

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**“Diseño e implementación de un sistema de transmisión de datos inalámbrico  
entre los pozos productores y las estaciones separadoras, en el Proyecto  
Geotérmico Miravalles”**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

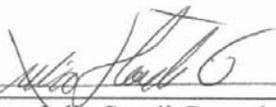
**Diego Alberto Badilla Elizondo**

**Cartago, septiembre de 2007**

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Julio Stradi Granados  
Profesor lector

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Eduardo Anteriano Salguero  
Profesor lector

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Adolfo Chaves Jiménez  
Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Costa Rica, Septiembre 2007

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema, así como la información que suministró la institución para la que se realizó el proyecto, y aplicando e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, jueves 6 de septiembre de 2007



---

Diego Alberto Badilla Elizondo

Céd: 6 0338 0665

## Resumen

El Instituto Costarricense de Electricidad realiza un monitoreo constante de variables digitales y analógicas que están presentes en los pozos productores de vapor del Proyecto Geotérmico Miravalles. Estas variables son transmitidas mediante cables desde los pozos hasta las estaciones separadoras, la cuales se conocen con el nombre de satélites y se encargan de separar el fluido bifásico extraído de los pozos en vapor y agua, pero actualmente se ha tenido muchos problemas por el robo y daño del cable a tal punto que los datos no llegan hasta las estaciones separadoras. Por este motivo, el Departamento de Mantenimiento Instrumentación de Campo del Centro de Servicio Recursos Geotérmicos Miravalles solicitó el diseño de un sistema inalámbrico que permita eliminar la utilización de cable para el monitoreo de estas señales provenientes de los pozos.

El presente proyecto consiste en el diseño y la implementación de un sistema de comunicación inalámbrico para transmitir datos analógicos y digitales presentes en los pozos productores; el sistema incluye la posibilidad de enviar cinco alarmas digitales y tres señales analógicas, cuenta con un respaldo de energía y se puede utilizar en configuración multipunto a punto.

El sistema se implementó en los pozos 11 y 60 para transmitir los datos hacia el satélite 7 con lo cual fue posible llevar a cabo las pruebas respectivas durante un lapso de tiempo de 30 días aproximadamente.

El diseño se hizo de manera tal que permita la escalabilidad, es decir, que permita la posibilidad de realizar mejoras en el diseño con el fin de optimizar su funcionalidad, tales como el número de alarmas digitales y variables analógicas a transmitir. Inicialmente, se pretendía implementar un sistema punto a punto sin embargo fue posible realizar el diseño y probar un sistema multipunto a punto debido a la versatilidad del equipo y a la implementación final.

Palabras claves: estación separadora, pozo productor, monitoreo, inalámbrico, analógico, digital, paquetes de datos, multipunto a punto.

## **Summary**

The Costa Rican Electricity Institute has a monitoring system of analog and digital variables that are present in the steam producer wells of the Miravalles Geothermic Project. The variables are transmitted by wires from the wells to the satellites, which are stations that separate the biphasic fluids (extracted from the wells) into vapor and water; however, actually there are many problems due to the wire robbery and damage and the data can't be visualized. Consequently, field maintenance devices department of the Miravalles Geothermic Resources Service Center requested the wireless system design that allows eliminating the wires used for the monitoring of these signals.

This project consists on the design and the implementation of a wireless communication system to transmit analog and digital variables from the producer wells; the system includes the possibility of sending five digital alarms and tree analog signals, it has an energy support system and it can be configured as a multipoint to point system.

The system was implemented in the wells number eleven and sixty to transmit the data toward the separating station number seven. This was proved for a term of approximately thirty days.

The system design was made in order to allow the possibility of making improvements with the purpose of optimizing its functionality, such as the number of digital alarms and analog signals to transmit. Initially, it was tried to implement a point to point system nevertheless was possible to design and implement a multipoint to point system due to the versatility of the equipment and to the final implementation.

Key words: separating station, producer well, monitoring, wireless, analog, digital, data package, multipoint to point.

*A mis queridos padres que durante toda mi vida me han acompañado y me han dado la oportunidad de superarme, a ellos de todo corazón.*

*A mis hermanos y hermanas que han estado siempre a mi lado brindándome su apoyo.*

*Y especialmente a Dios que me ha dado la vida y ha estado a mi lado siempre.*

## **Agradecimiento**

Quiero agradecer al Ing. Rodrigo Mora Salas, por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación en el Centro de Servicio Recursos Geotérmicos Miravalles, por la ayuda brindada, la confianza que depositó en mí, su preocupación e interés.

Al personal del Departamento de Mantenimiento Instrumentación de Campo por el apoyo brindado y la oportunidad de compartir con ellos durante el desarrollo del proyecto de graduación.

Por su apoyo inmensurable, esfuerzo y dedicación le agradezco de corazón a mis padres, quienes son la base de mis principios y deseos de lucha por ser cada día mejor. No tengo manera de pagarles todo cuanto me han brindado, a ellos mis más sinceros agradecimientos.

A aquellos amigos que de uno u otro modo han contribuido a alcanzar este logro. A todos los familiares que creyeron en mí y me brindaron su ayuda.

A todos ellos...

.....Gracias!

## INDICE GENERAL

<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Problema existente e importancia de su solución .....	1
1.2. Solución seleccionada.....	5
<b>Capítulo 2: Metas y objetivos</b> .....	<b>7</b>
2.1. Meta .....	7
2.2. Objetivo general .....	7
2.3. Objetivos específicos .....	7
<b>Capítulo 3: Marco teórico</b> .....	<b>9</b>
3.1. Descripción del sistema o proceso a mejorar .....	9
3.2. Principios relacionados con la solución del problema.....	13
3.2.1. El modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI) .....	13
3.2.2. Topologías físicas de red .....	16
3.2.3. Espectro expandido por saltos de frecuencia (frequency hopping spread spectrum, FHSS).....	21
<b>Capítulo 4: Procedimiento metodológico</b> .....	<b>26</b>
4.1. Reconocimiento y definición del problema.....	26
4.1.1. Generalidades .....	26
4.1.2. Descripción sintética del problema.....	27
4.2. Obtención y análisis de información.....	27
4.3. Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución.....	27
4.4. Implementación de la solución .....	28
4.5. Reevaluación y rediseño .....	29
<b>Capítulo 5: Descripción detallada de la solución</b> .....	<b>30</b>
5.1. Análisis de soluciones y selección final.....	30
5.1.1. Generalidades .....	30
5.1.2. Tecnologías de transmisión.....	30
5.1.3. Módems inalámbricos.....	32
5.1.4. Extensores inalámbricos .....	37
5.1.5. Ventajas de radio módem.....	40
5.1.6. Desventajas del radio módem .....	40
5.1.7. Ventajas del extensor .....	40
5.1.8. Desventajas de extensor .....	41
5.1.9. Solución en el pozo .....	42
5.1.10. Solución en el satélite.....	43
5.2. Diseño de la solución implementada.....	46
5.2.1. Arquitectura de la red .....	46
5.2.2. Diseño del protocolo de comunicación.....	47
5.2.3. Diseño del protocolo de aplicación.....	51
5.3. Descripción del hardware.....	55
5.3.1. Transmisor inalámbrico de datos (Radio módem).....	55
5.3.2. Sistema prototipo de transmisión en el pozo.....	57
5.3.3. Fuente de alimentación y cargador de baterías .....	58
5.3.3.1. Circuito para adquisición de datos .....	63
5.3.3.2. Radio módem (Esclavo) .....	67
5.3.4. Sistema prototipo de recepción en la estación separadora (satélite).....	68
5.3.4.1. Radio módem (Maestro).....	68

