....	92
<b>Tabla A.7</b>	Valores de voltaje y atenuación de la señal para la conexión 4 .....	94
<b>Tabla A.8</b>	Registro de comunicación para la conexión 4.....	94
<b>Tabla A.9</b>	Valores de voltaje y atenuación de la señal para la conexión 5 .....	97
<b>Tabla A.10</b>	Registro de comunicación para la conexión 5.....	97
<b>Tabla A.11</b>	Registro de comunicación para la conexión 6.....	98
<b>Tabla A.12</b>	Registro de comunicación para la conexión 7 .....	99
<b>Tabla A.13</b>	Registro de comunicación para la conexión 8.....	100
<b>Tabla A.14</b>	Registro de comunicación para la conexión 9.....	101
<b>Tabla A.15</b>	Resumen de la evaluación de comunicación. ....	101
<b>Tabla A.16</b>	Registro de comunicación sin fuente de interferencia.....	103
<b>Tabla A.17</b>	Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a una secadora de pelo de 1300 watts. ....	103

<b>Tabla A.18</b> Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un ventilador de 65 watts .....	104
<b>Tabla A.19</b> Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un cepillo eléctrico de 400 watts .....	105
<b>Tabla A.20</b> Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un regulador de voltaje (dimmer) ajustado al 50% con carga resistiva de 50 Watts.....	106
<b>Tabla A.21</b> Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un regulador de voltaje (dimmer) ajustado al 50% con carga reactiva de 65 Watts.....	107
<b>Tabla A.22</b> Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un horno de microondas de 1400 watts .....	108
<b>Tabla A.23</b> Resumen de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de interferencia y ruido.....	109

## RESUMEN

El crecimiento de la tecnología y la información hacen del computador una herramienta cada vez más necesaria. Cada día, más personas buscan la forma de interconectar esos computadores en redes, con el fin de obtener una mayor productividad y eficiencia.

La tecnología PLC abre una nueva posibilidad en la comunicación de computadores. Consiste en utilizar la red eléctrica instalada en toda vivienda moderna como un medio de transmisión de información entre diferentes puntos de la residencia.

Este proyecto consistió en comunicar dos computadores a través de las líneas de potencia dentro de una red de área residencial, utilizando un hardware especializado (MODEM) y un software de evaluación que permite conocer los errores de la comunicación en tiempo real.

Primeramente se diseñó y se implementó el hardware especializado (MODEM) que permitió comunicar las computadoras a través de las líneas de potencia. Posteriormente se realizó una evaluación de la comunicación entre ambos MODEM, sometiendo el sistema a distintas configuraciones de conexión y diversas fuentes de ruido e interferencia, para conocer como afectan estos factores la información transmitida.

Se logró determinar algunas configuraciones de conexión entre ambos MODEM que favorecen una comunicación consistente así como otras configuraciones que deterioran altamente el proceso de transmisión. Asimismo se identificó que tipo de dispositivos causan mayor interferencia y afectan la comunicación a través de las líneas de potencia.

**Palabras claves:** Tecnología PLC; MODEM; Red de área residencial; Ruido e interferencia

## **ABSTRACT**

The increase of technology and information turn the computer in a very necessary tool. Every day more people search for new forms to interconnect these computers in networks to obtain the best productivity and performance.

The PLC technology opens a new possibility in computer communications. This consist in use the electrical network installed in every modern house has a way to transmit information between different points of it.

This project consist in communicate two computers across the power lines in a Home Area Network, using a specialized hardware (MODEM) and an evaluation software to know the communication errors in real time.

First, the specialized hardware (MODEM) to communicate the computers across the power lines was designed and implemented. Next an evaluation of modems communication was made with different connections and noise sources to know how affect this factors the transmitted information.

Finally, were identified some connections between two modems that favor a stable communication and other connections that produces a deteriorate transmission process. Also were identified some electrical devices that produces interference and affect the communication across the power lines.

**Keywords:** PLC technology; MODEM; Home Area Network; Noise and interference.

# **CAPITULO 1**

## **INTRODUCCION**

---

### **1.1 Descripción de la empresa**

Este proyecto fue realizado para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), en el departamento de Investigación y Desarrollo. A continuación se presenta una descripción de esta entidad.

#### **1.1.1 Descripción general.**

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), es una institución autónoma del Estado, conformado por dos sectores: ICELEC, que corresponde al sector de electrificación; e ICETEL que corresponde al sector de telecomunicaciones. Además, el ICE cuenta con empresas subsidiarias, como son la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) y Radiográfica Costarricense S.A. (RACSA).

La principal actividad del ICE es la venta de servicios de energía y telecomunicaciones, lo cual a su vez es la fuente principal de financiamiento.

En el campo de la energía ha realizado numerosas obras hidroeléctricas, térmicas y geotérmicas, así como proyectos de energía solar, que han permitido una cobertura del 96.8% del territorio nacional.

En cuanto a las telecomunicaciones, el ICE ha logrado una cobertura del 94% del territorio nacional en telefonía básica, lo que lo coloca en primer lugar de los países centroamericanos y el segundo a nivel sudamericano.

El Consejo Directivo del ICE esta constituido por siete miembros, los cuales son nombrados directamente por el Consejo de Gobierno. De este Consejo Directivo se nombra el Presidente Ejecutivo, que es el máximo jerarca en la estructura organizacional del ICE; y también se nombre un Vicepresidente y un Secretario.

El Consejo Directivo se encarga de nombrar a un Gerente General e internamente se elige un grupo de apoyo, lo cual se constituye en la Gerencia General del ICE.

La Gerencia General se divide en tres Subgerencias: Electricidad, Gestión Administrativa y Telecomunicaciones. Cada una de estas subgerencias está integrada por Áreas y Unidades Estratégicas de Negocios (UEN) cuyos Directores son nombrados a nivel interno y por concurso.

### **1.1.2 Descripción del departamento**

El proyecto se desarrolló en la Unidad Estratégica de Negocios, Proyectos y Servicios Asociados, propiamente en el Departamento de Investigación y Desarrollo.

La misión de esta unidad es Desarrollar y Comercializar Proyectos con calidad de clase mundial para continuar impulsado el desarrollo eléctrico, la especialización de su recurso humano y los productos y servicios asociados, satisfaciendo las necesidades y expectativas del mercado.

El Departamento de Investigación y Desarrollo se dedica a investigar nuevas tecnologías que puedan aplicarse en el sector de energía. Esta sección busca el desarrollo de proyectos particularmente en esa área.

En el departamento laboran aproximadamente 50 personas, de las cuales casi todos son ingenieros, además de personal técnico.

## 1.2 Definición del problema y su importancia

El crecimiento de la tecnología y la información hacen del computador una herramienta cada vez más necesaria. Cada día, más personas buscan la forma de interconectar esos computadores en redes, con el fin de obtener una mayor productividad y eficiencia.

La conexión de dos o más computadores en red requiere de la instalación de cableado adicional, lo cual implica costos a nivel económico e inclusive la necesidad de realizar ciertas alteraciones a la infraestructura del lugar. Otra opción utilizada actualmente es la comunicación por MODEM a través de las líneas telefónicas existentes, lo que también introduce un costo de utilización del servicio y por supuesto una limitante en la velocidad de transmisión.

De acuerdo con lo anterior, surgió la necesidad de contar con un medio de comunicación alternativo para la transmisión de datos a nivel local, que sea sencillo de conectar y que no implique costos de instalación de cableado adicional. Para esto, se vislumbra la posibilidad de utilizar la red eléctrica instalada en toda vivienda moderna como un medio de transmisión de información entre diferentes puntos de la residencia, evitando así la necesidad de instalar un nuevo cableado para comunicar los dispositivos electrónicos, o en este caso, computadores.

El problema planteado por el ICE consistió en ¿Cómo lograr comunicar dos o más computadores utilizando las líneas de potencia existentes y que tan factible es utilizar este tipo de comunicación en un sistema de electrificación como el nuestro?

El hecho de establecer una comunicación a través de las líneas de potencia hizo surgir una serie de interrogantes relacionadas propiamente con el proceso de transmisión de información, como por ejemplo, ¿ Que sucedería si durante el proceso de comunicación se enciende algún dispositivo eléctrico de alto consumo, como un motor o un dispositivo de calefacción ?; ¿Cómo afectaría esa perturbación al proceso de comunicación? Todos estos factores fueron considerados y analizados en el proceso de investigación, diseño y pruebas.

El desarrollo de este proyecto y la solución de este problema es importante para el Departamento de Investigación y Desarrollo, ya que puede abrir la puerta a la utilización de una nueva tecnología en la comunicación a nivel local, ya sea entre computadoras o dispositivos electrónicos, cuyas aplicaciones van desde la transmisión de datos hasta funciones de control sobre aparatos eléctricos instalados dentro de una residencia.

## **1.3 Objetivos**

A continuación se presentan los objetivos general y específicos, alcanzados durante la realización de este proyecto.

### **1.3.1 Objetivo General**

Comunicar dos computadores a través de la red de potencia de 110V mediante un MODEM y realizar un estudio que permita determinar que tan factible es utilizar este medio de comunicación en un sistema de electrificación como el nuestro.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Buscar y estudiar información relacionada con la tecnología PLC (Comunicación a través de las Líneas de Potencia) y los principales protocolos de comunicación utilizados
2. Buscar información relevante sobre líneas de transmisión de potencia, e interferencia o ruido en estas líneas de transmisión
3. Escoger los componentes electrónicos adecuados para el diseño del hardware de comunicación
4. Diseñar un prototipo de MODEM para la transmisión de datos, que conecte el puerto de comunicaciones de una PC con la línea de potencia de 110V.

5. Construir dos prototipos del MODEM.
6. Escribir un programa en Delphi que permita comunicar la computadora con el MODEM y que sea capaz de realizar un registro estadístico de errores de transmisión producidos.
7. Probar el sistema de comunicación y recolectar la información generada por el programa y observada durante el proceso.
8. Analizar detalladamente la información recolectada de las diversas pruebas y documentar los resultados y el análisis de los mismos.

## CAPITULO 2

### ANTECEDENTES

---

#### 2.1 Estudio del problema a resolver

Para establecer una conexión de computadores mediante la red de potencia existen algunas características que deben tomarse en cuenta, para delimitar apropiadamente el problema y vislumbrar los alcances del mismo.

Entre las características de la red de potencia está la impedancia de línea de transmisión, que se utilizó como medio de comunicación de las computadoras. La figura A.1, presentada en el apéndice A.1, muestra un gráfico de la impedancia característica de una línea de transmisión en función de la frecuencia. En este gráfico se observa que para los 130 KHz que es una frecuencia normalmente utilizada para la transmisión de información, se espera una impedancia de línea de entre los 5  $\Omega$  y los 100  $\Omega$ . Esta impedancia depende de la frecuencia de operación, de la impedancia del transformador secundario y de las cargas conectadas a la red. Tanto la frecuencia de operación como la impedancia del transformador secundario se mantendrían constantes cuando la comunicación es limitada a la red HAN<sup>1</sup>. Esto indica que la única variante corresponde a los cambios de impedancia debidos a la conexión y desconexión de diversos dispositivos eléctricos que se alimentan de la red.

Otro aspecto importante a considerar es la atenuación producida en las líneas de potencia. En la figura A.2 mostrada en el apéndice A.1, se observa que el 96% de las veces la atenuación es menor a 54dB y que aumenta al incrementarse el número de conexiones eléctricas presentes en la red.

---

<sup>1</sup> Se refiere a la red eléctrica dentro de una residencia o edificio, limitada por el transformador de distribución

Es importante mencionar que las diferentes pruebas de comunicación realizadas se limitaron a la transmisión de información dentro de la misma fase de la señal de potencia, por lo que no se produce atenuación como consecuencia del cruce de fases, es decir, tanto el transmisor como el receptor deben ubicarse en la misma fase de la línea de alimentación de potencia. Es importante considerar la atenuación ya que está relacionada con la sensibilidad que debe tener el MODEM diseñado para poder captar la señal de información proveniente del dispositivo remoto.

El siguiente aspecto a considerar es el ruido. Específicamente interesa la presencia de señales no deseadas dentro de la banda de frecuencia que se elige para la transmisión de información, la cual se encuentra entre los 130KHz y los 132KHz. La figura A.5 en el apéndice A.1, muestra el espectro en frecuencia del ruido inyectado por una fuente conmutada., Se observa que para los 130 KHz hay un nivel de aproximadamente  $-35$  dBV. El nivel de ruido aumenta conforme aumenta la frecuencia. Por otro lado, los intercomunicadores utilizados en las residencias modernas, no producirían una señal de ruido significativa en la banda de interés, ya que la frecuencia fundamental de operación de estos dispositivos es mayor a los 150KHz y sus armónicas son aún mayores. La figura A.6 muestra el espectro en frecuencia del ruido generado por un intercomunicador. Se observa que la primera componente en frecuencia aparece aproximadamente a los 150 KHz y las armónicas a los 300 KHz, 500 KHz y 650 KHz.

## **2.2 Requerimientos de la empresa**

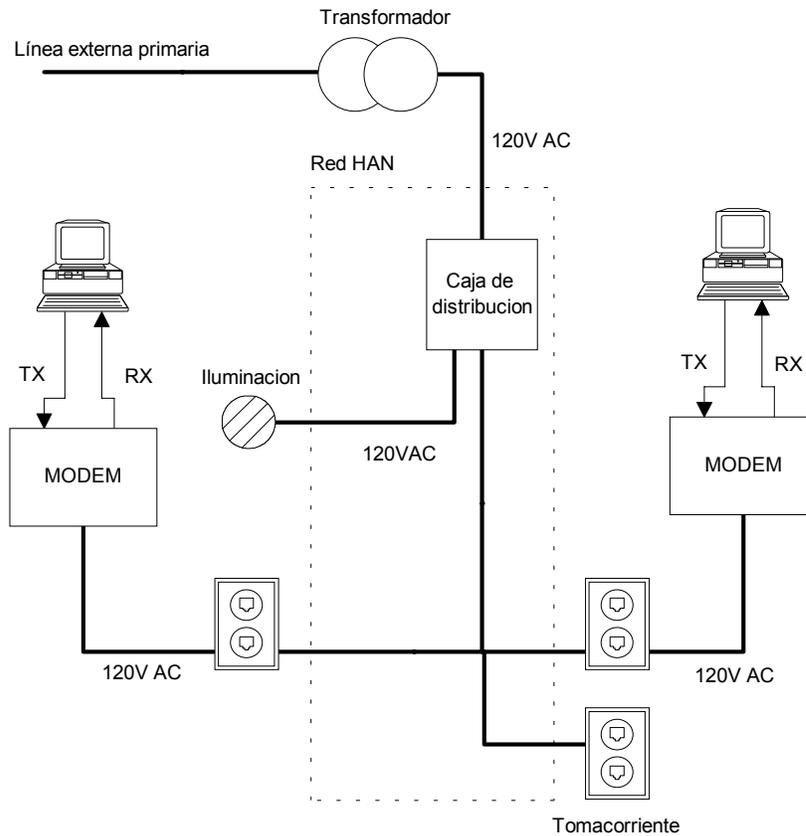
Los requerimientos de la empresa al finalizar el proyecto consistieron en obtener un prototipo de MODEM, construido en forma permanente, que permita enviar datos a través de las líneas de potencia de 110V y contar con un registro de pruebas de comunicación, realizadas al MODEM mediante un software que evalúe la comunicación.

### **2.3 Solución propuesta**

La solución del problema fue propuesta por el ICE y consistió en el diseño de dos MODEM de potencia que permitieran interconectar dos computadores a través de la red de potencia. Cada computadora tiene un software de comunicación, el cual permite registrar y evaluar estadísticamente los errores de comunicación ocurridos durante la transmisión, al someter el sistema a distintas perturbaciones. La solución se limita a una Red de Área Residencial (Red HAN) y a una sola fase de voltaje.

La figura 2.1 muestra un diagrama general de la solución. Se muestran las dos computadoras y el puerto de comunicaciones conectado al MODEM de potencia. El MODEM se encarga de recibir y transmitir datos a la PC, en formato serie RS-232. A su vez, se encarga de modular y demodular la información a ser transmitida por la red de alimentación de potencia. La comunicación bi-direccional, pero en tiempos diferentes (Half-Duplex)

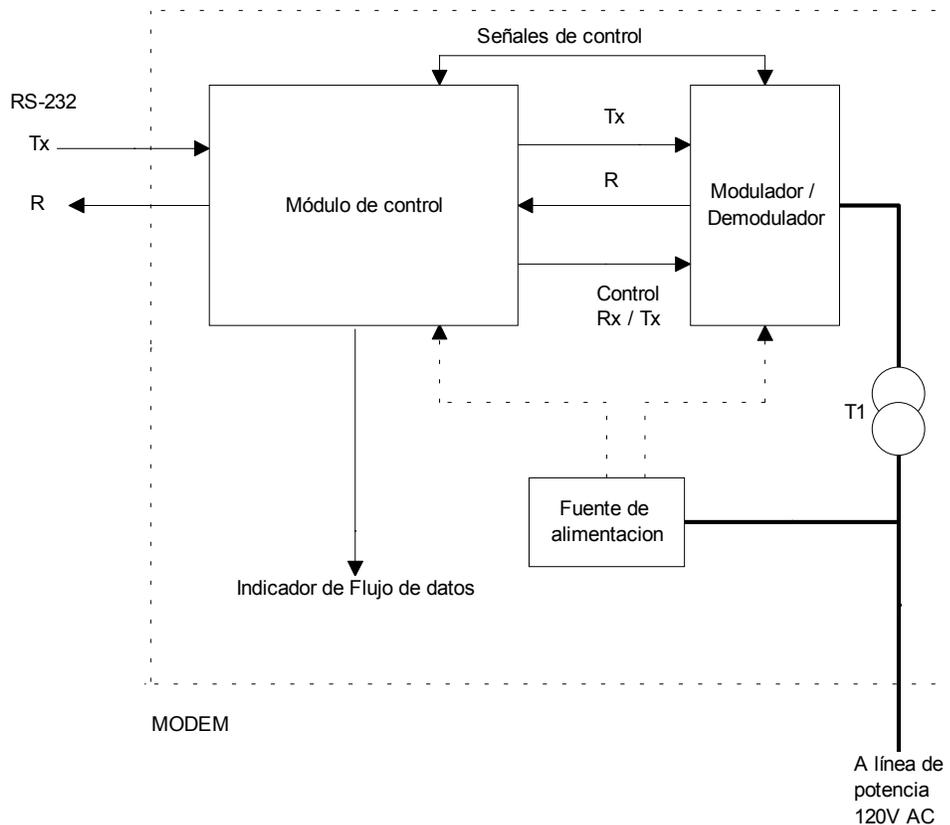
La figura 2.1 también muestra la red de potencia que se utiliza como red de comunicación. Se muestra también que la conexión entre los MODEM se lleva a cabo a través de una misma rama eléctrica desde la caja de distribución y en la misma fase de voltaje de la señal de potencia.



**Figura 2.1** Diagrama general del sistema de comunicación a través de las líneas de potencia.

La figura 2.2 muestra en forma más detallada un diagrama de bloques del MODEM del sistema.

La información proveniente del puerto de comunicaciones y la transmitida hacia este puerto, se presenta como una señal RS-232 (+12V / -12V). El módulo de control (Módulo Adapt812) posee un puerto de 9 pines macho (DB9), que se conecta con el puerto de comunicaciones de la computadora. Internamente se realiza la conversión o acople de la señal RS-232 a una señal TTL (0-5V).



**Figura 2.2** Diagrama de bloques del MODEM de potencia utilizado para acoplar el puerto de comunicaciones con la línea de potencia.

Este módulo posee internamente un microcontrolador de la familia HC12 de motorola, que constituye una parte importante del MODEM , pues se encarga de administrar correctamente los datos a través de una línea bi-direccional. Este módulo debe generar una señal de control (RX/TX) que indica al resto del hardware cuando se va a transmitir y cuando se está en espera de un dato. Adicionalmente el MODEM tiene un indicador de flujo de datos, que indica en forma visible cuando se recibe y cuando se envía un bloque de información.

El modulador/demodulador es la parte más importante del MODEM. Este se comunica con el controlador y se encarga de acoplar la información a la red de potencia de 110V. Para esto se utiliza el ST7537 que es un circuito integrado que utiliza modulación por corrimiento en frecuencia (FSK) para la transmisión de información y cuenta con un demodulador PLL con filtro de ruido, para la información entrante. Adicionalmente al ST7537, se utiliza una Interfaz de Acople a la línea de potencia basada en un circuito discreto y un transformador especial.

Otro bloque que se presenta es la fuente de alimentación, la cual toma la energía de la misma red de potencia, la transforma y la rectifica a 5V DC estables para alimentar la circuitería digital y a 10V DC estables para la sección analógica y la alimentación del ST7537.

El software es otra sección importante del sistema, pues es aquí donde se establece el protocolo de comunicación utilizado por el MODEM, para manejar este tipo de comunicación bi-direccional (half-duplex). Este se encuentra almacenado en el microcontrolador HC12 que forma parte del MODEM.

## **CAPITULO 3**

### **PROCEDIMIENTO METODOLOGICO**

---

#### **3.1 Metodología**

A continuación se presentan los diferentes pasos ejecutados para cumplir con cada uno de los objetivos planteados en el capítulo 1.

1. Investigación en Internet y en literatura sobre temas relacionados con tecnología PLC
2. Investigación en Internet y en literatura sobre los principales protocolos de transmisión utilizados en la tecnología PLC
3. Investigación en literatura sobre temas relacionados a líneas de transmisión de potencia e interferencia o ruido producido en los sistemas de electrificación.
4. Compilación y estudio de la información más relevante, que sea de utilidad para el desarrollo del proyecto.
5. Búsqueda en Internet y catálogos de los componentes electrónicos o chips adecuados para construir el hardware de transmisión.
6. Estudio de las hojas de especificación de cada uno de los componentes, para conocer y dominar los lenguajes de programación correspondientes y las características del dispositivo a adquirir.
7. Realización de un diseño en papel del hardware de comunicación.
8. Montaje del circuito diseñado en el solder wrap
9. Estudio de un manual de Delphi para aprender la forma de programación en este lenguaje.

10. Escritura de un programa en Delphi para comunicar la computadora con el MODEM diseñado, que permita realizar un registro estadístico de errores.
11. Realización de pruebas de comunicación y recolección de la información proporcionada por el software, relacionada con errores de transmisión.
12. Realización de un análisis con los datos e información obtenida de las diferentes pruebas de comunicación y documentación de los resultados.

## **CAPITULO 4**

### **DESCRIPCION DEL HARDWARE UTILIZADO**

---

#### **4.1 Módulo Adapt 812**

El módulo Adapt812, desarrollado por la empresa Technological Arts, es un módulo de prueba especializado para el diseño de prototipos, el cual se encuentra basado en el microcontrolador 68HC812A4 de Motorola.

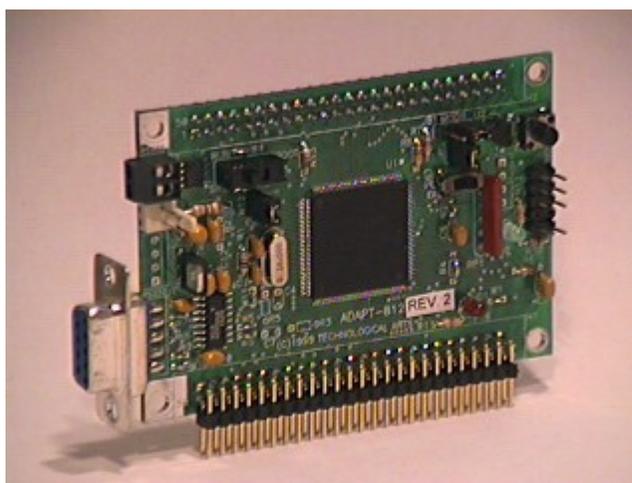
La presentación del módulo Adapt-812, simplifica enormemente el diseño de hardware de un prototipo, pues gran parte de la circuitería se encuentra ya montada en el módulo (osciladores, transistores, interruptores, convertidor RS-232 a TTL).

Este módulo utiliza conectores de 50 pines que permiten adaptarlo fácilmente a tarjetas para montajes de prototipos (protoboards, wire wrap y solder wrap).

La memoria de programa es expandible hasta 4MB y la memoria de datos hasta 1MB. El módulo Adapt812 es programable en C, Basic y ensamblador y se utiliza el puerto RS-232 para descargar el programa desde la computadora.

**Tabla 4.1** Características del módulo Adapt812

<b>Característicaracterística</b>	<b>Adapt812 (68HC812)</b>
Memoria ROM	2K EEPROM
Memoria RAM	8K
Memoria Flash	128K
Líneas I/O	90, programables como entradas o salidas
Acceso a memoria externa	Módulos 128K y 64K
PWM	4 canales
Convertidores Analógico – digital	8 canales y 8 bits de precisión
Programación	C, Basic, ensamblador. Se programa directamente, mediante el puerto de comunicaciones RS-232 de la computadora.
Presentación	Tarjeta 2.25" x 3.25"



**Figura 4.1** Fotografía del módulo Adapt 812

## 4.2 Modulador/demodulador ST7537

El ST7537 es un modulador/demodulador que utiliza modulación por corrimiento en frecuencia (FSK). Es orientado a la automatización de dispositivos mediante las líneas de potencia y cumple con el estándar CENELEC EN50065-1.

Este circuito integrado utiliza un voltaje de alimentación de 10V para la etapa de modulación/demodulación y 5V para la interfaz digital con el microcontrolador.

El modulador/demodulador ST7537 se acopla al sistema de potencia mediante un controlador externo (circuito discreto) y un transformador especial para alta frecuencia (TOKO 707VX). La velocidad de transmisión máxima es de 2400 bps (bits por segundo) y la frecuencia portadora es de 132.45KHz.

A continuación se presentan las características más importantes del modulador/demodulador ST7537.

- Orientado a automatización de dispositivos a través de las líneas de potencia.
- Transmisión Half-Duplex, Asíncrona, 2400 bps máximo
- Frecuencias de transmisión: 133.05 KHz = 0 131.85 KHz = 1
- Señal de transmisión (TX) de baja distorsión.
- Sensibilidad en recepción de 1 mV rms mínimo.
- Entrada para señal de 'WatchDog' que permite verificar si el microcontrolador se detiene en la ejecución del programa.
- Señal de detección de portadora, que permite indicar al microcontrolador si existe una señal a la frecuencia portadora en la red de potencia.
- Señal de reiniciar (RESET) para el microcontrolador.

La figura 4.3 muestra el modulador/demodulador, el cual se presenta en un paquete PLCC<sup>2</sup> de 28 pines. La figura 4.4 muestra un diagrama de bloques interno del ST7537 en el que se muestran las etapas de modulación y demodulación así como los diferentes filtros pasa banda que este circuito integrado posee.

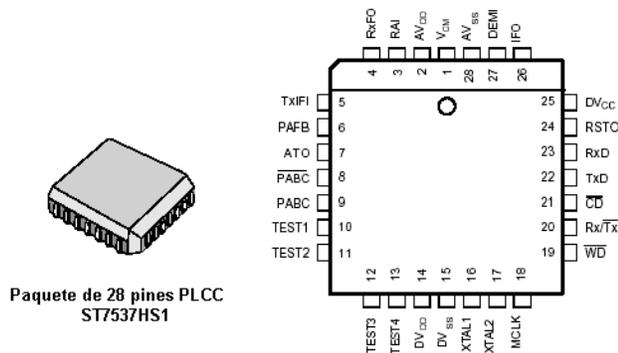


Figura 4.2 Encapsulado del Modulador/demodulador ST7537.

