

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Instituto Costarricense de Electricidad**

**Evaluación de la transmisión de datos entre tarjetas modem PLC utilizando  
protocolo MODBUS**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el Grado Académico de Licenciatura**

**Oscar Jesús Delgado Jiménez**

**Cartago, Diciembre de 2002**

## **Resumen**

El objetivo del proyecto fue evaluar la confiabilidad de transmitir datos de control por medio de las líneas de potencia. El área de la comunicación de datos entre equipos electrónicos ha permitido el desarrollo de tarjetas modem PLC, cuya función principal es la de acoplar las transmisiones a líneas portadoras de potencia eléctrica.

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) cuenta con dos tarjetas modem del tipo PLC. Las pruebas realizadas a dichos dispositivos han revelado que permiten una transmisión de datos confiables, pero no se había experimentado con una aplicación más precisa, como por ejemplo, protocolos para sistemas de control industrial.

Mediante la adaptación, vía software, de las funciones del protocolo MODBUS en el microcontrolador de una tarjeta modem PLC, se concluyó que, a nivel de una red local de distribución eléctrica, es factible una efectiva comunicación de datos de control entre un equipo maestro y un dispositivo esclavo.

El presente informe documenta la adaptación del protocolo a las tarjetas modem PLC y el estudio evaluativo de su funcionamiento en el momento de transmitir datos entre dos equipos específicos.

Palabras claves: Protocolo MODBUS, Modem PLC.

## **Abstract**

The objective of the project was to evaluate the trustworthiness to transmit control data by means of the lines of power. The area of the data communication between electronic equipment has allowed the development of the PLC modem, whose main function is the one to connect the transmissions to carrying lines of electrical power.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) counts on two modem of type PLC. The tests made to these devices have revealed that allow a transmission of highly reliable messages, but it had not been experienced with one more a more precise application, like for example, protocols for systems of industrial control.

By means of the adaptation, by software, of the functions of MODBUS protocol in the microcontroller of a PLC modem, one concluded that, at level of a local network of electrical distribution, an effective data communication of control between masterful equipment and an enslaved device is feasible.

The present report documents to the adaptation of the protocol to PLC modem and the study of its operation at the moment for transmitting data between specific equipment.

Key words: MODBUS Protocol, PLC Modem.

## **Dedicatoria**

*A los mejores padres del mundo y a la hermanita más especial, que DIOS y la virgencita los conserve siempre a mi lado, los amo.*

## **Agradecimiento**

Agradezco a DIOS por todo cuanto tengo y soy.

Agradezco a la Virgen María por todos los momentos en que me inspiró la confianza para seguir adelante.

Agradezco a San Juan Bosco por su magnífica labor social y espiritual hacia con todos los jóvenes.

Agradezco a mis padres, por el orgullo que siento de ser su hijo, les aseguro que con gusto velaré por que nunca les falte absolutamente nada ni ustedes ni a shisha.

Agradezco a Marcela por su cariño sincero e incondicional y a Floria por los momentos especiales a su lado. Incluyo un gracias y una bendición a mis grandes y verdaderos compañeros: Ariel Salazar, César Lépiz y Luis Diego Conejo, estos profesionales saben el significado del trabajo en equipo.

Toda mi gratitud al profesor asesor Ing. Carlos Badilla Corrales por velar que los objetivos propuestos para el proyecto se cumplieran fielmente.

Finalmente, reservo estas últimas líneas para agradecer al personal del departamento de Investigación y Desarrollo del ICE, en especial al Ing. Luis Moya Vargas y a la Ing. Ana Catalina Villalobos. La ayuda y el apoyo brindado al desarrollo de mi proyecto lo tendré siempre presente.

## INDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1</b>		<b>1</b>
1.1	DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	1
1.1.1	Descripción general	1
1.1.2	Descripción del Departamento donde se realizó el proyecto	3
1.2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y SU IMPORTANCIA	4
1.3	OBJETIVOS	6
1.3.1	Objetivo General	6
1.3.2	Objetivos Específicos	6
<b>CAPÍTULO 2</b>		<b>7</b>
2.1	ESTUDIO DEL PROBLEMA A RESOLVER	7
2.2	REQUERIMIENTOS DE LA EMPRESA	10
2.3	SOLUCIÓN PROPUESTA	10
2.3.1	Aspectos de software	10
2.3.2	Aspectos de hardware	11
2.3.3	Especificaciones del sistema	13
<b>CAPÍTULO 3</b>		<b>14</b>
3.1	METODOLOGÍA	14
<b>CAPÍTULO 4</b>		<b>16</b>
4.1	TARJETA MODEM PLC	16
4.1.1	Generalidades	16
4.1.2	Módulo Adapt812	18
4.1.3	Modulador/demodulador ST7537	21
<b>CAPÍTULO 5</b>		<b>22</b>
5.1	SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR 68HC812A4	22
<b>CAPÍTULO 6</b>		<b>31</b>
6.1	EXPLICACIÓN DEL DISEÑO	31
6.2	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE TRANSMISIÓN DE TRAMAS MODBUS	36
6.3	ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO	38
6.4	ALCANCES Y LIMITACIONES	39
<b>CAPÍTULO 7</b>		<b>41</b>
7.1	CONCLUSIONES	41
7.2	RECOMENDACIONES	42

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>43</b>
<b>APÉNDICES</b>	<b>44</b>
APÉNDICE A.1 INFORMACIÓN SOBRE EL PROYECTO	44
APÉNDICE A.2 COMUNICACIÓN SERIAL	45
APÉNDICE A.3 PROTOCOLO MODBUS	49
APÉNDICE A.4 PRUEBAS DEL PROTOCOLO MODBUS PARA CONEXIONES DISTINTAS ENTRE TARJETAS MODEM PLC	55
APÉNDICE A.5 GLOSARIO	61
<b>ANEXOS</b>	<b>63</b>
ANEXO B.1 PRUEBAS SOBRE TASAS DE ERROR EN TRANSMISIONES VÍA MODEM PLC	63
ANEXO B.2 CONEXIONES INTERNAS DE MODEM PLC	65
ANEXO B.3 TABLAS PARA CALCULAR EL CRC	66

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN ENLACE DE DATOS	8
FIGURA 2.2	ESTRUCTURA BÁSICA DE UN MENSAJE EN UN PROTOCOLO	9
FIGURA 4.1	DIAGRAMA DE BLOQUES INTERNO DE UNA TARJETA MODEM PLC	18
FIGURA 4.2	TARJETA ADAPT812	19
FIGURA 5.1	DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL PARA EL MICROCONTROLADOR DEL MODEM PLC MAESTRO	27
FIGURA 5.2	DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL PARA EL MICROCONTROLADOR DEL MODEM PLC ESCLAVO	28
FIGURA 5.3	DIAGRAMA DE BLOQUES PARA CÁLCULO DE CRC	29
FIGURA 5.4	DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA SUBROUTINA DE WATCH DOG	30
FIGURA 6.1	DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS	32
FIGURA 6.2	DIAGRAMA DE BLOQUES INTERNO DEL MODEM PLC	35
FIGURA A.2.1	DISTRIBUCIÓN DE PINES DEL CONECTOR DB9	48
FIGURA A.4.1	DIAGRAMA DE PRIMERA CONEXIÓN DE PRUEBA DEL PROTOCOLO MODBUS	55
FIGURA A.4.2	DIAGRAMA DE SEGUNDA CONEXIÓN DE PRUEBA DEL PROTOCOLO MODBUS	57
FIGURA A.4.3	DIAGRAMA DE TERCERA CONEXIÓN DE PRUEBA DEL PROTOCOLO MODBUS	59
FIGURA B.1.1	CONEXIÓN UTILIZADA PARA EVALUAR TASAS DE ERROR DE LOS MODEM PLC ANTE DISTINTAS INTERFERENCIAS	63
FIGURA B.2.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DETALLADO PARA EL HARDWARE DEL MODEM PLC	65

## INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1	DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES MODBUS A IMPLEMENTAR EN EL MICROPROCESADOR	12
TABLA 4.1	CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO ADAPT812	19
TABLA 4.2	DESCRIPCIÓN DE SEÑALES DE ENTRADA/SALIDA EN MÓDULO DE CONTROL	20
TABLA 5.1	REGISTROS PARA MANEJO DE PUERTOS SERIE DEL MICROCONTROLADOR 68HC812A4	25
TABLA 5.2	REGISTROS PARA MANEJO DE PUERTOS I/O DEL MICROCONTROLADOR 68HC812A4	26
TABLA 6.1	MATERIALES	38
TABLA 6.2	EQUIPO	38
TABLA 6.3	SERVICIOS PERSONALES	38
TABLA 6.4	SERVICIOS NO PERSONALES	39
TABLA 6.5	INFRAESTRUCTURA	39
TABLA A.3.1	ESTRUCTURA DE UN MENSAJE MODBUS, UTILIZANDO EL MODO UTR	51
TABLA A.3.2	FUNCIONES DEL PROTOCOLO MODBUS	52
TABLA A.3.3	ESTRUCTURA DE LOS MENSAJES DE ERROR EN PROTOCOLO MODBUS	53
TABLA A.3.4	VALORES POSIBLES PARA LA SEÑAL DE DESCRIPCIÓN DE ERROR	54
TABLA A.4.1	RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA PRIMERA CONEXIÓN DE PRUEBA	56
TABLA A.4.1	RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA SEGUNDA CONEXIÓN DE PRUEBA	58
TABLA A.4.3	RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA TERCERA CONEXIÓN DE PRUEBA	60
TABLA B.1.1	RESUMEN DE VARIAS TASAS DE ERROR EN LA TRANSFERENCIA DE DATOS PARA LAS TARJETAS MODEM PLC	64
TABLA B.3.1	TABLA PARA CALCULAR LA VARIABLE CRCHI	66
TABLA B.3.2	TABLA PARA CALCULAR LA VARIABLE CRCLO	66

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

---

### **1.1 Descripción de la empresa**

El proyecto “Evaluación de la transmisión de datos entre tarjetas modem PLC utilizando protocolo MODBUS” fue desarrollado para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

#### **1.1.1 Descripción general**

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) fue creado por el Decreto - Ley No.449 del 8 de abril de 1949 como una institución autónoma, con personalidad jurídica y patrimonio propio. Está dotado de plena autonomía e independencia administrativa, técnica y financiera. Al ICE le corresponde, por medio de sus empresas, desarrollar, ejecutar, producir y comercializar todo tipo de servicios públicos de electricidad y telecomunicaciones, así como actividades o servicios complementarios a estos.

Como objetivos primarios el ICE debe desarrollar, de manera sostenible, las fuentes productoras de energía existentes en el país y prestar el servicio de electricidad. A su vez, se encarga de desarrollar y prestar los servicios de telecomunicaciones, con el fin de promover el mayor bienestar de los habitantes del país y fortalecer la economía nacional.

En 1963 y por medio de la Ley No. 3226, la Asamblea Legislativa le confirió al ICE un nuevo objetivo: el establecimiento, mejoramiento, extensión y operación de los servicios de comunicaciones telefónicas, radiotelegráficas y radiotelefónicas en el territorio nacional. Tres años más tarde, instaló las

primeras centrales telefónicas automáticas y, a partir de entonces, las telecomunicaciones iniciaron su desarrollo.

Con el devenir del tiempo, ha evolucionado como un grupo corporativo de empresas estatales, integrado por el propio ICE (Sectores Energía y Telecomunicaciones) y sus empresas: Radiográfica Costarricense S.A. (RACSA) y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S.A. (CNFL), las cuales han trazado su trayectoria, mediante diversos proyectos de modernización desarrollados en las últimas décadas.

En el campo de la energía, el ICE ha desarrollado 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, la Institución ha logrado una cobertura del 94% del territorio nacional en telefonía básica, lo que coloca a Costa Rica como líder a nivel centroamericano en esta área.

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, un Vicepresidente y un Secretario; al primero de ellos le corresponde ser el máximo jerarca en la estructura organizacional del ICE.

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

El sector ICE-Energía cuenta actualmente con las siguientes 6 UEN: Producción de electricidad, Transporte de electricidad, Servicio al cliente, Proyectos y servicios asociados, Centro nacional de control de energía y el Centro nacional de planificación de energía.

### **1.1.2 Descripción del Departamento donde se realizó el proyecto**

El proyecto se desarrollo para el sector ICE-Energía en la Unidad Estratégica de Negocios Proyectos y Servicios Asociados (UEN-PySA), específicamente en el Departamento de Investigación y Desarrollo.

La misión de la UEN-PySA es desarrollar y comercializar proyectos con calidad de clase mundial para continuar impulsando el desarrollo eléctrico, la especialización de su recurso humano y los productos y servicios asociados.

En el Departamento de Investigación y Desarrollo se investigan nuevas tecnologías que puedan aplicarse particularmente en el sector energía. Para este Departamento laboran alrededor de 40 empleados, de los cuales, 30 son ingenieros en áreas tales como Electricidad, Electrónica, Informática y Química. Se cuenta con oficinas y laboratorios de desarrollo en el tercer piso del edificio UEN-PySA (300 metros Norte del ICE Sabana) y con laboratorios de electrónica y corrosión en el plantel del ICE en Colima de Tibás.

El Ing. Luis Moya Vargas, quien labora como Coordinador de Proyectos en el Departamento de Investigación y Desarrollo, fue el encargado por parte del ICE de supervisar el avance del proyecto.

## 1.2 Definición del problema y su importancia

Actualmente la conexión por red de dos o más equipos electrónicos brinda la posibilidad de obtener mayor productividad y eficiencia en el manejo y procesamiento de datos. Dichas conexiones requieren en muchos casos la onerosa instalación de cableados y alteraciones en la infraestructura del lugar de ubicación de la red.

Una opción utilizada comúnmente es la comunicación por modem a través de línea telefónica, pero aún esta tecnología involucra un costo en la utilización del servicio y una limitante en la velocidad de transmisión.

Debido a lo anterior, surge la necesidad de contar con un medio de comunicación alternativo para la transmisión de datos, que se caracterice por su sencilla conexión y bajo costo en el cableado adicional. Para esto, se vislumbró utilizar la red de transmisión eléctrica, presente en los hogares, como medio de transmisión de datos entre varios puntos de una edificación.

El Departamento de Investigación y Desarrollo del ICE, en el I semestre del 2002, asesoró y brindó los recursos necesarios al estudiante Rodrigo Vargas Sáenz para que diseñara un dispositivo electrónico que lograra la comunicación de datos de un computador a otro por medio de la red eléctrica local.

El proyecto le permitía al señor Vargas cumplir con su Proyecto de Graduación para optar por el título de bachiller en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Como resultados tangibles del proyecto se diseñaron e implementaron dos prototipos de modem que permiten el envío de datos a través de las líneas de potencia 110V de una red HAN<sup>1</sup>. Los prototipos, cuyas características se detallan en el capítulo 4, se basan principalmente en: un microprocesador Motorola 68HC812A4, circuitos moduladores, comunicación serie en formato RS-232<sup>2</sup> y un interfaz con la

---

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

<sup>2</sup> En el apéndice A.2 se detallan características de este tipo de comunicación.

línea de transmisión eléctrica. Por el tipo de medio en el que son enviados los datos, este modem se denomina modem PLC<sup>3</sup>.