5.3.4.2.	PLC OMRON C200-HS .....	69
5.3.4.3.	Pantalla de interfaz con usuario .....	70
5.3.4.4.	Modificaciones a la pantalla de monitoreo creada con el software Fix .....	72
5.4.	Descripción del software .....	74
5.4.1.	Programa del PLC .....	74
5.4.1.1.	Configuración del puerto de comunicación Host Link del PLC.....	75
5.4.1.2.	Descripción del programa.....	76
5.4.1.3.	Ubicaciones de memoria utilizadas .....	91
5.4.2.	Estructura del programa del microcontrolador PIC16F877A.....	93
5.4.3.	Configuración de los radio módems .....	97
<b>Capítulo 6:</b>	<b>Análisis de Resultados .....</b>	<b>101</b>
6.1.	Resultados .....	101
6.2.	Análisis.....	109
<b>Capítulo 7:</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>116</b>
7.1.	Conclusiones.....	116
7.2.	Recomendaciones.....	118
<b>Bibliografía</b>	<b>.....</b>	<b>119</b>
<b>Capítulo 8:</b>	<b>Apéndices y anexos .....</b>	<b>121</b>
8.1.	Apéndices.....	121
Apéndice A.1.	Costos de por instalación del sistema inalámbrico.....	121
Apéndice A.2.	Programa del microcontrolador .....	121
Apéndice A.3.	Descripción específica de la configuración de los módems .....	125
8.2.	Anexos .....	129
Anexo B.1.	Costos por instalación del sistema de transmisión mediante cables...	129
Anexo B.2.	Cotización de radio módems, antenas y cable coaxial.....	131

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama del sistema de inhibición de un pozo .....	2
Figura 1.2 Relés que activan la alarma por fallo de red en los pozos .....	2
Figura 1.3 Estación separadora (satélite 7) .....	3
Figura 1.4 Diagrama de la solución implementada.....	6
Figura 3.1 Diagrama del sistema de comunicación actual entre pozos y satélites.....	10
Figura 3.2 Diagrama de la conexión del sistema de comunicación actual entre pozos y satélites.....	12
Figura 3.3 Capas de modelo OSI.....	13
Figura 3.4 Visualización de los encabezados de las capas OSI.....	16
Figura 3.5 Conexión punto a punto.....	17
Figura 3.6 Conexión multipunto a punto .....	18
Figura 3.7 Topología punto - multipunto .....	19
Figura 3.8 Topología punto – multipunto con repetidor .....	20
Figura 3.9 Modulación de espectro expandido por salto de frecuencia.....	22
Figura 3.10 Demodulación de espectro expandido por salto de frecuencia .....	23
Figura 5.1 Diagrama de la solución en el pozo.....	43
Figura 5.2 Diagrama de la solución en el satélite .....	45
Figura 5.3 Topologías de comunicación multipunto a punto.....	46
Figura 5.4 Inicialización de datos a transmitir .....	48
Figura 5.5 Solicitud de información por parte del PLC.....	49
Figura 5.6 Inicio de la rutina de recepción de datos en PLC .....	50
Figura 5.7 Formato del protocolo de aplicación .....	51
Figura 5.8 Formato del protocolo enviado desde el pozo 11 .....	54
Figura 5.9 Formato del protocolo enviado desde el pozo 60 .....	54
Figura 5.10 LEDs indicadores del Spectra 910.....	55
Figura 5.11 Conectores para comunicación y antena.....	56
Figura 5.12 Pantalla para la configuración del Spectra 910 .....	57
Figura 5.13 Circuito de la fuente de alimentación y cargador de baterías.....	61
Figura 5.14 Circuito impreso de la fuente de alimentación y cargador de baterías .....	62
Figura 5.15 Vista superior del circuito cargador y regulador.....	62
Figura 5.16 Diagrama esquemático de la tarjeta de adquisición de datos .....	66
Figura 5.17 Circuito impreso de la tarjeta de adquisición de datos .....	67
Figura 5.18 PLC ubicado en el satélite .....	69
Figura 5.19 Pantallas de interfaz de usuario.....	70
Figura 5.20 Lógica para el manejo de las alarmas .....	71
Figura 5.21 Pantalla de monitoreo específica del satélite 7.....	73
Figura 5.22 Diagrama del programa del PLC .....	74
Figura 5.23 Pantalla de configuración del puerto serie del PLC .....	76
Figura 5.24 Instrucción block set .....	77
Figura 5.25 Función para realizar movimientos de datos .....	78
Figura 5.26 Función para transmitir datos por el puerto serie .....	79
Figura 5.27 Función para recibir datos por el puerto serie .....	80
Figura 5.28 Función para transferir bits .....	81
Figura 5.29 Función del PLC que realiza la suma binaria .....	82
Figura 5.30 Función para comparación de datos.....	82
Figura 5.31 Función para comparación de datos.....	83

Figura 5.32 Proceso de verificación y almacenamiento temporal de datos .....	84
Figura 5.33 Función de conversión de binario a BCD .....	86
Figura 5.34 Función para realizar escalados .....	86
Figura 5.35 Función move bit.....	87
Figura 5.36 Generación de contactos con la función keep .....	89
Figura 5.37 Lógica de control para la visualización de las alarmas.....	90
Figura 5.38 Variables tipo DM utilizadas para el almacenamiento de datos .....	91
Figura 5.39 Variables tipo SR utilizadas para generar contactos .....	92
Figura 5.40 Diagrama del programa implementado en el PIC.....	96
Figura 5.41 Topología de la red implementada .....	97
Figura 6.1 Tarjeta del circuito cargador y regulador .....	101
Figura 6.2 Tarjeta del circuito de adquisición de datos.....	102
Figura 6.3 Pantalla principal de monitoreo.....	104
Figura 6.4 Recuadro que muestra las alarmas presentes en el pozo.....	104
Figura 6.5 Pantalla de interfaz del satélite .....	105
Figura 6.6 Curvas características de descarga de la batería.....	112

## INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Características buscadas en la tecnología de transmisión .....	31
Tabla 5.2 Características de los extensores inalámbricos.....	32
Tabla 5.3 Datos técnicos de los módems inalámbricos .....	33
Tabla 5.4 Datos técnicos de los módems inalámbricos (continuación) .....	34
Tabla 5.5 Datos técnicos de los módems inalámbricos (continuación) .....	35
Tabla 5.6 Datos técnicos de los módems inalámbricos (continuación) .....	36
Tabla 5.7 Datos técnicos de los extensores inalámbricos .....	38
Tabla 5.8 Datos técnicos de los extensores inalámbricos (continuación).....	39
Tabla 5.9 Modo de operación del RSSI .....	56
Tabla 5.10 Configuración del puerto RS232 .....	69
Tabla 5.11 Configuración para el maestro .....	98
Tabla 5.12 Configuración para el esclavo .....	99
Tabla 5.13 Configuración para el repetidor.....	100
Tabla 8.1 Costos aproximados para instalación del sistema inalámbrico por pozo.....	121
Tabla 8.2 Costos de la transmisión de señales de control mediante cables desde los pozos 11, 60, 14 y 66 hacia el satélite 7.....	129
Tabla 8.3 Costos del cable de control para la transmisión de señales de control mediante cables desde los pozos 11, 60, 14 y 66 hacia el satélite 7 .....	130
Tabla 8.4 Costos por planillas para el trabajo de instalación de cables de control desde los pozos 11, 60, 14 y 66 hacia el satélite 7 .....	130
Tabla 8.5 Costos totales para el trabajo de instalación de cables de control desde los pozos 11, 60, 14 y 66 hacia el satélite 7.....	130

# Capítulo 1: Introducción

## ***1.1. Problema existente e importancia de su solución***

En el Proyecto Geotérmico Miravalles existen decenas de yacimientos de vapor denominados pozos, los cuales consisten en una excavación en la que se introduce una tubería metálica a una profundidad de 2km aproximadamente, y por esta se extrae el fluido bifásico que contiene el vapor.

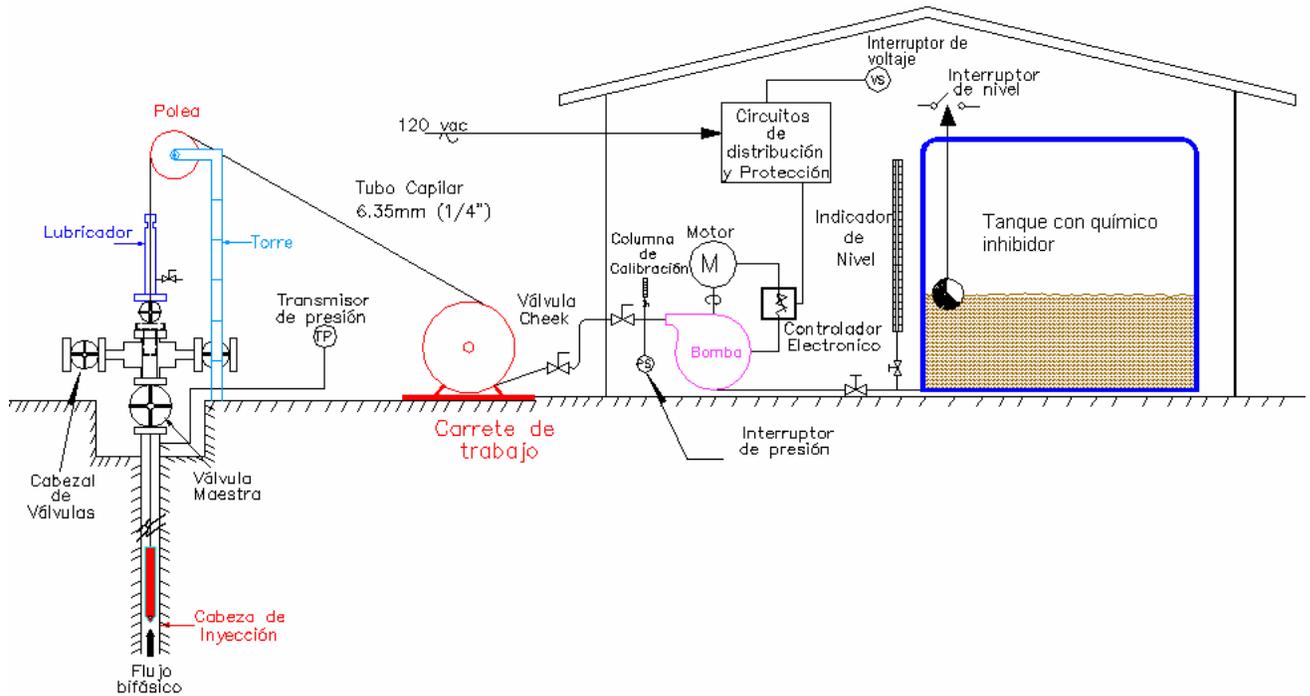
Cada pozo cuenta en la superficie con una torre y una caseta en donde se encuentra: un tanque, instalación eléctrica (circuitos de distribución), una bomba, y en algunos casos una planta de emergencia. Además, en la salida del pozo en la superficie, se tiene un sensor de presión para medir la presión de “cabezal”.

El tanque ubicado en la caseta del pozo posee un químico inhibidor que es inyectado mediante la bomba a la tubería del pozo por medio de un tubo capilar. Este químico debe ser suministrado a la tubería de manera constante para evitar que la misma se obstruya por los componentes (como calcita) que vienen en el fluido bifásico.

Es por lo anterior que la presión de bombeo del químico es un parámetro importante a vigilar y debe mantenerse entre ciertos límites. Si la presión de la bomba está por debajo o supera esos límites se activa un contacto que representa una alarma por presión de bombeo.

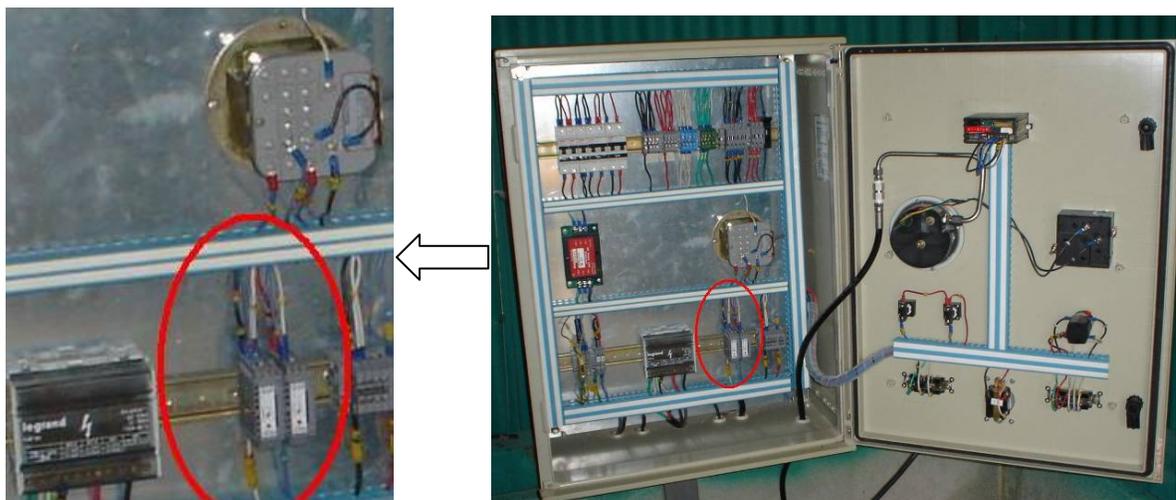
El nivel del líquido que contiene el tanque que está en la caseta del pozo también tiene asociado un contacto que se activa si el tanque está muy vacío y genera la alarma por nivel de tanque.