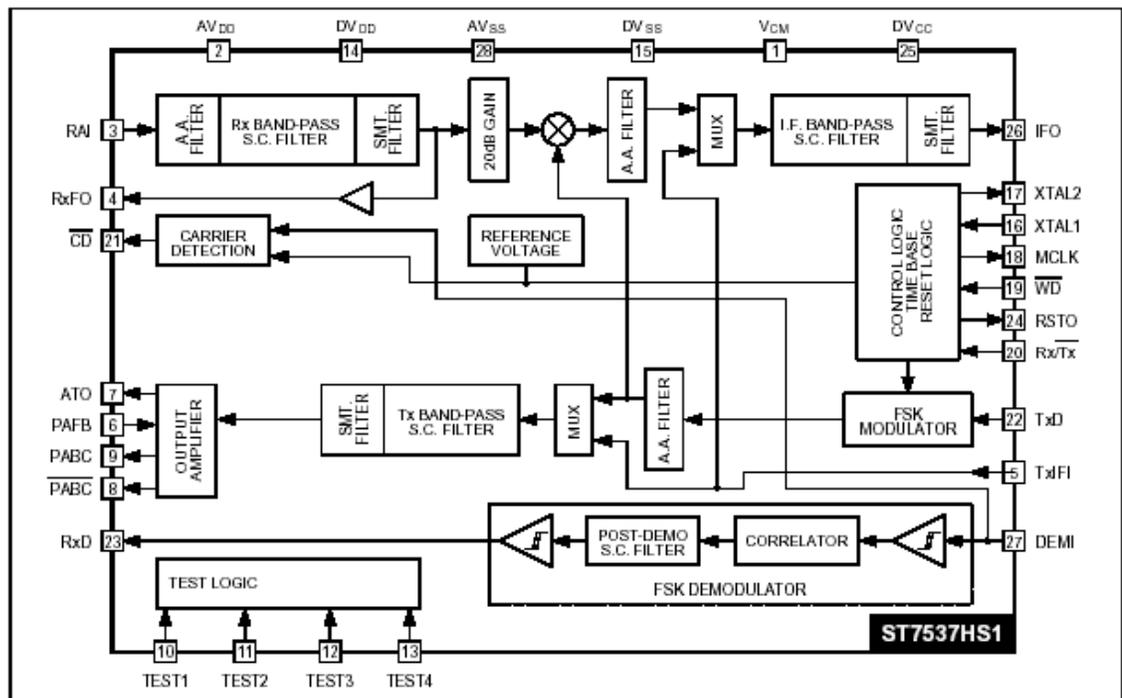


Figura 4.3 Diagrama de bloques interno del circuito integrado ST7537.

<sup>2</sup> Presentación física del encapsulado del circuito integrado

## **CAPITULO 5**

### **DESCRIPCION DEL SOFTWARE DEL SISTEMA**

---

#### **5.1 Software del MODEM**

A continuación se presenta una descripción detallada del software involucrado en el diseño del MODEM que comunica una computadora local, a través de las líneas de potencia, con una computadora remota que utiliza un MODEM idéntico. Se describen las aplicaciones y herramientas utilizadas para la compilación y descarga del programa en el MODEM así como su diseño de software.

##### **5.1.1 Aplicaciones utilizadas**

El software del MODEM se encuentra almacenado en el microcontrolador 68HC812A4 de Motorola, parte principal del módulo para desarrollo de prototipos Adapt812, descrito en la sección 4.1.

El software residente en el microcontrolador fue programado en lenguaje ensamblador AS12, el cual es soportado por toda la familia de microcontroladores HC12 de Motorola. La tabla 5.1 muestra una lista de las aplicaciones utilizadas para editar, compilar y descargar el programa en el microcontrolador vía puerto serie RS-232, así como una breve descripción de cada uno de ellos.

**Tabla 5.1** Aplicaciones utilizadas para edición, compilación y descarga.

<b>Aplicación</b>	<b>Descripción</b>
MiniIDE	Programa para edición, corrección de errores y compilación de los archivos ASM, en lenguaje ensamblador para HC12. Internamente utiliza el compilador As12 para generar los archivos de extensión S19. Es para ambiente Windows
As12	Compilador para el ensamblador de la familia HC12. Genera un archivo con extensión S19 que es el que posteriormente se descarga en la memoria EEPROM del microcontrolador. Es para ambiente DOS
P8S1,P8S2	Programas para descargar el archivo de extensión S19 al microcontrolador por los puertos COM1 y COM2 respectivamente. Es para ambiente DOS

### 5.1.2 Protocolo de comunicación

La comunicación del módulo de control (microcontrolador) se lleva a cabo en dos direcciones. El módulo debe comunicarse con la computadora y también con la etapa de modulación, la cual transforma la señal de datos serie y la modula en frecuencia.

Para la comunicación MODEM - Computadora se utiliza el protocolo mostrado en la figura 5.1. Se tiene un paquete de información conformado por dos caracteres (bytes<sup>3</sup>) que contienen la longitud del bloque y que para efectos de minimizar errores deben ser idénticos; un carácter (byte) de código, que únicamente toma 3 posibles valores y un bloque de información de 128 caracteres máximo.

La tabla 5.2 muestra los 3 posibles códigos presentes en el paquete de información y su descripción.

Esta información contenida en el paquete de información permite que en el proceso de comunicación la longitud del bloque de datos sea conocida, así como los diferentes códigos de comunicación que permiten mantener un control sobre el flujo de la información y el tiempo en que esta es enviada o recibida.



**Figura 5.1** Protocolo utilizado entre el MODEM y la PC

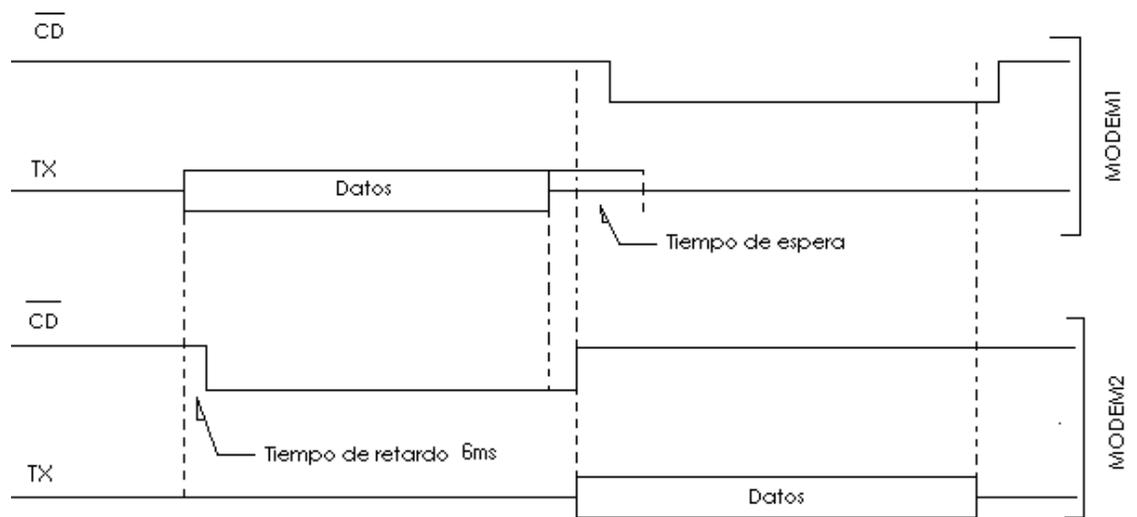
<sup>3</sup> Paquete de información conformado por 8 bits. Puede representar valores entre 0 y 255

**Tabla 5.2** Códigos utilizados en la comunicación MODEM-PC

Código	Descripción
A	Bloque de datos. No hay código., el contenido es un bloque de datos.
O	MODEM Ocupado. Se utiliza cuando el registro (buffer) de entrada del MODEM está lleno y se requiere que la computadora espere.
L	MODEM Listo. Se utiliza cuando el registro (buffer) de entrada se ha liberado y el proceso puede continuar normalmente.

La figura 5.2 muestra el protocolo utilizado en la comunicación MODEM-MODEM a 1200 bps. En este caso ningún carácter de control o código es transmitido, sino únicamente se transmiten datos debido a que interesa evaluar la pérdida de información a través de las líneas de potencia. Si se transmitieran códigos o información de control esta podría alterarse y provocar inconsistencias en el funcionamiento del MODEM o del programa de evaluación. Es importante recalcar que no se cuenta en el programa del MODEM con ningún tipo de protocolo o algoritmo de corrección de errores, pues precisamente interesa visualizar la pérdida de información como consecuencia de diferentes factores. Si se implementara un protocolo que permitiera la identificación y corrección de errores y brindara seguridad a los datos es posible entonces enviar información de control con toda tranquilidad, sin embargo ese no es el interés por el momento.

Para controlar el flujo de los datos y evitar los choques de información a través del único canal disponible para la transmisión se utiliza la función de detección de portadora del ST7537 sumado a un tiempo de espera por software. Cuando el modulador/demodulador detecta la presencia de una portadora a la frecuencia de transmisión, con amplitud mayor a 5mV entonces la señal de detección de portadora (CD) del ST7537 cambia de estado indicando al microcontrolador que no transmita. En la figura 5.2 se muestra el estado de la señal CD y el flujo de los datos.



**Figura 5.2** Protocolo utilizado entre el MODEM local y el MODEM remoto

### 5.1.3 Diseño del Software para el MODEM

El Microcontrolador del MODEM es el encargado de manejar todas las señales de control involucradas en el proceso de comunicación, recibir y almacenar la información serie proveniente de la computadora y enviar la información serie al modulador/demodulador ST7537.

Las velocidades de transmisión de datos Computadora – MODEM y MODEM - MODEM son diferentes, por lo cual el almacenamiento en memoria de los distintos bloques de información se hace necesario. La comunicación entre la computadora y el MODEM se lleva a cabo a una velocidad de 9600 bps y la recepción y transmisión se pueden realizar al mismo tiempo (full-duplex). Por el contrario la comunicación MODEM-MODEM se lleva a cabo a 1200 bps y la transmisión y recepción en tiempos diferentes (Half-duplex)

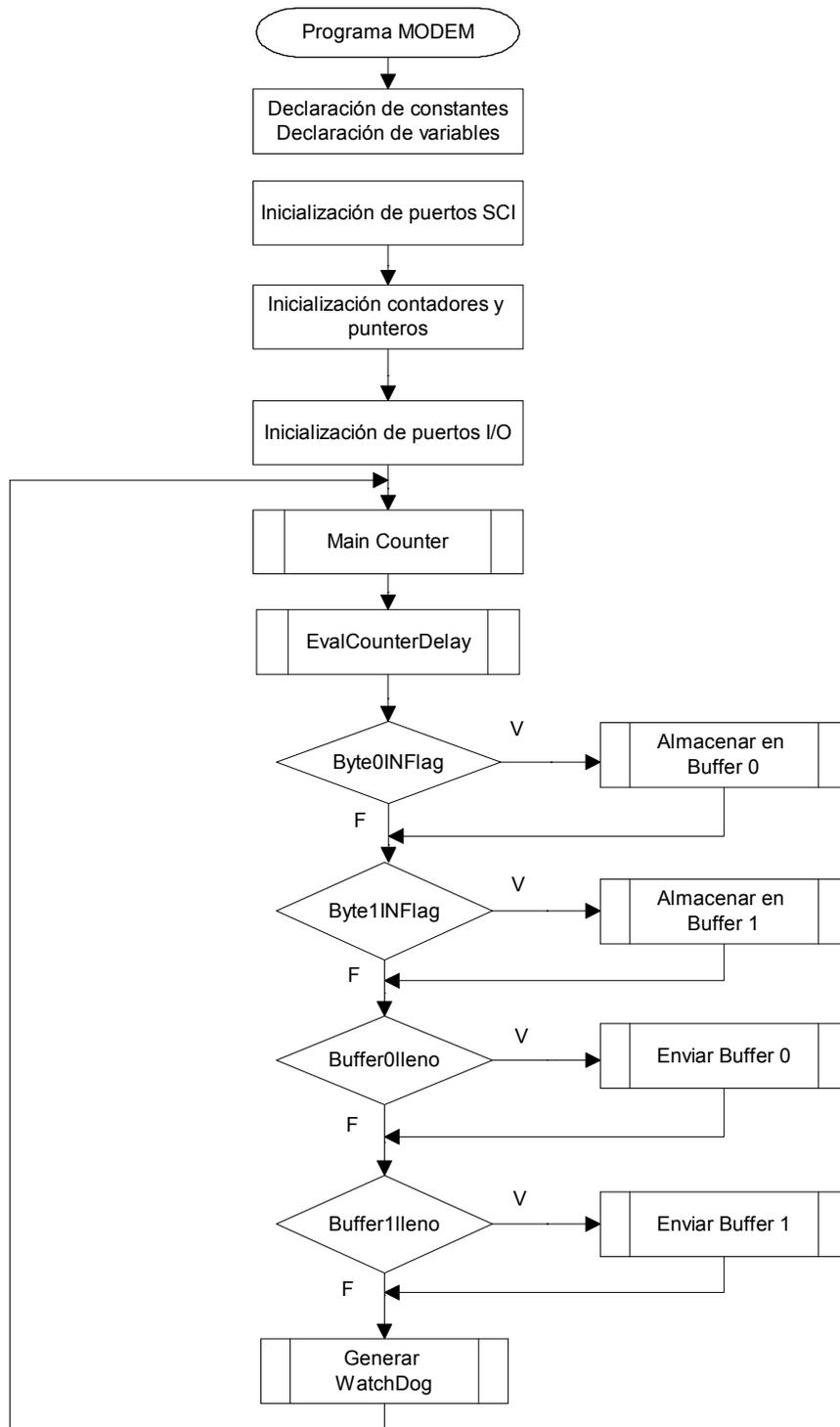
La figura 5.3 corresponde al diagrama de bloques de la rutina o ciclo principal del programa en el MODEM. La rutina inicia con la declaración de las constantes y variables del programa, seguida por la inicialización y configuración de los puertos de comunicación SCI (Interfaz de Comunicación Serial). Es aquí donde se establecen las velocidades de 9600 bps para la interfaz serie SCI0 y 1200 bps para la interfaz serie SCI1. Posteriormente se inicializan los punteros y contadores necesarios para la manipulación de los datos en memoria y luego se inicializa el puerto J, utilizado para el control del ST7537.

La siguiente parte la constituye un lazo infinito dentro del cual se revisa constantemente el ingreso de un nuevo carácter (byte). Estos bytes se cargan en las rutinas de interrupción correspondientes al SCI0 y SCI1, las cuales se muestran en la figura 5.4. Además, se verifica el estado de los bloques (buffers) en memoria donde se almacenan los paquetes de información entrantes.

Si alguno de los dos “buffers” se llena, es decir, se ha recibido y almacenado un bloque de información proveniente de alguno de los dos puertos, se procede entonces a enviarlo por el otro puerto siguiendo los lineamientos del protocolo explicado en la sección 5.1.2.

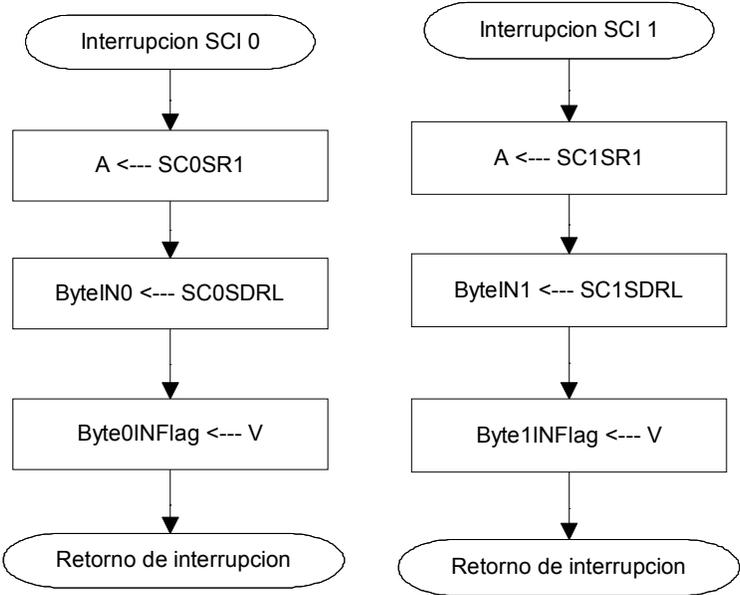
Los subprocesos “MainConter” y “EvalCounterDelay” se encargan de contar los ciclos del programa principal y evaluar el valor del contador de ciclos. Esto se utiliza en la recepción de información proveniente de la línea de potencia para generar un tiempo de espera después del último carácter recibido, con el fin de fijar el fin de bloque. Esto debido a que, como se mencionó anteriormente, no existe ningún código o carácter de longitud que se transmita a través de la línea de potencia y que pueda utilizarse como referencia para conocer la longitud del bloque de información.

El subproceso “GenerarWatchDog” se encarga de generar una señal cuadrada de período inferior a 1.5 segundos, la cual es necesaria para alimentar el módulo de WatchDog del ST7537. El ancho del período de la señal es variable, pues depende de la ejecución del programa en el MODEM, pero nunca será mayor a 1.5 segundos. La razón por la que se genera esta señal en esta forma y no con un temporizador es precisamente porque el ST7537 vigila que el microcontrolador se mantenga en ejecución y si por alguna razón el programa se detiene el ST7537 genera una señal de reinicio (RESET) para el microcontrolador.



**Figura 5.3** Diagrama de flujo de la rutina principal del programa

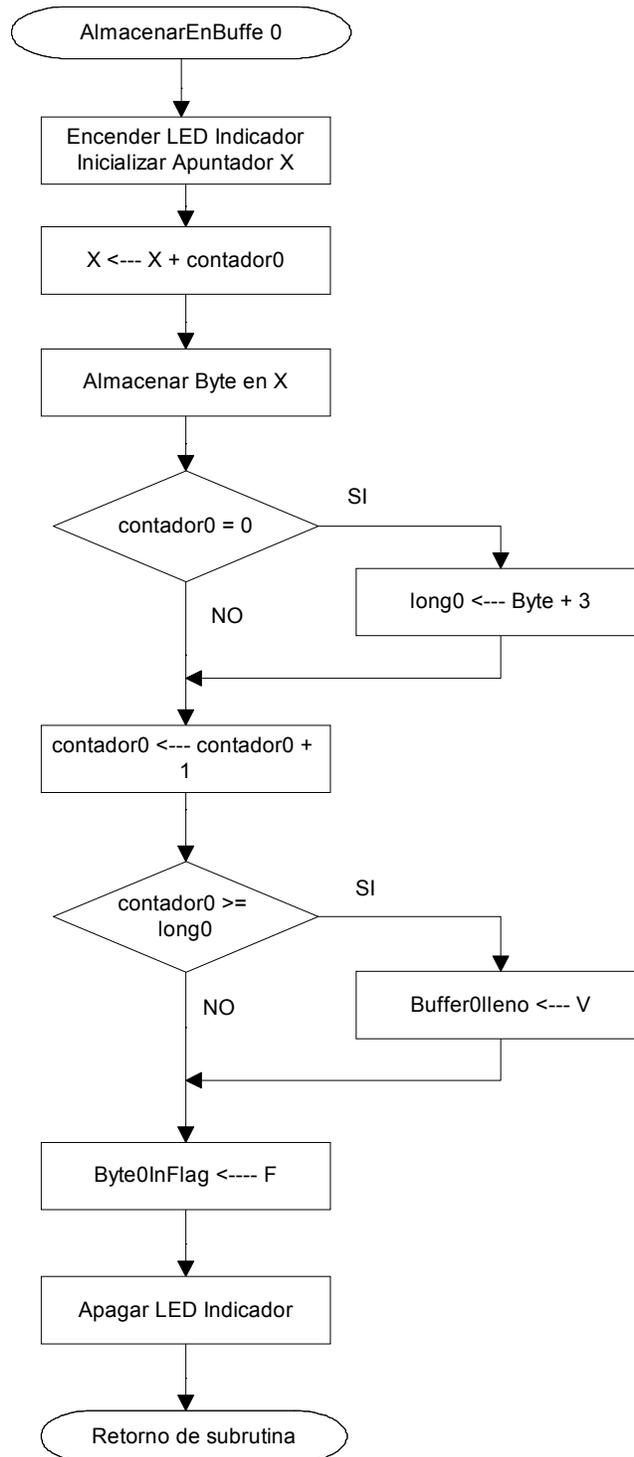
La figura 5.4 muestra las rutinas de interrupción de los puertos de comunicación SCI1 y SCI0 del microcontrolador 68HC812A4. Ambas son idénticas; Se almacena el valor del carácter (byte) recibido en el registro A de 8 bits, luego se carga en la variable correspondiente y finalmente se pone en verdadero (FF) la bandera que indica la presencia de un nuevo carácter (byte). Esta bandera es evaluada en el programa principal fuera de la rutina de interrupción para luego almacenar el caracter en el buffer correspondiente.



**Figura 5.4** Rutinas de interrupción para el SCI1 y SCI2

La figura 5.5 muestra el diagrama de flujo de la subrutina utilizada para almacenar un carácter (byte) en el "buffer0". El apuntador del inicio del buffer0 en memoria es el registro "X". La variable "contador0" lleva el número de caracteres (bytes) almacenados, por lo que al iniciar el programa ésta se inicializa con un cero. La posición en memoria donde debe almacenarse el caracter esta dada por el valor de "X" sumado al valor del "contador0". Luego de almacenar el caracter se determina si este es el caracter de longitud, es decir, el primero recibido. De ser así se almacena su valor en "long0" y se incrementa en 3 debido a que el bloque contiene dos caracteres de longitud y uno de código.

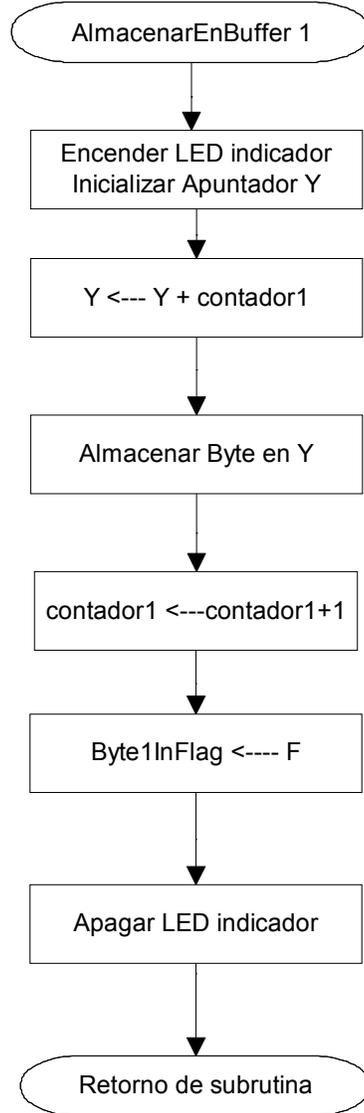
Posteriormente el "contador0" se incrementa en 1 y se evalúa si es igual a "long0", es decir, si es el último caracter del bloque. En caso de que sea el último caracter la bandera de "buffer0" lleno se pone en "verdadero" (FF). Luego la bandera de caracter presente "Byte0INFlag" se pone de nuevo en "falso" (00) y se retorna de la subrutina.



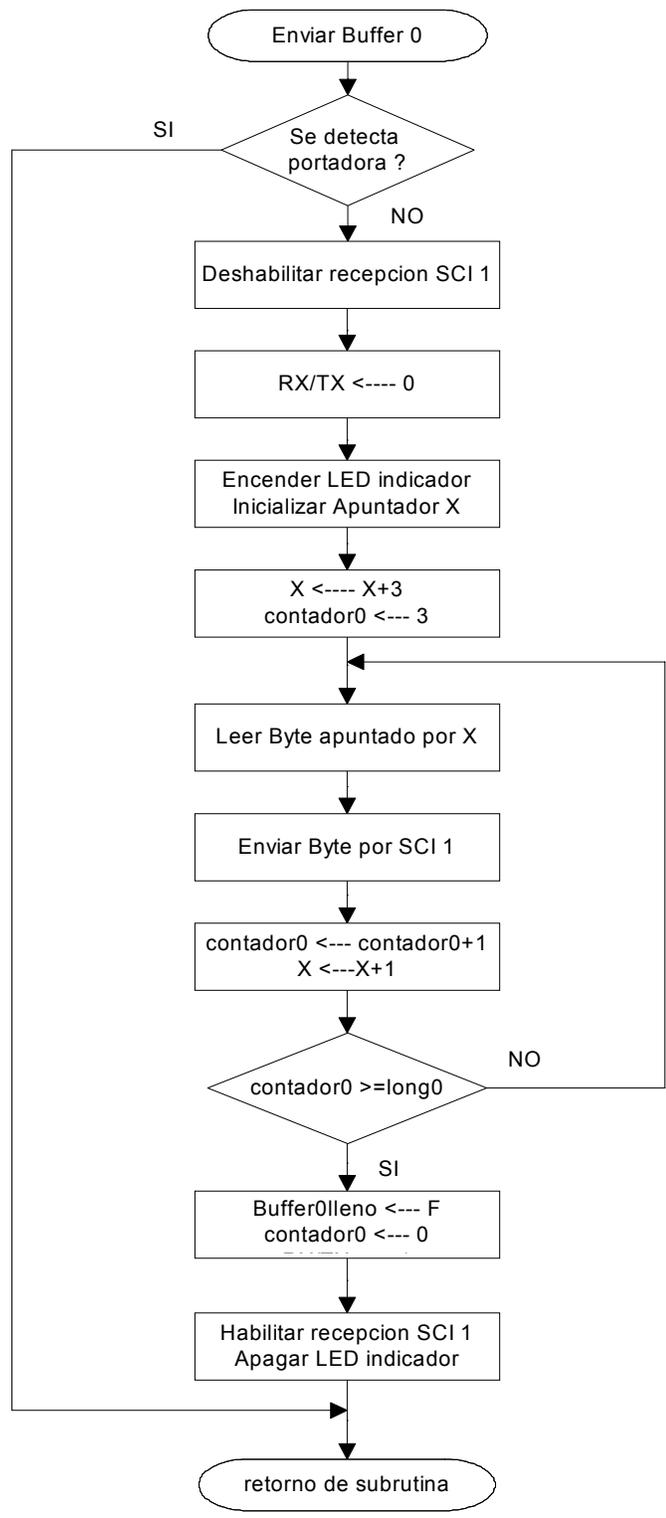
**Figura 5.5** Subrutina para almacenar un caracter en el “buffer0” proveniente del puerto SCI0

La subrutina para almacenar un caracter proveniente del “SCI1” en el “buffer1” se muestra en la figura 5.6 y es muy similar a la rutina anterior, con la salvedad de que en este caso no se recibe un caracter de longitud ni se conoce el tamaño del bloque a recibir. El almacenamiento se lleva a cabo en forma secuencial, conforme los caracteres son recibidos en el puerto de comunicaciones SCI1. La bandera de buffer1lleno es controlada por el contador de ciclos del programa, el cual, si después de 255 ciclos no detecta el ingreso de un nuevo caracter al buffer, activa esta bandera, habilitando así la transmisión del contenido del “Buffer1” al programa residente en la computadora.

La figura 5.7 corresponde al diagrama de flujo de la rutina que envía el contenido del “buffer0” por el puerto de comunicaciones SCI1. Primero se evalúa el estado de la señal de detección de portadora (CD) que indica la presencia de una frecuencia portadora en la línea de potencia. Si esta señal está en “0” no se transmite el bloque sino hasta el siguiente ciclo de programa principal, donde se volverá a evaluar el estado de la señal. Si CD está en “1” se procede al envío del “buffer0”. Primero se deshabilita la recepción por ese puerto y se cambia el estado de la señal RX/TX para indicar al modulador que cambie a modo de transmisión. Posteriormente se posiciona el “apuntador X” al inicio del buffer y se envía cada caracter secuencialmente hasta que el “contador0” sea igual a la longitud del bloque almacenada en “long0”. Finalmente se cambia el estado de la bandera “Buffer0full” y se habilita nuevamente la recepción.