Adicional al desarrollo de los modem PLC se diseñó un software de evaluación. Dicho programa permite registrar y evaluar estadísticamente la tasa de error<sup>4</sup> que se presenta en una prueba de envío y recepción de datos. En el anexo B.1 se presentan los resultados obtenidos al someter las tarjetas modem PLC a distintos tipos de conexiones y perturbaciones comunes de las líneas de distribución eléctrica.

El problema que se le presentó al ICE fue la necesidad de saber si incluir el protocolo MODBUS<sup>5</sup>, en las tarjetas modem PLC, aumentaría la confiabilidad de los datos transmitidos en comparación con los resultados obtenidos para el mejor de los casos presente en el anexo B.1. Los datos transmitidos en este proyecto ya no sólo comprobaron que un mensaje pudiera ser transmitido por líneas de potencia, sino también que los modem PLC pueden o no ser útiles para funciones de control.

La importancia de adaptar MODBUS radicó en la efectividad del código de detección de errores presente en el protocolo. Esta característica permitió evaluar la confiabilidad de la transmisión de datos de control por las líneas de potencia, ya que cada modem PLC fue programado para reenviar un mensaje MODBUS solamente si su cálculo interno del CRC es idéntico al del mensaje recibido.

---

<sup>3</sup> PLC son las siglas en inglés para Power Line Communication (Comunicación por líneas de potencia)

<sup>4</sup> Tasa de error se refiere al porcentaje de bytes que son recibidos incorrectamente en una transmisión de datos.

<sup>5</sup> En el apéndice A.3 se detallan las principales características de este protocolo de comunicación.

### **1.3 Objetivos**

A continuación se detallan los objetivos planteados para el desarrollo del presente proyecto.

#### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar mediante la adaptación del protocolo MODBUS la transmisión de datos entre tarjetas modem PLC.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Recopilar por escrito las características de la tarjeta modem PLC.
2. Recopilar por escrito las características del protocolo MODBUS.
3. Diseñar un algoritmo de programación que adapte el protocolo MODBUS a las tarjetas modem PLC.
4. Programar en el microprocesador del modem PLC las rutinas de ejecución de las funciones MODBUS definidas para el proyecto.
5. Ejecutar pruebas de envío y recepción de tramas MODBUS, a través de las tarjetas modem PLC interconectadas para el caso de menor tasa de error de transmisión.
6. Recopilar por escrito la información obtenida en las pruebas de transmisión de tramas MODBUS a través de las tarjetas modem PLC.
7. Analizar la transmisión de datos entre las tarjetas modem PLC adaptadas a funciones del protocolo MODBUS.
8. Preparar la documentación para la transferencia del conocimiento tecnológico adquirido durante la ejecución del proyecto.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

---

#### 2.1 Estudio del problema a resolver

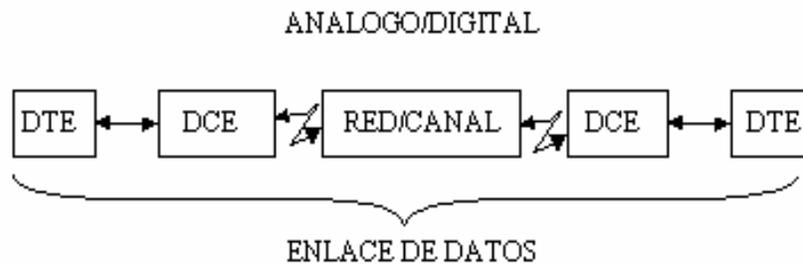
Una vez definida la conexión física para poder transferir información entre dos dispositivos o sistemas debe existir un formato para los datos y una estrategia de sincronización de como se envían y reciben los mensajes, incluyendo la detección y corrección de los errores.

En un enlace de datos se presentan bloques que cumplen diferentes funciones. En la figura 2.1 se define la conexión típica de dichos bloques. El primero de ellos son los sistemas a comunicar, denominados individualmente como Equipo Terminal de Datos o DTE. Un segundo bloque, muy importante en este tipo de enlace, es el Equipo de Comunicación de Datos o DCE, el cual generalmente es una tarjeta modem<sup>6</sup>.

La red o canal, constituye el medio físico por el cual es transmitido el mensaje entre los DCE. Ejemplos de canales son las líneas telefónicas, cables de comunicación serie, fibra óptica y de manera especial para este proyecto, las líneas de transmisión eléctrica. La escogencia de un determinado canal se hace conforme a parámetros técnicos requeridos, tales como, velocidad de transmisión de datos, grado de inmunidad a ruidos, facilidades de instalación a distancia y factores económicos.

---

<sup>6</sup> Un modem es un periférico de entrada y salida que permite intercambiar información con otros sistemas a través de un cable físico.



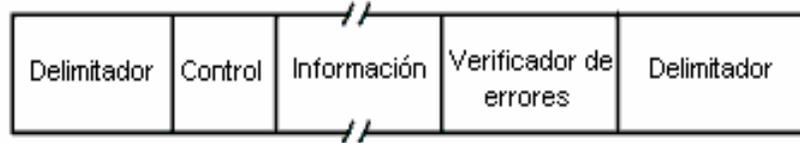
**Figura 2.1** Diagrama de bloques de un enlace de datos

La transferencia ordenada de información en un enlace de comunicación se logra por medio de un protocolo.

El protocolo constituye el conjunto de reglas y convenciones entre entes comunicantes. El objetivo de un protocolo es establecer una conexión entre equipos terminales de datos, identificando el emisor y el receptor, asegurando que todos los mensajes se transfieran correctamente y controlando toda la transferencia de información.

Los modos de operación, la estructura de los mensajes, los tipos de solicitudes y respuestas, constituyen las diferentes piezas constructivas de un protocolo. Los equipos, las conexiones, los cables, repetidoras, y otros, constituyen el soporte físico que permiten el enlace de datos.

Un protocolo define los detalles y especificaciones técnicas del lenguaje de comunicación entre los equipos. Por lo tanto, un elemento básico a considerar en cualquier protocolo es la estructura del mensaje. Básicamente dicha estructura debe cumplir con los parámetros definidos en la figura 2.2.



**Figura 2.2** Estructura básica de un mensaje en un protocolo

MODBUS<sup>7</sup> es un protocolo de gran aceptación por las empresas debido a su simplicidad de uso. Básicamente, este protocolo estructura un mensaje de control basado en cualquiera de las 24 funciones que maneja. Mediante una configuración maestro - esclavo se establece un enlace de datos entre un emisor y un receptor. MODBUS realiza un chequeo de errores en cada mensaje que transmite, razón por la cual se detecta rápidamente si un mensaje enviado no llega correctamente a su destino.

Los modem PLC, cuyas características se detallan en el capítulo 4, son equipos de comunicación de datos (DCE) que utilizan como canal de transmisión las líneas de distribución eléctrica a 110V. En conexiones experimentales se ha demostrado, anexo B.1, que este tipo de modem presenta una tasa de error de transmisión de datos muy baja<sup>8</sup> en casos muy específicos.

Por otra parte, la comunicación entre los equipos terminales de datos (DTE) y los modem PLC es de tipo serial<sup>9</sup>. En este caso, el protocolo de transmisión de datos, sólo toma en cuenta dos estados de la línea, 0 y 1, también llamados Low y High. Cuando no se transmite ningún carácter, la línea esta High. Si su estado pasa a Low, se sabe que se transmiten datos. Por convenio se transmiten entre 5 y 8 bits, pero la BIOS sólo soporta una anchura de datos de 7 u 8 bits. Durante la transmisión, si la línea está Low, se envía un 0 y si está High indica un bit a uno. Se envía primero

<sup>7</sup> En el apéndice A.3 se detallan las principales características de este protocolo de comunicación.

<sup>8</sup> Tasa de error del 1.5% para el caso de conexión de los modem PLC a un mismo tomacorriente y sin compartir con otro tipo de cargas.

<sup>9</sup> En el apéndice A.2 se detallan las características de la comunicación serial.

el bit menos significativo, siendo el más significativo el último en enviarse. Luego, se envía un bit de paridad para detectar errores. Finalmente se mandan los bits de stop, que indican el fin de la transmisión de un carácter. El protocolo de comunicación serial permite utilizar 1, 1,5 y 2 bits de stop.

## **2.2 Requerimientos de la empresa**

El Departamento de Investigación y Desarrollo del Instituto Costarricense de Electricidad, requería de un estudio que permitiera determinar si incluir varias de las funciones del protocolo de comunicación MODBUS a las tarjetas modem PLC, aumentaría la confiabilidad de los datos transmitidos por medio de las líneas de distribución eléctrica a 110V. La evaluación determinaría la factibilidad de usar los modem PLC para comunicación entre equipos dedicados al control industrial.

## **2.3 Solución propuesta**

La solución al problema fue planteada por el Departamento de Investigación y Desarrollo del Instituto Costarricense de Electricidad.

A continuación se detallan los aspectos tomados en cuenta para la solución.

### **2.3.1 Aspectos de software**

Se debió diseñar un algoritmo, para el microprocesador Motorola XC68HC812A4, que permita adaptar a los modem PLC cada una de las funciones del protocolo MODBUS que se detallan en la tabla 2.1.

La programación del algoritmo se debió realizar en lenguaje C, debido a la compatibilidad de dicho lenguaje con este tipo de microprocesador. El compilador del programa fue suministrado por la institución.

Cada transferencia de datos entre los puertos seriales del microcontrolador debió detectar la presencia de algún error en la transmisión de los bytes del mensaje.

El programa, además de implementar el código CRC de detección de errores, debió ser capaz de controlar el tráfico de los datos a través del único canal disponible, la línea de distribución eléctrica.

El mensaje MODBUS fue estructurado para su envío en un respectivo software de aplicación llamado maestro MODBUS, el cual fue facilitado por el Departamento de Investigación y Desarrollo. De manera análoga fue suministrado software simulador de unidad esclava o UTR.

### **2.3.2 Aspectos de hardware**

Por la naturaleza del proyecto, como parte de la solución al problema, el Departamento de Investigación y Desarrollo del ICE, no contempló la construcción o eventual modificación de un hardware.

Todos los desarrollos y pruebas se realizaron sobre las tarjetas modem PLC existentes en el ICE. Las características principales de dichas tarjetas modem se detallan en el capítulo 4 del presente documento.

**Tabla 2.1** Descripción de las funciones MODBUS<sup>10</sup> a implementar en el microprocesador

<b>Número</b>	<b>Nombre de la función</b>	<b>Descripción</b>
1	Read coil status	Lectura del estado ON/OFF de un número determinado de salidas digitales, en un esclavo específico (0X)
2	Read input status	Lectura del estado ON/OFF de un número determinado de entradas digitales, en un esclavo específico (1X)
3	Read holding registers	Lectura del contenido binario, de un número determinado de registros de retención de datos (para señales analógicas), en un esclavo específico (4X)
4	Read input registers	Lectura del contenido binario, de un número determinado de registros de entrada de datos (para señales analógicas), en un esclavo específico (3X)
5	Force single coil	Escribe un valor ON u OFF a requerir en una determinada salida digital de un esclavo específico (0X)
6	Preset single register	Escribe un contenido a requerir en un determinado registro de retención de datos (para señales analógicas), en un esclavo específico (4X)

---

<sup>10</sup> En el apéndice A.3 se encuentra una descripción más detallada sobre las funciones MODBUS a implementar.

### 2.3.3 Especificaciones del sistema

A continuación se detalla una lista de las principales especificaciones del sistema instalado con el fin de lograr la evaluación de la transmisión de datos a través de las líneas de potencia.

- Tipo de modem: PLC.
- Canal de transmisión: Línea de distribución eléctrica a 110 voltios-corriente alterna.
- Tipo de microprocesador: Motorola XC68HC812A4.
- Lenguaje de programación: Lenguaje C
- Compilador: ICC12
- Tipo de protocolo: MODBUS.
- Funciones MODBUS evaluadas: Read coil status (1), Read input status (2), Read holding registers (3), Read input registers (4), Force single coil (5) y Preset single register (6).
- La principal prueba de evaluación de transmisión de datos se realizó con los modem PLC interconectados a un mismo tomacorriente y sin ninguna otra carga adicional conectada al mismo. La anterior conexión presenta una tasa de error del 1.5%, según datos presentes en el anexo B.1.
- Las pruebas de evaluación consistieron en el seguimiento de tramas de datos, precisamente, desde el momento en que fueron enviada por el maestro MODBUS hacia alguna unidad esclava.
- Cada tarjeta modem PLC posee la característica de hacer su propio chequeo de errores CRC, por lo que en una comunicación típica entre maestro y esclavo, el CRC es chequeado como mínimo en dos puntos.
- Idealmente se buscó que los modem PLC ofrecieran una vía de transmisión transparente a los datos enviados y recibidos.

# CAPÍTULO 3

## PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

---

### 3.1 Metodología

1. Recopilación por escrito de las características de la tarjeta modem PLC.  
Toma de notas por escrito de las principales características del hardware de las tarjetas modem PLC.
2. Recopilación por escrito de las características del protocolo MODBUS.
  - 2.1 Toma de notas escritas sobre características de la comunicación serial.
  - 2.1 Toma de notas escritas sobre la estructura de los mensajes MODBUS.
  - 2.2 Tabulación de las principales funciones del protocolo MODBUS.
  - 2.3 Toma de notas por escrito referentes al código de chequeo de errores CRC en transmisión de tramas MODBUS.
  - 2.4 Ambientación sobre el uso de los paquetes software simuladores de Maestro MODBUS y equipo esclavo MODBUS, para pruebas con el protocolo.
3. Diseño de los algoritmos para la programación del microcontrolador 68HC812A4.
  - 3.1 Toma de notas por escrito del manejo de los puertos serie y de los puertos de entrada y salida del microcontrolador.
  - 3.2 Toma por escrito de los principales registros de control del microcontrolador.
  - 3.3 Diseño del algoritmo para recepción de datos por puertos serie.

- 3.4 Diseño del algoritmo para almacenar datos en memoria.
- 3.5 Diseño del algoritmo para cálculo del CRC.
- 3.6 Diseño del algoritmo para envío de datos por puerto serie.
- 3.7 Diseño del algoritmo para generar señal de control Watch Dog.