En la siguiente figura se muestra un esquema del sistema de inhibición en el pozo:



**Figura 1.1** Diagrama del sistema de inhibición de un pozo

Cada una de las líneas de potencia, línea 1 y línea 2, tiene asociado un contacto mediante un relé que se desactiva si alguna de las dos falla, así como se muestra en la Figura 1.2:



**Figura 1.2** Relés que activan la alarma por fallo de red en los pozos

Todos los contactos son normalmente cerrados y sus conexiones se realizan dentro de un panel que se encuentra en la caseta del pozo (ver Figura 1.2). Si alguna de las alarmas está presente dicho contacto se abre para generar la alarma.

El estado de las alarmas y la presión de cabezal son variables que deben ser transmitidas hasta unas estaciones separadoras que se encuentran a distancias entre los 200 y 1000 metros de los pozos y donde se encuentra un PLC que recopila la información y la envía por medio de fibra óptica hasta un sistema de monitoreo en la localidad de Guayabo. A continuación se muestra una imagen de una estación separadora:



**Figura 1.3** Estación separadora (satélite 7)

La información de los pozos es transmitida mediante cables hasta las estaciones separadoras, sin embargo, actualmente se han tenido grandes problemas con el cableado debido al robo de cable, al daño que causan los roedores y por el efecto de la temperatura en los ductos subterráneos, ya que se generan cortocircuitos debido al calentamiento de los cables. Además, el sistema actual es poco flexible, requiere de gran inversión y mucho tiempo para ser instalado; y en caso de que se produzca algún problema o daño en el mismo resulta muy difícil realizar reparaciones ya que se tiene que revisar la conexión desde el pozo hasta el satélite para lo cual hay que atravesar terrenos de muy difícil acceso (montañosos).

Por los motivos anteriores, el Departamento de Mantenimiento Instrumentación de Campo del Centro de Servicio Recursos Geotérmicos Miravalles requería implementar un sistema que permita eliminar la utilización de cable para el monitoreo de estas señales de control provenientes de los pozos y con ello eliminar los problemas actuales y al mismo tiempo poder contar con un sistema más flexible, menos costoso y que requiera un tiempo de instalación mínimo.

Es importante destacar que son muy pocos los pozos de los cuales se obtiene información por medio de fibra óptica, esto debido a que no es viable instalar este tipo de tecnología por los costos tan altos y porque se presentan problemas por aspectos como el robo de cable y los vientos extremos que votan el cableado aéreo.

## **1.2. Solución seleccionada**

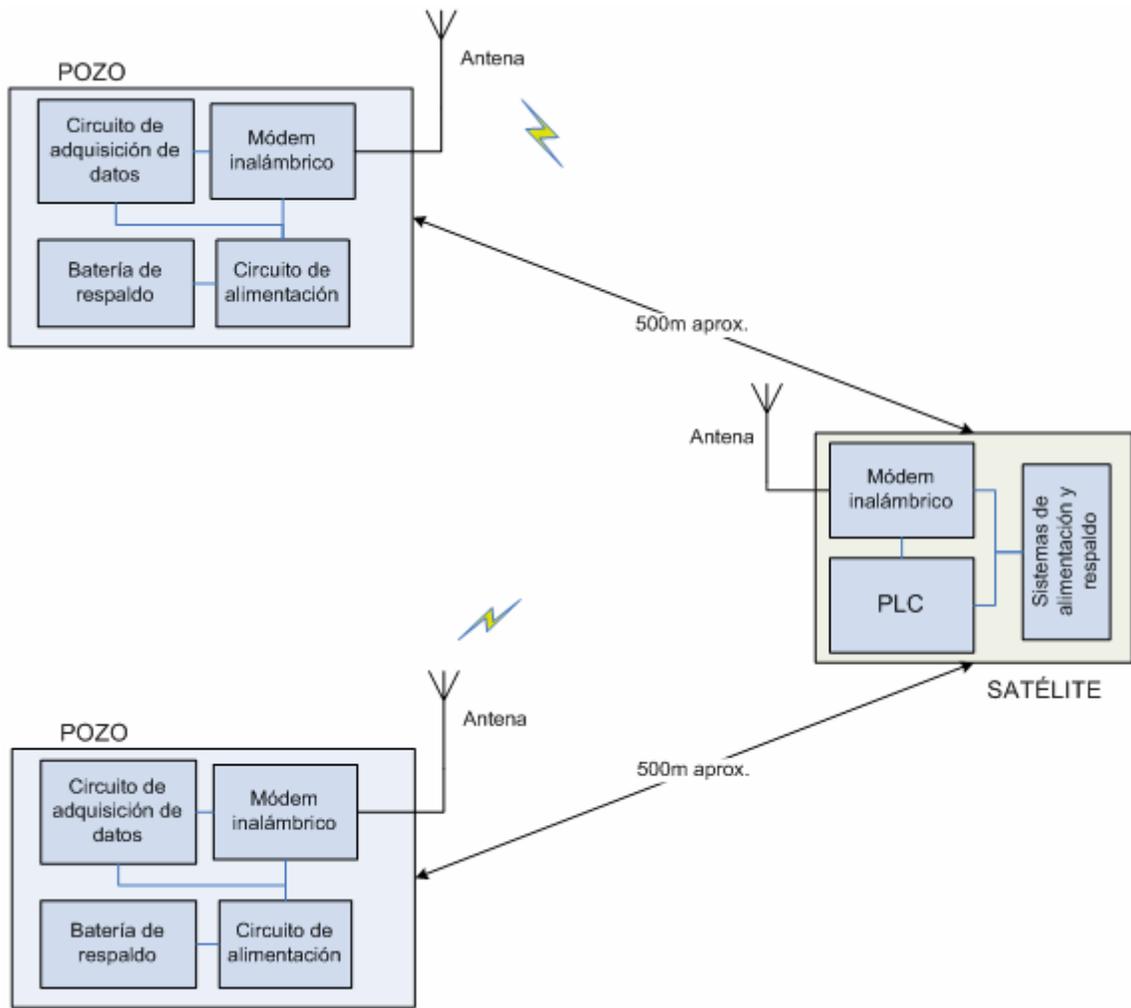
La solución implementada tomó en consideración los siguientes requisitos que son necesarios para que el sistema sea eficiente:

- Flexibilidad, para poder implementarse en corto tiempo y de manera fácil.
- Reducir el gasto de recursos, tanto económicos como de mano de obra.
- Debe ser confiable, es decir, debe contar con algún método de verificación de errores.
- Debe permitir monitorear las alarmas de los pozos de manera independiente.
- Permitir la transmisión de un máximo de 5 entradas digitales y 3 analógicas.
- Debe permitir la comunicación multipunto a punto.
- Debe contar con un sistema de respaldo que permita la transmisión de datos cuando la alimentación falle.

Basándose en los aspectos anteriores se realizó el diseño de un sistema que se orientó en la utilización de módulos para la transmisión inalámbrica de datos (módems inalámbricos), los cuales contarán con la posibilidad de comunicarse mediante puerto RS232 debido a que es la tecnología con que se cuenta actualmente en el PLC de las estaciones separadoras.

En la Figura 1.4 se muestra un esquema muy general de la solución seleccionada tomando en cuenta que para la implementación del sistema prototipo se utilizaron dos pozos para realizar las pruebas.

La solución desarrollada se describe detalladamente en el capítulo 5 del presente informe.