**Figura 5.6** Subrutina para almacenar un caracter en el “buffer1” proveniente del puerto SCI1



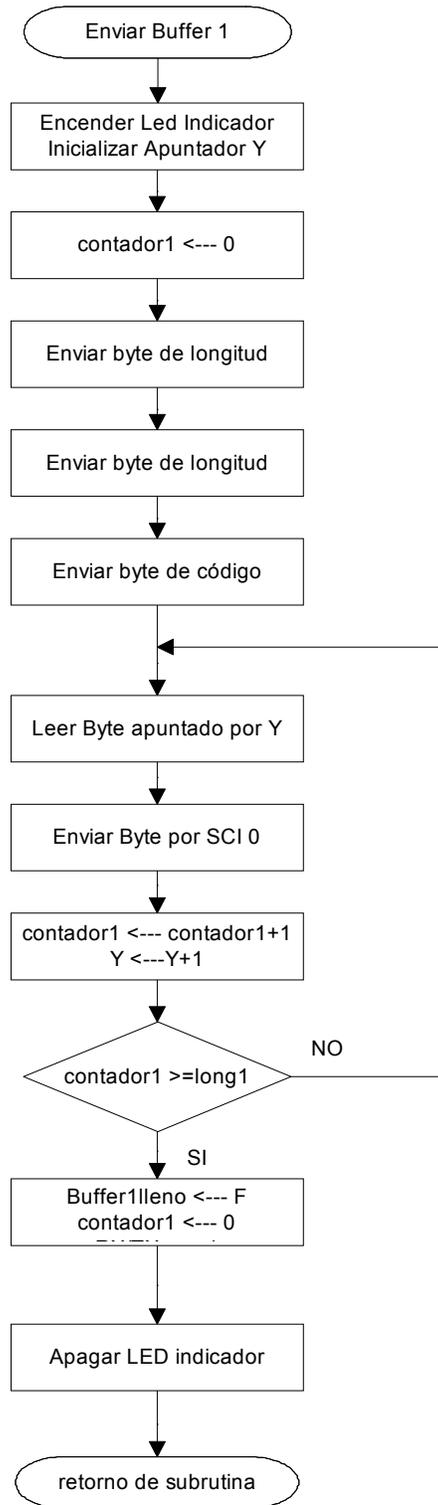
**Figura 5.7** Subrutina para enviar el “buffer0” por el puerto SCI1

La subrutina para enviar el “buffer1” por el puerto de comunicaciones SCI0 es muy similar a la anterior, con la diferencia de que no se evalúa la señal de detección de portadora, pues en este caso la comunicación es con la computadora. El diagrama de flujo para esta subrutina es mostrado en la figura 5.8.

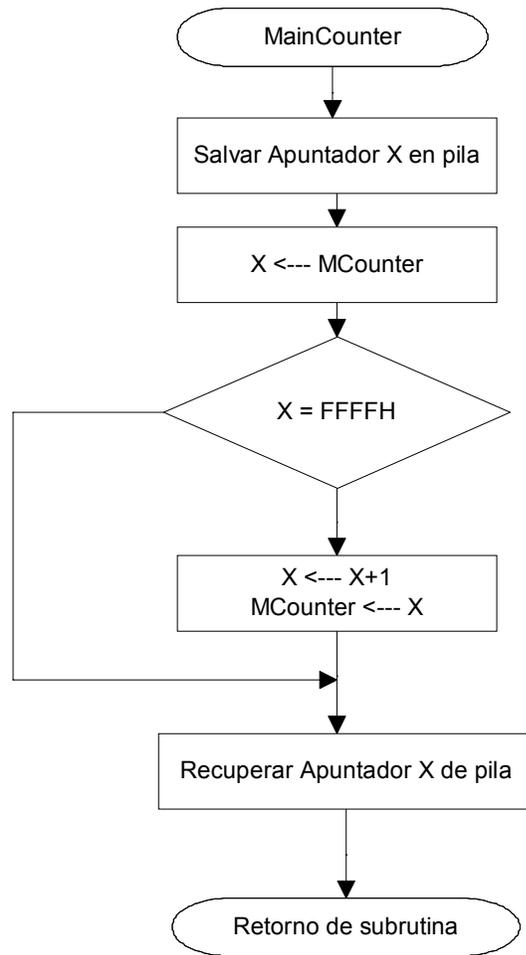
La figura 5.9 muestra el diagrama para el contador de ciclos de programa principal. Esta rutina se encarga únicamente de incrementar el valor del contador y asegurarse que no ocurra un sobre flujo, al limitar su incremento a FFFFh (65535 decimal)

La figura 5.10 corresponde a la subrutina de evaluación del contador de ciclos de programa. Puede observarse que si el valor de la variable de conteo “Mcounter” es mayor o igual al valor 00FFh (255 decimal) entonces la variable de “Buffer1lleno” se pone en verdadero FFh (255 decimal) . Esto equivale a preguntar 256 veces si existe un nuevo caracter que halla ingresado por el puerto SCI1. Esta es la subrutina encargada de fijar el final de bloque para la información entrante por el puerto SCI1, debido a la ausencia de caracteres de control, tal y como se explicó anteriormente.

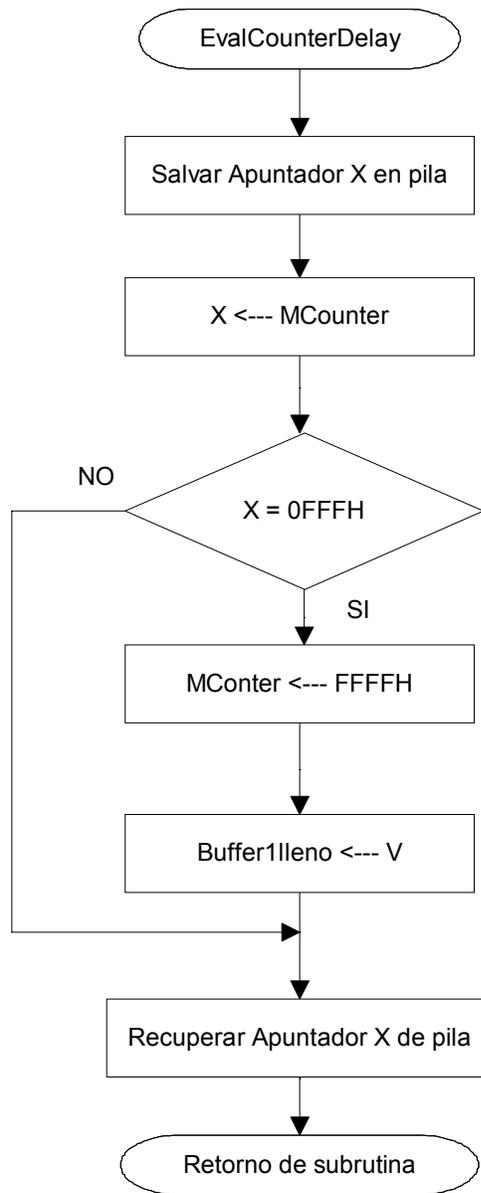
Finalmente, la figura 5.11 muestra la subrutina encargada de generar la señal cuadrada “WD” que se conecta al ST7537 y que alimenta el módulo de WatchDog presente en este circuito integrado. El período de la señal es variable, pero no mayor a 1.5 segundos que es el mínimo para que no se produzca una señal de reinicio (RESET) en el sistema por parte del ST7537.



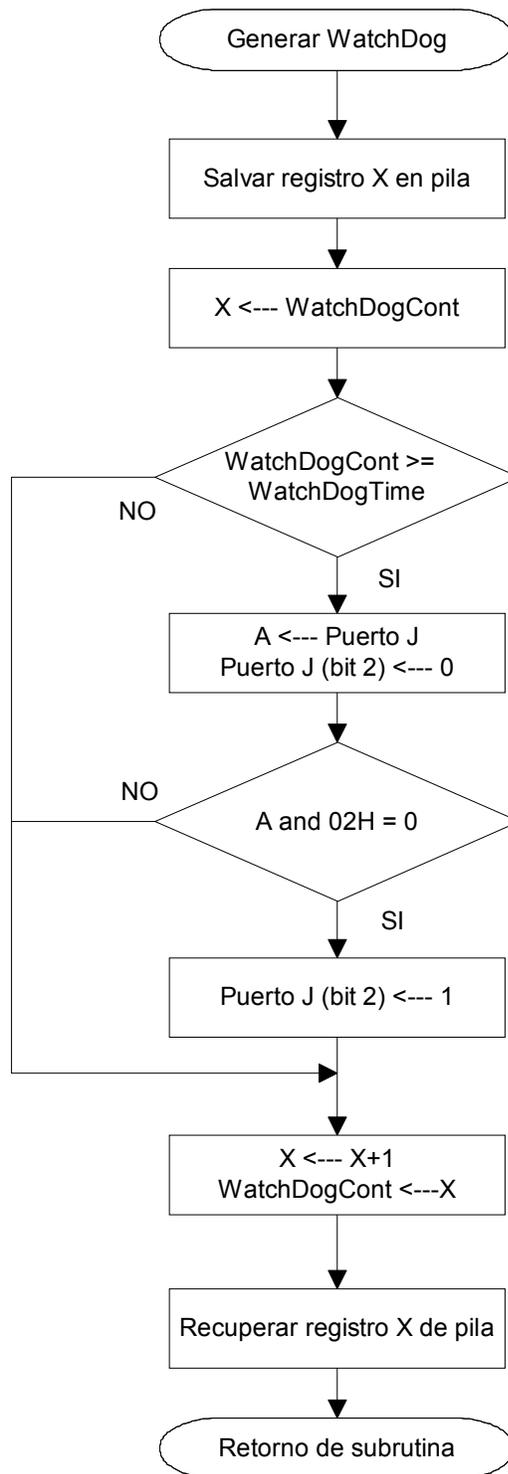
**Figura 5.8** Subrutina para enviar el “buffer1” por el puerto SCI0



**Figura 5.9** Subrutina de conteo de ciclos de programa principal



**Figura 5.10** Subrutina para evaluar el valor del contador de ciclos de programa



**Figura 5.11** Subrutina para generar la señal de “WatchDog” para el ST7537

## 5.2 Software de evaluación PLCEVAL

Este software fue implementado en el lenguaje de programación Delphi 5.0 y permite realizar una evaluación de la comunicación en tiempo real.

La figura 5.12 muestra la ventana principal del programa de evaluación PLCEVAL. El programa tiene dos modos de operación, el modo “chat” y el modo “evaluación”, los cuales se activan con los botones localizados en la parte superior izquierda de la ventana. Además el software permite configurar el puerto de comunicaciones a utilizar, la velocidad de transmisión y los bits de parada y paridad.

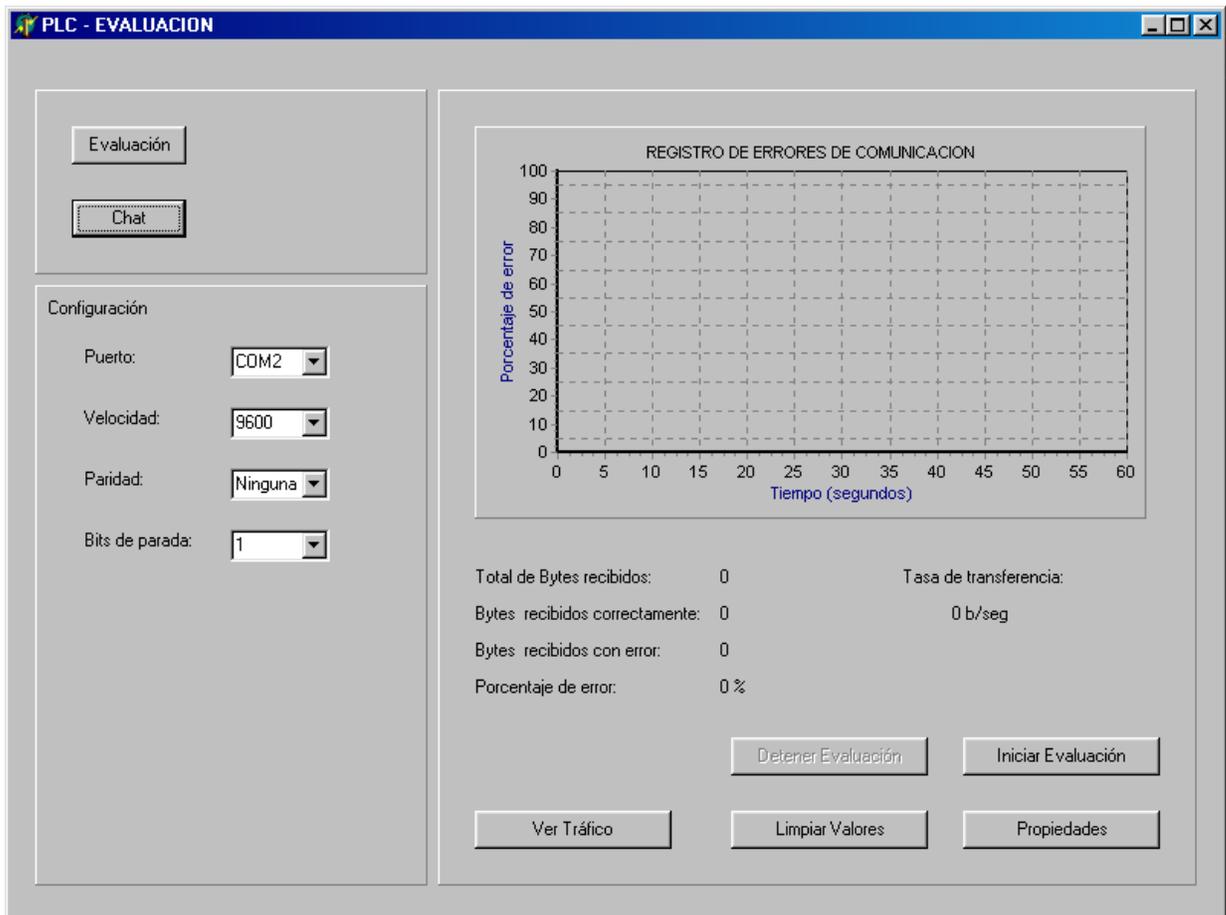


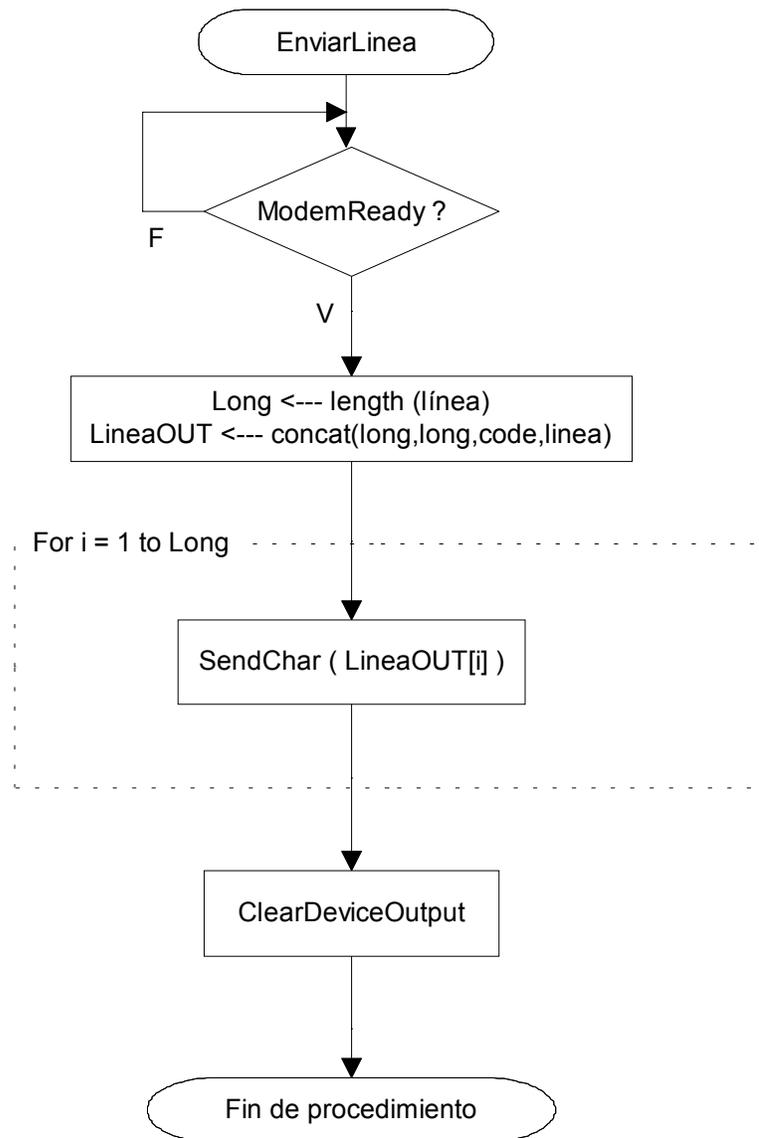
Figura 5.12 Ventana principal del software de evaluación PLCEVAL

En el modo evaluación existe la posibilidad de configurar, mediante el botón de propiedades, la frase de prueba a utilizar en el proceso de comunicación así como el nombre y localización de dos archivos de reporte, uno que almacena las frases de prueba recibidas y otro que registra los datos de la comunicación.

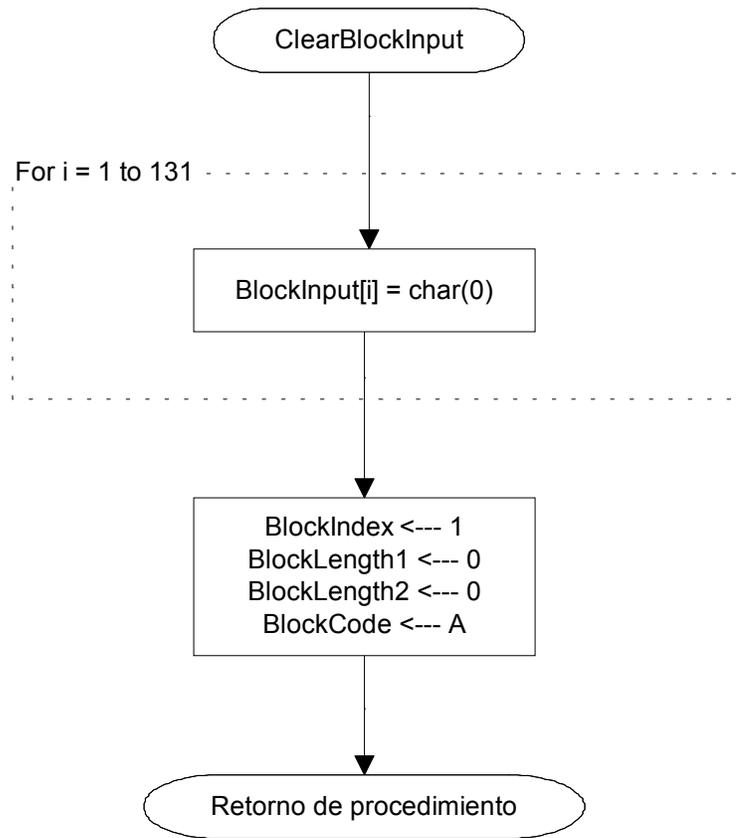
El gráfico de registro de errores de comunicación permite visualizar el porcentaje de error en el tiempo, mientras se lleva a cabo el proceso de evaluación. Adicionalmente es posible visualizar el tráfico de la información entrante mediante la opción “ver tráfico”, disponible en la ventana principal del software de evaluación PLCEVAL.

La figura 5.13 corresponde al diagrama de flujo del procedimiento utilizado para enviar un bloque de información por el puerto serie de la computadora. La variable “ModemReady” indica el estado del MODEM. Si el contenido de “ModemReady” es FFh (255 decimal) entonces el programa debe esperar para enviar el bloque. Cuando “ModemReady” es 00h (0 decimal) se procede al envío de la información. Cada carácter (byte) es enviado en forma secuencial hasta completar el bloque. Posteriormente se procede a limpiar el “buffer” de salida del componente de comunicación serie.

La figura 5.14 muestra el procedimiento utilizado para limpiar el bloque de entrada en memoria. Mediante un ciclo que se repite 131 veces se sustituye cada carácter almacenado en el bloque por un carácter nulo (0 decimal). Posteriormente se inicializan las variables que contienen la longitud del bloque y el código, así como la variable “BlockIndex” que es la variable que lleva el conteo de los caracteres almacenados en el bloque de entrada.

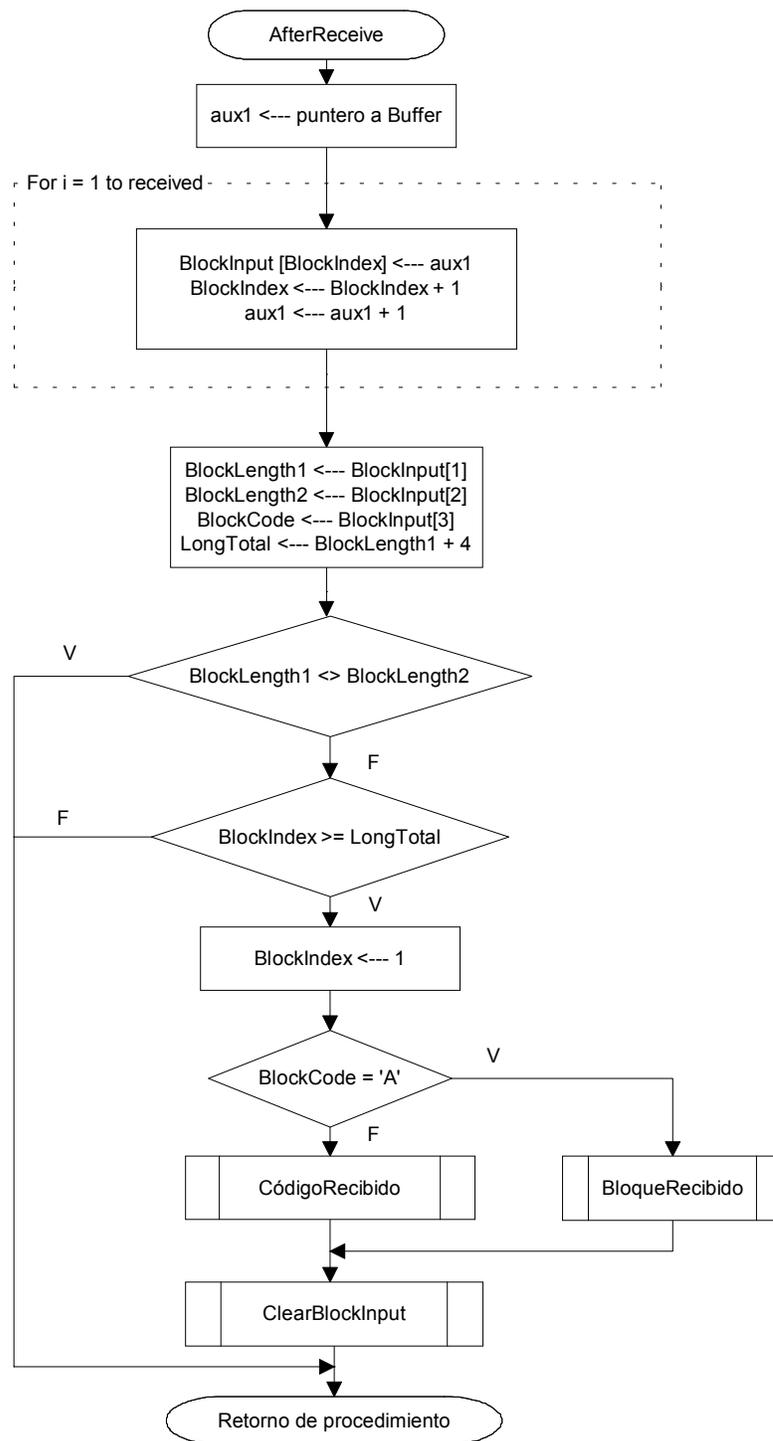


**Figura 5.13** Procedimiento para enviar una línea de caracteres por el puerto de comunicaciones seleccionado.



**Figura 5.14** Procedimiento para limpiar el “buffer” de entrada e inicializar las variables.

La figura 5.15 muestra el diagrama de flujo del evento generado por el componente de comunicación al recibir un bloque de datos, el cual es normalmente de 8 caracteres. Inicialmente se asigna la variable tipo puntero “aux1” al “buffer” en memoria donde se encuentran los caracteres que han ingresado por el puerto serie. Seguidamente se almacena cada caracter (byte) entrante en el bloque de memoria “BufferInput”.



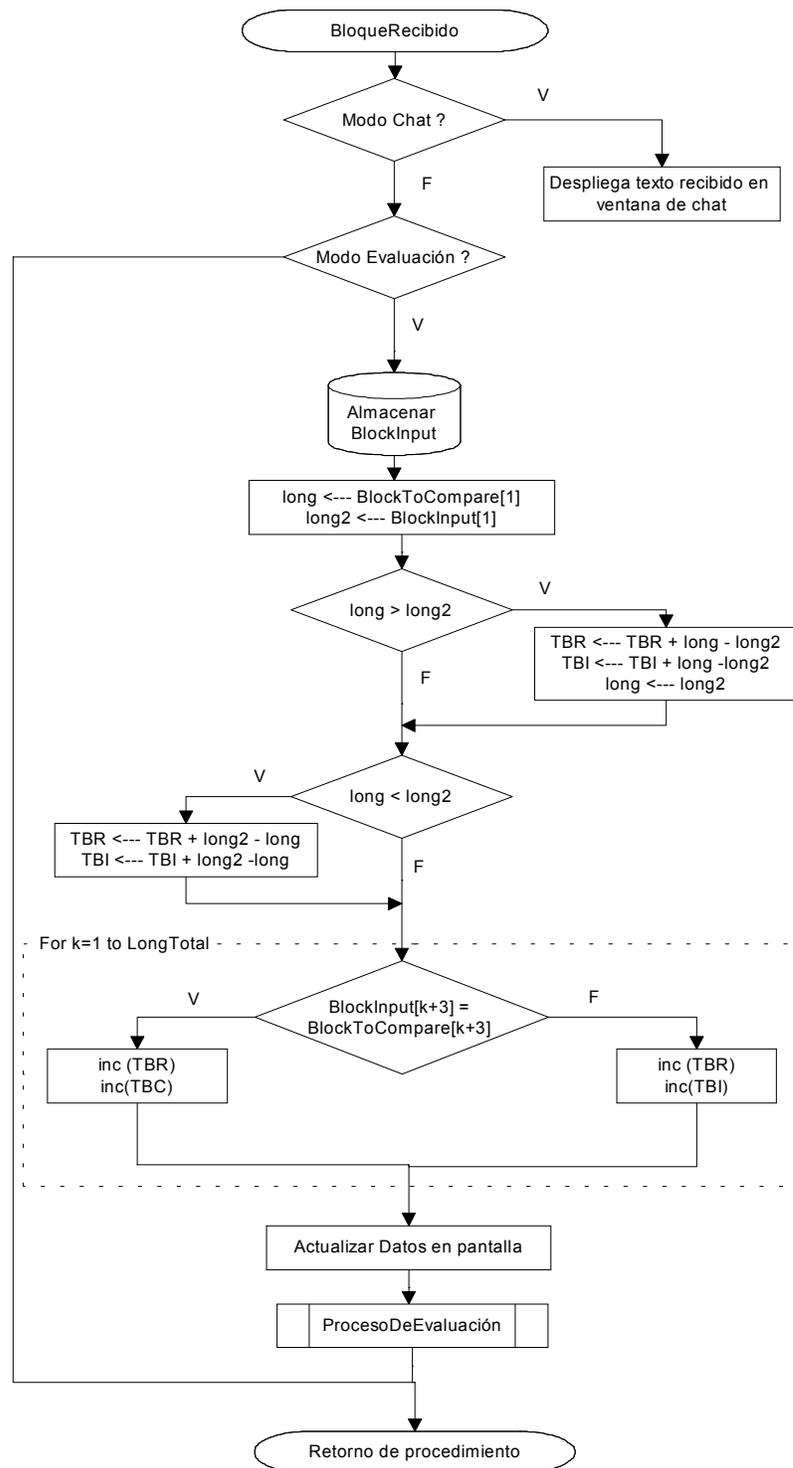
**Figura 5.15** Diagrama de flujo del evento generado por el componente de comunicación al recibir un bloque de datos

También se leen los caracteres de longitud almacenados en las posiciones 1 y 2 del bloque de entrada, así como el caracter de código almacenado en la posición 3 del mismo bloque.