- 4 Programación de las rutinas de ejecución de las funciones MODBUS en el microprocesador del modem PLC.
- 5 Ejecución de pruebas de envío y recepción de tramas MODBUS, a través de las tarjetas modem PLC.
- 6 Tabulación por escrito de la información obtenida en las pruebas de transmisión de tramas MODBUS a través de las tarjetas modem PLC.
- 7 Análisis de la transmisión de datos entre las tarjetas modem PLC adaptadas a funciones del protocolo MODBUS.
  - 7.1 Toma de notas por escrito con las principales conclusiones obtenidas de las pruebas a las tarjetas modem PLC.
  - 7.2 Toma de nota por escrito de las recomendaciones sugeridas para una eficiente transmisión de datos a través del modem PLC.
- 8 Redacción de la documentación para la transferencia del conocimiento tecnológico adquirido durante la ejecución del proyecto.

## CAPÍTULO 4

# DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE UTILIZADO

---

### 4.1 Tarjeta modem PLC

Se presenta, a continuación, una descripción detallada del hardware de una tarjeta modem PLC.

#### 4.1.1 Generalidades

La tarjeta modem PLC es un equipo de comunicación de datos (DCE) que se encarga de recibir y transmitir mensajes a los equipos terminales de datos (DTE). A su vez, se encarga de modular y demodular la información a ser transmitida por la red de alimentación de potencia.

La figura 4.1 muestra un diagrama de bloques<sup>11</sup> de una tarjeta modem PLC.

La información proveniente del puerto de comunicaciones y la transmitida hacia él, se presenta como una señal RS-232 (+12V / -12V).

El módulo de control (módulo Adapt812<sup>12</sup>) posee un puerto de 9 pines macho (DB9), que se conecta con el puerto de comunicación serie. Internamente se realiza la conversión o acople de la señal RS-232 a una señal TTL (0 – 5V). Este módulo posee internamente un microcontrolador de la familia HC12 de Motorola, que constituye la parte del modem que 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.

---

<sup>11</sup> Un diagrama de bloques más detallado se presenta en el anexo B.2.

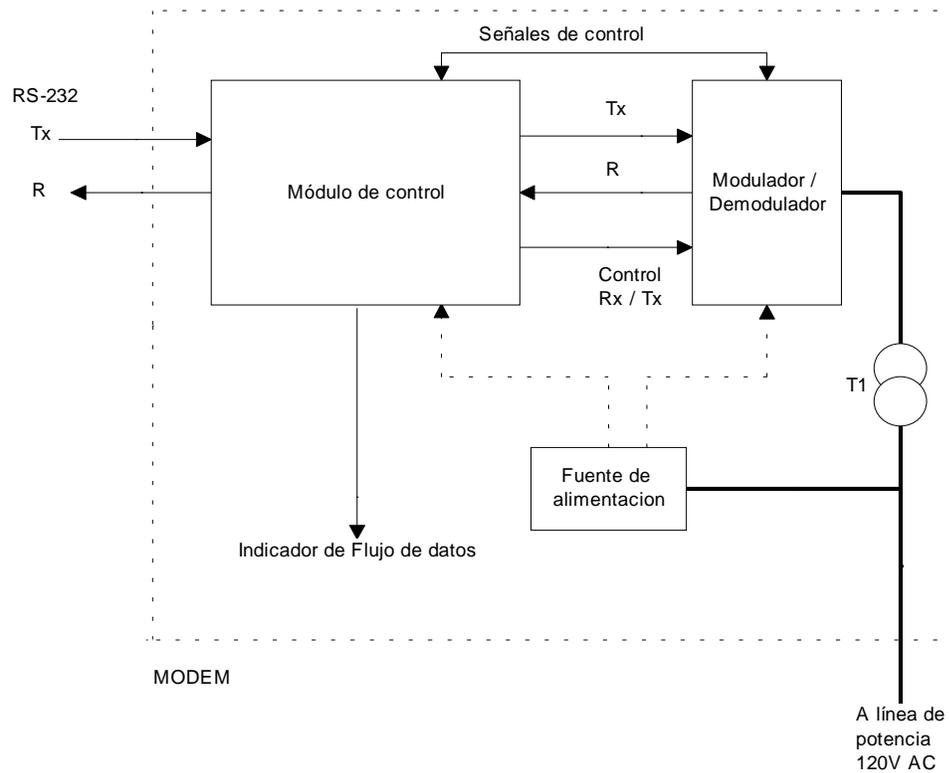
<sup>12</sup> El módulo Adapt812 se detalla en la sección 4.1.2.

Adicionalmente el modem posee 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 hardware del modem PLC. Este se comunica con el controlador y se encarga de acoplar la información a la red de potencia de 110 voltios-corriente alterna. Para esto se utiliza el ST7537<sup>13</sup> que es un circuito integrado que utiliza modulación por corrimiento en frecuencia (FSK) para la transmisión de información y cuenta con demodulador PLL con filtro de ruido, para la información entrante. Adicionalmente al ST7537, se presenta una interfaz de acople a la línea de potencia basada en un circuito discreto y un transformador especial. Otro bloque que se detalla en la figura 4.1 es la fuente de alimentación del modem PLC. Esta fuente toma la energía de la misma red de potencia, la transforma y la rectifica a 5 V DC estables para alimentar los circuitos digitales y a 10 V DC estables para la sección analógica y la alimentación del ST7537.

---

<sup>13</sup> El modulador/demodulador ST7537 se detalla en la sección 4.1.3.

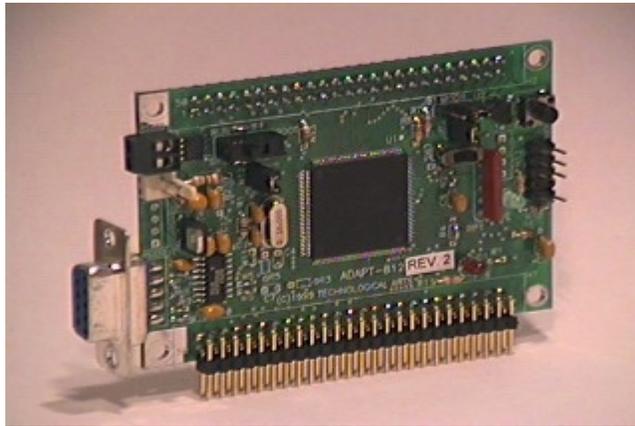


**Figura 4.1** Diagrama de bloques interno de una tarjeta modem PLC

#### 4.1.2 Módulo Adapt812

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, mostrada en la figura 4.2, simplifica el diseño del hardware de un prototipo, pues gran parte de los circuitos se encuentran instalados en el módulo (osciladores, transistores, interruptores, convertidor RS-232 a TTL).



**Figura 4.2** Tarjeta Adapt812

El Adapt812 utiliza conectores de 50 pines que permiten adaptarlo fácilmente a tarjetas para montajes de prototipos (protoboards, wire gras y solder wrap).

La memoria de programa es expandible hasta 4 MB y la memoria de datos hasta 1MB. El módulo es programable en C, Basic y ensamblador y se utiliza el puerto RS-232 para descargar el programa desde la computadora. Otras características del módulo se detallan en la tabla 4.1.

La descripción de las señales de entrada y salida del módulo de control Adapt812, que fueron utilizadas para el proyecto, se detallan en la tabla 4.2.

**Tabla 4.1** Características del módulo Adapt812

Dato	Característica
Memoria ROM	2 K EEPROM
Memoria RAM	8 K
Memoria Flash	128 K
Líneas I/O	90, programables como entradas o salidas

**Tabla 4.2** 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	Conector DB9	---	Salida	Conector 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 reset, controlada 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.

### 4.1.3 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 10 V para la etapa de modulación/demodulación y 5 V para la interfaz digital con el microcontrolador.

El 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 132.45 KHz. Otras características importantes de resaltar son:

- Transmisión Half-Duplex, asíncrona, 2400 bps máximo.
- Frecuencias de transmisión: 133.05 KHz = 0      131.85 KHz = 1.
- 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.

# CAPÍTULO 5

## DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DEL SISTEMA

---

### 5.1 Software del microcontrolador 68HC812A4

El software implementado en el microcontrolador 68HC812A4, programado en lenguaje C por medio del compilador ICC12, debió cumplir las especificaciones del protocolo MODBUS, que se describen en el apéndice A.3.

El puerto serie SCI0, cuya velocidad fue programada a 9600 bps, es utilizado para comunicar el modem PLC ya sea con el maestro MODBUS o con una unidad esclava. Por otro lado el puerto SCI1, programado a una velocidad de 1200 bps, se usa para la comunicación de datos por la línea de potencia.

Las figuras 5.1 y 5.2 detallan, por medio de diagrama de bloques, el funcionamiento general de los programas desarrollados para adaptar el protocolo MODBUS a las tarjetas modem PLC. La figura 5.1 corresponde al algoritmo de programación para el modem PLC maestro. De igual forma, el algoritmo equivalente para el modem PLC esclavo se muestra en la figura 5.2.

La primera acción que debe ejecutar cada modem PLC es entrar en un ciclo infinito de espera de mensaje de petición de información, en el modem PLC maestro la trama de datos debe ser recibida por el puerto SCI0 y en el esclavo por el SCI1.

Una vez detectado el mensaje a transmitir, el programa actúa sobre los registro de control, banderas y datos del respectivo SCI. Cada byte de la trama es recibido y almacenado en un espacio de la memoria RAM del microprocesador. El objetivo de recurrir a la memoria se debe a que las velocidades de los puertos seriales son diferentes.

El programa debe detectar cuando ha recibido una trama MODBUS completa, es decir, como mínimo se deben enumerar 1 byte de dirección de unidad esclava, 1 byte de identificación de función MODBUS, n bytes de datos y 2 bytes de chequeo de

errores CRC. Para las 6 primeras funciones MODBUS, el mensaje emitido por la unidad maestra siempre consta de 8 bytes, por lo que dicha longitud de trama es la que se espera recibir por los puertos SCI respectivos de cada tarjeta modem PLC.

Con el mensaje almacenado en memoria, el programa procede a ejecutar la rutina más importante para el microcontrolador de cada tarjeta modem PLC, el chequeo de errores CRC. En esta rutina, el programa actúa como un ente controlador del derecho de paso hacia el otro puerto serie del microcontrolador. El Código de Redundancia Cíclica (CRC), consiste en dos bytes que son generados a partir de cálculos en lógica digital con los bytes de dirección, función MODBUS y datos de cada mensaje. Tanto el maestro MODBUS como las unidades esclavas calculan internamente los valores de CRC correspondientes a cada mensaje y se encargan de empaquetarlos dentro de las respectivas tramas a ser transmitidas.

Resultó indispensable, que cada tarjeta modem PLC fuera capaz de calcular internamente el CRC de cada mensaje recibido por puerto serie y almacenado en memoria. El método seguido para dicho cálculo fue el sugerido por la empresa MODICON<sup>14</sup> en su guía de referencia sobre protocolo MODBUS.

La figura 5.3 detalla el algoritmo para cálculo de CRC. Básicamente el método se basa en dos variables identificadas como CRCHI y CRCLO, las cuales se inicializan en el valor FF hexadecimal. Mediante operaciones lógicas xor, cada nuevo byte de mensaje modifica el valor de dichas variables recurriendo a datos almacenados en las diferentes posiciones de las dos tablas del anexo B.3. Una vez que el algoritmo, en forma recursiva, haya hecho el cálculo de CRC con todos los bytes respectivos del mensaje en memoria, se compara los valores de CRCHI y CRCLO con los dos últimos bytes del mensaje recibido. Si los bytes comparados concuerdan entre sí, el programa principal del modem PLC interpreta que el mensaje se recibió sin errores.

---

<sup>14</sup> MODICON es una compañía Estadounidense fabricante y distribuidora de Sistemas de Automatización Industrial. Su dirección electrónica es [www.modicon.com](http://www.modicon.com).

Un LED indicador, instalado en el módulo de control del modem y controlado por software, parpadea un primer instante indicando que el mensaje fue recibido con el CRC correcto.

Si por motivos de ruidos en el canal o por problemas de hardware, el mensaje recibido presenta un CRC incorrecto, el microcontrolador no permite el envío del mensaje hacia el otro puerto, por lo que se genera un corte en la comunicación entre los equipos terminales de datos. Al no permitirse la comunicación, el protocolo MODBUS, después de un determinado tiempo, asume que el esclavo no contesta la petición formulada por el maestro y procederá a realizar un reenvío de la orden hasta que formalmente reciba una respuesta de la unidad esclava.

Los algoritmos de las figuras 5.1 y 5.2, detallan que si el CRC del mensaje recibido está correcto, el microcontrolador debe realizar un cálculo interno del tamaño de la trama de respuesta que ha de esperar. Dicho cálculo se efectúa dependiendo de la función MODBUS solicitada por el mensaje recién recibido. Para las cuatro primeras funciones, la longitud de la trama de respuesta depende de la información contenida en los bytes de datos. En las funciones 5 y 6 el mensaje de respuesta es un eco del mensaje de petición de información.

Cumplida la rutina de cálculo de longitud de la trama de respuesta, se efectúa el envío de datos por medio de los puertos serie correspondientes, SCI1 para modem PLC maestro y SCI0 para modem PLC esclavo. Al igual que la rutina de recepción, el envío de información se basa en un simple control de los registros de banderas y datos de cada uno de los puertos serie SCI y puertos de entrada y salida I/O del microcontrolador. En la tabla 5.1 se resaltan los registros usados en el control de los puertos serie y en la tabla 5.2 los registros para control de los puertos de entrada y salida.

Una vez enviado el mensaje de petición de información, cada modem PLC se mantiene a la espera del mensaje de respuesta que formula la unidad esclava respectiva. La longitud de dicha respuesta debe ser igual a la calculada previamente por el microcontrolador.

Nuevamente se repiten, con el mensaje de respuesta, las rutinas de recepción de mensaje, almacenaje en memoria, cálculo de CRC, comprobación de errores y envío de trama de datos. La recepción de la trama de respuesta se realiza por el puerto SCI1 en el modem PLC maestro y por el puerto SCI0 en el esclavo.