**Figura 1.4** Diagrama de la solución implementada

## **Capítulo 2: Metas y objetivos**

### **2.1. Meta**

2.1.1. Lograr que en el Proyecto Geotérmico Miravalles se cuente con un sistema de comunicación inalámbrico entre un satélite y un pozo (punto a punto), que permita con su implementación transmitir la información con fidelidad de las señales de las alarmas y de presión existentes en dicho pozo; y que el diseño del sistema permita la escalabilidad para convertirlo en un sistema multipunto a punto (comunicación pozos - satélite).

### **2.2. Objetivo general**

2.2.1. Diseñar un prototipo de un sistema que permita la comunicación inalámbrica entre un satélite y un pozo asociado a dicho satélite, con el fin de transmitir las señales analógicas y digitales presentes en cada pozo.

### **2.3. Objetivos específicos**

2.3.1.1. Determinar la metodología de modulación - demodulación y la tecnología de transmisión que será utilizada en la implementación del sistema.

*Indicador:* Elección basada en una justificación comparativa de la metodología de modulación - demodulación y de la tecnología de transmisión.

2.3.1.2. Desarrollar a nivel de diseño el sistema prototipo que se utilizará para la transmisión de los datos en el pozo.

*Indicador:* Diseño del prototipo de transmisión en el pozo.

**2.3.1.3.** Desarrollar a nivel de diseño el sistema prototipo que se utilizará para la recepción de los datos en la estación separadora.

*Indicador:* Diseño del prototipo de recepción en la estación separadora.

**2.3.1.4.** Realizar las modificaciones al software del PLC que se encuentra en los satélites para recibir los datos de las señales transmitidas.

*Indicador:* Compilación del software modificado y programación del PLC del satélite.

**2.3.1.5.** Comprobar el funcionamiento del sistema prototipo a partir de una comparación entre el sistema actual y el sistema diseñado para un caso en línea de vista.

*Indicador:* Se reciben los mismos datos de las alarmas y de presión con ambos sistemas.

**2.3.1.6.** Desarrollar un manual de mantenimiento para el sistema diseñado que permita a los usuarios interactuar con los equipos a través de un programa preventivo.

*Indicador:* Documentación en formato electrónico (tipo web) del manual.

## **Capítulo 3: Marco teórico**

### ***3.1. Descripción del sistema o proceso a mejorar***

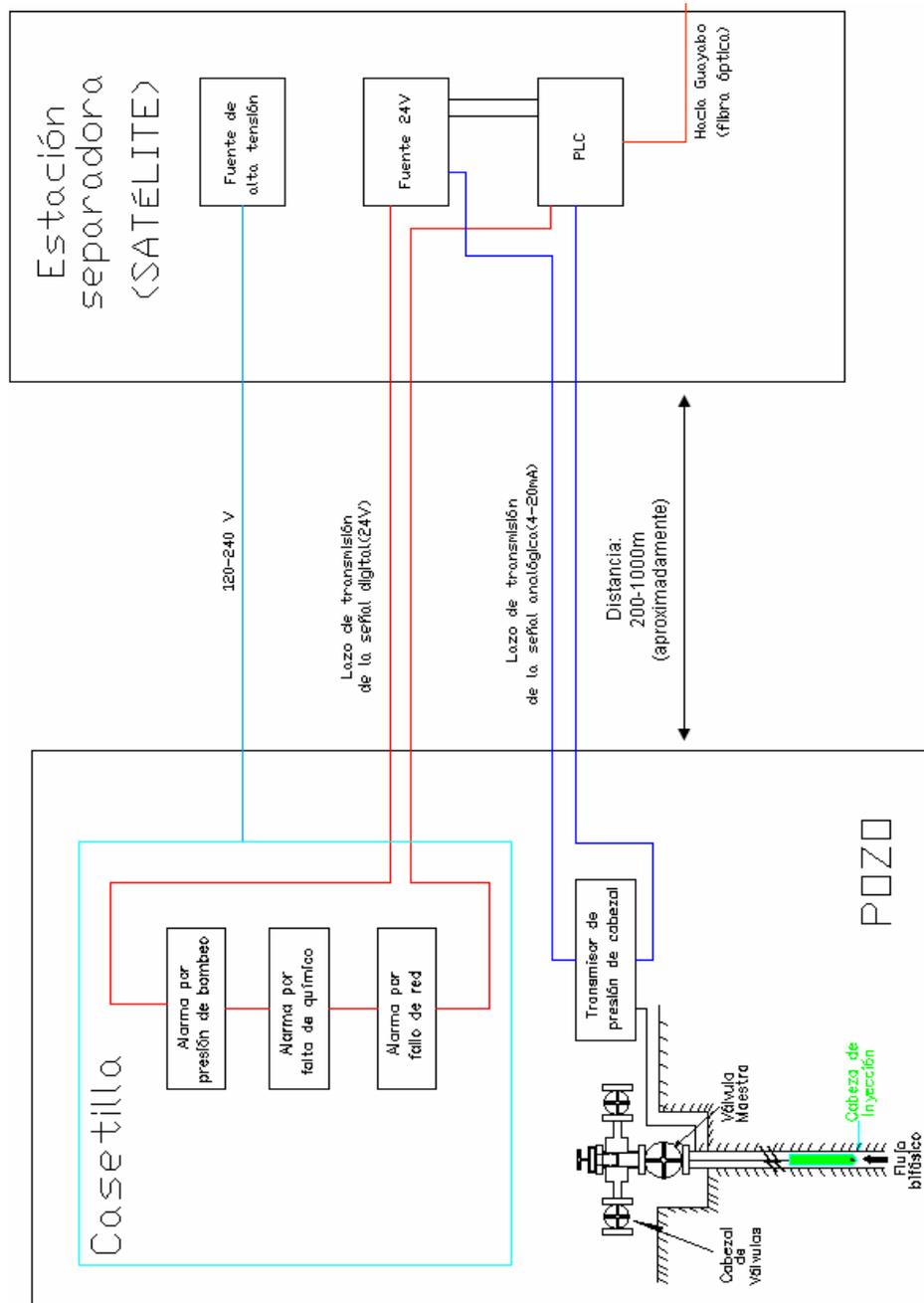
Como ya se mencionó, el Instituto Costarricense de Electricidad cuenta con un sistema de monitoreo para los pozos productores del Proyecto Geotérmico de Miravalles.

Este sistema es dependiente del cableado que se utiliza para muestrear el valor de las variables que forman parte del proceso de producción en el pozo. Sin embargo, el ICE ha tenido grandes problemas con este tipo de comunicación debido a que en muchas ocasiones el cable se daña, ya sea por situaciones de calentamiento en el ducto subterráneo o por roedores que lo muerden, o es robado.

El sistema de comunicación actual entre los pozos y los satélites no posee ningún protocolo. Los satélites proveen la alimentación para los sistemas que se encuentran en los pozos, tanto la alimentación de potencia (120-240V) como la alimentación de 24Vdc.