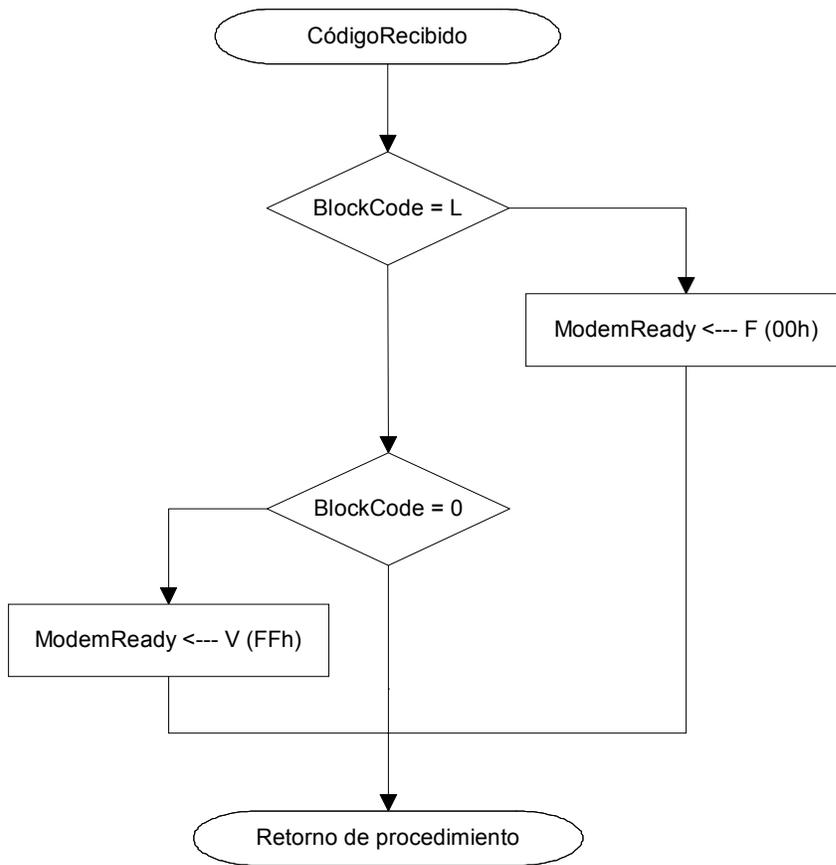
Posteriormente se evalúa si ambos caracteres de longitud recibidos son idénticos y de no ser así se abandona el procedimiento. Luego se verifica, mediante el valor de la variable "LongTotal" y su comparación con "BlockIndex" si todo el bloque de datos ha sido recibido. En caso de ser así se verifica si el contenido de la información entrante es un código de operación o un bloque de información, para luego invocar el procedimiento correspondiente.

La figura 5.16 presenta el diagrama de flujo del procedimiento "BloqueRecibido". Este procedimiento es invocado cuando el MODEM envía al computador un bloque de información. Si el modo de trabajo es "chat" entonces únicamente debe desplegarse la información entrante en la ventana del "chat". En caso de que el modo de trabajo sea "evaluación" se procede a realizar un análisis del bloque de información entrante, comparando su contenido con una frase de prueba previamente definida en la sección de propiedades. En esta etapa de análisis, para cada caracter (byte) recibido se incrementa en uno el valor de la variable TBR (Total de Bytes Recibidos). Para cada caracter incorrecto se incrementa en uno TBI (Total de Bytes Incorrectos) y para cada caracter correcto se incrementa TBC (Total de Bytes Correctos). Estas variables son utilizadas posteriormente para generar la información en pantalla y el gráfico en tiempo real.

La figura 5.17 muestra el diagrama de flujo del procedimiento "CódigoRecibido". Este procedimiento es invocado cuando el MODEM envía al computador un código y no un bloque de información. Primero se evalúa si el contenido de la variable "BlockCode" es un caracter "O" y de ser así se cambia el valor de "ModemReady" a FFh (255 decimal). Si el valor de "BlockCode" es "L" entonces "ModemReady" toma el valor de 00h (0 decimal). Cualquier otro valor de "BlockCode" es ignorado en el procedimiento.



**Figura 5.16** Procedimiento para procesar del bloque de información recibido



**Figura 5.17** Procedimiento para definir el estado de “ModemReady” en función del código recibido.

# CAPITULO 6

## ANALISIS Y RESULTADOS

---

### 6.1 Explicación del diseño del MODEM

La figura 6.1 muestra un diagrama de bloques detallado del MODEM diseñado. En él se muestran los diferentes módulos que conforman el hardware del MODEM.

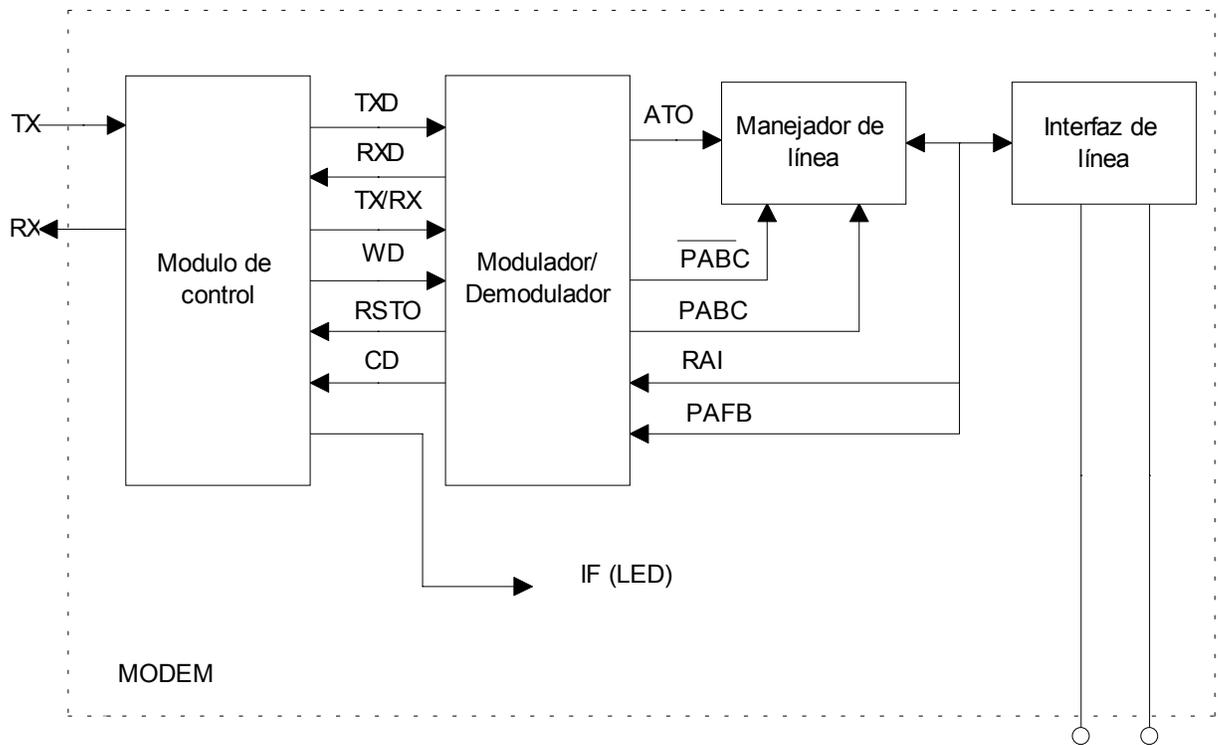


Figura 6.1 Diagrama de bloques interno del MODEM de potencia.

110VAC

### 6.1.1 Módulo de control

La sección de control está constituida por el módulo Adapt812, el cual consiste en un módulo para desarrollo de prototipos basado en el microcontrolador 68HC812A4 de Motorola.

El mismo se comunica con la computadora mediante un puerto RS-232. Internamente en el módulo mediante el circuito integrado SP232A se realiza el acople de la señal RS-232 a una señal TTL (0V / 5V), que es la soportada por los puertos de comunicaciones del microcontrolador 68HC812A4. El puerto de comunicaciones RS232 se encuentra físicamente conectado al circuito integrado SP232A, en el módulo Adapt812, y éste último al microcontrolador 68HC12A4.

Las señales RXD y TXD, mostradas en la figura 6.1, permiten transmitir los datos en formato serie desde el modulo de control al modulador/demodulador. Si bien el puerto SCI 1 del microcontrolador 68HC12A4 presenta la posibilidad de transmitir en ambas direcciones al mismo tiempo (full duplex), las señales RXD y TXD no se pueden utilizar al mismo tiempo, debido a la condición de transmisión y recepción bidireccional, pero en tiempos diferentes (half duplex), que presenta el circuito integrado ST7537. Esto se debe a que la línea de potencia es el único canal disponible para transmitir y recibir la información.

Mediante la señal RX/TX el módulo de control se encarga de manejar el flujo de información a través de las líneas de potencia. El microcontrolador puede indicar al modulador/demodulador si se desea transmitir datos (modo transmisión) o si se esta en espera de información (modo recepción).

El microcontrolador recibe también del modulador/demodulador la señal CD, que indica la presencia de una frecuencia portadora en la línea de transmisión de potencia, lo cual es útil para evitar choques de información.

Mientras la señal digital CD permanezca en “1” el canal está libre para transmitir datos. Cuando ésta cambia a “0” indica la presencia de datos en el canal de transmisión, por lo que el MODEM deberá esperar para transmitir la información. Una descripción más detallada de la señal de detección de portadora (CD) del circuito integrado ST7537 se presenta en el capítulo 4.

La señal IF, mostrada en la figura 6.1, se encuentra físicamente conectada a un diodo LED incluido en la tarjeta del módulo Adapt812. Esta señal indica cuando se recibe o transmite un bloque de datos por el canal de transmisión.

La tabla 6.1 presenta una lista de las señales de entrada y salida del módulo de control, sus características principales y una descripción de su función en el diseño del MODEM.

**Tabla 6.1** Descripción de señales de entrada/salida en módulo de control.

Nombre de la señal	Patilla física (68HC12A4)	Número de patilla	Dirección	Función en el diseño
TX	Puerto DB9	---	Salida	Puerto RS232, permite conectar la PC con el módulo Adapt812. Internamente el SP232A realiza la conversión RS232 a niveles lógicos TTL.
RX		---	Entrada	
TXD	PS3/TXD1	32	Salida	Salida de datos serie hacia el modulador. Se utiliza el puerto de comunicaciones SC1 del microcontrolador 68HC12A4
RXD	PS2/RXD1	34	Entrada	Entrada de datos serie desde el demodulador. Se utiliza el puerto de comunicaciones SC1 del microcontrolador 68HC12A4
TX/RX	KWJ2	19	Salida	Señal de control para el modulador. Se utiliza para cambiar de modo recepción a modo transmisión y viceversa.
WD	KWJ1	20	Salida	Señal de "WatchDog" para el modulador. Proporciona una señal cuadrada de 5V generada por software y con periodo inferior a los 1.5 segundos.
RSTO	RESET	44	Entrada	Señal de Reinicia programa, para el microcontrolador. Es manejada por el modulador/demodulador.
CD	KWJ3	18	Entrada	Detección de portadora. Indica al microcontrolador la presencia de una señal portadora en la red de potencia.
IF	PT6/OC6	111	Salida	LED indicador del flujo de datos.

### 6.1.2 El modulador/demodulador

Este bloque se encarga de tomar la información serie suministrada por el microcontrolador y modularla utilizando corrimiento en frecuencia (modulación FSK). Es controlado totalmente por el microcontrolador.

La figura 6.2 muestra el circuito eléctrico del bloque de modulación, el cual esta conformado por el circuito integrado ST7537, por una serie de capacitores y un acople para la señal RXD.

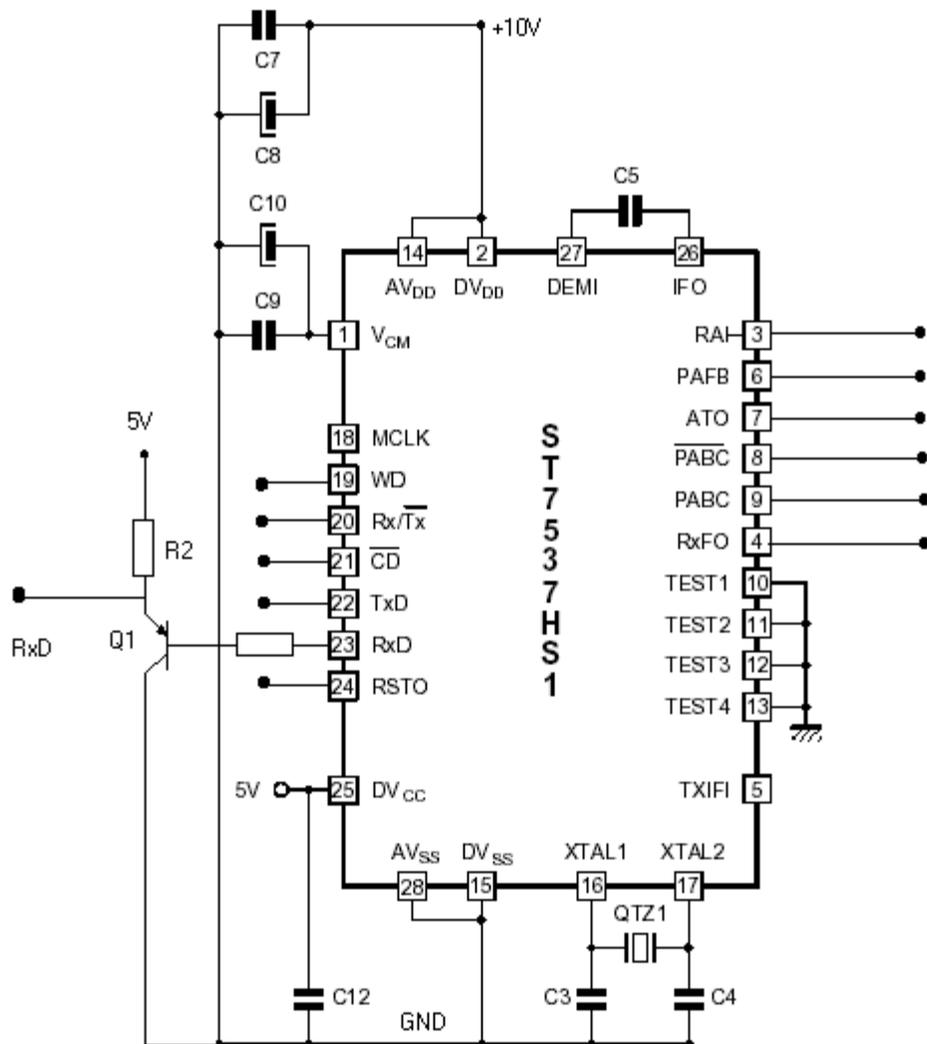


Figura 6.2 Circuito eléctrico del modulador/demodulador

El modulador/demodulador se alimenta con 5V para la sección digital, que es la que interactúa con el microcontrolador y con 10V para la sección analógica.

La señal “WD” corresponde a la entrada de la señal de “WatchDog” del microcontrolador y “RSTO” es la salida de la línea de “RESET” para el microcontrolador. “TXD” y “RXD” son las señales de entrada y salida de datos serie respectivamente. La señal RXD debió ser acoplada mediante un transistor npn debido a requerimientos de corriente en el micro. La señal “RX/TX” es la línea de control para pasar de modo recepción a modo transmisión y viceversa. CD es la señal de detección de portadora.

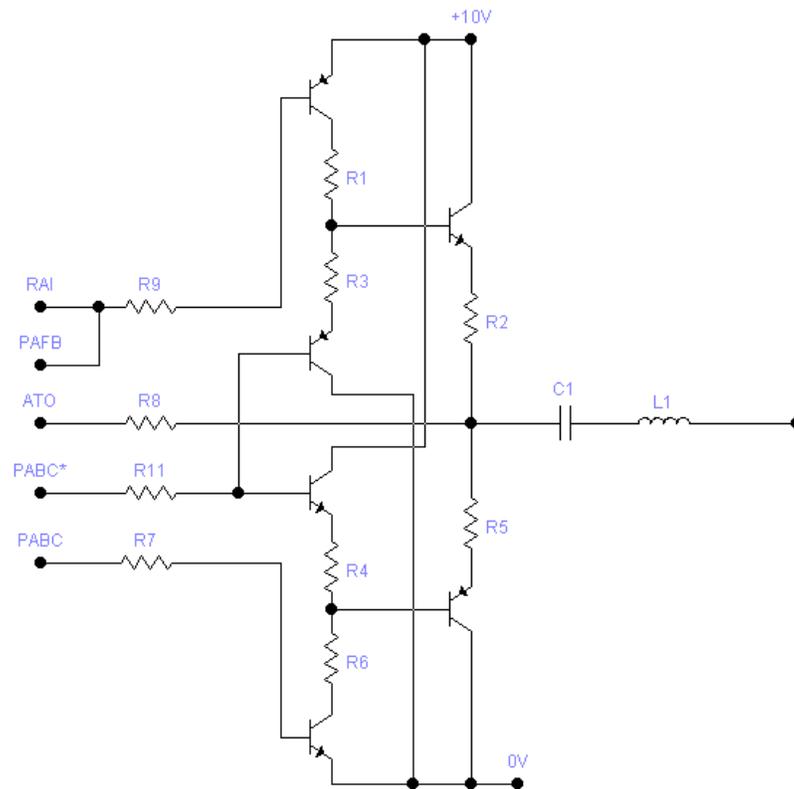
En el otro extremo del circuito integrado ST7537, mostrado en la figura 6.2, se tienen las señales que interactúan con el manejador de línea y la interfaz de línea. “PABC” y “PABC” habilitan y deshabilitan el manejador de línea, en función del estado de la señal “RX/TX”. La señal “ATO” corresponde a la salida de la información modulada en frecuencia y la señal “RAI” es la entrada de la información proveniente de la línea de potencia.

### **6.1.3 El manejador de Línea**

El manejador de línea se encarga de amplificar la señal de salida del ST7537, durante el modo de recepción de información.

Las señales “PABC” y “PABC” controlan la conexión y desconexión de éste módulo, en función del estado de la señal “RX/TX” que es manejada por el microcontrolador.

La figura 6.3 muestra el circuito eléctrico del manejador de línea. Los transistores Q2 y Q6 funcionan a modo de interruptor, habilitando esta etapa durante la transmisión y deshabilitándola durante la recepción.



**Figura 6.3** Circuito eléctrico del manejador de línea

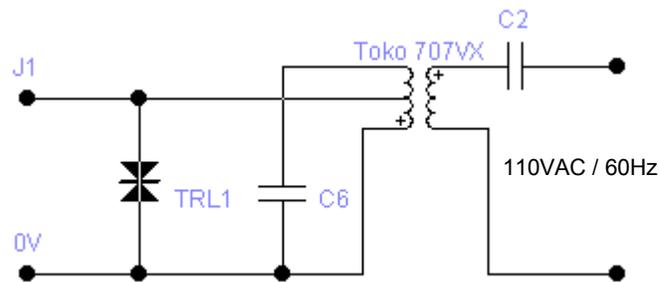
El manejador acopla el modulador ST7537 con la interfaz de línea, pues el circuito discreto presenta una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, además de una ganancia de voltaje unitaria.

Los transistores Q1,Q4 y Q5,Q3 se encuentran térmicamente acoplados, con el fin de mantener una misma temperatura de operación en ambos componentes y lograr así un comportamiento homogéneo.

#### 6.1.4 La interfaz de línea

Esta etapa permite acoplar el manejador de línea a la señal de potencia de 110V. Esta constituida por un transformador TOKO707VX-T1002N, un capacitor tipo X2 de 0,47 uF (C2), un supresor de transitorios (TRL1) y un capacitor de 6,8nF (C6) .

La figura 6.4 muestra un diagrama eléctrico de la interfaz de línea



**Figura 6.4** Diagrama eléctrico de la interfaz de línea

El transformador tiene varias funciones:

- Aislar el circuito de la línea de potencia
- Filtrar las armónicas de la señal transmitida
- Colocar y extraer la señal de información de la línea de potencia

El primario del transformador es utilizado, en conjunto con el capacitor C6, para crear un filtro pasabanda. La frecuencia de resonancia se ajusta a la frecuencia de transmisión, la cual es de 132,45 KHz, mediante el capacitor C6.

A partir de la fórmula 4 mostrada en el apéndice A.2 es posible determinar el valor de C6 para la frecuencia deseada.

Según la fórmula 4, para una inductancia equivalente en el transformador ( $L_{eq}$ ) igual a  $200,7 \mu\text{H}$  y una frecuencia de resonancia igual a la frecuencia portadora de  $132,45 \text{ KHz}$  el valor de  $C6$  sería de  $7,2 \text{ nF}$ . Este se aproxima a  $6,8 \text{ nF}$  que es el valor comercial más cercano. A partir de la fórmula 3, mostrada en el apéndice A.2, es posible calcular el valor de la frecuencia de resonancia al utilizar el capacitor de  $6,8 \text{ nF}$  en vez del capacitor de  $7,2 \text{ nF}$ . Sustituyendo los valores de  $L_{eq} = 200,7 \mu\text{H}$  y  $C6 = 6,8 \text{ nF}$  se obtiene que la frecuencia de resonancia es de  $132,1 \text{ KHz}$  lo cual no difiere mucho del valor deseado, el cual es de  $132,45 \text{ KHz}$ .

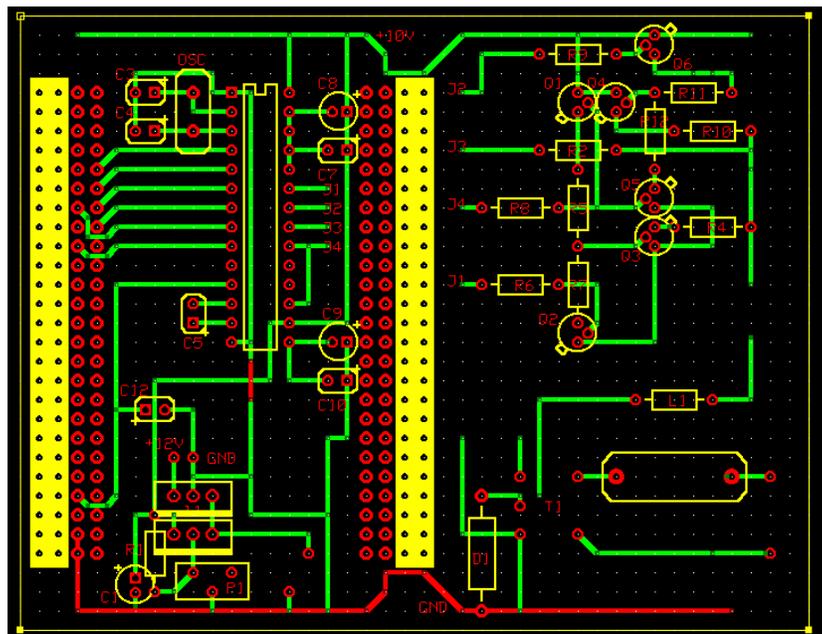
El capacitor de  $0,47 \mu\text{F}$  se utiliza para filtrar la señal de potencia de  $60 \text{ Hz}$ . Este capacitor es del tipo X2, que tiene protección contra corto circuito. Esto es importante para proteger el resto del sistema en caso de que se produzca un corto circuito en el capacitor.

Un supresor de transitorios bidireccional P6kE6V8CP de  $6.8 \text{ V}$  es utilizado como protección final. Este dispositivo recorta la señal de voltaje cuando ésta supera los  $6,8 \text{ V}$ , permitiendo que el resto del circuito sea protegido contra sobrevoltajes.

### 6.1.5 Diseño del circuito impreso

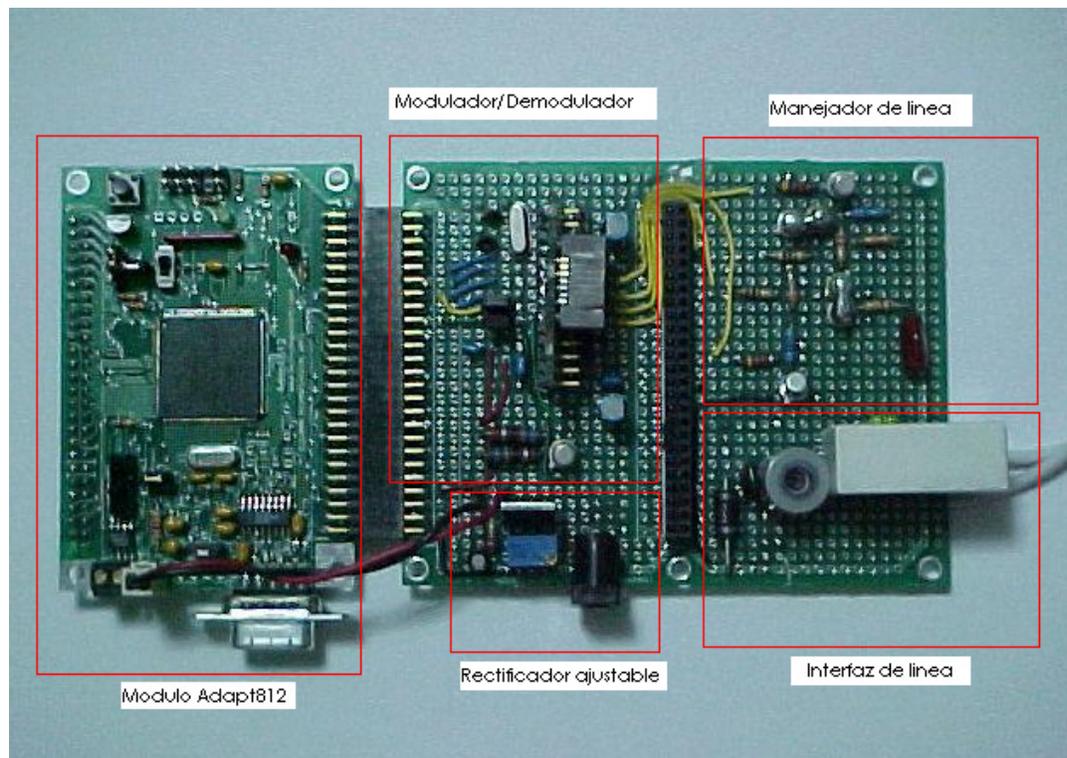
El circuito se implementó directamente sobre una tarjeta para prototipos Adapt12MAXPRO1 la cual permite el montaje en forma permanente de los diferentes componentes electrónicos del diseño y es perfectamente acoplable al módulo de control Adapt812. Esto facilitó no solamente el proceso de alambrado del circuito sino que también disminuyó las posibilidades de error de hardware y la susceptibilidad al ruido.

La figura 6.5 muestra un diseño del alambrado de las etapas de modulación/demodulación, el manejador de línea y la interfaz de línea. No se incluye el módulo Adapt812, pues este se acopla directamente a la tarjeta mediante un conector de 50 pines.



**Figura 6.5** Diagrama del alambrado físico de las diferentes etapas del MODEM en una tarjeta para prototipos Adapt12MAXPRO1

La figura 6.6 muestra una fotografía del MODEM diseñado, una vez que éste se ha implementado sobre la tarjeta para desarrollo de prototipos (solder-wrap). En la figura se muestra la etapa de modulación/demodulación, conformada por el ST7537, el módulo manejador de línea y la interfaz de línea. En la figura puede observarse la posición física de cada uno de estos módulos en la tarjeta. Adicionalmente se muestra el módulo de control (Adapt812), adaptado a la tarjeta mediante un conector de 50 pines, y el rectificador ajustable, que alimenta el circuito con 10V DC estables..



**Figura 6.6** Fotografía del MODEM diseñado e implementado en una tarjeta para desarrollo de prototipos

## **6.2 Análisis de las mediciones y pruebas de comunicación**

En esta sección se presenta un análisis de las mediciones y pruebas de comunicación realizadas, las cuales se presentan en el apéndice A.3.