**Tabla 5.1** Registros para manejo de puertos serie del microcontrolador 68HC812A4

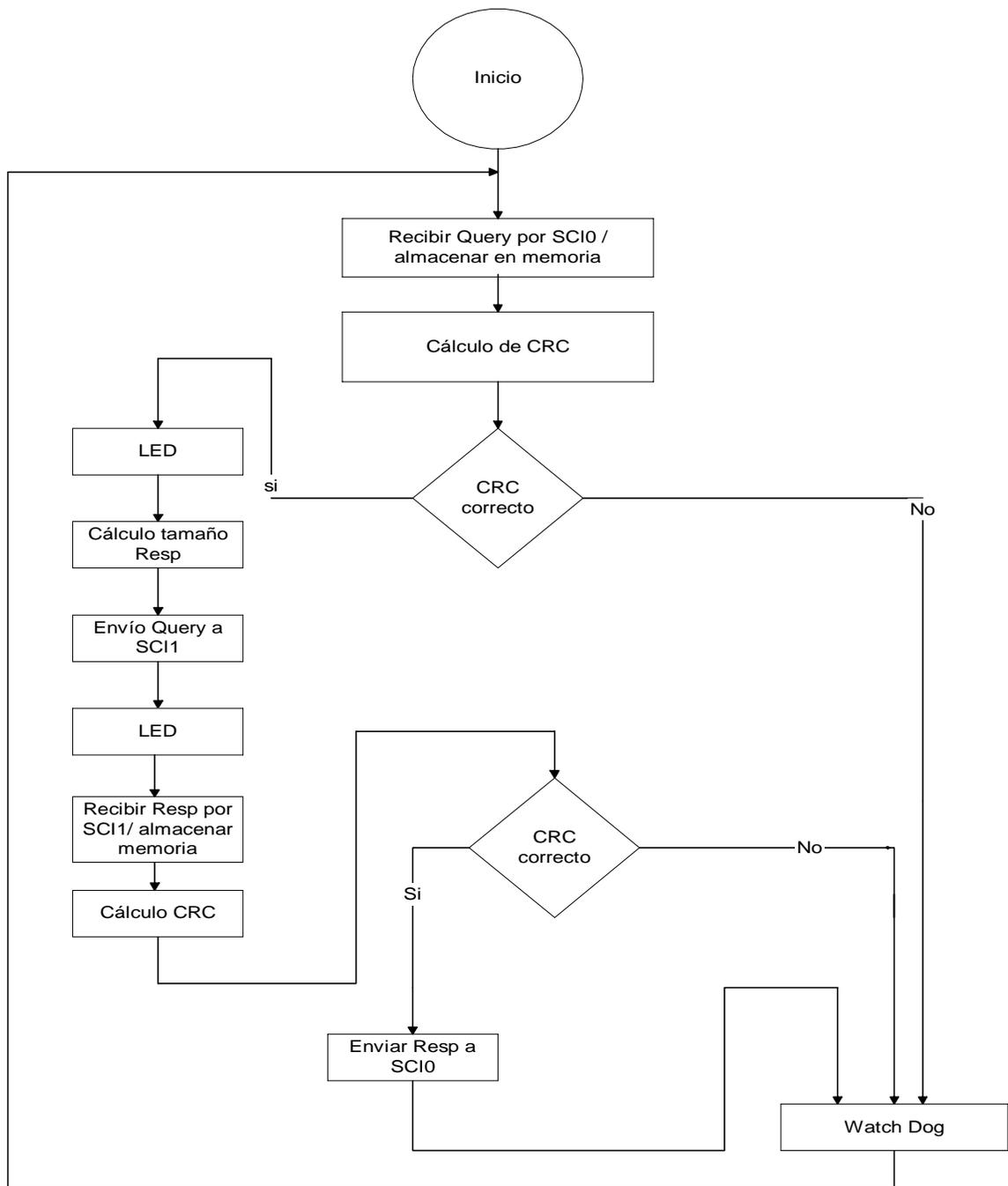
Registro	Descripción
SC0BDH / SC1BDH	Determinan la velocidad del puerto serie respectivo. Para el caso del SC0 la velocidad corresponde a 9600 bps (00HEX en BDH y 34HEX en BDL). El SC1 trabaja a 1200 bps (01HEX en BDH y A0HEX en BDL)
SC0BDL / SC1BDL	
SC0CR1 / SC1CR1	En ambos registros el bit 4 debe estar en 1 lógico. Dicho bit configura cada byte a recibir por puerto serie con 1 start bit, 8 bit de datos y dos bits de parada. (10HEX en ambos registros)
SC0CR2 / SC1CR2	El bit dos (en 1) en ambos registros habilita la recepción por el puerto serie respectivo. El bit 3 (en 1) habilita la transmisión por el puerto. ( 08HEX para transmitir y un 04HEX para recibir).
SC0SR1 / SC1SR1	El bit 7 es la bandera que indica si se puede cargar un nuevo dato para ser transmitido por el puerto serie. Si bit 7 esta en 1 lógico se puede cargar un dato. El bit 5 corresponde a la bandera de dato recibido por el puerto serie correspondiente. Si bit 5 está en 1 hay un nuevo dato recibido que puede ser procesado.
SC0DRL / SC1DRL	Estos registros son de lectura y escritura para el puerto serie respectivo. Si se desea enviar un mensaje, este se carga en este registro para poder ser transmitido. Si por otro lado se recibe un nuevo dato, este es recibido en el DRL.

**Tabla 5.2** Registros para manejo de puertos I/O del microcontrolador 68HC812A4

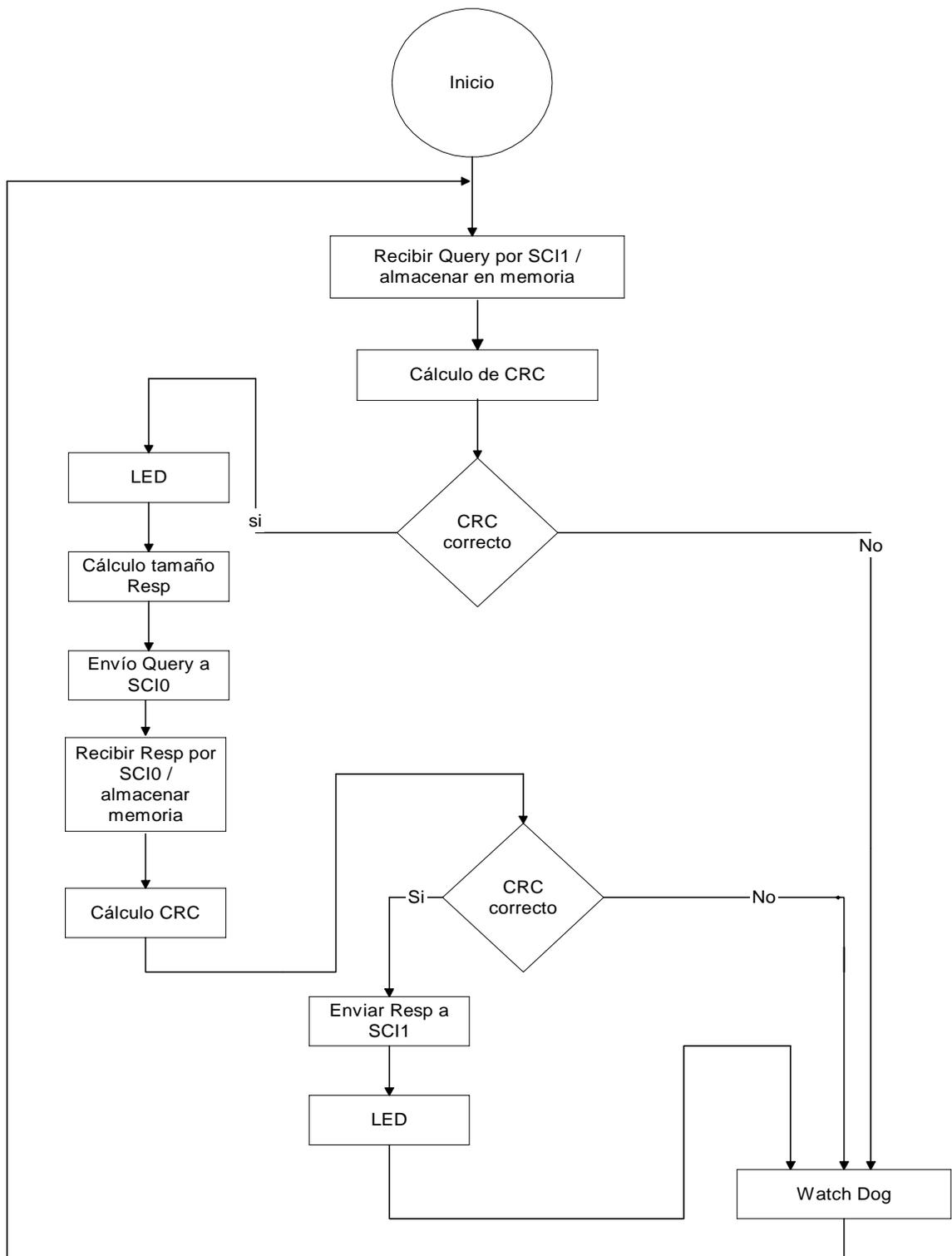
Registro	Descripción
DDRJ	Registro para configurar los bits del puerto J como entradas ( 0 ) o salidas ( 1 ). En el programa el bit 1 se configura como salida para la señal de Watch Dog. El bit 2 es una salida correspondiente a la señal de control para el demodulador. El bit 3 se configura como entrada, ya que recibe la señal de detección de portadora.
DDRT	Registro para configurar los bits del puerto T como entradas ( 0 ) o salidas ( 1 ). En el programa el bit 6 se configura como salida para el LED indicador de CRC correcto y mensaje enviado.
PORTJ	El bit 1 en 1 mantiene la señal de match dog en alto. El bit 2 en 1 coloca el modulador en modo recepción y en 0 lo coloca en modo transmisión. El bit 3 en 1 indica que el canal se encuentra libre para transmitir.
PORTT	El bit 6 en 1 enciende el LED.

En la figura 5.4 se detalla el algoritmo para generar la señal de Watch Dog. Dicha señal es un pulso cuadrado generado por software en el microcontrolador y que le indica al modulador que el microcontrolador se encuentra activo. De no recibir la señal de WD el microcontrolador sería automáticamente reiniciado por el modulador. El programa lo que se encarga es de que en un periodo, no mayor a 1.5 segundos, la patilla PJ3 del microcontrolador, controlada por el bit 3 del puerto J, emita dicho pulso cuadrado.

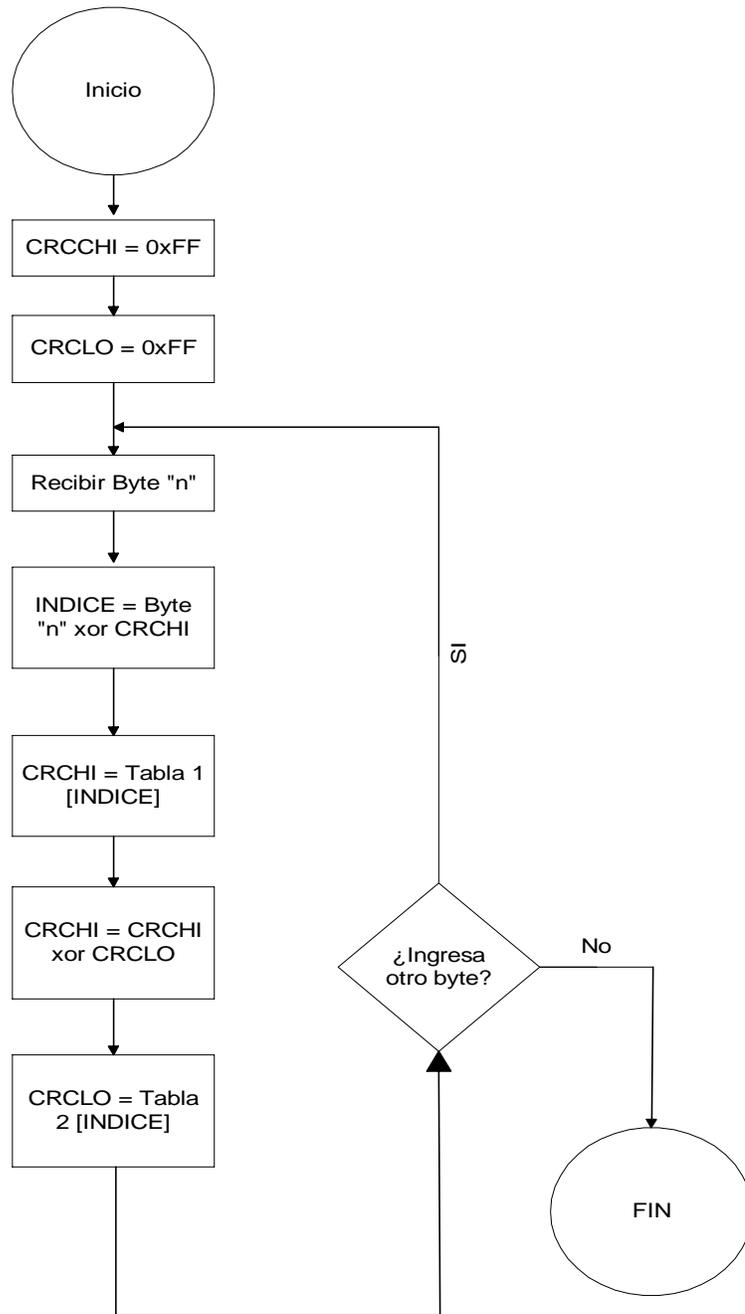
El programa principal de cada modem PLC se mantiene repitiendo infinitamente todas las rutinas descritas anteriormente, por lo que puede recibir, procesar y transmitir datos constantemente.



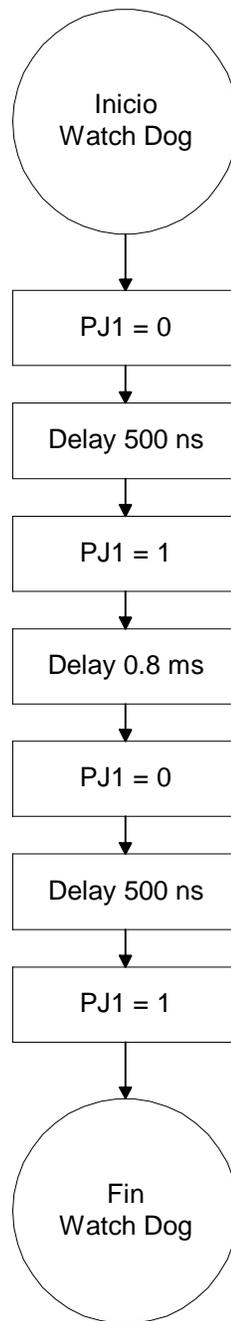
**Figura 5.1** Diagrama de bloques general para el microcontrolador del modem PLC maestro



**Figura 5.2** Diagrama de bloques general para el microcontrolador del modem PLC esclavo



**Figura 5.3** Diagrama de bloques para cálculo de CRC



**Figura 5.4** Diagrama de bloques para la subrutina de Watch Dog

# CAPÍTULO 6

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

---

### 6.1 Explicación del diseño

Para evaluar la confiabilidad de la transmisión de datos a través de las líneas de potencia es indispensable reconocer los elementos que conforman un enlace de comunicación de datos. Se conoce como Equipo Terminal de Datos (DTE) a los sistemas emisores y receptores de la transmisión. Los Equipos de Comunicación de Datos son los dispositivos encargados de lograr la comunicación de datos, por medio de algún tipo de canal, entre los DTE.