Las alarmas, que generalmente son cuatro por pozo, son señales binarias (digitales a 24V) que están conectadas en serie (ver Figura 3.2). Todas ellas son activadas por medio de contactos que se encuentran normalmente cerrados (ver Figura 3.2). Esto quiere decir que es suficiente con que se active una de las cuatro señales para activar la alarma que informa de algún fallo. Sin embargo, este sistema se cambió por otro que informa de manera específica cual de las alarmas fue la que se activó, ya que esto permite resolver el fallo de una forma más eficiente. Esto debido a que los pozos se encuentran a varios kilómetros (en ocasiones hasta 10km) de donde se monitorean las alarmas, por lo tanto es importante conocer con exactitud la alarma que se activa.

Existen pozos en los cuales hay presente una planta de emergencia en caso de que alguna de las dos líneas de red falle. En estos casos se incluyen dos nuevas alarmas que también se activan por medio de contactos, que son: alarma por planta con carga y alarma por planta en manual.

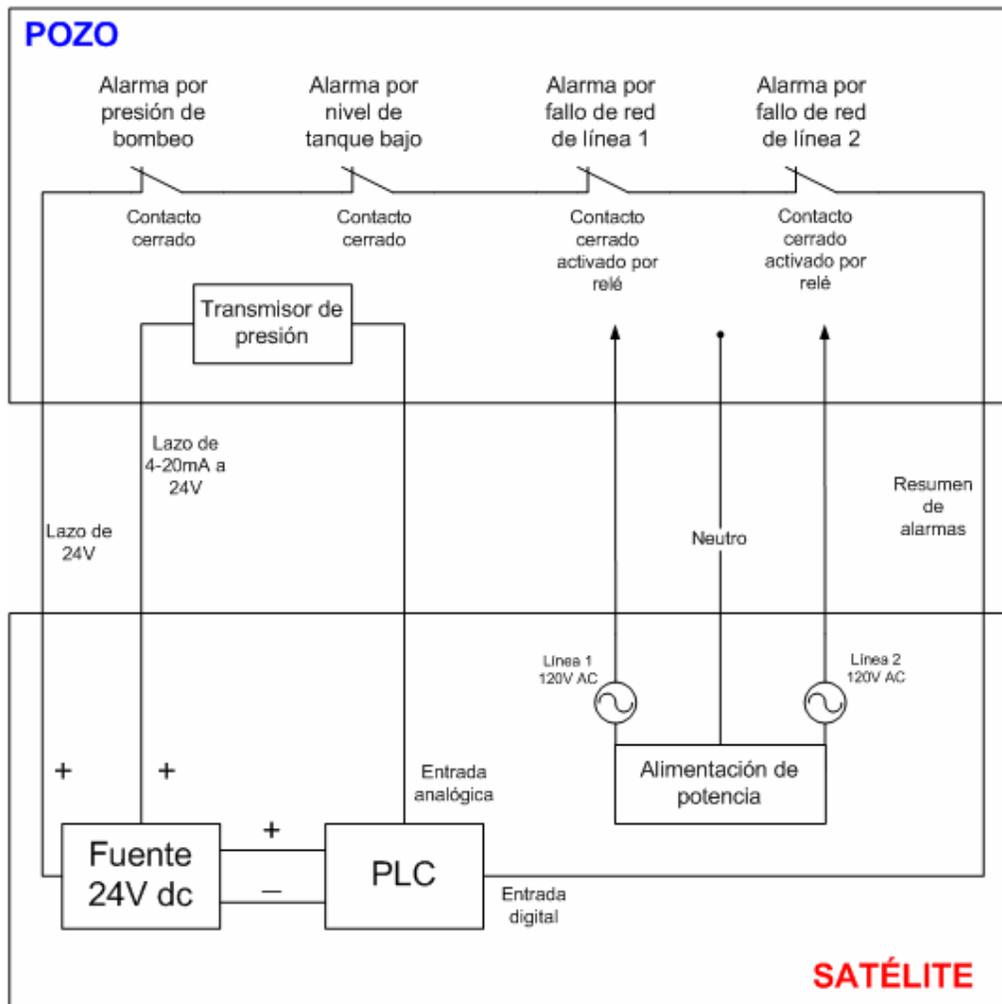


**Figura 3.1** Diagrama del sistema de comunicación actual entre pozos y satélites

Actualmente estas alarmas están conectadas mediante un lazo de 24V que permite unir los contactos, así se utiliza una sola entrada digital del PLC para ingresar el dato binario que representan las cuatro alarmas (una señal resume las 4 alarmas) y además se reduce la utilización de cable ya que es muy costoso.

Lo anterior también incluye el caso en que se produzca algún daño o robo de cable, ya que de no haber conexión también se activaría la alarma debido a que se utiliza una lógica negativa para el manejo de esta señal. Esto quiere decir que si todos los contactos están cerrados y si el cable de comunicación está bien en la entrada del PLC se tiene un “1 lógico” y por consiguiente el sistema está funcionando correctamente.

En la Figura 3.2 se muestra un diagrama general de la conexión del sistema de comunicación actual, el cual transmite la señal del transmisor de presión y también el resumen de alarmas.



**Figura 3.2** Diagrama de la conexión del sistema de comunicación actual entre pozos y satélites

## **3.2. Principios relacionados con la solución del problema**

### **3.2.1. El modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI)**

En el área de redes de computadoras, los protocolos se pueden dividir en varias categorías. El modelo de referencia OSI es una de las opciones que existe para realizar la división por categorías de un protocolo y este es uno de lo más usados.

Como su nombre lo indica, este es sólo un modelo de referencia ya que no especifica el protocolo que se debe utilizar en cada una de las capas por las cuales está conformado.

Este modelo está constituido por siete capas, cada una de ellas con una función específica y se distribuyen de la siguiente manera:



**Figura 3.3** Capas de modelo OSI

A continuación se da una breve explicación de cada una de las capas del modelo OSI:

- **Capa 7 – Capa de aplicación:** ¿Qué se desea hacer?

Es la última capa que forma parte del modelo OSI, es una de las dos capas que permiten la interacción del usuario con la red. Proporciona la interfaz al usuario para interactuar con el sistema y ofrece un acceso a la red de forma general.

- **Capa 6 – Capa de presentación:** ¿Cómo me entenderá el otro proceso?

Esta capa toma los datos de la capa de aplicación y los convierte a un formato que puede ser leído por otros componentes de la red. Esta capa funciona como un tipo de codificador y decodificador.

- **Capa 5 – Capa de sesión:** ¿Con quién y cómo se establecerá la comunicación?

Es la capa encargada de establecer y gestionar el enlace de comunicación entre el emisor y el receptor.

- **Capa 4 – Capa de transporte:** ¿Dónde está el otro proceso?

Esta capa se encarga de controlar el flujo de datos entre los nodos que establecen una comunicación. Además, esta capa debe encargarse de entregar los datos sin errores y en un orden específico. Evalúa también el tamaño de los paquetes de datos, para que estos sean compatibles con las capas inferiores.

- **Capa 3 – Capa de red:** ¿Cómo se llega al otro proceso?

Además de guiar los paquetes de datos, esta capa debe entregarlos. La ruta que deben seguir los datos es determinada por esta capa, lo mismo que el intercambio efectivo de los mismos dentro de la ruta.

En esta capa es donde ocurre el proceso en que las direcciones lógicas pasan a convertirse en direcciones físicas.