La primera etapa consistió en realizar una serie de pruebas de comunicación entre dos MODEM idénticos, con longitudes de cable #16 conocidas y en configuraciones distintas de conexión, para lo cual se utilizaron varios dispositivos. La siguiente etapa consistió en someter el proceso de comunicación a una serie de perturbaciones causadas por diferentes aparatos que inyectan ruido en la línea de potencia.

Estas mediciones fueron realizadas en una oficina del Departamento de Investigación y Desarrollo, situada en el edificio de la Unidad Estratégica de Negocios, Proyectos y Servicios Asociados, Sabana Norte y en una vivienda convencional, situada en la urbanización Monte Azul en Paso Ancho.

La figura A.12 muestra una conexión simple de ambos MODEM a una regleta de protección, con una separación entre ambos de 17m, mediante el cable mencionado. Para esta primera conexión no se conectaron otras cargas adicionales a la regleta. En este caso existe un único punto de atenuación, aparte de la introducida por el cable, que corresponde a las conexiones en la regleta. La figura A.13 corresponde al porcentaje de error en el tiempo, para un período de evaluación de 60 segundos. En la tabla A.3 se observa que el porcentaje de error para esta conexión fue de 3,37 % lo cual es bastante bajo.

La siguiente prueba se realizó con una configuración igual a la anterior, mostrada en la figura A.14. En este caso si existían otras cargas conectadas a la regleta, principalmente equipo de computo y adaptadores de corriente alterna a corriente directa. La figura A.15 presenta un gráfico del porcentaje de error en el tiempo, donde se observa que la amplitud de los errores es similar a la figura A.13 pero se generan con más frecuencia. La figura A.16 es el gráfico en el tiempo de la señal de información modulada que fue transmitida por el MODEM 1.

La figura A.17 muestra la señal de información recibida por este mismo MODEM. De ambos gráficos puede calcularse la atenuación que sufre la señal de información al atravesar la configuración mostrada en la figura A.14. La tabla A.4 muestra los valores de voltaje pico-pico y RMS para estas señales, así como el valor de la atenuación que para este caso fue de  $-2,98$  dB. La tabla A.5 se observa un aumento significativo en el porcentaje de error, el cual es ahora de  $14,75\%$  y es atribuible al ruido producido por el equipo de cómputo conectado al mismo punto.

La siguiente configuración de prueba corresponde a la figura A.18. En este caso la señal de información debe pasar a través de varios dispositivos: dos regletas, una unidad suplidora de potencia (UPS) y un tomacorriente. Para esta prueba se registró un aumento en la amplitud del error de comunicación en el tiempo y un aumento significativo en el porcentaje de error, el cual se presenta en la tabla A.6 y es de  $35,86\%$ . Este aumento es atribuible a que la señal debe atravesar 4 puntos de atenuación y además atravesar la UPS.

La prueba de comunicación 4, mostrada en la figura A.20, es muy similar a la segunda, solo que en este caso la regleta no se conecta a un tomacorriente sino a una UPS. Puede observarse de la tabla A.8 que el porcentaje de error es prácticamente el mismo al obtenido en la prueba 2, el cual es de  $14,75\%$ . Las Figuras A.22 y A.23 muestran las señales de información transmitida y recibida respectivamente. La tabla A.7 presenta los valores de voltaje pico-pico y RMS, así como la atenuación, la cual es de  $-2,73$  dB. En este caso la atenuación es muy similar a la obtenida en la prueba de la conexión 2 (Figura A.14). Esto sugiere que el problema de pérdida de información no se debe al ruido que pueda generar una UPS sino más bien al filtrado y atenuación que se produce sobre la señal al tener que atravesar este dispositivo.

La conexión de prueba 5 mostrada en la figura A.24 es muy similar a la de la figura A.18 de la prueba 3, con la excepción de que se incluye una UPS más en la línea de comunicación. La tabla A.10 muestra el porcentaje de error de comunicación que en este caso fue de 98,22% , es decir, casi la totalidad de la información fue alterada o no se recibió correctamente. Esto confirma nuevamente lo que se planteó para la prueba anterior en cuanto al efecto en la señal de información cuando ésta debe atravesar un dispositivo como la UPS. La figura A.26 corresponde a la señal de información modulada transmitida por el MODEM 1 y la figura A.27 corresponde a la señal recibida. Puede observarse que la señal recibida se encuentra sumamente atenuada y distorsionada, lo que produce la pérdida casi total de la información. La atenuación en este caso resultó ser de – 20,58 dB y se presenta en la tabla A.9.

La prueba 6 se muestra en la figura A.28 y consistió en conectar los MODEM a un mismo punto en el tomacorriente sin ningún otro dispositivo adicional. La tabla A.11 muestra el porcentaje de error para esta prueba, el cual fue de 1,50% y resultó ser el más bajo.

La prueba 7 es similar a la anterior, pero se realizó en una vivienda convencional. La figura A.30 muestra un diagrama de la conexión. A la misma rama del tomacorriente se encuentra conectado un equipo de cómputo, un fax y una impresora. La tabla A.12 muestra el detalle de la evaluación de la comunicación donde se tiene un 3,57% de error, el cual se atribuye al ruido presente en la línea.

La configuración de conexión para la prueba 8 se muestra en la figura A.32. En este caso se estableció una comunicación entre los MODEM conectados en dos tomacorrientes diferentes en dos dormitorios diferentes pero pertenecientes a la misma rama eléctrica desde la caja de distribución. Puede observarse de la tabla A.13 que el error de comunicación fue de 37,57%, lo cual implica que más de 1/3 de los datos se perdieron. En este caso hay que considerar que al tomacorriente 1, en la figura A.32, se encuentra conectado el equipo de computo y otros dispositivos electrónicos adicionales.

Finalmente se realizó una prueba de conexión entre dos puntos diferentes, pertenecientes a diferente rama eléctrica desde la caja de distribución. La figura A.34 muestra un diagrama de la conexión. En la figura A.35 se observa el gráfico correspondiente a esta prueba, donde se muestra el porcentaje de error de comunicación en el tiempo. La tabla A.14 muestra el porcentaje de error general para esta prueba que fue de 0,29%. De aquí se observa que específicamente el paso de la señal de una rama a otra no es causa significativa de pérdida de la señal de información.

Finalmente la tabla A.15 muestra un resumen de los resultados de cada prueba. Las conexiones de prueba 10 y 11 se realizaron entre puntos pertenecientes a diferente fase de voltaje , por lo que no fue posible establecer comunicación entre ellos y por consiguiente no fue posible evaluar.

La siguiente etapa consistió en una serie de pruebas de comunicación con diferentes dispositivos conectados a la línea productores de ruido. La distancia entre los MODEM se fijó en 4m y un único punto de conexión, con el fin de disminuir al máximo los errores debidos a pérdidas y atenuación y poder evaluar únicamente los errores causados por interferencia. La figura A.36 muestra un diagrama de la conexión utilizada para estas pruebas.

La primera prueba no involucra ningún dispositivo productor de ruido, con el fin de tener una referencia. La figura A.37 muestra el porcentaje de error en el tiempo y la tabla A.16 el detalle de la evaluación, donde se observa que el porcentaje de error fue de 0,21%.

La siguiente prueba se realizó utilizando una secadora de pelo de 1300 watts. La figura A.38 muestra el gráfico de la comunicación y en la tabla A.17 se muestra que el porcentaje de error fue de 0,63%, es decir, únicamente aumentó un 0,42%.

Posteriormente se evaluó la comunicación con un ventilador de 65 watts conectado a la línea de potencia. Se observa de la tabla A.18 que el porcentaje de error (0,23%) es prácticamente igual al obtenido en la primera prueba donde no habían dispositivos conectados.

Seguidamente, se evaluó la comunicación con un cepillo eléctrico de 400 watts conectado a la línea. La tabla A.19 muestra el porcentaje de error de comunicación, que en este caso a 2,29%. La figura A.9 en apéndices muestra el espectro en frecuencia del ruido producido por el cepillo eléctrico. Se observa que para 130 KHz se espera la presencia de ruido de  $-50\text{dBV}$ .

La siguiente prueba consistió en conectar un circuito de control de potencia (dimmer) ajustado al 50% de potencia con carga resistiva de 50 watts. Para este caso el error fue de 3,33% y se muestra en la tabla A.20. La misma prueba se realizó para un dimmer con carga reactiva y se obtuvo un 2,23% de error de comunicación, el cual se muestra en la tabla A.21. Estos corresponden a los porcentajes de error más altos obtenidos en esta etapa de pruebas de ruido e interferencia.

Finalmente se evaluó la comunicación con un horno de microondas de 1400 watts conectado a la línea de potencia. La figura A.43 muestra el porcentaje de error de comunicación en el tiempo y la tabla A.22 el detalle de la evaluación, donde se presenta un error de comunicación de 0,36%. En este caso el dispositivo no alteró significativamente el proceso de comunicación.

La tabla A.23 es un resumen de los resultados obtenidos para esta etapa de pruebas de interferencia en la comunicación.

### 6.3 Análisis de costos del proyecto

El propósito de éste apartado es suministrar al Departamento de Investigación y Desarrollo la información relacionada con el costo total del proyecto y el costo de implementación de un MODEM. La tabla 6.2 presenta una lista de los componentes adquiridos para la construcción del MODEM. La tabla 6.3 muestra una lista del equipo utilizado existente en la empresa y su valor aproximado y la tabla 6.4 muestra el costo de servicios personales. No se presentaron gastos en cuanto a servicios no personales.

Adicionalmente se presenta la tabla 6.5 en la que se detalla el costo de construcción de un MODEM, como el diseñado en el proyecto.

**Tabla 6.2** Materiales adquiridos para el desarrollo del proyecto

Descripción	Cantidad	Precio Unidad	Precio Total
Paquete Adapt812	2	\$99,00	\$198,00
Adaptador PLCC28 – PDIP	2	\$7,50	\$15,00
Tarjeta de prototipo Adapt12 MAXPRO1	2	\$25,00	\$50,00
Transistor 2N2222A	10	\$0,70	\$7,00
Transistor 2N2907A	10	\$0,47	\$4,70
Supresor de transitorios bidireccional	2	\$1,25	\$2,50
Transformador TOKO 707VX-T1002N	3	\$12,92	\$38,76
Strip Wrap Tool	1	\$45,22	\$45,22
Regulador de voltaje ajustable LM317T	4	\$0,84	\$3,36
Regulador de voltaje 5V LM340T-5	4	\$0,70	\$2,80
Cable serie DB9 hembra-hembra	2	\$8,99	\$17,98
Inductor 10uH / 0.8 ohm	2	\$0,30	\$0,60
Potenciómetro Cermet 5Kohm	4	\$4,97	\$19,88
Cristal 11.0592 MHz	3	\$1,91	\$5,73
Transformador 12VDC 1.5 A	2	\$16,29	\$32,58
Dip Switch 8 contactors	2	\$1,43	\$2,86
Capacitor 47uF 275VAC INTER SUPP class X2	3	\$2,35	\$7,05
Capacitores, Resistencias	1	\$2,00	\$2,00
IC ST7537 Modulador/demodulador PLC	5	\$25,00	\$125,00
Regleta	1	\$4,78	\$4,78
<b>TOTAL</b>			<b>\$585,80</b>

**Tabla 6.3** Equipo utilizado en el desarrollo del proyecto

Recurso	Cantidad	Costo Total
Computador	2	\$1500
Impresora	1	\$300
Osciloscopio	1	\$2000
Cautín	1	\$15

**Tabla 6.4** Servicios personales para el desarrollo del proyecto

Recurso	Cantidad	Costo Total
Practicante	1	\$943

**Tabla 6.5** Costos de construcción de un MODEM

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	PRECIO TOTAL
Paquete Adapt812	1	\$99,00	\$99,00
Adaptador PLCC28 – PDIP	1	\$7,50	\$7,50
Tarjeta de prototipo Adapt12 MAXPRO1	1	\$25,00	\$25,00
Transistor 2N2222A	3	\$0,70	\$2,10
Transistor 2N2907A	4	\$0,47	\$1,88
Supresor de transitorios bidireccional	1	\$1,25	\$1,25
Transformador TOKO 707VX-T1002N	1	\$12,92	\$12,92
Regulador de voltaje ajustable LM317T	1	\$0,84	\$0,84
Inductor 10uH / 0.8 ohm	1	\$0,30	\$0,30
Potenciómetro Cermet 5Kohm	1	\$4,97	\$4,97
Cristal 11.0592 MHz	1	\$1,91	\$1,91
Transformador 12VDC 1.5 A	1	\$16,29	\$16,29
Capacitor 47uF 275VAC INTER SUPP class X2	1	\$2,35	\$2,35
Capacitores, Resistencias	1	\$2,00	\$2,00
IC ST7537 Modulador/demodulador PLC	1	\$25,00	\$25,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$203.31</b>

#### **6.4 Alcances y limitaciones**

Al finalizar el proyecto se obtuvieron dos prototipos idénticos de un MODEM para transmitir información a través de las líneas de potencia. La velocidad de transmisión es de 9600 bits por segundo entre cada MODEM y el computador y de 1200 bits por segundo entre ambos MODEM, a través de las líneas de potencia.

Se obtuvo además un software de evaluación de errores de comunicación que permite registrar en tiempo real los errores que se producen durante el tiempo de transmisión y recepción de información.

Una limitante del proyecto consiste en que la orientación del diseño y las pruebas de comunicación se limitaron a transmisiones de información dentro de una misma rama eléctrica a partir de la caja de distribución y a una misma fase de voltaje.

Una limitante en el diseño de hardware consiste en la velocidad máxima de transmisión, la cual es de 120 bits por segundo. No es posible aumentar la velocidad de transmisión a menos que se rediseñe la etapa de modulación/demodulación.

Una limitante del software diseñado es que no está orientado a lograr la mayor velocidad posible de transmisión de datos sino una comunicación que sea evaluable en cuanto a los errores que se pudieran producir en el proceso. Por esta razón no se cuenta con un protocolo de corrección de errores implementado en el software del MODEM.

## **CAPITULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

#### **7.1 Conclusiones**

A continuación se presentan en forma concreta las conclusiones obtenidas al finalizar el proyecto. Se presentan conclusiones con relación al MODEM diseñado e implementado, así como a las pruebas de comunicación realizadas.

- Es posible establecer una conexión entre dos o más computadores utilizando como medio las líneas de transmisión de potencia, mediante la utilización de un hardware especializado (MODEM PLC) que se encarga de modular la señal de información y acoplarla a la línea de transmisión de potencia.
- En una comunicación a través de las líneas de potencia existe pérdida de información, como consecuencia de las diferentes cargas conectadas a la red, las fuentes de ruido y los diferentes puntos de atenuación que debe atravesar la señal de información.
- Las principales causas de pérdida de información en una comunicación a través de las líneas de potencia se deben a atenuación distorsión y filtrado de la señal de información por parte de dispositivos conectados a la red y cuyo circuito eléctrico debe ser atravesado por la señal.
- Al establecer una comunicación a través de las líneas de potencia a la frecuencia de transmisión de 132.45 KHz es preferible evitar que la señal portadora de información atraviese dispositivos electrónicos de protección como sistemas de alimentación de potencia ininterrumpidos (UPS) y protectores de picos o regletas.

- La presencia de sistemas de alimentación de potencia ininterrumpidos (UPS) en la red no afecta significativamente la señal de información siempre que esta no tenga que atravesar el dispositivo.
- La comunicación entre los dos MODEM a través de las líneas de potencia se encuentra limitada a una única fase, salvo que se utilice un circuito adicional que realice el paso amplificado de la señal de información de una fase a otra, o si existieran dispositivos de baja impedancia alimentándose permanentemente de ambas fases de la señal de potencia.
- Las principales fuentes de interferencia que afectan la señal de información en una comunicación a través de las líneas de potencia dentro de una red HAN se atribuyen a las fuentes conmutadas y a las fuentes de alimentación de equipo electrónico y en un menor grado a los circuitos que involucran triacs controlados y a los motores AC monofásicos.
- En una transmisión de datos a través de las líneas de potencia los errores en la información no solamente se limitan a caracteres (bytes) recibidos con error sino también a caracteres omitidos, que son enviados por el transmisor pero no son captados por el receptor y a caracteres indeseados, los cuales se introducen en el paquete de información y son producto de interferencias y ruido presente en la línea de potencia.

## 7.2 Recomendaciones

El MODEM diseñado e implementado permite el envío de información a través de las líneas de potencia a una frecuencia portadora de 132.45 KHz y una velocidad máxima de transmisión de 1200 bps. Esta velocidad es apta para aplicaciones de control a través de las líneas de potencia, sin embargo, no lo es cuando lo que se requiere es transmitir paquetes de información entre computadores. Para aumentar la velocidad de transmisión y disminuir las pérdidas de información se recomienda rediseñar la etapa de modulación utilizando dispositivos basados en tecnología de procesamiento digital de señales (DSP) que ofrece una mayor posibilidad de disminuir los errores de comunicación y aumentar la velocidad de transmisión.

Se recomienda implementar un protocolo de corrección de errores que permita identificar aquellos caracteres (bytes) del paquete de información que fueron modificados en el proceso de comunicación así como aquellos caracteres que fueron omitidos (no recibidos) e indeseados (introducidos en el paquete de información por efectos de ruido e interferencia).

## BIBLIOGRAFIA

---

- SGS-THOMSON Microelectronics. "ST7537HS1 HOME AUTOMATION MODEM". 1995. <<http://www.fe.up.pt/~ee99043/download/st7537hs.pdf>> (Marzo 2002).
- SGS-THOMSON Microelectronics. "ST7537 POWER LINE MODEM APLICATION". 1995. < [http://www.angliac.com/extras/product\\_spotlight/Powerline\\_Modem/1124.pdf](http://www.angliac.com/extras/product_spotlight/Powerline_Modem/1124.pdf) > (Marzo 2002).
- Power Line World public resources. "Providing access to the Internet through electric power lines". <<http://www.powerlineworld.com/powerlineintro.html>> (Marzo 2002).
- Downey, Walter. Sutterlin, Phil. "Power Line Communication technology update". Echelon Corporation. 2002. <<http://www.echelon.com/Products/Transceivers/PLTPresentations/PLTechnology.pdf>>. (Abril 2002).
- Kingery, Phil "Which One Should I Use, Part III". 1997. <[www.hometoys.com/htinews/jun97/articles/kingery/kingery3.htm](http://www.hometoys.com/htinews/jun97/articles/kingery/kingery3.htm)> (Marzo 2002).
- Motorola, Inc. "HCS12 V1.5 Core User Guide". 2000. < [http://www.motorola.com/webapp/sps/site/prod\\_summary.jsp?code=MC9S12A256B&noDeld=01M0zGQK100](http://www.motorola.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MC9S12A256B&noDeld=01M0zGQK100) > (Abril 2002)
- Motorola, Inc. "MC68HC812A4 Advance information"., 1999. (Abril 2002)

## **APENDICES Y ANEXOS**

---

### **Apéndice A.1 Características eléctricas de la red de potencia**

La evaluación de cualquier sistema de comunicación va directamente relacionado con el ambiente de operación del sistema. Las condiciones del entorno y las diferentes variables involucradas que afectan directa o indirectamente al sistema deben ser consideradas para que la evaluación del mismo sea relevante.

Existen algunas suposiciones que se asumen como verdaderas y que deben ser modificadas a la hora de evaluar un sistema de comunicación a través de las líneas de potencia (Tecnología PLC - Power Line Communications):

a. La superposición:

Para que el principio de superposición sea aplicable en un sistema se requiere de dos condiciones: linealidad e invariabilidad con el tiempo. Estas condiciones no están por lo general presentes en un sistema de electrificación. Ejemplo de la no linealidad sería que si se añade un paquete de señal de voltaje a la señal de 60Hz de la línea de potencia, se hace que los diodos de la fuente de alimentación se apaguen y se enciendan a la frecuencia de la señal añadida. Por otro lado, las cargas en un sistema de electrificación normalmente varían con el tiempo. Existen horas pico en las cuales la demanda de potencia es mayor y el sistema se encuentra más cargado. Esto es una clara evidencia de que este es un sistema que varía con el tiempo.

b. La capacitancia del cable determina los efectos de propagación de la señal: Esta afirmación es válida cuando la impedancia de carga es mayor que la impedancia característica del cable. Lo que sucede es que en las líneas de potencia la impedancia es normalmente menor a la impedancia característica de la línea, específicamente a las frecuencias de transmisión de datos. Las bajas impedancias de carga son producidas por dispositivos como:

- Capacitores en televisores y computadores
- Resistencias de calentamiento en cocinas y hornos
- Calefactores

La tabla A.1 muestra diferentes tipos de cable utilizado en líneas de potencia y sus características eléctricas por metro. Se observa que la velocidad de propagación de la señal en metros por nanosegundo depende de estas propiedades eléctricas.

La Tabla A.2 muestra la impedancia de dos cargas típicas presentes en un sistema de electrificación.

**Tabla A.1:** Características eléctricas de varios tipos de líneas de transmisión

Tipo de cable	Zo ( $\Omega$ )	C/m (pF)	L/m (mH)	R/m ( $\Omega$ ) 130 KHz	v (m/ns)
12-2 BX metal clad	74,2	74,47	0,426	0,043	0,181
12-2G Romex NM-B	143	34,12	0,702	0,045	0,204
18-2 Lamp cord	124	21,82	0,666	0,077	0,186
18-3 IEC power cord	79,6	101,04	0,640	0,103	0,124

**Tabla A.2:** Cargas de baja impedancia en una línea de transmisión , a 100 KHz

Tipo de carga	Impedancia a 100KHz
0.1 uF EMC capacitor	16 $\Omega$
2 KW 240VAC calentador	30 $\Omega$

Para poder modelar completamente un sistema de transmisión, se requeriría contar con modelos de alta frecuencia para cada una de las posibles cargas presentes en el sistema y adicionalmente bajo cada una de las condiciones. Si bien esto es muy difícil de lograr existen aproximaciones que nos permiten tener una idea muy cercana del modelo del sistema y conocer las diferentes características que pueden afectar directa o indirectamente el sistema de comunicación:

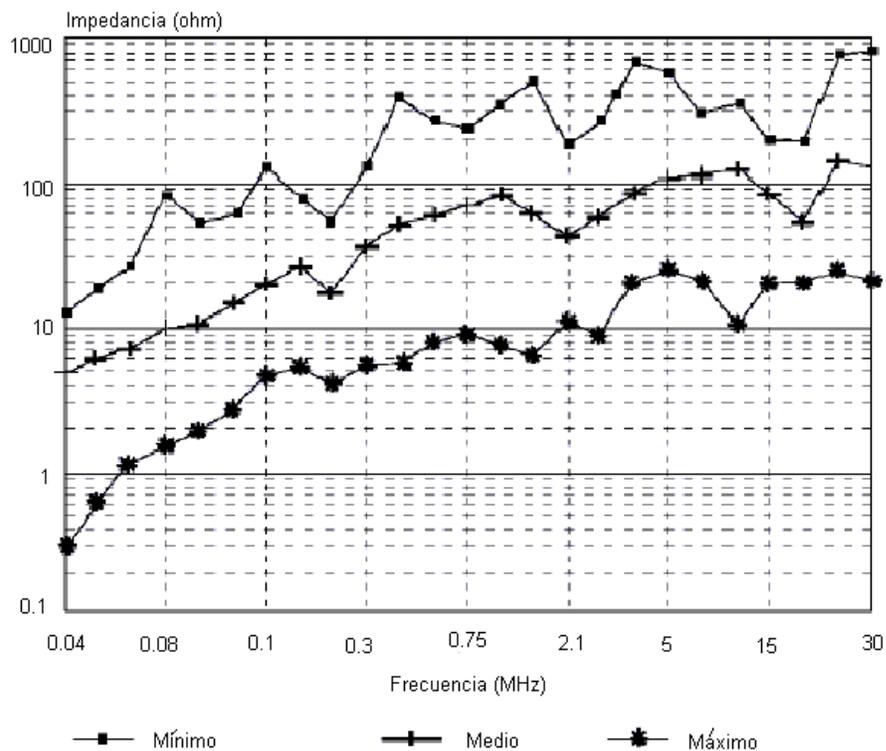
### a. Impedancia de la línea

Como se mencionó anteriormente, la impedancia de la red de potencia depende de varios factores.

La frecuencia de operación afecta directamente la impedancia de la red. Un aumento en la frecuencia implica un aumento en la impedancia.

Otros dos factores importantes son la impedancia del transformador secundario y la impedancia debida a las cargas conectadas a la red. Estas afectan la impedancia total del sistema.

La figura A.1 muestra un gráfico de la impedancia de la línea de potencia en función de la frecuencia, entre los 0.04MHz y los 30MHz. Este muestra el rango esperado de impedancia de línea a una frecuencia determinada.



**Figura A.1** Impedancia de la línea de potencia en función de la frecuencia para líneas de transmisión europeas

## **b. Atenuación:**

Se ha encontrado que para cables con longitud inferior a  $1/8$  de longitud de onda (250 m a 100KHz), la presencia de cargas de baja impedancia hace que la inductancia del cable sea dominante. Un modelo limitado que incluya la inductancia del cable y cargas de baja impedancia aproxima bien la atenuación de la señal.

Una pérdida a considerar es la que se produce si la señal de información debe cruzar las fases de la señal de potencia. Se ha encontrado que esta atenuación es entre 5 dB y 25 dB.

Estas pérdidas entre fases son influenciadas por una serie de variantes como son:

- Acoples en los transformadores de distribución.
- Acoples en las líneas de potencia.
- Impedancias de carga multifase.

La figura A.2 muestra una distribución de la atenuación en una línea de potencia a 130 KHz y además las diferentes atenuaciones que se presentan dependiendo del número de conexiones eléctricas presentes (socket pairs).

Para realizar estas mediciones se utilizaron cientos de conexiones eléctricas seleccionadas al azar, entre cientos de casas de 5 países diferentes.

De las mediciones se concluyó que el 96% de las veces, la atenuación en una residencia convencional se encuentra entre los 5 y los 54 dB, a una frecuencia de 130 KHz.

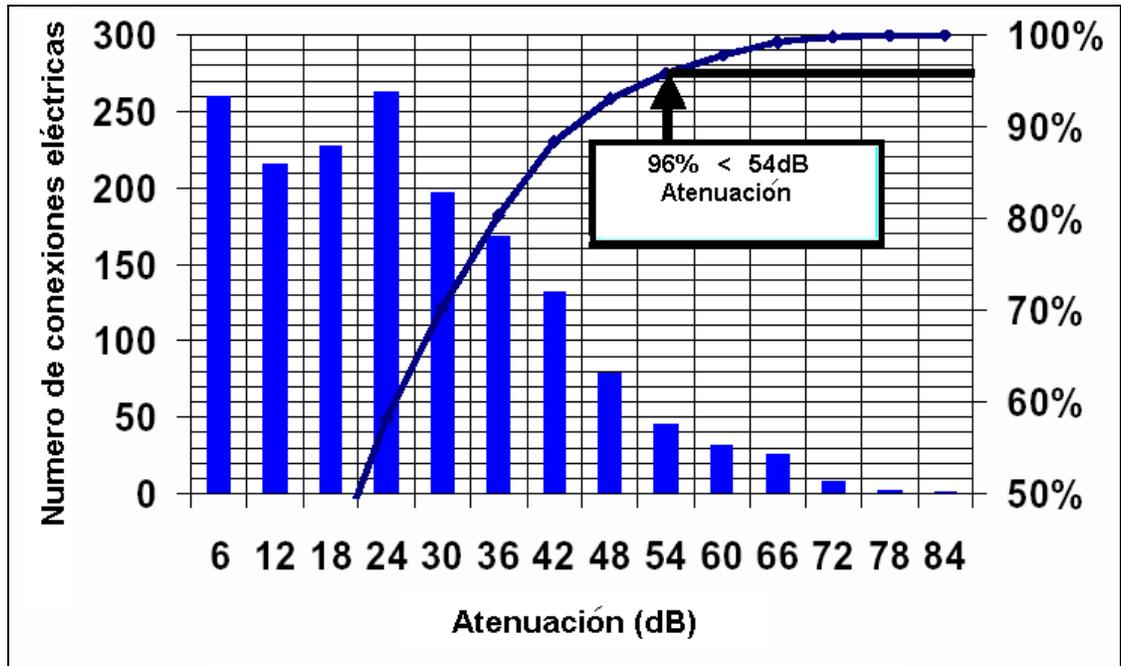


Figura A.2 Gráfico de la distribución de la atenuación en una línea de potencia a 130 KHz

**a. Ruido y distorsión**

Es importante considerar que, conjuntamente con el sistema de comunicación a través de las líneas de potencia, existirán una serie de dispositivos conectados a la red y funcionando en forma paralela, los cuales inyectan ruido en la red y pueden afectar el sistema de comunicación.