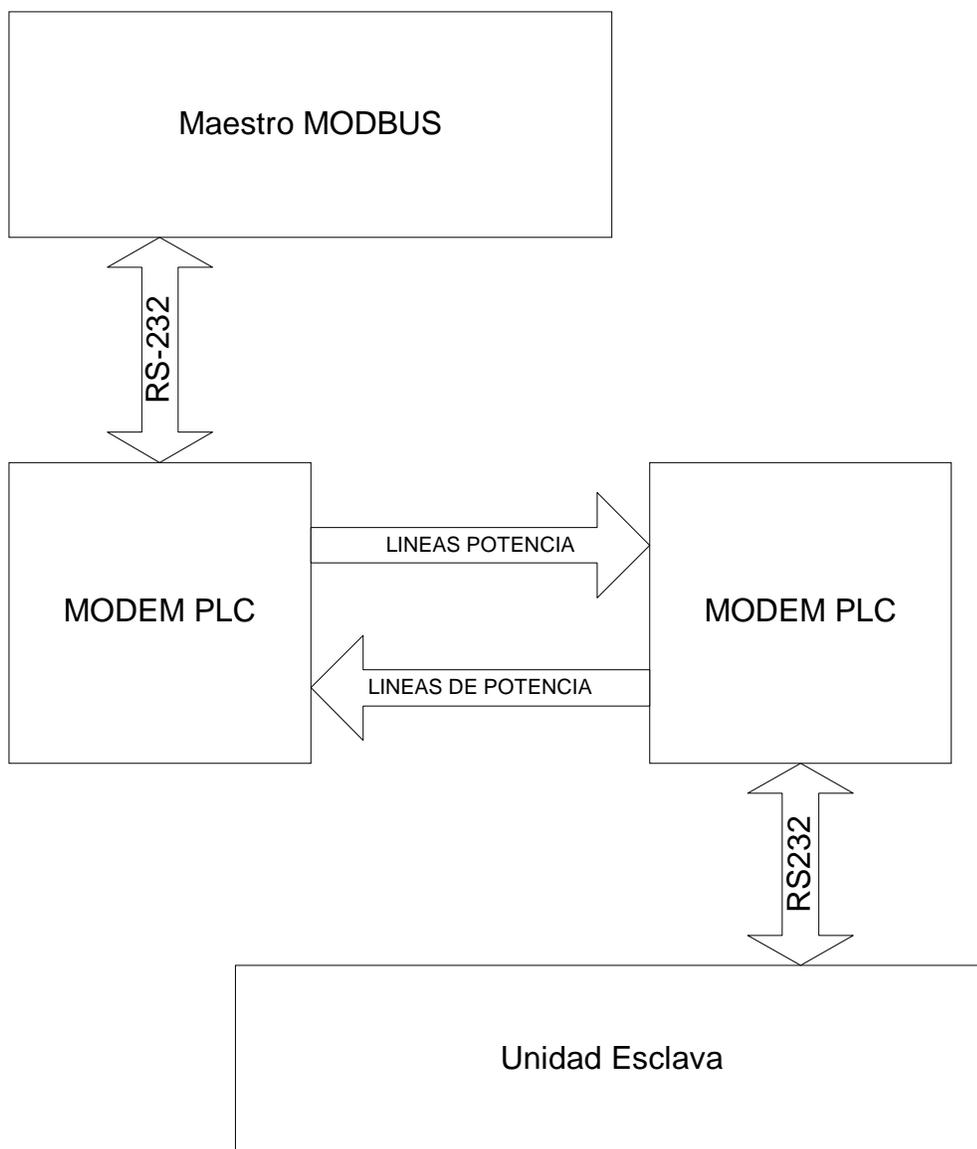
Para el enlace mostrado en la figura 6.1, el cual corresponde al implementado en el proyecto, los DTE están representados por una unidad principal emisora y receptora de datos denominada MAESTRO y una unidad también emisora y receptora llamada esclavo. Los equipos de comunicación de datos o DCE son representados por los modem PLC, cuya principal característica, según la información presente en la sección 4.1, es la de permitir la transmisión de mensajes por medio de las líneas de potencia.

Para lograr una transferencia ordenada de información en un enlace de comunicación se implementa un protocolo de comunicación.

El protocolo constituye el conjunto de reglas y convenciones entre entes comunicantes. El objetivo de un protocolo es establecer una conexión entre equipos terminales de datos, identificando el emisor y el receptor, asegurando que todos los mensajes se transfieran correctamente y controlando toda la transferencia de información. Para el enlace de la figura 6.1 el protocolo a implementar es el denominado MODBUS, cuyas principales características se detallan en el apéndice A.3.

Por el tipo de objetivos que se deseaban alcanzar con el proyecto, no resultaba de interés una modificación al hardware de las tarjetas modem PLC. Por esta razón

todo el desarrollo del proyecto se basó principalmente en la programación del microcontrolador interno que le permite a la tarjeta modem PLC estar en capacidad de recibir, procesar y enviar mensajes estructurados en protocolo MODBUS.



**Figura 6.1** Diagrama de bloques general del sistema de comunicación de datos

En la figura 6.2 se muestra el diagrama de bloques interno de una tarjeta modem PLC. Los dos elementos más importantes a destacar en la figura son el microcontrolador y el modulador/demodulador. La importancia del microcontrolador radica en la labor de manejo de los datos entrantes y salientes por la tarjeta. El software diseñado para el proyecto, precisamente fue orientado a los algoritmos para la programación de las actividades a realizar por este dispositivo electrónico. El modulador es el encargado de acoplar la tarjeta a las líneas de potencia, por lo que dirigir su labor es también tarea del microcontrolador.

Las tarjetas modem PLC deben ofrecer una vía transparente a todos los datos que han de ser enviados entre los equipos maestro y esclavo. Aunque la estructura de un mensaje MODBUS UTR, en la gran mayoría de los casos, contiene muy pocos bytes de trama, es indispensable que no se altere la extensión y el contenido de los mensajes. La presencia del código de redundancia cíclica (CRC) como un método de chequeo de errores, ofrece la ventaja de poder corroborar la veracidad de los datos enviados por medio de los equipos de comunicación (modem PLC) y el canal de transmisión (línea de potencia).

El microcontrolador de cada modem PLC está programado para entrar en un ciclo infinito de chequeo de los puertos serie SCI habilitados para la recepción de datos. Un mensaje puede ingresar al modem por cualquiera de los dos puertos serie. El puerto SCI0 es exclusivo para la comunicación entre modem y el equipo terminal de datos (master o slave) y el SCI1 permite la comunicación entre modem y modem por medio de las líneas de potencia. Por razones de hardware la velocidad de transmisión entre los puertos serie es diferente, lo que obliga a guardar en memoria cada uno de los bytes que sean recibidos por el modem PLC.

La rutina más importante que debe cumplir el microcontrolador es el cálculo y posterior chequeo del código de error CRC. Si el mensaje que se recibe en el modem no concuerda con los dos bytes de CRC calculados internamente con los datos almacenados en memoria, significa que el mensaje sufrió una alteración a la hora de ser recibido por dicho equipo de comunicación. Al ser el CRC incorrecto la tarjeta

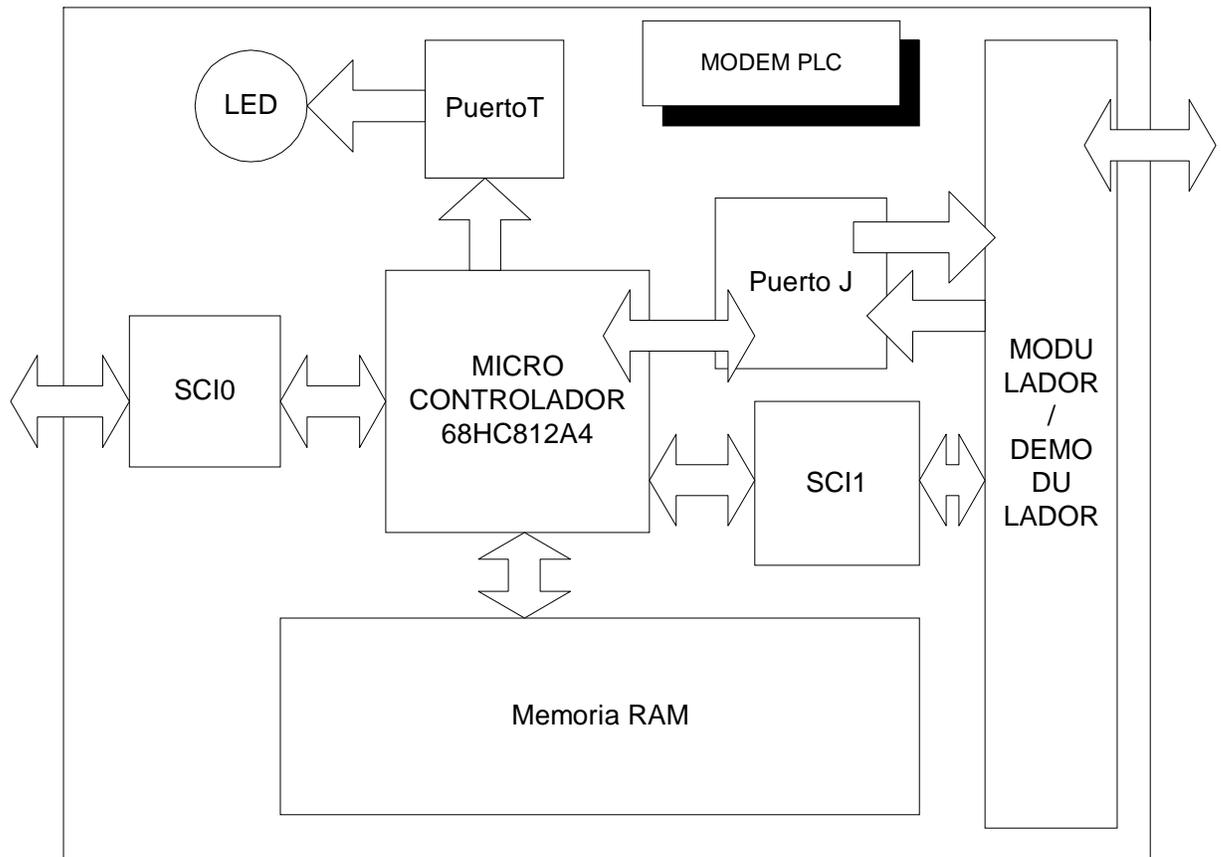
modem trunca la transmisión de datos, obligando al maestro MODBUS a realizar un reenvío de la orden solicitada a la unidad esclava respectiva.

Si por el contrario, el CRC calculado coincide con los dos últimos bytes del mensaje recibido por puerto serie, se concluye que el mensaje no sufrió alteración alguna y por lo tanto puede ser enviado hacia el otro puerto serie. Nótese que es en esta rutina de chequeo de error en donde se efectúa la verdadera evaluación de los datos transmitidos por las líneas de potencia. Un esclavo recibirá la orden del maestro MODBUS, solo si la trama de mensaje ha logrado cruzar las tarjetas modem PLC sin perder un solo bit a consecuencia de ruidos en la línea o desperfectos en el hardware de los modem.

Las etapas de transmisión de datos, especialmente por medio del SCI1 deben ser controladas a través de los registros de puerto serie respectivos y los registros del puerto J de I/O que controlan señales de manejo del modulador del modem.

La visualización del proceso de transmisión en cada tarjeta se realiza mediante el encendido repentino del LED indicador presente el módulo de control del modem. Dicho LED es controlado por software a través del microcontrolador.

Es importante recalcar que existe una rutina de señal de watch dog, la cual se encarga, vía software, de generar un pulso cuadrado hacia el modulador. Este pulso es necesario para indicarle a dicho dispositivo que el microcontrolador se encuentra cumpliendo un programa, ya que de no ser así el demodulador puede reiniciar el programa residente en el modem.



**Figura 6.2** Diagrama de bloques interno del modem PLC

## **6.2 Análisis de las pruebas de transmisión de tramas MODBUS**

Para evaluar la transmisión de datos en protocolo MODBUS a través de las líneas de potencia se procedió a realizar una serie de envíos de mensajes desde el Maestro hacia la unidad esclava, siguiendo las diferentes conexiones entre las tarjetas modem PLC, que se detallan en el apéndice A.4.

La figura A.4.1 muestra la primera conexión de prueba. Ambas tarjetas modem se encuentran conectadas al mismo tomacorriente de la red eléctrica local. Los resultados obtenidos en la prueba se detallan en la tabla A.4.1. La información recopilada muestra que realmente se da una comunicación de datos entre un equipo maestro y una unidad esclava, utilizando como canal de transmisión las líneas de potencia. El lapso de tiempo existente entre el momento de petición de información y el momento de recepción de respuesta, incluye, los tiempos de procesamiento de datos en cada modem, los cálculos de chequeo de errores y el traslado de información por la línea de potencia.

En los casos en donde el maestro MODBUS no detecto una respuesta formal del esclavo, se debió principalmente a que el tiempo de espera de respuesta, programado en la unidad Maestra, fue menor al tiempo mínimo de duración de una transmisión.

Para todos los casos evaluados se obtuvieron resultados muy similares y altamente provechosos, ya que, se logro observar como la línea de potencia no incluyó ruidos que modificaran el mensaje enviado por la unidad maestra. La confiabilidad en la transmisión de los datos por medio de las tarjetas modem PLC resultó ser muy alta, ya que el chequeo constante de errores vía CRC fue exitoso.

Con la función 6 MODBUS, se observó que realmente en todos los casos se logra con éxito la comunicación entre el maestro y el esclavo, pero no se logra una comunicación eficiente en la respuesta del esclavo hacia el maestro. Una explicación a dicho comportamiento fue la existencia de un error en el programa simulador de la unidad terminal esclava.

En la figura A.4.2, se muestra la segunda conexión de prueba entre tarjetas modem PLC. Para este caso, cada tarjeta modem PLC fue conectada a tomacorrientes distintos, pero siempre dentro de una misma red eléctrica local. Esta conexión resulta ser mucho más compleja que la anterior, ya que conlleva un recorrido de mayor distancia de los datos a través de las líneas de potencia. La tabla A.4.2 detalla las observaciones más destacadas en la realización de la prueba. Nuevamente se consigue una comunicación exitosa entre el maestro y la unidad esclava, aunque para este caso, el tiempo de la transmisión resulto ser ligeramente mayor en comparación con la primera conexión. La evaluación de los datos recopilados en el momento, permite confiar en la efectividad del protocolo MODBUS y en la transmisión de datos por medio de las líneas de distribución eléctrica.

Una última conexión, detallada en la figura A.4.3, permite observar el comportamiento de los datos, siendo sometida la línea de transmisión a fuentes directas de perturbación. Los generadores de ruido usados consistieron en equipos eléctricos de carácter capacitivos e inductivos, de uso común dentro de redes locales de distribución eléctrica. Como se muestra en la tabla A.4.3, el conectar una radio grabadora, una lámpara de luz floreciente o un ventilador a la misma línea de potencia que transmite los datos no altera la eficaz transmisión del mensaje MODBUS. El tiempo detectado como mínimo para una transmisión y recepción de datos, no se ve alterado por la incorporación de dichos equipos a la red eléctrica. Esta conexión comprueba la efectividad del manejo transparente de una trama de bytes de control que se efectúa en el interior de cada tarjeta modem PLC analizada.