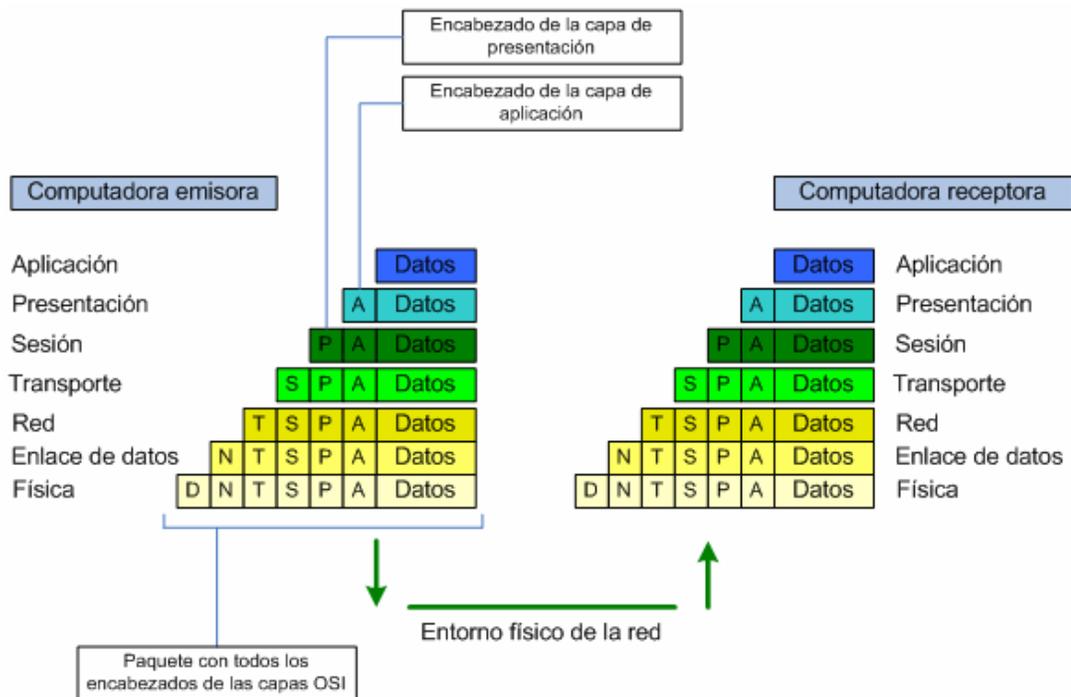
- **Capa 2 – Capa de enlace de datos:** ¿Cómo ir a través de esa ruta?

En esta capa del modelo los paquetes de datos son ubicados en tramas las cuales las define la arquitectura de la red. Esta capa se encarga de desplazar los datos por el enlace físico de comunicación hasta el receptor.

- **Capa 1 – Capa física:** ¿Cómo se puede conectar al medio?

Esta en conjunto con la capa de aplicación son las únicas dos capas con las que interactúa el usuario. Aquí las tramas de datos provenientes de la capa de enlace de datos se convierten en una secuencia única de bits que pueden transmitirse por el entorno físico de la red. En el receptor, es la encargada de recibir esa secuencia única de bits.

Como se explica en [8] el modelo OSI ofrece un modelo teórico que explica el modo en que se desplazan los datos desde una computadora emisora a otra computadora receptora como se muestra a continuación:



**Figura 3.4** Visualización de los encabezados de las capas OSI

Los datos bajan por las diferentes capas de la pila OSI de la computadora emisora y suben por la pila OSI de la computadora receptora. Los encabezados que son parte de las diferentes capas se van eliminando a medida que los datos suben por la capa OSI de la computadora receptora.

### 3.2.2. Topologías físicas de red

La topología física de una red se refiere a la disposición que van a tener los dispositivos que la conforman (en este caso los esclavos, repetidores y maestros) geográficamente en un área determinada.

Dentro de las topologías físicas de red más destacadas se encuentran: la de bus, la topología en anillo, en estrella, en malla y la de árbol. Es posible encontrar variaciones de estas topologías ya sea de forma independiente o por medio de combinaciones entre las mismas.

Las topologías físicas están identificadas por un tipo de conexión. Básicamente, en una red pueden haber dos tipos de conexión: la conexión punto a punto y la conexión multipunto a punto.

### Conexión punto a punto

Una conexión de este tipo representa un enlace que está caracterizado por la conexión física entre dos unidades de trabajo hasta alcanzar su destino, estando conectadas entre ellas y nadie más.

### Características

- Poseen un costo relativamente bajo.
- Admite la utilización de diferentes medios físicos de transmisión.
- Es de fácil implementación.



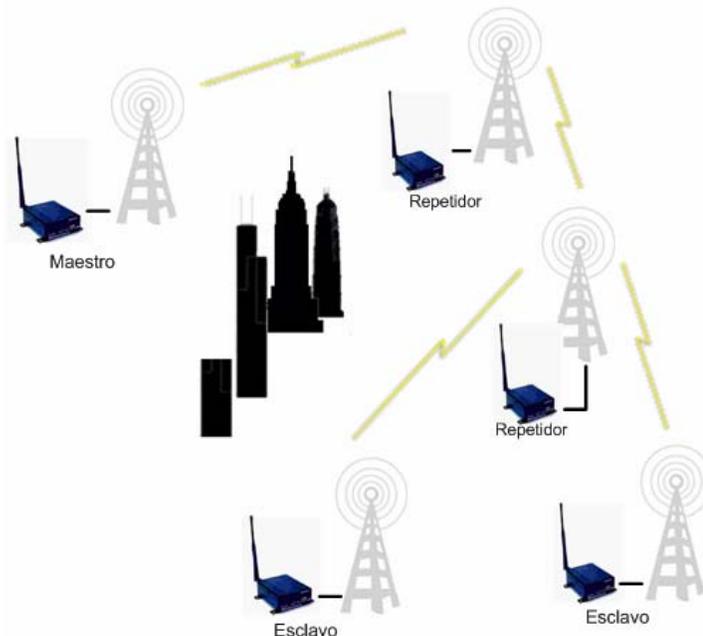
**Figura 3.5** Conexión punto a punto

## Conexión multipunto a punto

Esta conexión posee la característica fundamental de que existe un origen y múltiples destinos. Las líneas del tipo multipunto se utilizan para reducir el número de líneas requeridas para conectar estaciones y minimizar el coste de las mismas. En ocasiones se requiere implementar conceptos de control de acceso a estas líneas para evitar conflictos de uso de canal ya que hay un único medio de comunicación para todas las unidades. Una red de este tipo llega a ser generalmente más compleja.

### Características

- Economiza líneas de conexión, módems, adaptadores, puertos del procesador.
- El sistema opera mediante la técnica del monitoreo.
- Permite la flexibilidad de crecimiento.
- El software y hardware son relativamente complejos.