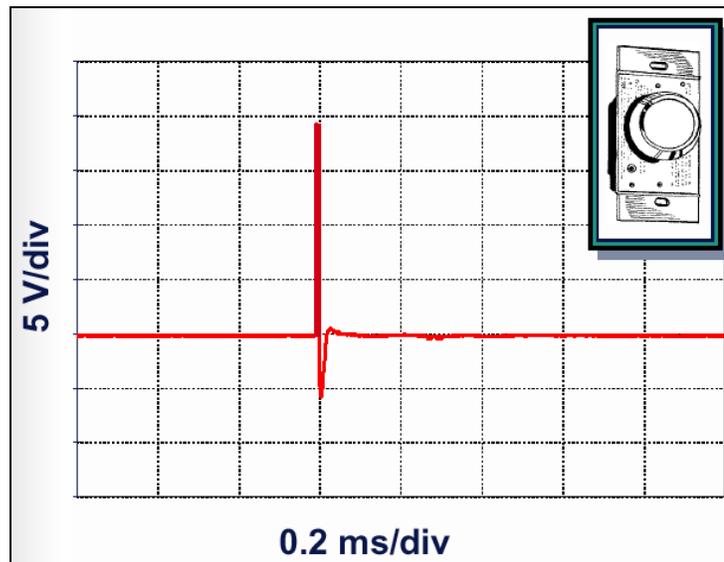
El ruido es clasificable en tres categorías:

**b.1 Ruido por impulso**

Las fuentes más frecuentes de este tipo de ruido son debidos a circuitos que involucran triacs controlados, tal como los dimmers utilizados para regular la intensidad de luz. Estos circuitos introducen un impulso de ruido para cada medio ciclo de voltaje AC.

Cuando la luz se ajusta a la mitad de brillo (regulación al 50% de potencia) el flujo de corriente es máximo y se produce un impulso de varias décadas de voltios, el cual es inyectado en la línea de voltaje AC. Los impulsos se producen a 2 veces la frecuencia de la señal de potencia AC (120 Hz), debido a que se producen cada medio ciclo.

La figura A.3 muestra un impulso típico producido por un dimmer al 50% de regulación.

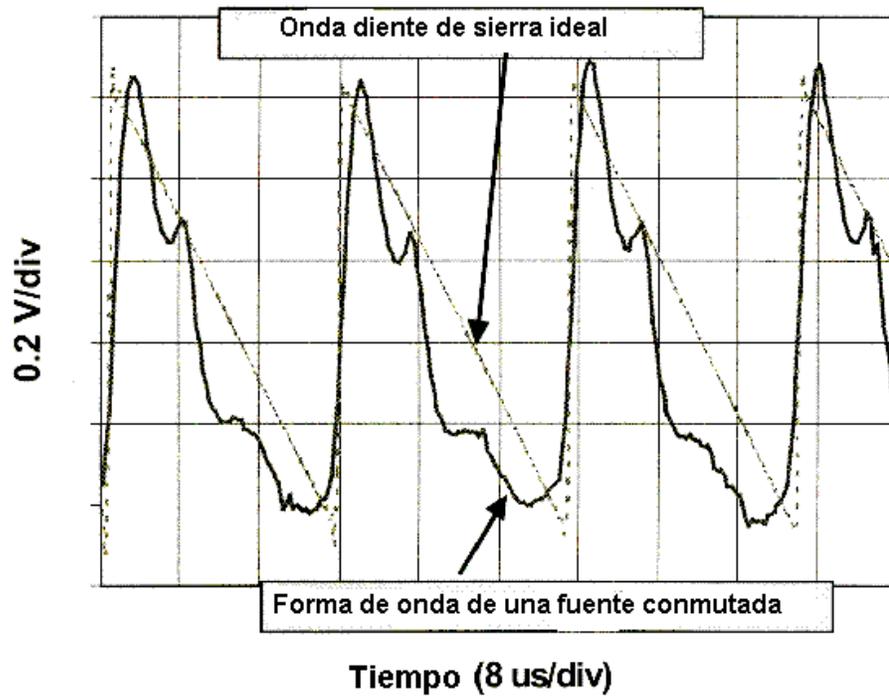


**Figura A.3** Gráfico del impulso eléctrico en la línea de potencia, producido por un circuito de control de potencia (dimmer) ajustado al 50% de regulación

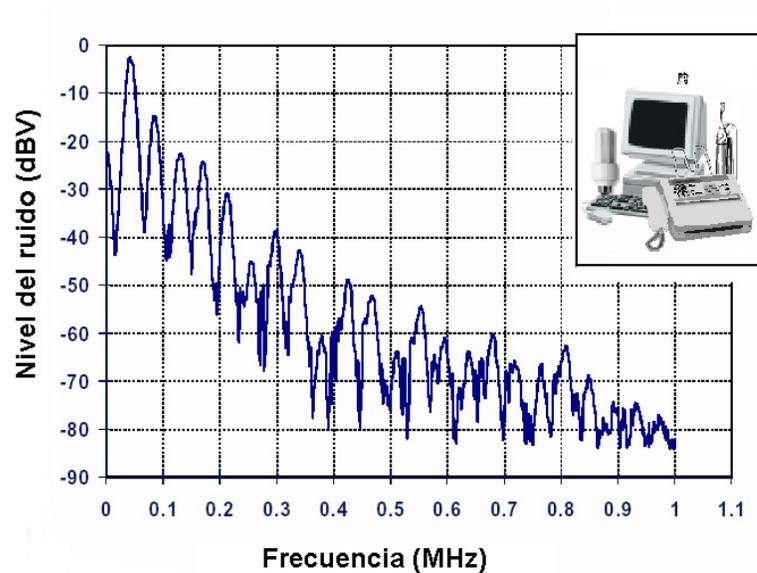
## **b.2 Ruido tonal o de tono**

Las fuente más común del ruido tonal o de tono es atribuible a las fuentes conmutadas presentes en las PC y en los balastros electrónicos. La frecuencia fundamental de éstas fuentes puede ser cualquiera en el rango de 20KHz a 1MHz y el ruido inyectado está cargado de armónicas de la frecuencia de conmutación.

La figura A.4 muestra una comparación gráfica del ruido inyectado por la fuente conmutada y una onda tipo diente de sierra. La figura A.5 corresponde al espectro en frecuencia de éste tipo de ruido.



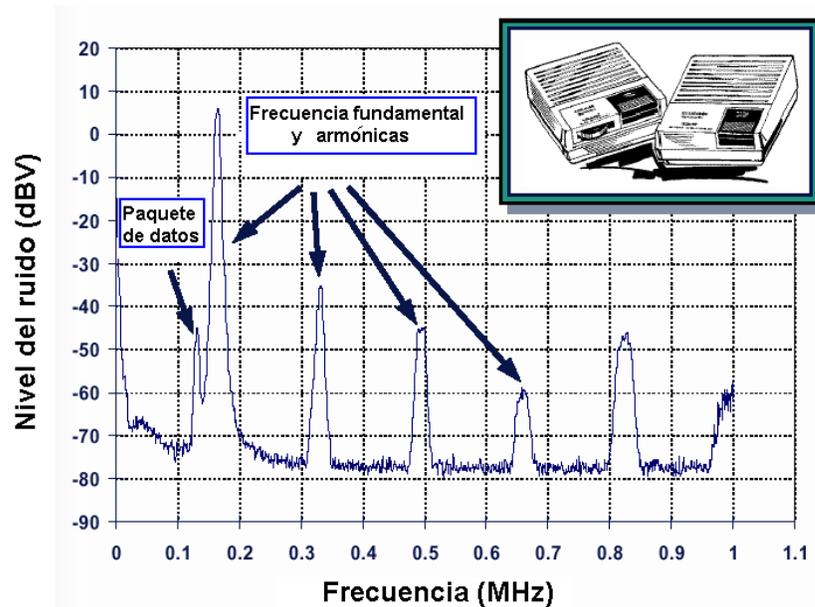
**Figura A.4** Gráfico de comparación entre una onda diente de sierra y el ruido producido por la fuente conmutada.



**Figura A.5** Gráfico del espectro en frecuencia del ruido inyectado por una fuente conmutada

Otras fuentes productoras de este tipo de ruido corresponden a algunos intercomunicadores utilizados en las residencias modernas, que operan a frecuencias entre los 150KHz y 400KHz, e inyectan señales de varios voltios en las líneas de potencia.

La figura A.6 muestra el espectro en frecuencia del ruido producido por un intercomunicador. Se muestra la frecuencia fundamental y las correspondientes armónicas.



**Figura A.6** Gráfico del espectro en frecuencia del ruido producido por un intercomunicador.

También existen otras fuentes importantes como son las emisoras de radio local, que transmiten dentro del rango de frecuencias utilizado para la transmisión de datos. Las líneas de potencia actúan como grandes antenas capaces de captar estas señales provenientes de los transmisores de radio de alta potencia.

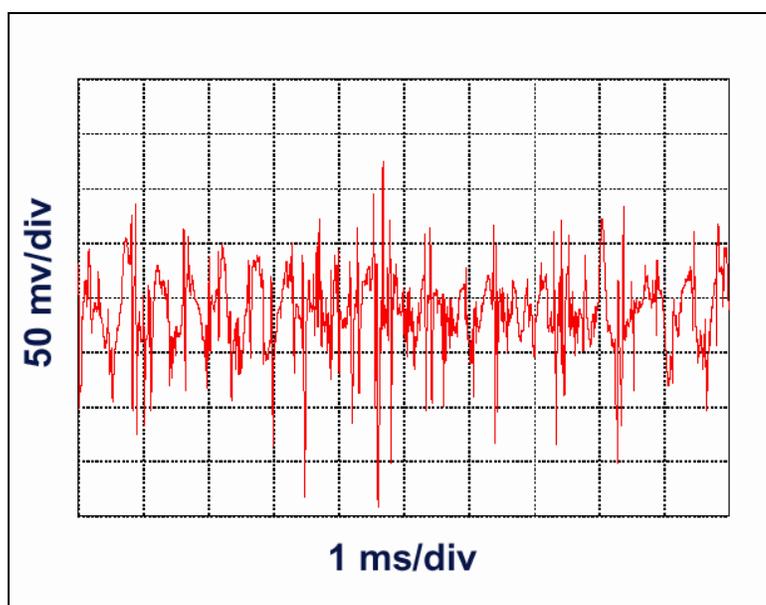
### **b.3 Ruido por impulso de alta frecuencia**

Los impulsos de alta frecuencia tienen su origen en los motores eléctricos de corriente alterna, como los utilizados lavadoras, secadoras y electrodomésticos. Estos motores producen impulsos repetitivos en el rango de los KHz.

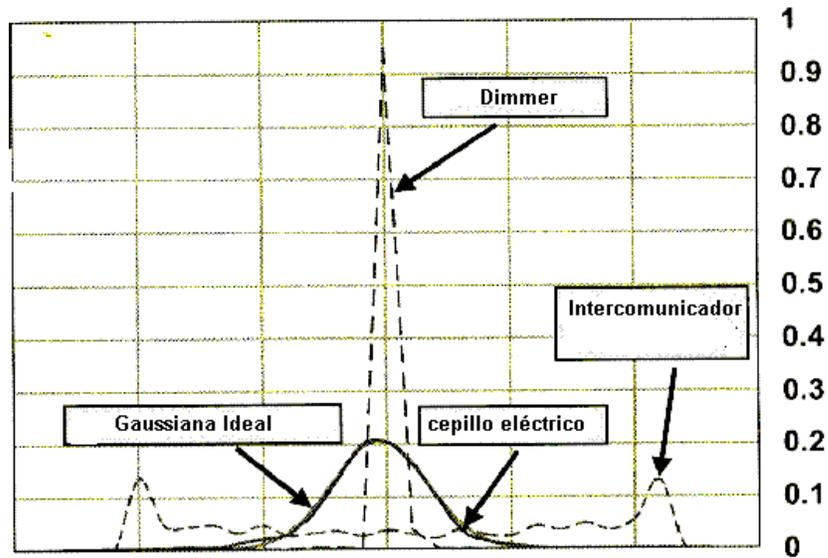
La figura A.7 muestra el ruido característico producido por un cepillo eléctrico. Se observa que la amplitud del ruido llega hasta los 250 mV en el mayor de los casos.

La figura A.8 muestra una distribución gaussiana del ruido producido por el cepillo eléctrico y su comparación con una curva de gauss ideal. Adicionalmente se muestran las distribuciones correspondientes a un intercomunicador y a un dimmer.

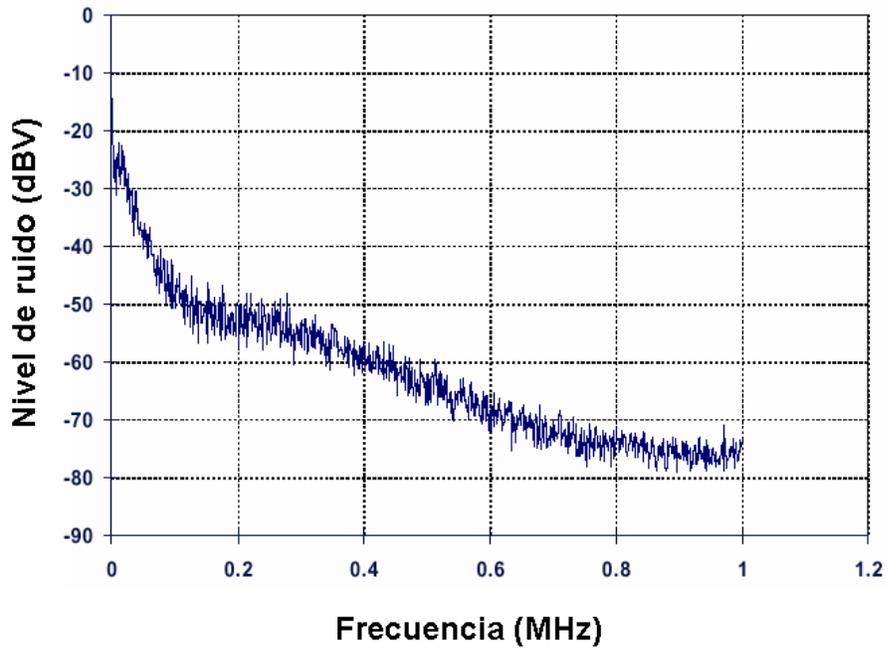
La figura A.9 muestra el espectro en frecuencia del ruido producido por el cepillo eléctrico y la figura A.10 es un detalle del espectro en frecuencia, limitado al rango de frecuencias utilizadas para la transmisión de información a través de las líneas de potencia.



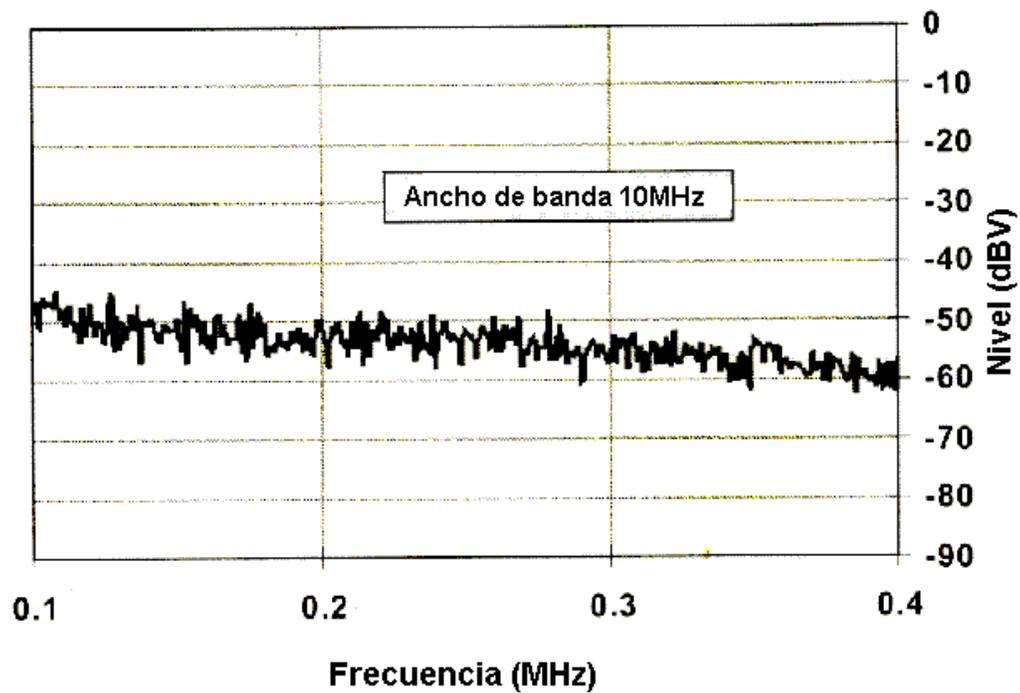
**Figura A.7** Gráfico de la señal de ruido en el dominio del tiempo producido por un cepillo eléctrico



**Figura A.8** Gráfico de la distribución gaussiana del ruido producido por un cepillo eléctrico.



**Figura A.9** Gráfico del espectro en frecuencia del ruido producido por un cepillo eléctrico.



**Figura A.10** Espectro en frecuencia del ruido producido por un cepillo eléctrico dentro del rango utilizado para comunicación PLC.

Para contar con un análisis completo de las características de una línea de potencia es importante incluir un análisis de las características de distorsión del canal. Se utilizaron varias cargas reactivas y características del cable para crear un canal con alta distorsión en frecuencia y variación en el tiempo.

La figura A.11 muestra las características de magnitud y fase para la distorsión de frecuencia entre dos puntos de una red de potencia convencional.

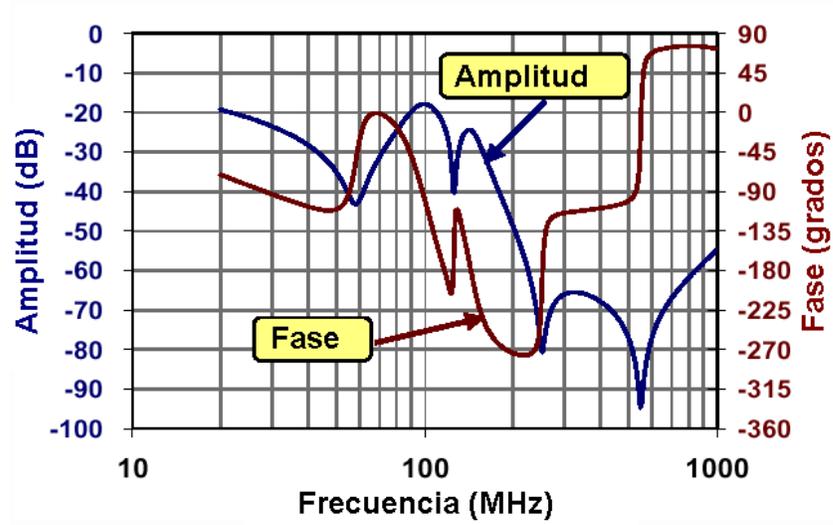


Figura A.11 Gráfico de la distorsión de frecuencia en una línea de potencia

## Apéndice A.2 Fórmulas para el cálculo de la frecuencia de resonancia

Las siguientes fórmulas se utilizan para calcular el valor de la inductancia equivalente ( $L_{eq}$ ) del transformador TOKO 707VX. Este transformador posee dos embobinados primarios y un embobinado secundario, en una relación de vueltas de 4:1:1.

$$L_{eq} = L_{1t} + L_{4t} + 2M \quad (1)$$

$$M = K\sqrt{L_{1t} \cdot L_{4t}} \quad (2)$$

$L_{1t}$  : Inductancia del embobinado primario 1

$L_{4t}$ : Inductancia del embobinado primario 2

M: Inductancia mutua

K: Constante de acoplamiento

Para el transformador TOKO 707VX los valores de estas variables serían:

$$L_{1t} = 9,4 \mu\text{H}$$

$$L_{4t} = 140 \mu\text{H}$$

$$M = 25,7 \mu\text{H}$$

$$K = (1/2)^{1/2}$$

La siguiente expresión permite calcular el valor de la frecuencia de resonancia ( $F_{res}$ ) en función del capacitor  $C_4$  y la inductancia equivalente ( $L_{eq}$ ), para el circuito mostrado en la figura 6.4.

$$F_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq} \cdot C_4}} \quad (3)$$

Despejando la variable C4 se obtiene una expresión en función de la inductancia equivalente del transformador ( $L_{eq}$ ) y de la frecuencia de resonancia ( $F_{res}$ )

$$C4 = \frac{1}{L_{eq}(2\pi \cdot F_{res})^2} \quad (4)$$

## Apéndice A.3 Mediciones y pruebas de comunicación

### A.3.1 Definición de términos y conceptos

A continuación se presenta una definición de los términos y conceptos utilizados en la sección de mediciones y pruebas de comunicación.

*Total de bytes recibidos:* Total de caracteres recibidos por el MODEM durante un tiempo de evaluación determinado. Incluye los caracteres (bytes) correctos y con error.

*Bytes recibidos correctos:* Total de caracteres correctos recibidos por el MODEM durante un tiempo de evaluación determinado.

*Bytes recibidos incorrectos:* Total de caracteres incorrectos recibidos por el MODEM durante un tiempo de evaluación determinado.

*Porcentaje de error:* Porcentaje de caracteres recibidos incorrectamente. Se calcula con base en el total de bytes recibidos

*Tasa de transferencia:* Promedio de bytes (caracteres) recibidos en un segundo. Proporciona una idea de la velocidad de comunicación del sistema.

*Tiempo de evaluación:* Tiempo total de duración del proceso de evaluación de la comunicación.

### A.3.2 Pruebas de comunicación para diferentes configuraciones de conexión

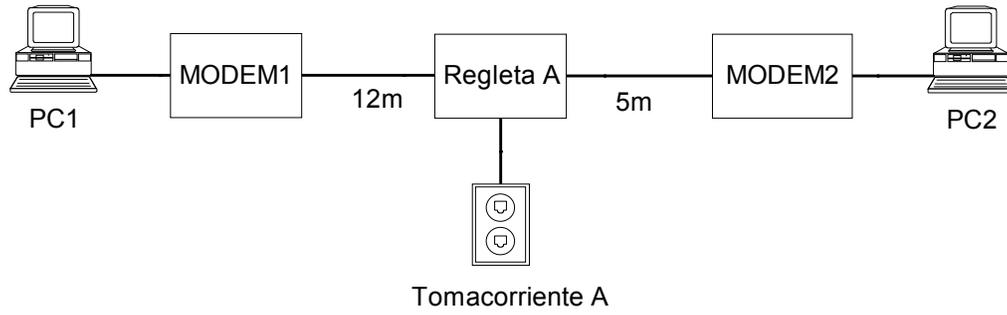


Figura A.12 Diagrama de bloques para la conexión 1

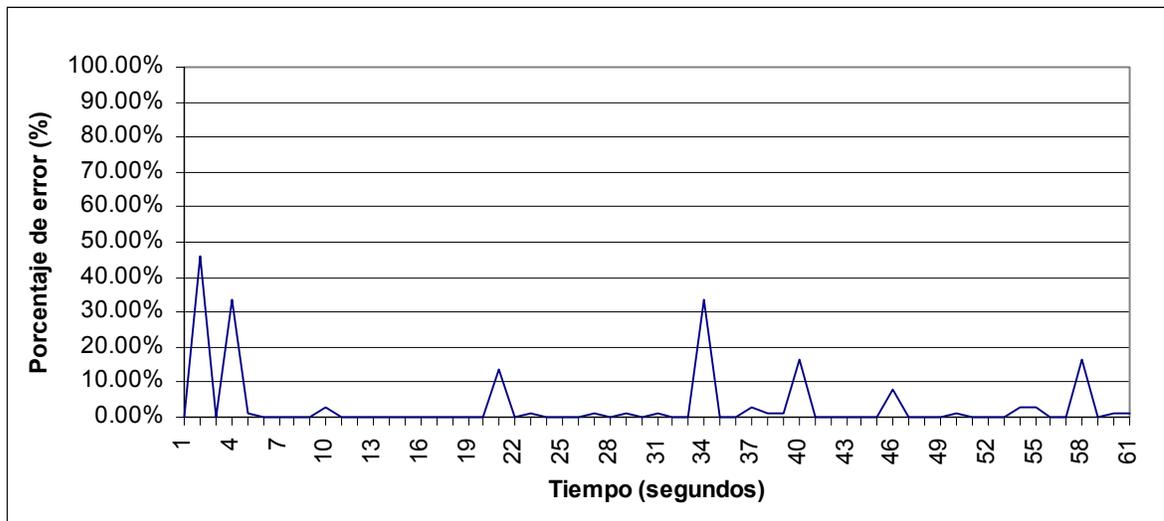
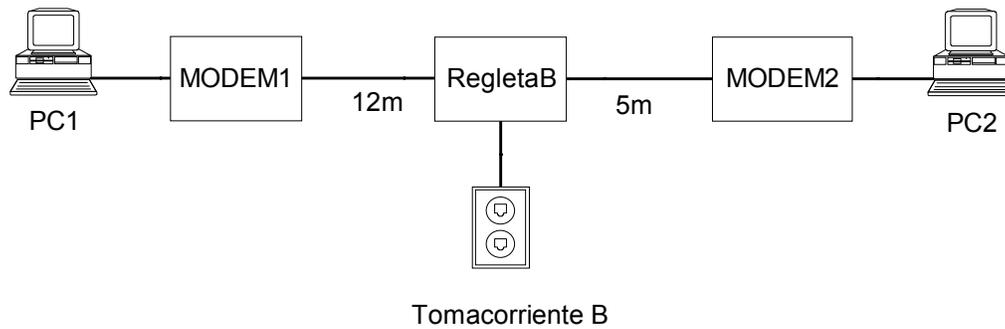


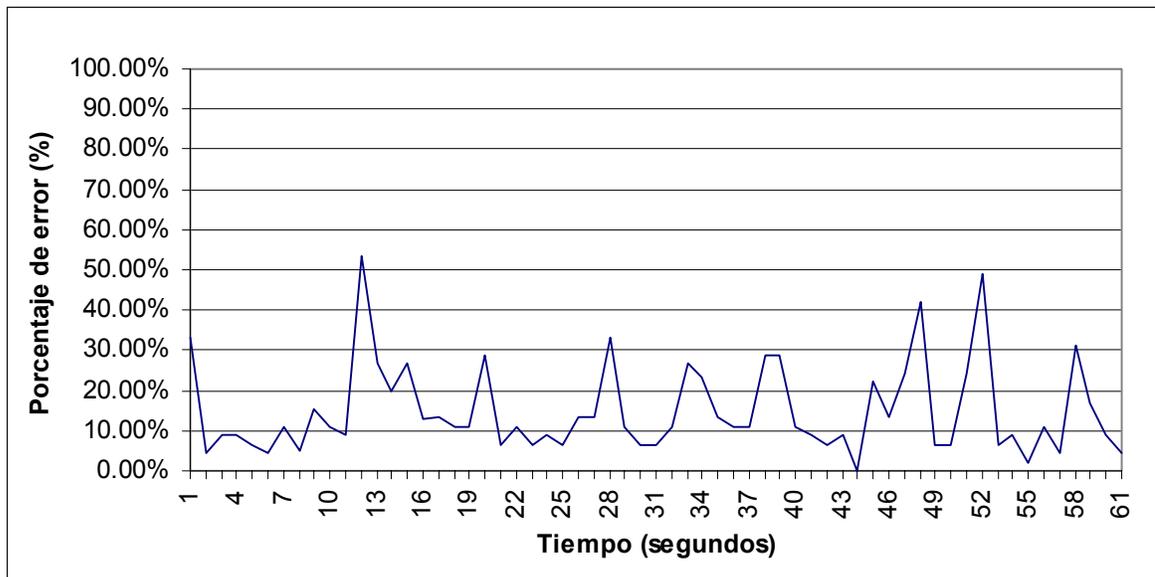
Figura A.13 Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 1