### 6.3 Análisis de costos del proyecto

**Tabla 6.1** Materiales

<b>Recurso</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Componentes electrónicos y eléctricos varios	4	4
Equipo de oficina	1	50

**Tabla 6.2** Equipo

<b>Recurso</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Tarjeta MODEM adaptable a red de distribución eléctrica.	2	1 600
Computadora	2	1 500
Software para programación de microprocesador	1	600
Software para estructurar mensajes de envío y recepción de datos MODBUS	1	250

**Tabla 6.3** Servicios Personales

<b>Recurso</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Practicante de Ingeniería	1	1 000

**Tabla 6.4** Servicios no personales

<b>Recurso</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Internet	1	100
Servicio de impresión de textos	1	50

**Tabla 6.5** Infraestructura

<b>Recurso</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Laboratorio equipado	1	2 000

**Costo estimado total del proyecto: \$ 7 154.00**

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

Finalizado el proyecto se ha logrado determinar la confiabilidad, en la transmisión de datos, que generan los modem PLC, con adaptación de protocolo MODBUS.

Se ha demostrado que los códigos de detección de errores garantizan una excelente transmisión de datos de control por medio de las líneas de potencia.

Es factible conectar elementos generadores de ruido eléctrico, tales como motores pequeños y lámparas de luz floreciente, en la misma red eléctrica por donde se transmiten los datos de control entre las tarjetas modem PLC.

El ICE, a partir de este momento, cuenta con un software de prueba que le permitirá evaluar completamente las seis primeras funciones del protocolo MODBUS para futuras transmisiones de datos de control vía modem PLC.

Las limitaciones del proyecto se debieron principalmente al hardware de las tarjetas modem PLC. Por ejemplo, la transmisión de datos por la línea de potencia es

a una velocidad de 1200 bps. Al sólo existir un único canal de transmisión, la comunicación se efectúa únicamente en half-duplex entre las dos tarjetas modem.

El tiempo mínimo requerido para una comunicación entre maestro MODBUS y una unidad esclava es de 330 ms. Dicho tiempo empieza con el envío de la señal de petición de información y concluye con la recepción del mensaje de respuesta en el maestro MODBUS.

A nivel de software, el programa es exclusivo para las primeras seis de las 24 funciones MODBUS existentes. Además el algoritmo diseñado solamente interpreta MODBUS UTR, dejando excluido al tipo MODBUS ASCII.

El único código de chequeo de errores permitido es el de redundancia cíclica CRC a 16 bits. El protocolo y por ende el algoritmo diseñado no cuenta con un código corrector de errores, sólo de chequeo.

Para lograr una comunicación efectiva de datos se debe de estructurar los mensajes únicamente en una unidad Maestro MODBUS. Ningún esclavo puede comunicarse con el maestro, sin que este le haya solicitado alguna orden previamente.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 7.1 Conclusiones

1. La adaptación del protocolo MODBUS a las tarjetas modem PLC garantiza una eficaz transmisión de los datos por medio de las líneas de transmisión de potencia de una red local.
2. Es posible comunicar dos tarjetas modem PLC, adaptadas a protocolo MODBUS, conectadas a tomacorrientes distintos que se encuentren en una misma red eléctrica HAN.
3. Aparatos y máquinas eléctricas comunes tales radios, luces florecientes y motores pequeños, conectados a la misma red eléctrica que transmite datos de control, no perjudican la comunicación entre tarjetas modem PLC adaptadas a protocolo MODBUS.
4. El éxito de la efectividad de protocolo MODBUS en la comunicación por líneas de potencia se basa en el preciso método de chequeo de errores con que cuenta el protocolo.
5. El tiempo mínimo requerido para una comunicación completa, por medio de las tarjetas modem PLC, entre un equipo maestro MODBUS y una unidad esclava es de 330 ms.
6. Para las tarjetas modem PLC es indiferente el procesamiento de datos correspondientes a funciones MODBUS de escritura o de lectura.

## **7.2 Recomendaciones**

1. Rediseñar el hardware de la tarjeta modem PLC, de manera que permita transmitir datos por las líneas de potencia a una velocidad mayor a los 1200 bps actuales.
2. A la hora de programar cualquier otro tipo de protocolo a las tarjetas modem PLC, se debe cerciorar la existencia de un confiable código de chequeo de errores. Si el código permitiese la corrección de los mismos produciría mejores resultados.
3. Para usos de tipo industrial de las tarjetas modem PLC, se recomienda un estudio evaluativo semejante al realizado en este proyecto, pero las pruebas deben de tomar en cuenta equipos altamente generadores de ruidos para las líneas de potencia.
4. Las tarjetas modem PLC deben ser colocadas en lugares libres de movimientos bruscos y polvo. El ambiente debe cumplir con las especificaciones normales para ubicación de equipos electrónicos.

## BIBLIOGRAFÍA

---

A continuación se presenta la bibliografía y páginas de Internet consultadas para la elaboración del proyecto.

- 1 Lizana Moreno, F. *Implementación de un traductor de protocolo MODBUS para una unidad terminal remota de un sistema SCADA*. Proyecto de graduación para optar por el título de Bachiller en Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Electrónica: 2001.
- 2 Motorola inc. *68HC812A4 Advance Information*. Microcontroladores. Estados Unidos: 1999.
- 3 Vargas Sáenz, R. *Diseño de un modem para transmitir y recibir información a través de las líneas de potencia en una red HAN*. Proyecto de graduación para optar por el título de Bachiller en Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Electrónica: 2002.
- 4 [www.modicom.com](http://www.modicom.com)  
En esta dirección se encuentra información sobre protocolo MODBUS.
- 5 [www.pchardware.org/puertos/serie.php](http://www.pchardware.org/puertos/serie.php)  
En esta dirección se encuentra información sobre comunicación serial.
- 6 [www.ece.utexas.edu](http://www.ece.utexas.edu)  
En esta dirección se encuentra información sobre tutores para ICC12 y lenguaje C de programación.

# APÉNDICES

---

## Apéndice A.1 Información sobre el proyecto

Nombre del proyecto: Evaluación de la transmisión de datos entre tarjetas modem PLC utilizando protocolo MODBUS

Datos de la empresa impulsora del proyecto:

Nombre: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

Departamento: Investigación y Desarrollo

Datos de estudiante:

Nombre: Oscar Jesús Delgado Jiménez.

Cédula: 1-0990-0373

Carné ITCR: 9710964

Teléfono casa: 249-1229

Teléfono oficina: 297-4020

E-mail: [oscarjesus@costarricense.cr](mailto:oscarjesus@costarricense.cr)

Datos de asesor en la empresa:

Nombre: Ing. Luis Moya Vargas

Teléfono oficina: 220-8279

E-mail: [LMoyaV@ice.go.cr](mailto:LMoyaV@ice.go.cr)

Datos de profesor asesor Escuela de Ingeniería en Electrónica ITCR:

Nombre: Ing. Carlos Badilla Corrales.

Teléfono oficina: 550-2694

E-mail: [cbadilla@itcr.ac.cr](mailto:cbadilla@itcr.ac.cr)

## **Apéndice A.2 Comunicación Serial**

El puerto serie es un adaptador asíncrono utilizado para poder intercomunicar varios ordenadores entre sí. Un puerto serie recibe y envía información fuera del ordenador mediante un determinado software de comunicación o un driver de dicho puerto. El software envía la información carácter a carácter, convirtiéndolo en una señal que puede ser enviada por un cable serie o un módem.

Cuando se ha recibido un carácter, el puerto serie envía una señal por medio de una interrupción indicando que el carácter está listo. Cuando el ordenador ve la señal, los servicios del puerto serie leen el carácter.

La comunicación serial es un modo de transmisión de datos en el cual los bits de un carácter de datos se transmiten en forma secuencial sobre un solo canal. En aplicaciones especiales, la comunicación serial es la interfase más común usada para la adquisición de datos y aplicación de control de procesos.

Las comunicaciones serie se utilizan para enviar datos a través de largas distancias (1200 m), ya que las comunicaciones en paralelo exigen demasiado cableado para ser operativas y por sus características las líneas no pueden superar los 20 m. Hay que aclarar que la transmisión por puerto serie es más lenta comparada con la comunicación paralela.

Los equipos de comunicaciones serie se pueden dividir entre simplex, half-duplex y full-duplex. Una comunicación simplex envía información en una sola dirección (por ejemplo, una emisora de radio comercial). Half-duplex significa que los datos pueden ser enviados en ambas direcciones entre dos sistemas, pero en una sola dirección al mismo tiempo. En una transmisión full-duplex cada sistema puede enviar y recibir datos al mismo tiempo.

Hay dos tipos de comunicaciones: síncronas o asíncronas. En una transmisión síncrona los datos son enviados en bloques, el transmisor y el receptor son sincronizados por un o más caracteres especiales llamados caracteres sync.

En una transmisión asíncrona, un bit identifica su bit de comienzo y 1 o 2 bits identifican su final, no es necesario ningún carácter de sincronismo. Los bits de datos son enviados al receptor después del bit de start. El bit de menos peso es transmitido primero. Un carácter de datos suele consistir en 7 o 8 bits. Dependiendo de la configuración de la transmisión, un bit de paridad es enviado después de cada bit de datos y se utiliza para corregir errores en los caracteres de datos. Finalmente 1 o 2 bits de stop son enviados.

Comúnmente, el puerto serie es usado para transmitir datos en código ASCII. La comunicación se completa usando esencialmente 3 líneas de transmisión: GND, Tx y Rx.

Las características más importantes de la comunicación serie son:

- Baud rate: indica el número de bits transferidos por segundo (velocidad).
- Bits de datos: indica el número actual de bits de datos en la transmisión. Comúnmente los paquetes de información tienen 5, 7 u 8.
- Bit de parada: Bit usado como señal de fin de comunicación de un paquete de datos. Los valores típicos para stop bit son 1, 1.5 o 2 bits.
- Paridad: Es un sistema de verificación y corrección de errores en la transferencia de datos digitales. Consta de uno o más bits adicionales agregados a un paquete de datos, que se usa para detectar errores de transmisión. Toma su valor de acuerdo con la cantidad de números 1 que se encuentran dentro del byte en cuestión. Si se usa paridad par, el bit de paridad toma valor 0 cuando la cantidad de "unos" dentro del paquete de datos es par, y toma valor 1 cuando sucede lo contrario. La paridad impar actúa de manera inversa. El sistema emisor genera el bit de paridad y el receptor chequea que sea válido. Si se produjo algún error en la transmisión y el bit de paridad no coincide, puede pedirse la retransmisión de los datos. Por ejemplo: para el byte 10111011, usando paridad par, el bit de paridad toma valor 0 (hay 6 "unos").

La comunicación serial se ejecuta sobre una capa física definida por un conjunto de especificaciones conocidas como RS-232. Estas especificaciones estándar fueron diseñadas en la década de 1960 para comunicar un equipo terminal de datos o DTE (Data Terminal Equipment, el PC en este caso) y un equipo de comunicación de datos o DCE (Data Communication Equipment, habitualmente un modem).

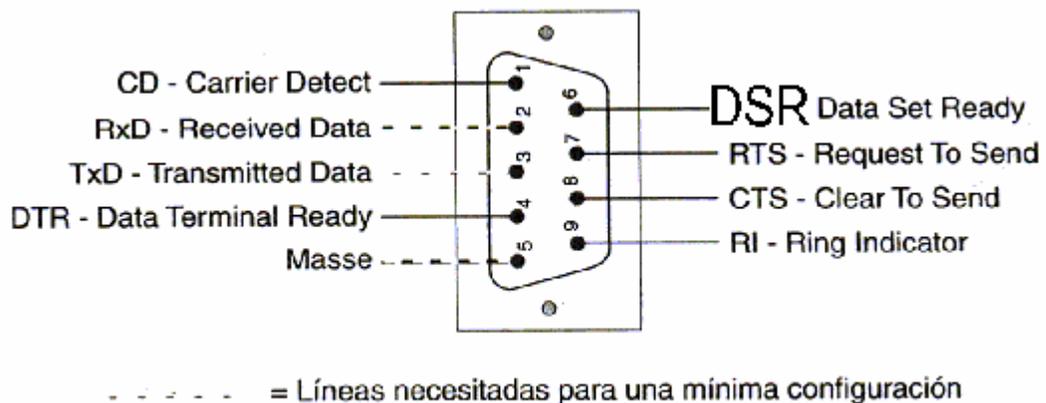
El estándar RS-232 especifica 25 pines de señal, y que el conector de DTE debe ser macho y el conector de DCE hembra. Los conectores más usados son el DB-25 macho, pero muchos de los 25 pines no son necesarios. Por esta razón en muchos PC modernos se utilizan el DB-9 macho mostrado en la figura A.2.1. Los voltajes para un nivel lógico alto están entre -3V y -15V. Un nivel lógico bajo tendrá un voltaje entre +3V y +15V. Los voltajes más usados son +12V y -12V.

El estándar RS-232 (ANSI/EIA-232 Standard) es utilizado para conectar dispositivos tales como mouse, impresora, modem e instrumentación industrial. Estos sistemas utilizan normalmente terminales de poca velocidad y el volumen de datos sobre las líneas seriales es bajo, el rendimiento de procesamiento por línea (velocidad con que los datos pasan a través del canal de comunicaciones) no es muy importante. Además, el RS-232 está limitado a conexiones punto a punto entre el puerto serie de un computador y el dispositivo a comunicar el cual puede estar ubicado inclusive a distancias mayores a 20 metros.

Las señales RS-232 (DB-9) usadas en comunicaciones asíncronas son:

- TxD -pin 3 (El MODEM recibe datos desde el PC),
- RxD -pin 2 (El MODEM transmite datos al PC),
- GND -pin 5 (señal de tierra),
- CD -pin 1 (Carrier-Detect: el MODEM pone esta señal a 1 cuando ha detectado al PC)

- RTS -pin 7 (Request to send: El PC pone ésta señal a 1 cuando tiene un carácter listo para ser enviado).
- CTS -pin 8 (Clear to send: El MODEM está preparado para transmitir datos. La PC empezara a enviar datos al MODEM).
- DTR -pin 4 (Data Terminal Ready: el PC indica al modem que está encendido y listo para enviar datos)
- DSR -pin 6 (Data Set Ready: El MODEM indica al PC que está encendido y listo para transmitir o recibir datos).
- RI -pin 9 (el indicador del ring, indica que alguien esta intentando un dial-in).



**Figura A.2.1** Distribución de pines del conector DB9

En la mayoría de las aplicaciones, las tarjetas modem requieren solamente las señales TxD, RxD, GND, RTS (usado como señal de control de flujo contrario), CTS, DTR y de DCD. Las aplicaciones muy específicas pueden requerir RI y DSR.

### **Apéndice A.3 Protocolo MODBUS**

El protocolo MODBUS define la estructura de los mensajes que serán enviados y recibidos por los equipos terminales de datos (DTE). Este protocolo como mínimo debe ser capaz de:

- Describir el procedimiento que un controlador debe seguir para solicitar acceso a otros dispositivos
- Indicar como se debe responder a los mensajes de los otros dispositivos
- Indicar como deben ser detectados y reportados los errores.

El protocolo MODBUS utiliza una técnica de Maestro-Esclavo cuando el controlador (DTE maestro) requiere comunicarse con los otros dispositivos (DTE esclavos). Los dispositivos esclavos responden enviando la información requerida o realizando las acciones indicadas en el mensaje. El controlador maestro puede enviar mensajes a los dispositivos esclavos individualmente o puede enviar mensajes generales. Los esclavos responderán únicamente a los mensajes enviados individualmente.

El protocolo MODBUS establece el formato para los mensajes del dispositivo maestro indicando la dirección del dispositivo esclavo, un código definiendo la acción requerida, la información que debe ser enviada y una señal de detección de errores.

El esclavo responderá utilizando también este protocolo. Si ocurriera un error en el recibimiento del mensaje, o si el dispositivo esclavo no puede realizar la acción requerida, entonces éste construirá un mensaje de error y lo enviará al dispositivo maestro.

Al enviar un mensaje, el código indica al dispositivo direccionado cual es la acción que debe realizar. Los bytes de información contienen los datos adicionales que pueda requerir el esclavo para realizar la función. Por ejemplo, la función con código 03 solicitará al esclavo que lea los registros de memoria y que responda con su contenido. Los bytes de información deben indicar al esclavo en cuál registro

comenzar con la lectura y cuántos registros debe leer. El espacio asignado para detección de errores provee un método, al esclavo, para valorar la integridad del contenido del mensaje.

Al responder un mensaje, el esclavo enviará los datos requeridos por el maestro. Si ocurriera un error, el código de función es modificado para indicar que la respuesta es de error, y los bytes de información contendrán un código que describirá el fallo.

Existen dos modos de transmisión serial de los datos, en el protocolo MODBUS. Estos son el modo ASCII y el modo UTR (unidad terminal remota). En el presente proyecto, el modo de transmisión que se utilizó fue el UTR. Algunas características de dicho modo se detallan a continuación:

- Se codifica en hexadecimal.
- Dos caracteres hexadecimales cada 8 bits del mensaje.
- 1 Start bit
- 8 data bits, LSB se envía primero
- 1 bit para paridad par/impar. (No se envía si no se utiliza paridad)
- 1 stop bit (2 stop bits si no se utiliza el bit de paridad)
- Método CRC (Cyclical Redundancy Check) para chequeo de errores.

### **Estructura de los mensajes**

A la hora de enviar un mensaje, el protocolo MODBUS especifica un punto de inicio o señal de inicio y un punto final. Esto permite a los dispositivos esclavos saber cuando inicia y cuando termina un mensaje, para así leer correctamente los datos enviados.

En el modo UTR, el inicio de un mensaje está indicado por una señal nula equivalente a 3,5 caracteres (los caracteres son hexadecimales, es decir, son de 4

bits cada uno). Luego, se transmite la dirección del dispositivo con el que se requiere comunicación. Una vez terminado el mensaje, el protocolo indicará el final del mismo enviando un intervalo de 3,5 caracteres. Luego de esto, un nuevo mensaje puede ser enviado. La tabla A.3.1 ilustra la estructura de un mensaje MODBUS, enviado mediante la utilización del modo UTR.

**Tabla A.3.1** Estructura de un mensaje MODBUS, utilizando el modo UTR

Inicio	Dirección	Función	Datos	CRC (chequeo de error)	Finalización
T1-T2-T3-T4	8 bits	8 bits	N * 8 bits	16 bits	T1-T2-T3-T4

### **Direccionamiento de los dispositivos esclavos**

Para direccionar los diferentes dispositivos esclavos, en los mensajes enviados por el maestro MODBUS se reservan dos caracteres (8 bits). La dirección cero está reservada para el envío de mensajes generales. Los demás estarán ubicados en las direcciones que van desde el 1 hasta el 247 decimal. El dispositivo maestro accesa algún otro poniendo la ubicación en el espacio de dirección del mensaje. El esclavo responde colocando su dirección en el espacio reservado para esto en el mensaje, para indicar así al maestro cuál dispositivo está respondiendo.

### **Instrucciones MODBUS**

El tercer espacio de un mensaje MODBUS está reservado para la función o instrucción que se solicita al esclavo que realice. En total este protocolo implementa 24 distintas funciones, las cuales se presentan en la tabla A.3.2.

**Tabla A.3.2** Funciones del protocolo MODBUS

<b>Número</b>	<b>Función</b>	<b>Número</b>	<b>Función</b>
1	Lectura de estado de señales digitales	13	Programación del controlador
2	Lectura de estado de señales digitales 2	14	Poll controller
3	Lectura de estado de señales analógicas	15	Escritura de varias señales digitales
4	Lectura de estado de señales analógicas 2	16	Escritura de varias señales analógicas
5	Escritura de una señal digital	17	Reporte de identificación del esclavo
6	Escritura de una señal analógica	18	Programación 884/M84
7	Lee estado de las señales de excepción	19	Reinicio de enlace de comunicación
8	Diagnóstico	20	Lectura de referencia general
9	Programa controlar 484	21	Escritura de referencia general
10	Poll 484	22	Escritura enmascarable de registros referenciados a 4X
11	Obtención del contador de eventos de comunicación	23	Lectura/Escritura de registros referenciados a 4X
12	Obtención de registro de eventos de comunicación	24	Lectura de cola FIFO

## Mensajes de error

Cuando se presenta un error en la ejecución de una instrucción, el dispositivo esclavo debe construir una respuesta de error y enviarla al maestro.

El mensaje de error está conformado, como puede observarse en la tabla A.3.3, por la dirección del dispositivo esclavo, seguida por la señal de identificación de error. Luego se coloca un espacio de descripción del tipo de error que se sucedió. Finalmente, se colocan los caracteres de chequeo de error.

La señal de identificación de error es la señal de la instrucción requerida, con el bit más significativo colocado en uno. Esto equivale a realizar la operación lógica “Y” entre la señal de instrucción y el número 128 en decimal.

La tabla A.3.4 proporciona los distintos valores que deben colocarse en la señal de descripción de error, dependiendo del evento ocurrido.

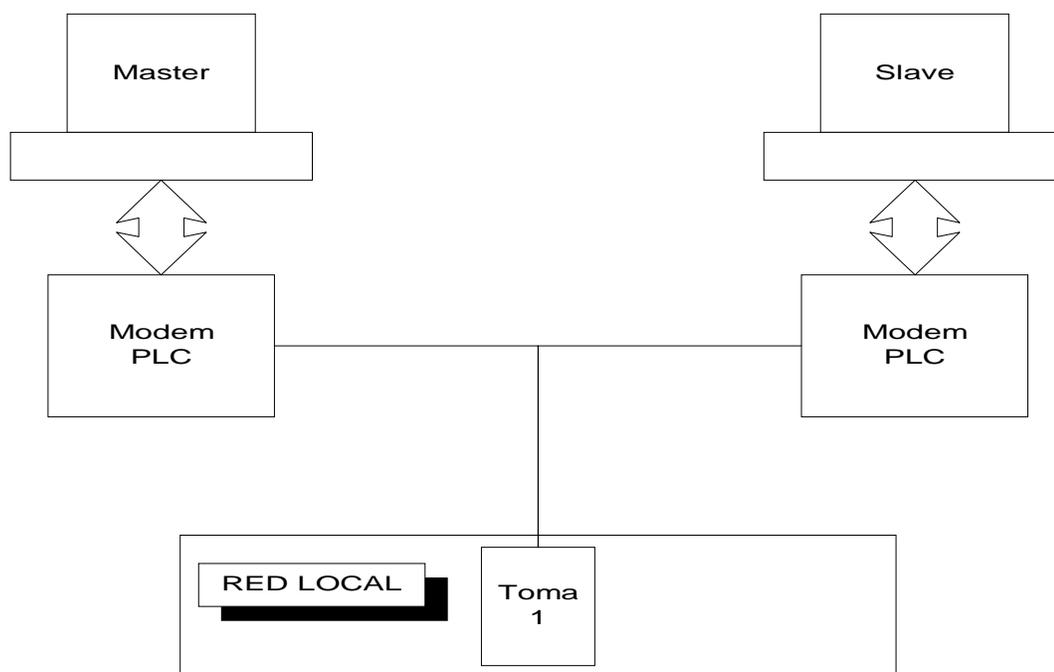
**Tabla A.3.3** Estructura de los mensajes de error en protocolo MODBUS

<b>Dato 1</b>	<b>Dato 2</b>	<b>Dato 3</b>	<b>Dato 4</b>
Dirección del dispositivo esclavo	Identificación del error	Descripción del tipo de error ocurrido	Chequeo de error CRC

**Tabla A.3.4** Valores posibles para la señal de descripción de error

<b>Valor de señal de descripción de error</b>	<b>Nombre</b>	<b>Significado</b>
1	Función inválida	La función requerida no está disponible en el dispositivo esclavo
2	Dirección inválida	La dirección enviada no está disponible
3	Dato inválido	El dato recibido no es válido en el esclavo
4	Error de esclavo	Ocurrió un error irrecuperable en el esclavo
5	Reconocimiento	Se está procesando la función, pero el esclavo tardará mucho. Este mensaje se envía para prevenir un error de tiempo del maestro
6	Esclavo ocupado	El esclavo está ocupado. El maestro deberá retransmitir los datos posteriormente

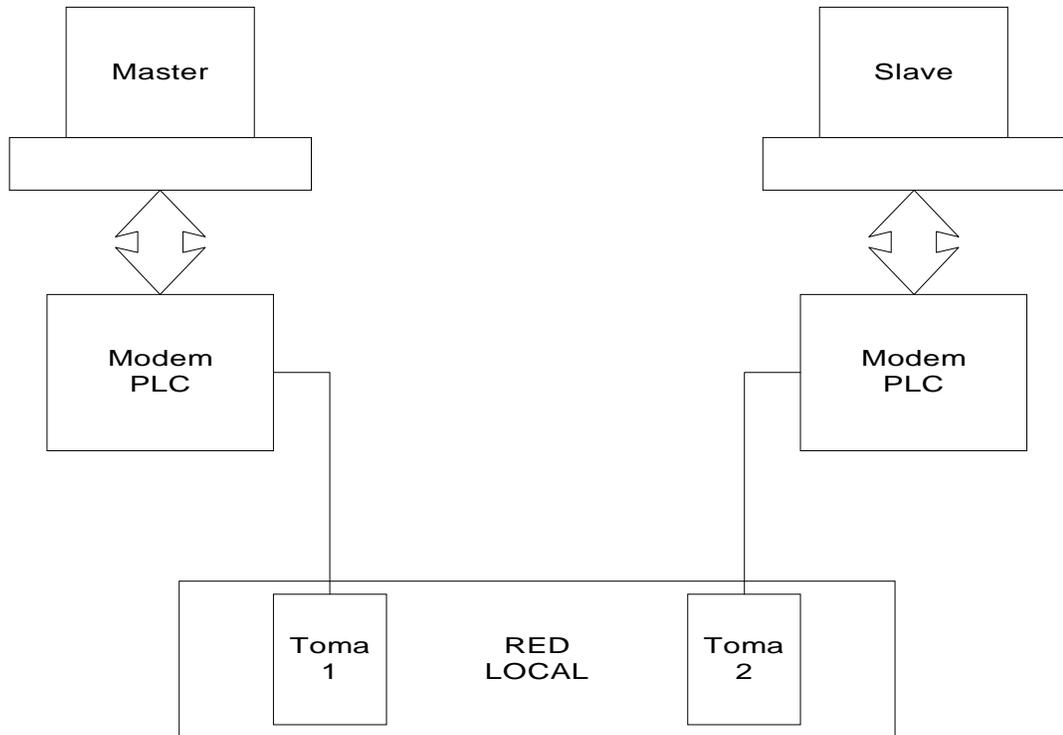
## Apéndice A.4 Pruebas del protocolo MODBUS para conexiones distintas entre tarjetas modem PLC



**Figura A.4.1** Diagrama de primera conexión de prueba del protocolo MODBUS

**Tabla A.4.1** Resultados obtenidos para la primera conexión de prueba

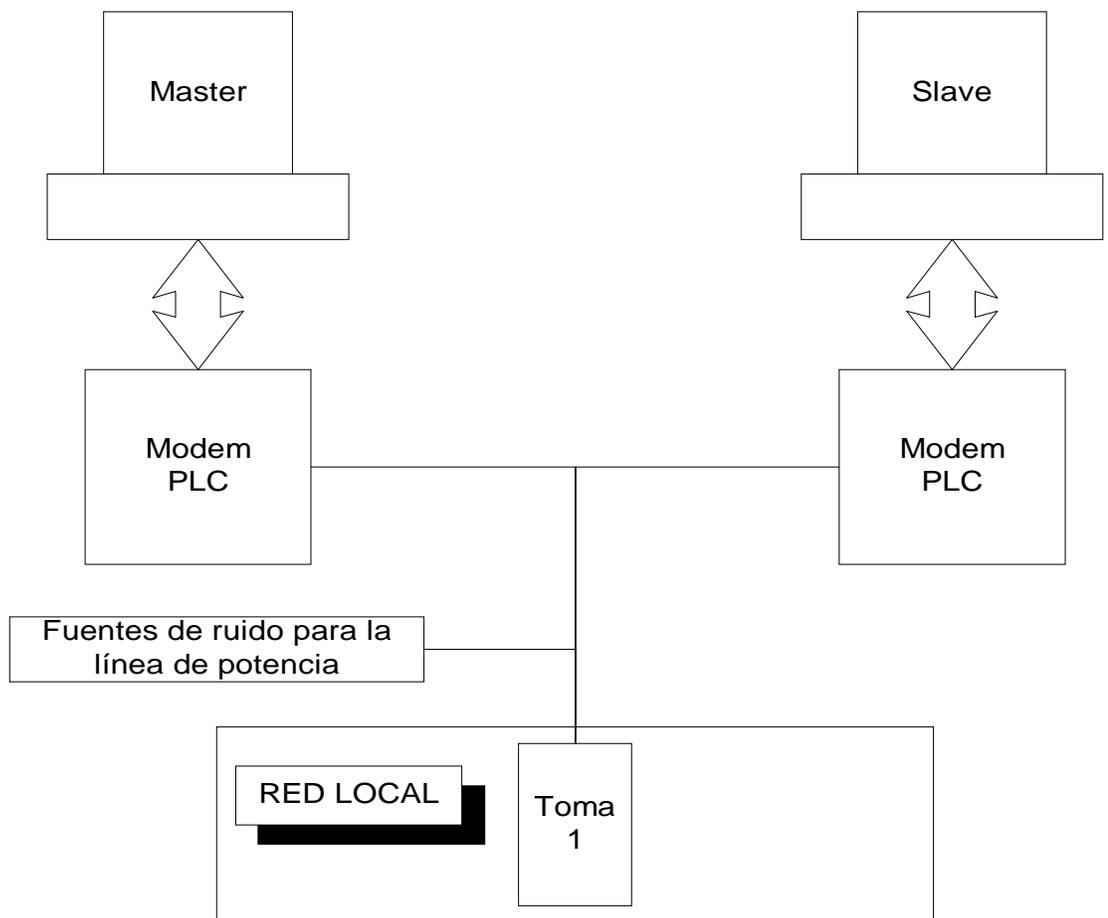
<b>Función</b>	<b>Tiempo de espera de respuesta en el maestro MODBUS (ms)</b>	<b>Observaciones</b>
1	1000	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
1	500	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
1	350	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
1	300	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
1	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
1	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
2	500	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
2	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
2	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
3	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
3	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
4	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
4	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
5	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
5	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
6	Varios tiempos	Se consigue la comunicación entre Maestro y esclavo, pero no se recibe la respuesta en ningún caso