**Tabla A.3** Registro de comunicación para la conexión 1

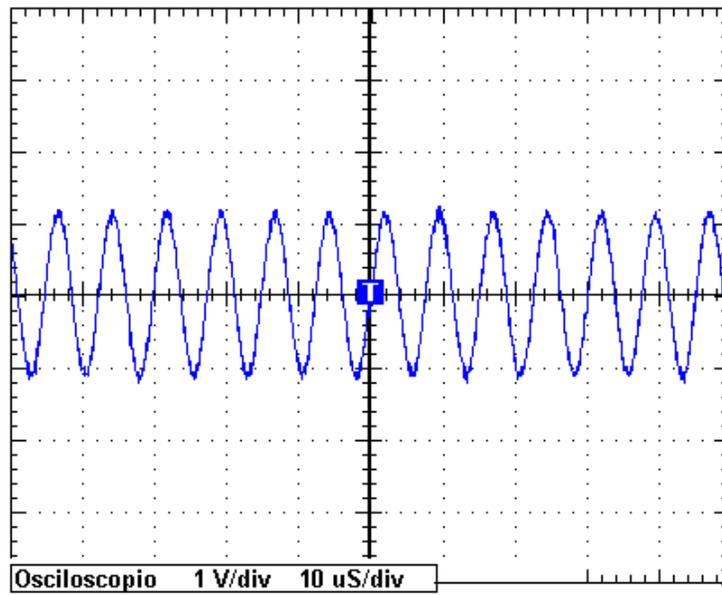
Total de bytes recibidos	4181
Bytes recibidos correctos:	4040
Bytes recibidos incorrectos:	141
Porcentaje de error:	3.37%
Tasa de transferencia:	90 b/seg
Tiempo de evaluación	60 seg



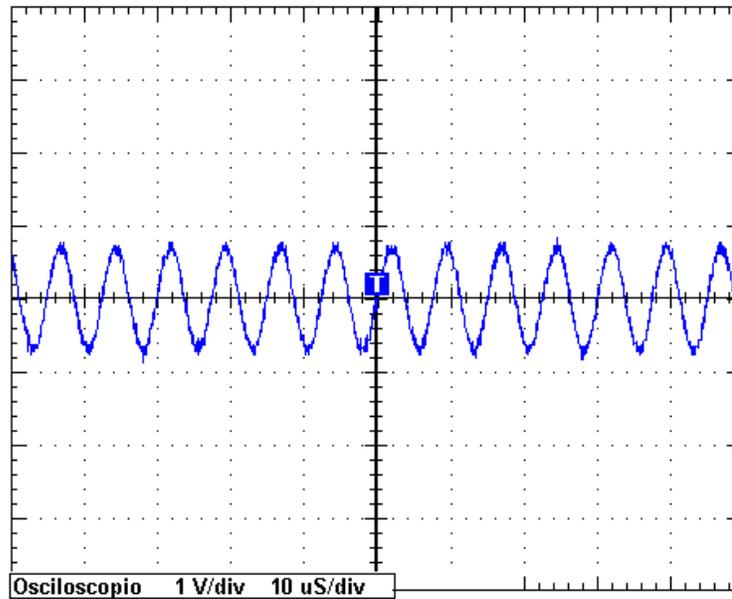
**Figura A.14** Diagrama de bloques para la conexión 2



**Figura A.15** Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 2



**Figura A.16** Señal de información modulada transmitida por el MODEM 1 para la conexión 2



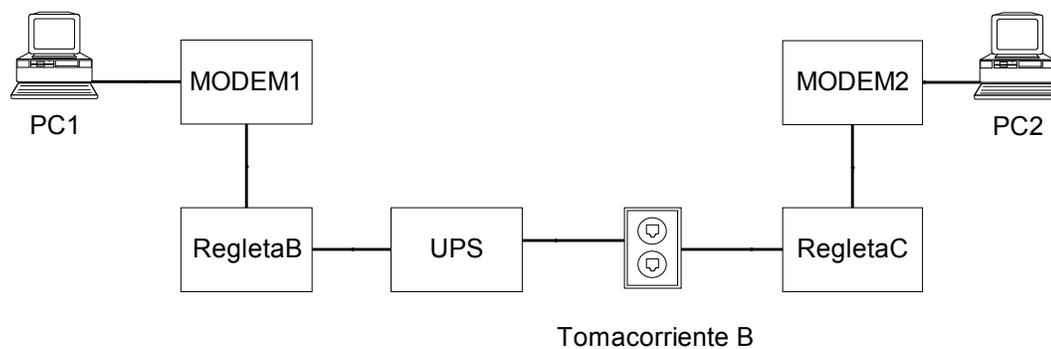
**Figura A.17** Señal de información modulada recibida por el MODEM 1 para la conexión 2

**Tabla A.4** Valores de voltaje y atenuación de la señal para la conexión 2

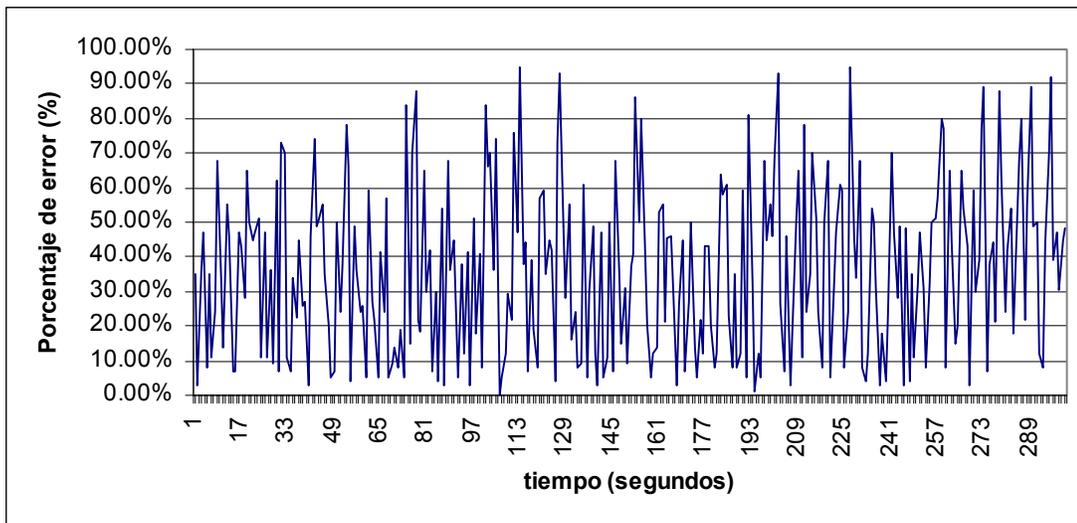
Señal	Voltaje pico-pico (V)	Voltaje RMS (V)	Atenuación (dB)
Transmitida	2.48	0.79	0
Recibida	1.76	0.50	-2.98

**Tabla A.5** Registro de comunicación para la conexión 2

Total de bytes recibidos	2821
Bytes recibidos correctos:	2405
Bytes recibidos incorrectos:	416
Porcentaje de error:	14.75%
Tasa de transferencia:	90 b/seg
Tiempo de evaluación	60 seg



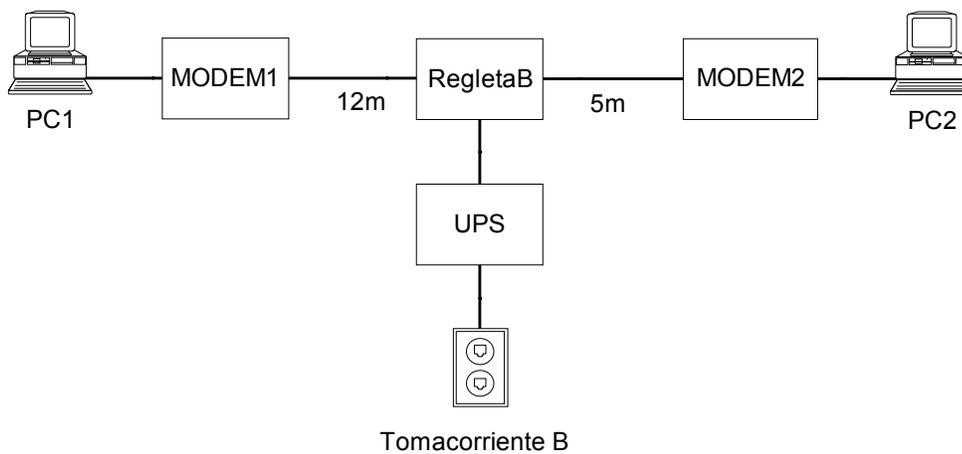
**Figura A.18** Diagrama de bloques para la conexión 3



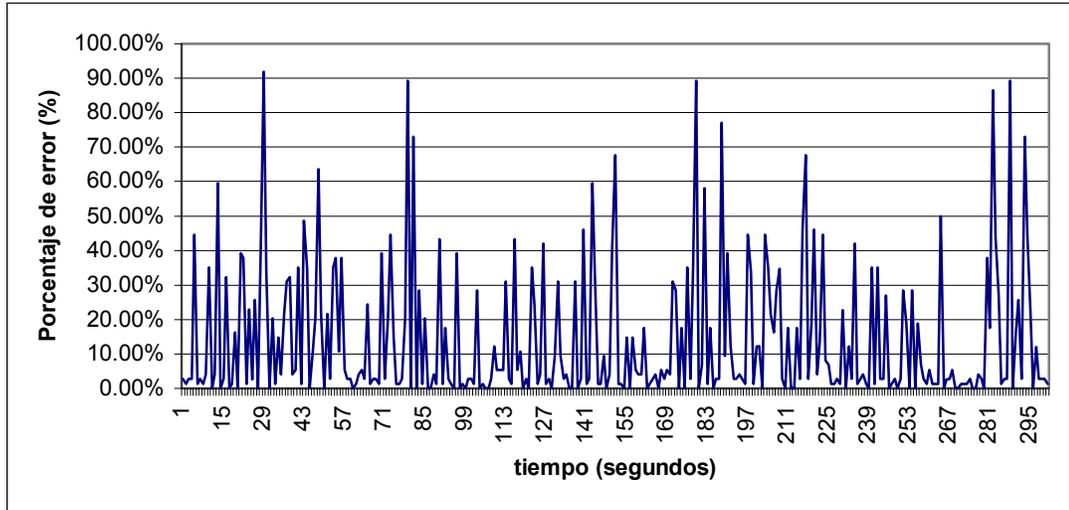
**Figura A.19** Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 3

**Tabla A.6** Registro de comunicación para la conexión 3

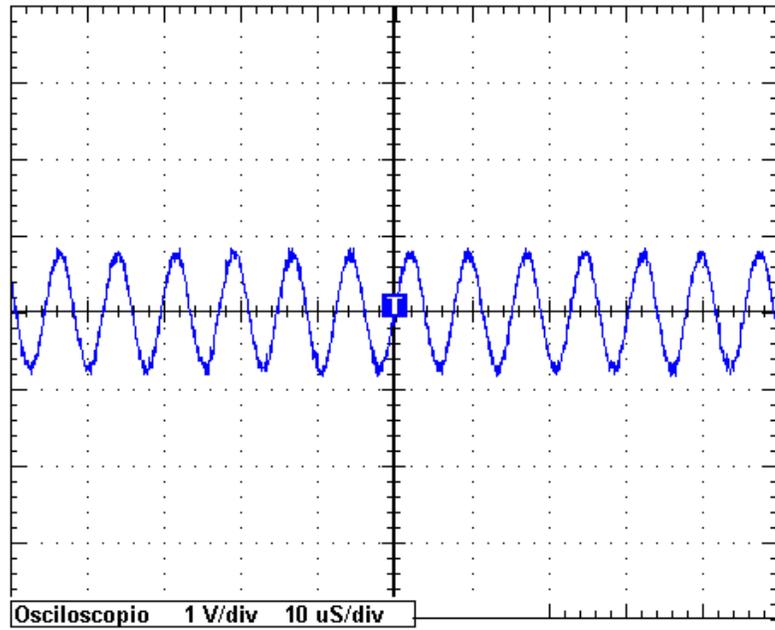
Total de bytes recibidos	20651
Bytes recibidos correctos:	13246
Bytes recibidos incorrectos:	7405
Porcentaje de error:	35.86%
Tasa de transferencia:	90 b/seg
Tiempo de evaluación	5 min



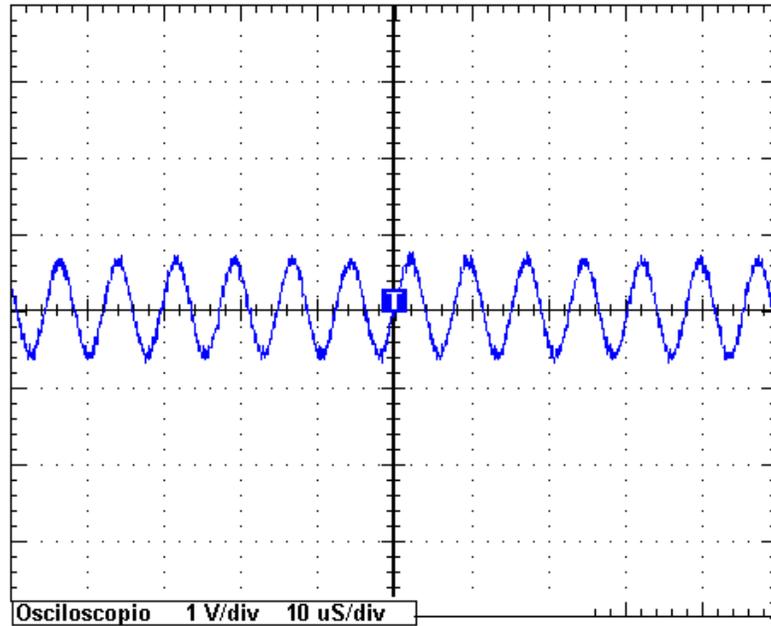
**Figura A.20** Diagrama de bloques para la conexión 4



**Figura A.21** Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 4



**Figura A.22** Señal de información modulada transmitida por el MODEM 1 para la conexión 4



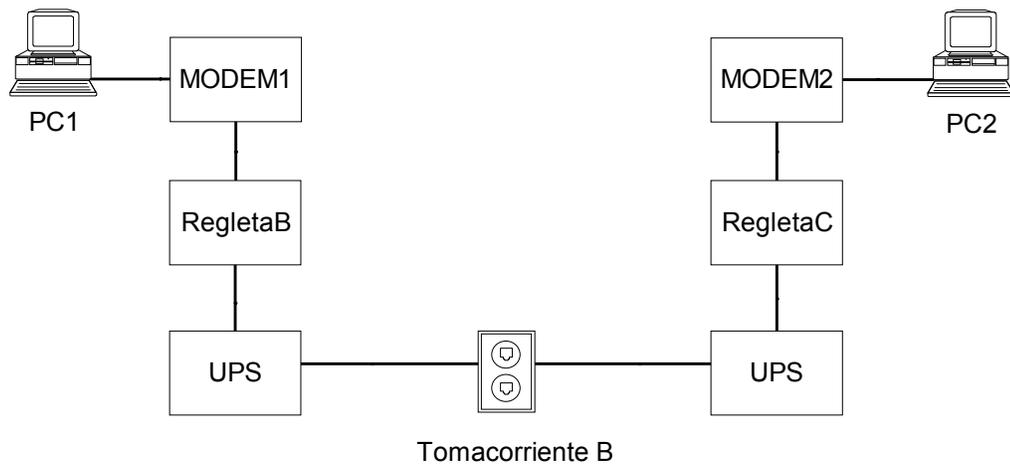
**Figura A.23** Señal de información modulada recibida por el MODEM 1 para la conexión 4

**Tabla A.7** Valores de voltaje y atenuación de la señal para la conexión 4

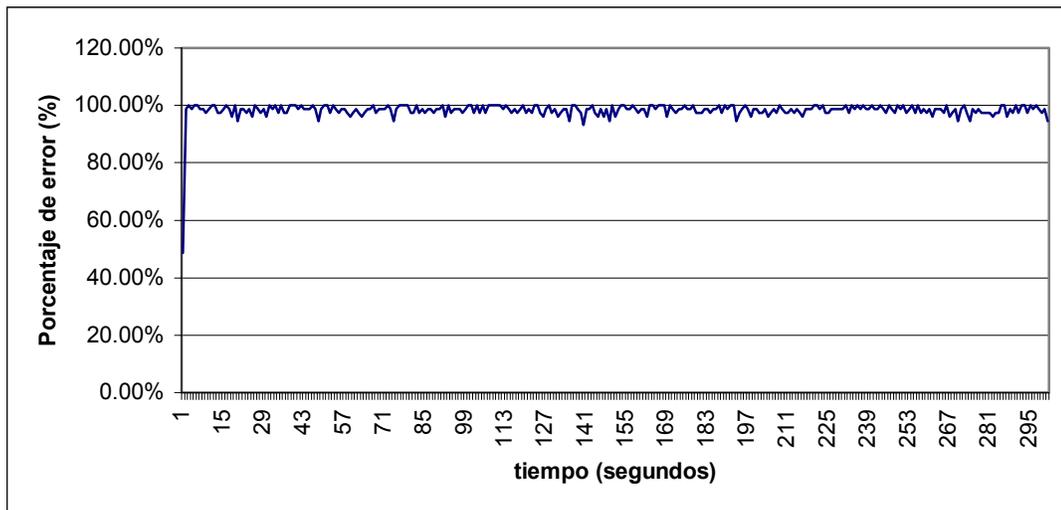
Señal	Voltaje pico-pico (V)	Voltaje RMS (V)	Atenuación (dB)
Transmitida	1.72	0.54	0
Recibida	0.74	0.22	-2.73

**Tabla A.8** Registro de comunicación para la conexión 4

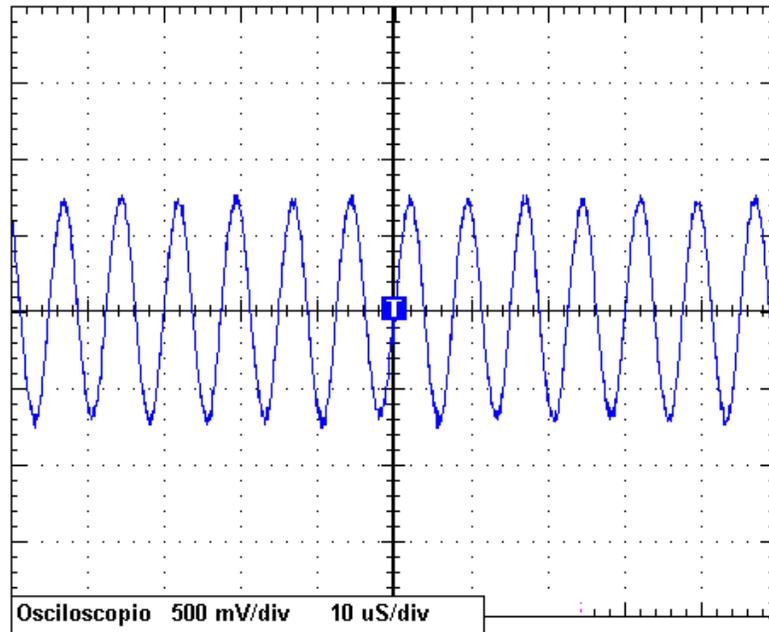
Total de bytes recibidos	20739
Bytes recibidos correctos:	17830
Bytes recibidos incorrectos:	2909
Porcentaje de error:	14.03%
Tasa de transferencia:	90 b/seg
Tiempo de evaluación	5 min



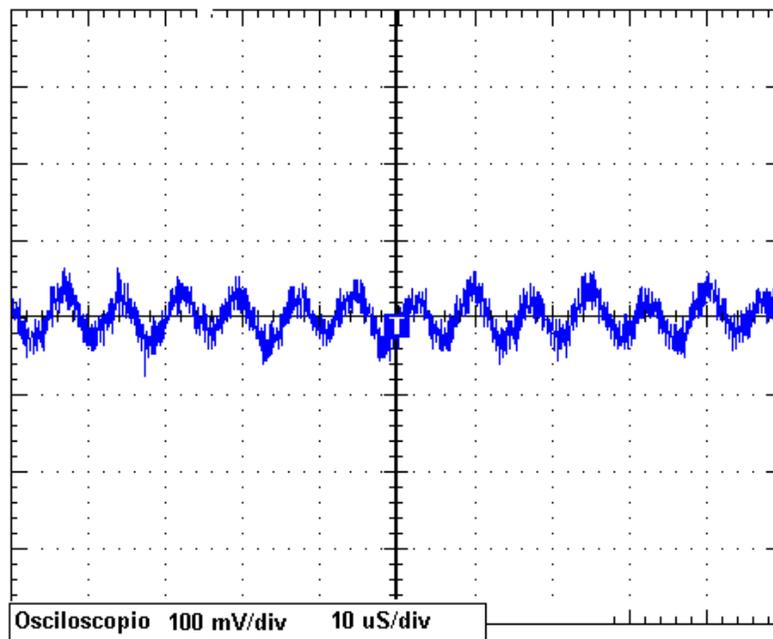
**Figura A.24** Diagrama de bloques para la conexión 5



**Figura A.25** Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 5



**Figura A.26** Señal de información modulada transmitida por el MODEM 1 para la conexión 5



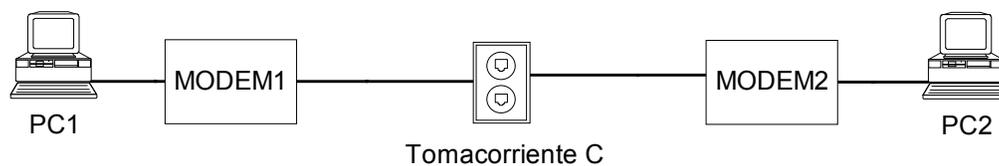
**Figura A.27** Señal de información modulada recibida por el MODEM 1 para la conexión 5

**Tabla A.9** Valores de voltaje y atenuación de la señal para la conexión 5

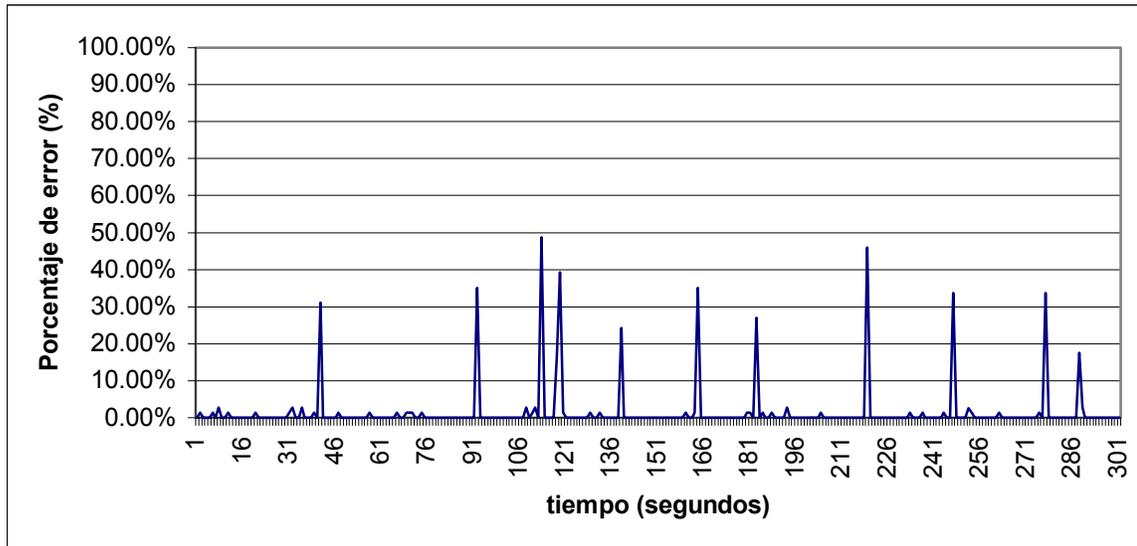
Señal	Voltaje pico-pico (V)	Voltaje RMS (V)	Atenuación (dB)
Transmitida	1.54	0.507	0
Recibida	0.144	0.0247	-20.58

**Tabla A.10** Registro de comunicación para la conexión 5

Total de bytes recibidos	21460
Bytes recibidos correctos:	383
Bytes recibidos incorrectos:	21077
Porcentaje de error:	98.22%
Tasa de transferencia:	90 b/seg
Tiempo de evaluación	5 min



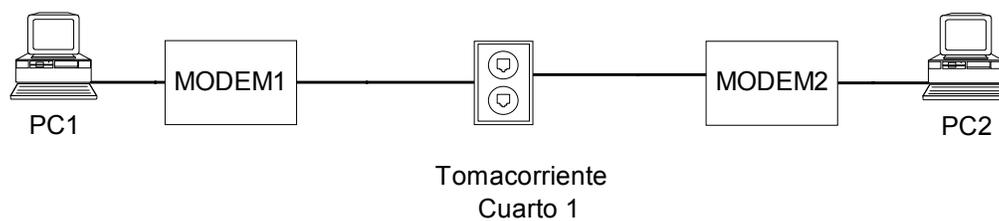
**Figura A.28** Diagrama de bloques para la conexión 6



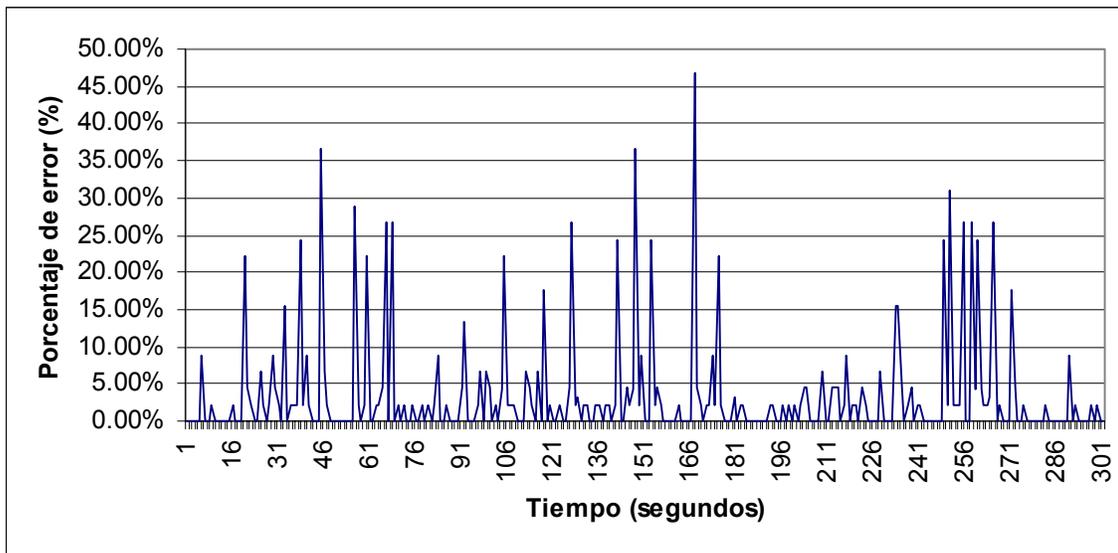
**Figura A.29** Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 6