**Figura A.4.2** Diagrama de segunda conexión de prueba del protocolo MODBUS

**Tabla A.4.1** Resultados obtenidos para la segunda conexión de prueba

<b>Función</b>	<b>Tiempo de espera de respuesta en el maestro MODBUS (ms)</b>	<b>Observaciones</b>
1	1000	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
1	500	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
1	350	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
1	300	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
1	330	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
1	340	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
2	500	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
2	340	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
2	330	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
3	340	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
3	330	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
4	340	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
4	330	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
5	340	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
5	330	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
6	Varios tiempos	Se consigue la comunicación entre Maestro y esclavo, pero no se recibe la respuesta en ningún caso



**Figura A.4.3** Diagrama de tercera conexión de prueba del protocolo MODBUS

**Tabla A.4.3** Resultados obtenidos para la tercera conexión de prueba

<b>Equipo generador de ruido</b>	<b>Función</b>	<b>Tiempo de espera de respuesta en el maestro MODBUS (ms)</b>	<b>Observaciones</b>
Ventilador	1	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
	1	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
	5	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
	5	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
Luz floreciente	2	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
	2	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
	5	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
	5	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
Radio grabadora	1	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
	1	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.
	5	330	Se logra una comunicación exitosa entre Maestro y esclavo.
	5	320	El maestro no recibe respuesta del esclavo, aunque se visualiza, por medio del LED identificador que se realiza la transmisión de datos.

## Apéndice A.5 Glosario

ADAPT812	Módulo de prueba especializado para el diseño de prototipos, el cual se encuentra basado en el microcontrolador 68HC812A4 de Motorola.
CRC	Código Redundancia Cíclica. Es el método de chequeo de errores utilizado por el protocolo MODBUS UTR.
DCE	Equipo de comunicación de datos. Todo dispositivo que cumpla la función, dentro de un enlace de comunicación, de permitir el flujo de datos, por medio de algún tipo de canal, entre un emisor y un receptor.
DTE	Equipo terminal de datos. Todo dispositivo que sea un ente emisor o receptor de datos en un enlace de comunicación.
Full-duplex	Enlace de comunicación en donde cada sistema puede enviar y recibir datos al mismo tiempo.
Half-duplex	Tipo de comunicación en donde los datos pueden ser enviados en ambas direcciones entre dos sistemas, pero en una sola dirección al mismo tiempo.
Maestro MODBUS	Equipo terminal de datos (DTE) cuyo software permite estructurar y enviar un mensaje en protocolo MODBUS, hacia una o más unidades esclavas.
MODBUS	Protocolo de comunicación que establece un conjunto de reglas sobre la transmisión de datos de control entre un emisor y un receptor. Su uso más extenso es en el área de Controladores Lógicos y Automatización Industrial. Se basa en el principio Maestro-Esclavo.

MODICON	Compañía Estadounidense que Instala y distribuye Sistemas de Automatización Industrial. Poseen una excelente guía de referencia sobre el protocolo MODBUS.
Modem PLC	Es un equipo de comunicación de datos (DCE) que utiliza como canal de comunicación las líneas de potencia.
Red HAN	Es un tipo de red de distribución eléctrica local. Se encuentra instalada en residencias, edificios y todo lugar donde la red se encuentre limitada por un transformador de distribución.
RS-232	Estándar que regula la comunicación por puertos seriales.
Simplex	La comunicación de datos entre emisor y receptor sólo se efectúa en una sola dirección.
Slave	Referente a la unida esclava MODBUS. Es la receptora de los mensajes estructurados y enviados por el maestro MODBUS.
UTR	Unidad terminal Remota. Es un tipo especial de Protocolo MODBUS muy utilizado a nivel industrial. Se caracteriza por estructurar mensajes con 1 start bit, 8 data bits, 2 stop bits. Además utiliza el código CRC para chequeo de errores.

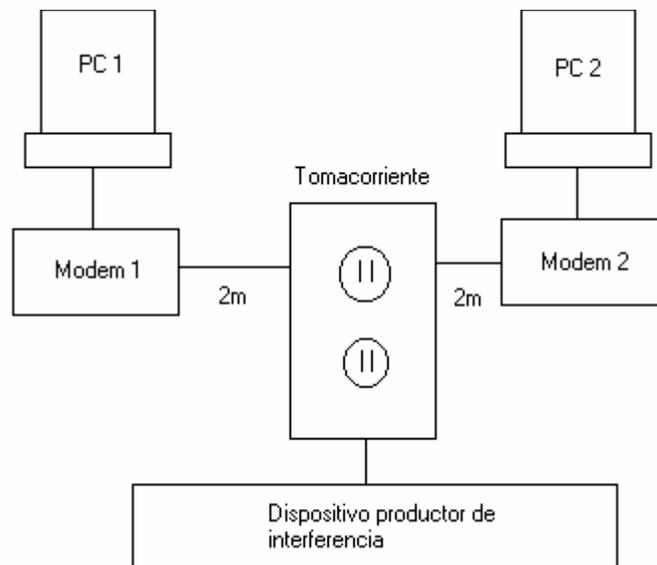
## ANEXOS

---

### Anexo B.1 Pruebas sobre tasas de error en transmisiones vía modem PLC

La conexión mostrada en la figura B.1.1 fue adaptada por el Departamento de Investigación y Desarrollo del ICE, como un montaje de prueba para medir la tasa de error que se produce en la transmisión de datos (sin adaptar protocolo MODBUS), a través de las tarjetas modem PLC. Las pruebas consistieron en colocar distintas fuentes productoras de ruido e interferencia y realizar una simple medición de bytes recibidos en total y bytes recibidos correcta e incorrectamente.

Los resultados obtenidos en las pruebas se detallan en la tabla B.1.1.



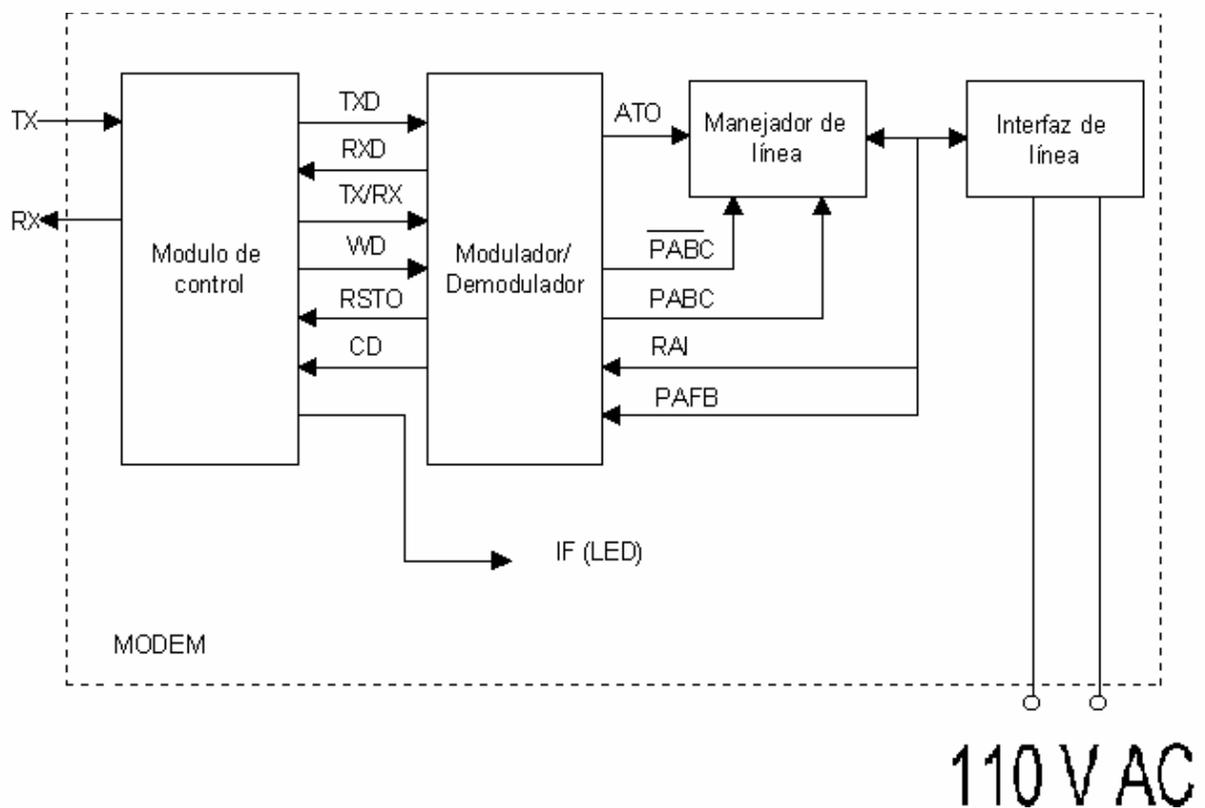
**Figura B.1.1** Conexión utilizada para evaluar tasas de error de los modem PLC ante distintas interferencias

**Tabla B.1.1** Resumen de varias tasas de error en la transferencia de datos para las tarjetas modem PLC

<b>Descripción de la conexión de prueba</b>	<b>Dispositivo productor de ruido</b>	<b>Tasa de transferencia, (bps)</b>	<b>Porcentaje de error, (%)</b>	<b>Tiempo de evaluación, (minutos)</b>
Conexión simple de dos tarjetas Modem PLC a un mismo tomacorriente. Corresponde a la conexión detallada en la figura B.1.1	Ninguno	86	0.21	2
	Ninguno	90	1.5	5
	Secadora de pelo	86	0.63	2
	Ventilador	86	0.23	2
	Cepillo eléctrico	86	2.29	2
	Horno de microondas	86	0.36	2
	Regulador de potencia (dimmer) al 50% carga resistiva	86	3.33	2
	Regulador de potencia (dimmer) al 50% carga inductiva	88	2.23	2

## Anexo B.2 Conexiones internas de modem PLC

La figura B.2.1 muestra un diagrama de bloques detallado de los módulos que conforman el hardware de las tarjetas modem PLC pertenecientes al Departamento de Investigación y Desarrollo del ICE.



**Figura B.2.1** Diagrama de bloques detallado para el hardware del modem PLC

## Anexo B.3 Tablas para calcular el CRC

**Tabla B.3.1** Tabla para calcular la variable CRCHI

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	00	C1	81	40	01	C0	80	41	01	C0	80	41	00	C1	81	40
1	01	C0	80	41	00	C1	81	40	00	C1	81	40	01	C0	80	41
2	01	C0	80	41	00	C1	81	40	00	C1	81	40	01	C0	80	41
3	00	C1	81	40	01	C0	80	41	00	C1	81	40	00	C1	81	40
4	01	C0	80	41	00	C1	81	40	01	C0	80	41	01	C0	80	41
5	00	C1	81	40	00	C1	81	40	01	C0	80	41	01	C0	80	41
6	00	C1	81	40	00	C0	80	41	00	C1	81	40	01	C0	80	41
7	01	C0	80	41	00	C1	81	40	00	C1	81	40	01	C0	80	41
8	01	C0	80	41	00	C1	81	40	00	C1	81	40	01	C0	80	41
9	00	C1	81	40	01	C0	80	41	01	C0	80	41	00	C1	81	40
A	00	C1	81	40	01	C0	80	41	01	C0	80	41	00	C1	81	40
B	01	C0	80	41	00	C1	81	40	00	C1	81	40	01	C0	80	41
C	00	C1	81	40	01	C0	80	41	01	C0	80	41	00	C1	81	40
D	01	C0	80	41	00	C1	81	40	00	C1	81	40	01	C0	80	41
E	01	C0	80	41	00	C1	81	40	00	C1	81	40	01	C0	80	41
F	00	C1	81	40	01	C0	80	41	01	C0	80	41	00	C1	81	40

**Tabla B.3.2** Tabla para calcular la variable CRCLO

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	00	C0	C1	01	C3	03	02	C2	C6	06	07	C7	05	C5	C4	04
1	CC	0C	0D	CD	0F	CF	CE	0E	0A	CA	CB	0B	C9	09	08	C8
2	D8	18	19	D9	1B	DB	DA	1 <sup>a</sup>	1E	DE	DF	1F	DD	1D	1C	DC
3	14	D4	D5	15	D7	17	16	D6	D2	12	13	D3	11	D1	D0	10
4	F0	30	31	F1	33	F3	F2	32	36	F6	F7	37	F5	35	34	F4
5	3C	FC	FD	3D	FF	3F	3E	FE	FA	3A	3B	FB	39	F9	F8	38
6	28	E8	E9	29	EB	2B	2A	EA	EE	2E	2F	EF	2D	ED	EC	2C
7	E4	24	25	E5	27	E7	E6	26	22	E2	E3	23	E1	21	20	E0
8	A0	60	61	A1	63	A3	A2	62	66	A6	A7	67	A5	65	64	A4
9	6C	AC	AD	6D	AF	6F	6E	AE	AA	6A	6B	AB	69	A9	A8	68
A	78	B8	B9	79	BB	7B	7A	BA	BE	7E	7F	BF	7D	BD	BC	7C
B	B4	74	75	B5	77	B7	B6	76	72	B2	B3	73	B1	71	70	B0
C	50	90	91	51	93	53	52	92	96	56	57	97	55	95	94	54
D	9C	5C	5D	9D	5F	9F	9E	5E	5A	9A	9B	5B	99	59	58	98
E	88	48	49	89	4B	8B	8A	4 <sup>a</sup>	4E	8E	8F	4F	8D	4D	4C	8C
F	44	84	85	45	87	47	46	86	82	42	43	83	41	81	80	40