**Tabla A.11** Registro de comunicación para la conexión 6

Total de bytes recibidos	20820
Bytes recibidos correctos:	20507
Bytes recibidos incorrectos:	313
Porcentaje de error:	1.50%
Tasa de transferencia:	90 b/seg
Tiempo de evaluación	5 min



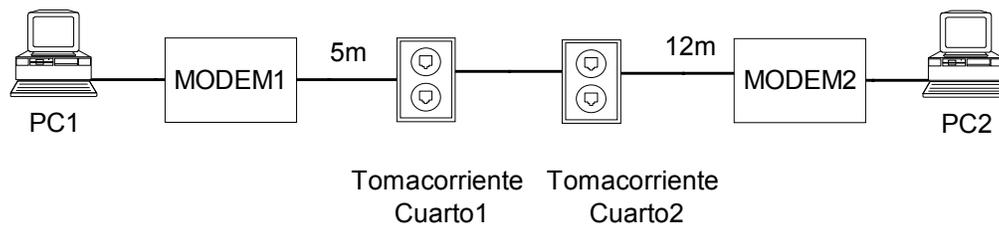
**Figura A.30** Diagrama de bloques para la conexión 7



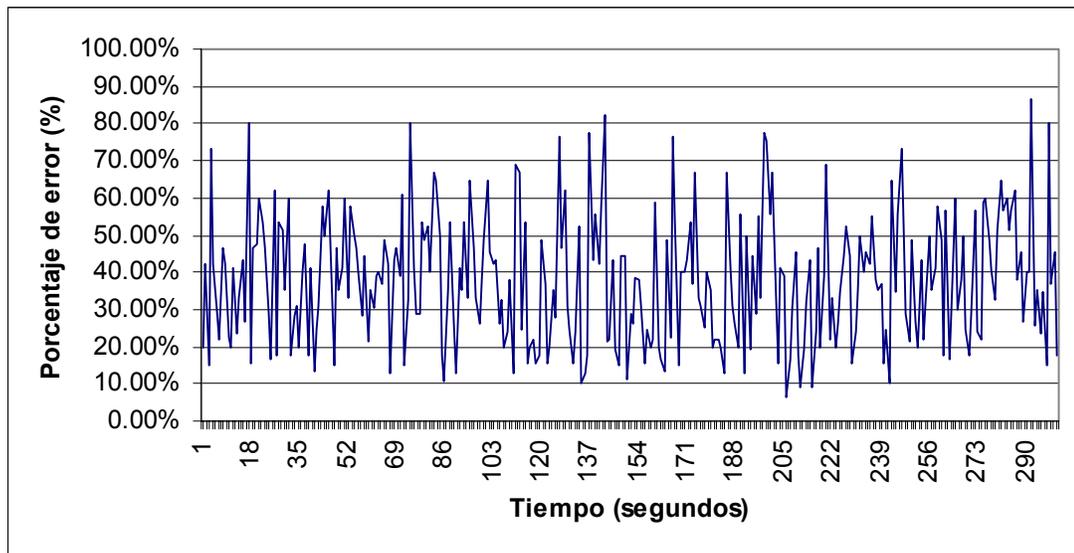
**Figura A.31** Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 7

**Tabla A.12** Registro de comunicación para la conexión 7

Total de bytes recibidos	13229
Bytes recibidos correctos:	12757
Bytes recibidos incorrectos:	472
Porcentaje de error:	3.57%
Tasa de transferencia:	84 b/seg
Tiempo de evaluación	5 min



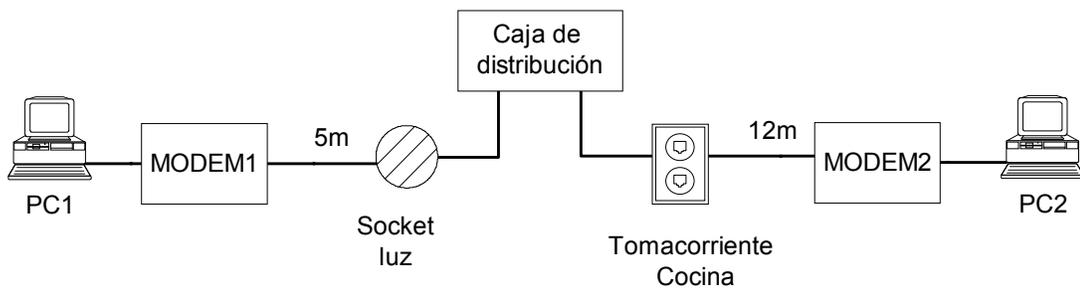
**Figura A.32** Diagrama de bloques para la conexión 8



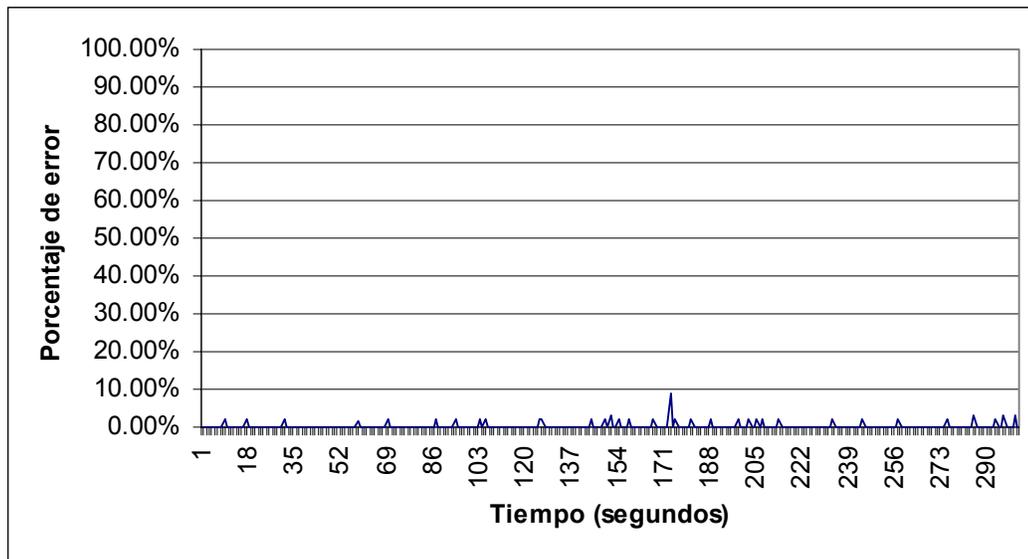
**Figura A.33** Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 8

**Tabla A.13** Registro de comunicación para la conexión 8

Total de bytes recibidos	12790
Bytes recibidos correctos:	7985
Bytes recibidos incorrectos:	4805
Porcentaje de error:	37.57%
Tasa de transferencia:	84b/seg
Tiempo de evaluación	5 min



**Figura A.34** Diagrama de bloques para la conexión 9



**Figura A.35** Porcentaje de error de comunicación en el tiempo para la conexión 9

**Tabla A.14** Registro de comunicación para la conexión 9

Total de bytes recibidos	12873
Bytes recibidos correctos:	12836
Bytes recibidos incorrectos:	37
Porcentaje de error:	0.29%
Tasa de transferencia:	84 b/seg
Tiempo de evaluación	5 min

**Tabla A.15** Resumen de la evaluación de comunicación.

Conexión de prueba	Tiempo de evaluación (segundos)	Porcentaje de error (%)	Fase de voltaje AC	Rama desde la caja de distribución
1	60	3.37	Igual	Igual
2	60	14.75	Igual	Igual
3	300	35.86	Igual	Igual
4	300	14.03	Igual	Igual
5	300	98.22	Igual	Igual
6	300	1.50	Igual	Igual
7	300	3.57	Igual	Igual
8	300	37.57	Igual	Igual
9	300	0.29	Igual	Diferente
10	----	100	Diferente	Diferente
11	----	100	Diferente	Diferente

### A.3.3 Pruebas de comunicación para diferentes fuentes de interferencia

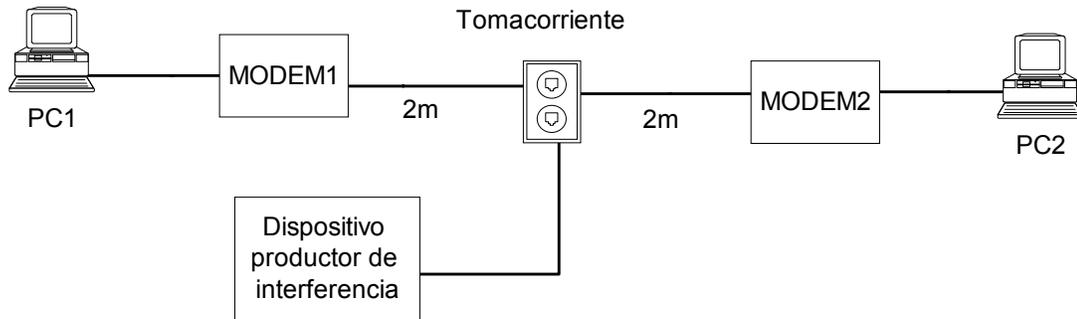


Figura A.36 Conexión utilizada para evaluar las diferentes interferencias

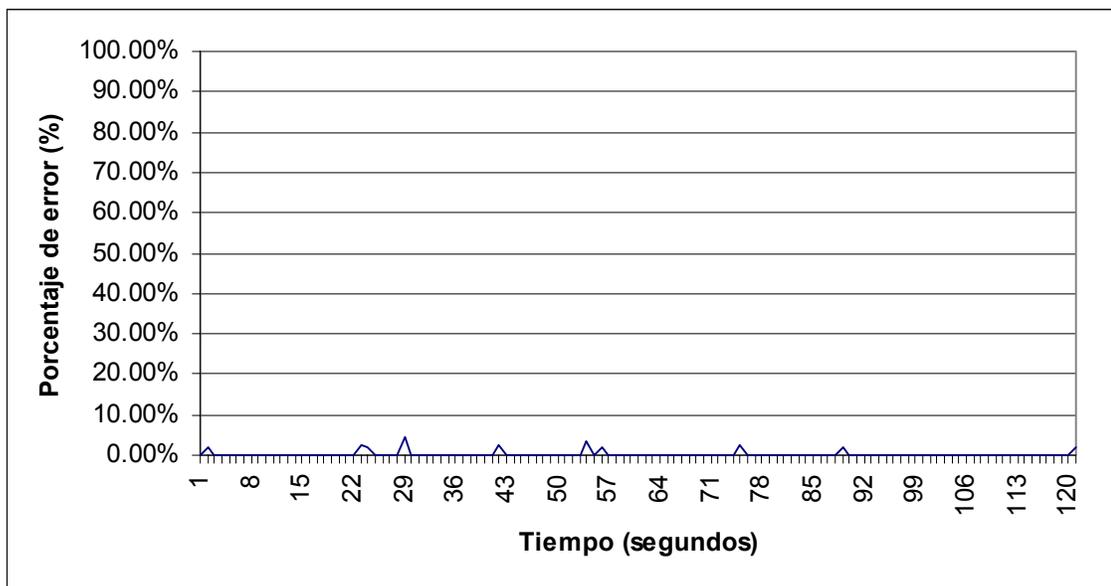
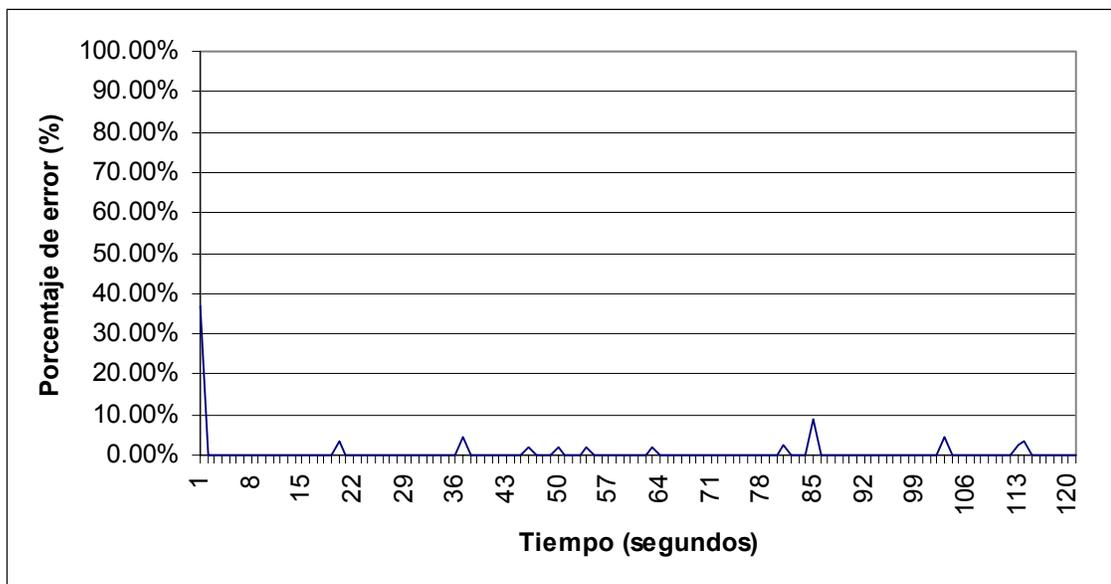


Figura A.37 Porcentaje de error de comunicación sin fuente de interferencia

**Tabla A.16** Registro de comunicación sin fuente de interferencia.

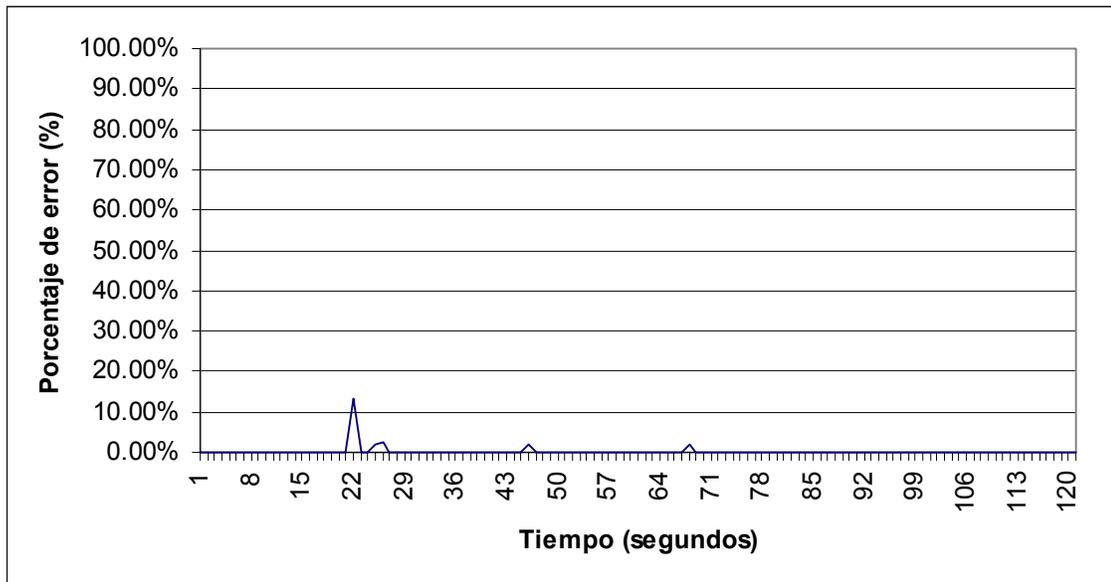
Total de bytes recibidos	5256
Bytes recibidos correctos:	5245
Bytes recibidos incorrectos:	11
Porcentaje de error:	0.21%
Tasa de transferencia:	86 b/seg
Tiempo de evaluación	2 min



**Figura A.38** Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a una secadora de pelo de 1300 watts.

**Tabla A.17** Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a una secadora de pelo de 1300 watts.

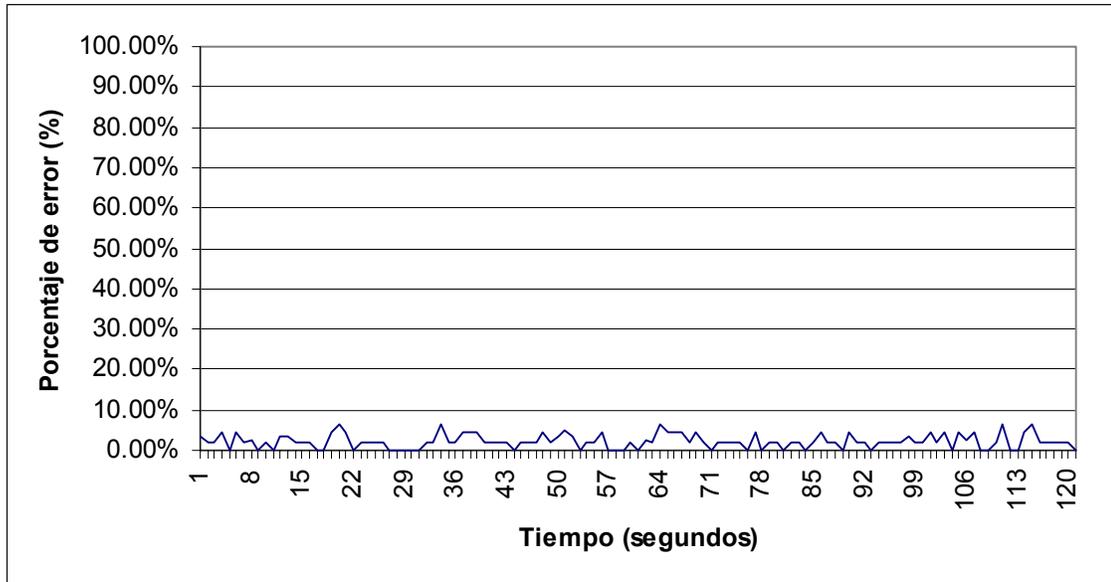
Total de bytes recibidos	5274
Bytes recibidos correctos:	5241
Bytes recibidos incorrectos:	33
Porcentaje de error:	0.63%
Tasa de transferencia:	86 b/seg
Tiempo de evaluación	2 min



**Figura A.39** Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un ventilador de 65 watts

**Tabla A.18** Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un ventilador de 65 watts

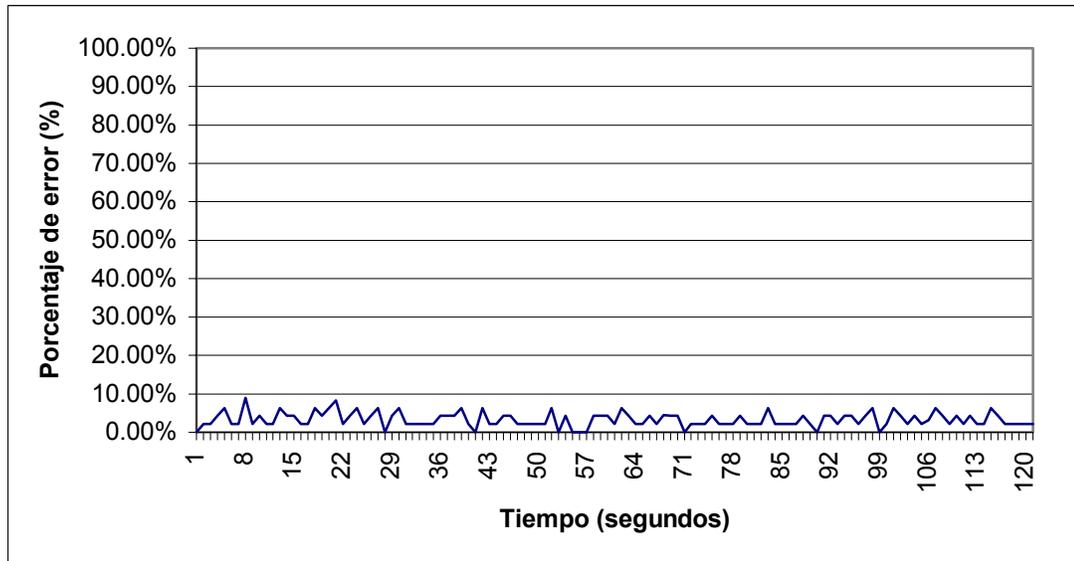
Total de bytes recibidos	3484
Bytes recibidos correctos:	3505
Bytes recibidos incorrectos:	8
Porcentaje de error:	0.23%
Tasa de transferencia:	86b/seg
Tiempo de evaluación	2 min



**Figura A.40** Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un cepillo eléctrico de 400 watts

**Tabla A.19** Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un cepillo eléctrico de 400 watts

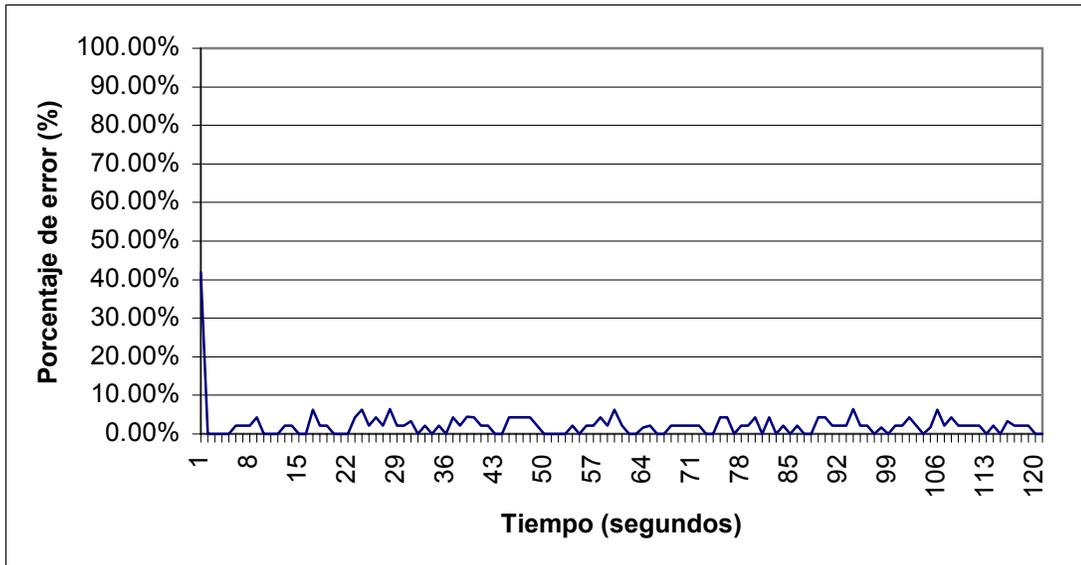
Total de bytes recibidos	5502
Bytes recibidos correctos:	5376
Bytes recibidos incorrectos:	126
Porcentaje de error:	2.29%
Tasa de transferencia:	86 b/seg
Tiempo de evaluación	2 min



**Figura A.41** Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un regulador de voltaje (dimmer) ajustado al 50% con carga resistiva de 50 Watts

**Tabla A.20** Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un regulador de voltaje (dimmer) ajustado al 50% con carga resistiva de 50 Watts.

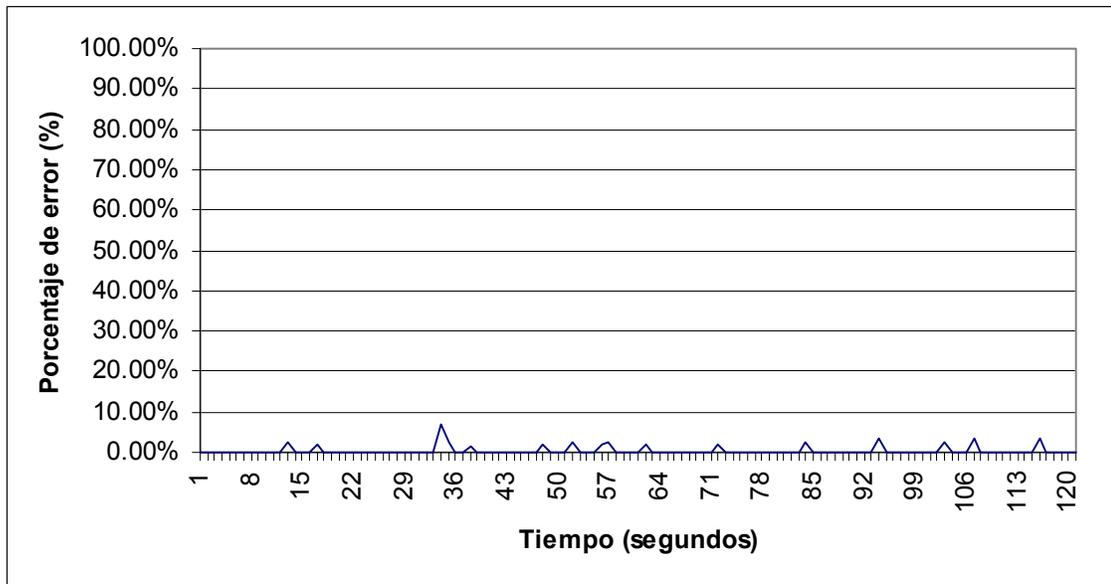
Total de bytes recibidos	5554
Bytes recibidos correctos:	5368
Bytes recibidos incorrectos:	185
Porcentaje de error:	3.33%
Tasa de transferencia:	86 b/seg
Tiempo de evaluación	2 min



**Figura A.42** Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un regulador de voltaje (dimmer) ajustado al 50% con carga reactiva de 65 Watts.

**Tabla A.21** Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un regulador de voltaje (dimmer) ajustado al 50% con carga reactiva de 65 Watts.

Total de bytes recibidos	5470
Bytes recibidos correctos:	5348
Bytes recibidos incorrectos:	122
Porcentaje de error:	2.23%
Tasa de transferencia:	86b/seg
Tiempo de evaluación	2 min



**Figura A.43** Porcentaje de error de comunicación para una fuente de interferencia debida a un horno de microondas de 1400 watts

**Tabla A.22** Registro de comunicación para una fuente de interferencia debida a un horno de microondas de 1400 watts

Total de bytes recibidos	5289
Bytes recibidos correctos:	5270
Bytes recibidos incorrectos:	19
Porcentaje de error:	0.36%
Tasa de transferencia:	86 b/seg
Tiempo de evaluación	2 min

**Tabla A.23** Resumen de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de interferencia y ruido

Descripción de la conexión de prueba	Dispositivo productor de ruido	Tasa de transferencia	Porcentaje de error	Tiempo de evaluación
Conexión simple de ambos MODEM a un mismo tomacorriente. La distancia entre cada MODEM y el punto de conexión es de 2m.	Ninguno	86b/seg	0.21%	2 min
	Secadora de pelo	86b/seg	0.63%	2 min
	Ventilador	86b/seg	0.23%	2 min
	Cepillo eléctrico	86b/seg	2.29%	2 min
	Horno de microondas	86b/seg	0.36%	2 min
	Regulador de potencia (dimmer) al 50%, carga resistiva	86b/seg	3.33%	2 min
	Regulador de potencia (dimmer) al 50%, carga inductiva	88b/seg	2.23%	2 min

## Apéndice A.4 Glosario

MODEM	Hardware utilizado para modular y demodular una señal de información
Byte	Paquete de información conformado por 8 bits. Puede representar valores entre 0 y 255
Tecnología PLC	Tecnología utilizada para la transmisión de información a través de las líneas de potencia
Red HAN	Red eléctrica dentro de una residencia o edificio limitada por el transformador de distribución
Half-Duplex	Transmisión de datos bidireccional en tiempos diferentes.
Full-Duplex	Transmisión de datos bidireccional al mismo tiempo.
Ruido	Señal eléctrica no deseada que se mezcla con la señal de información
RS-232	Formato de comunicación serie en el que un 1 lógico es representado por $-12V$ y un 0 lógico es representado por $+12V$ .

## Apéndice A.5 Lista de abreviaturas

AC	Corriente Alterna
bps	Bits por segundo
dB	Decibeles
dBm	Decibelímetros
dBV	Decibeles Voltio
DC	Corriente Directa
FSK	Frequency Shift Keying
HAN	Home Area Network
Hz	Hertz
KHz	KiloHertz
mH	Mili Henrios
nF	Nano Faradios
PC	Personal Computer – Computador personal
PLC	Power Line Communications
SCI	Serial Communication Interface
TTL	Transistor Transistor Logic
uF	Micro Faradios
uH	Micro Henrios