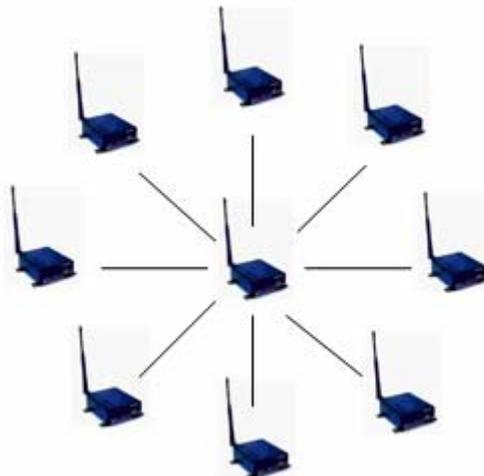


**Figura 3.6** Conexión multipunto a punto

La topología de red para la cual se configuró el sistema es una variación de la topología punto - multipunto, conocida como punto – multipunto con repetidor o punto - multipunto jerárquica. A continuación se brinda una explicación breve de ambas topologías.

### **Topología punto - multipunto**

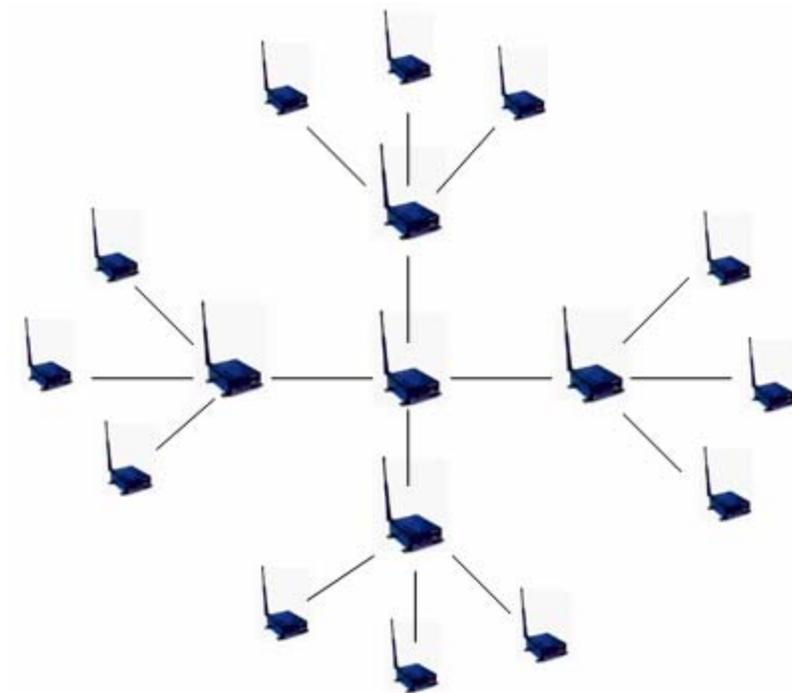
En configuración punto - multipunto todas las unidades están conectadas a una unidad central. Esa unidad central o concentrador manipula la mayor cantidad de datos, procesos de enrutamiento y hasta más capacidad de toma de decisiones que las demás unidades. Presenta una gran ventaja ya que si uno de los enlaces deja de funcionar eso no afecta a las demás unidades; sin embargo, si la unidad central falla toda la red también falla. En la siguiente figura se muestra un diagrama de esta topología:



**Figura 3.7** Topología punto - multipunto

### Topología punto – multipunto con repetidor

Básicamente posee la misma estructura que la topología punto - multipunto, con la diferencia de que cada unidad que se comunica con el concentrador central es el centro de otra estrella, y con esto se extiende la longitud y el tamaño de la red. Una ventaja de esta topología es que limita la cantidad de dispositivos que se deben intercomunicar con el concentrador central. La estructura es sumamente jerárquica y con ello se busca que el manejo de datos sea local.



**Figura 3.8** Topología punto – multipunto con repetidor

### **3.2.3. Espectro expandido por saltos de frecuencia (frequency hopping spread spectrum, FHSS)**

Algunos sistemas de radio control y telemetría ofrecen operación libre de problemas por la incorporación de esta sofisticada técnica de espectro expandido. Los mismos han incorporado esta técnica específicamente para el medio industrial en módulos de control remoto y telemetría.

Los sistemas tradicionales de radio control mandan una señal de baja potencia en una frecuencia de radio. Usualmente utilizan técnicas de FM para alta calidad de transmisión y un protocolo apropiado de datos para seguridad. Esta es una solución adecuada si usted es el único usuario en la cercanía donde se instaló el sistema.

En las áreas congestionadas, los radios que trabajan en FM son muy susceptibles a interferencia. Cualquier otro usuario que se encuentre utilizando la misma frecuencia puede corromper o bloquear el enlace de radio. ¡Nadie tiene el monopolio sobre una frecuencia específica!

*“En el espectro expandido por salto de frecuencia, la densidad espectral de la portadora modulada por datos se amplía cambiando la frecuencia de la portadora a una velocidad llamada tasa de salto.”<sup>1</sup>*

El objetivo de estos sistemas es expandir en forma intencional el espectro para lograr disminuir la densidad espectral transmitida hasta un nivel que se encuentre por debajo del nivel de ruido térmico de cualquier receptor que no se desee que escuche el mensaje. Con esto se logra que el sistema se pueda proteger por si mismo ante fuentes de interferencia que se presenten durante la transmisión.

---

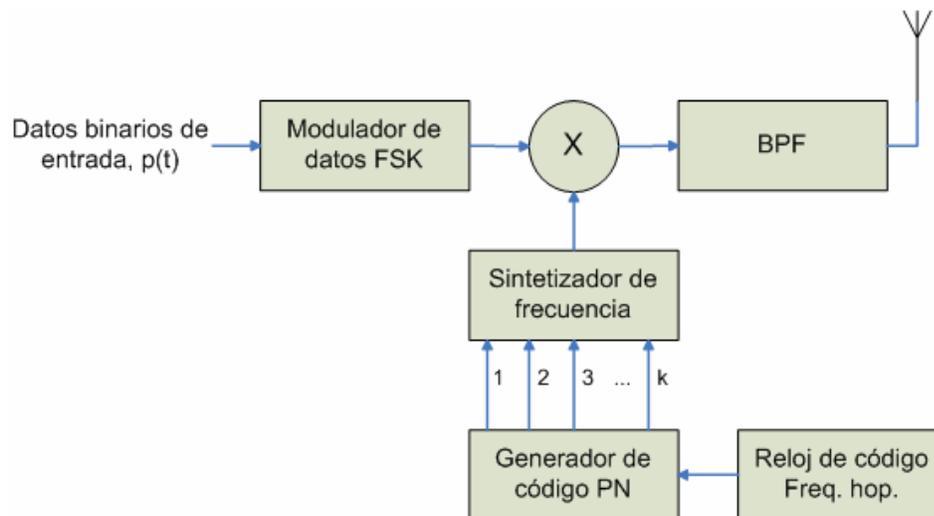
<sup>1</sup> Stremler, F.G. Introducción a los sistemas de comunicación. 3ra edición. Addison-Wesley Iberoamericana. Página 655.

Según lo que explica el autor en [4] es muy común encontrar que los sistemas de espectro expandido por saltos de frecuencia utilicen la conmutación de frecuencia para realizar la modulación de datos. Además, dice que si se utiliza FSK (frequency shift keying) binaria, la señal de espectro expandido por saltos de frecuencia se puede escribir como:

$$X(t) = A * \text{sen} \left\{ \int_0^t [w_c + (\Delta w)p(t)] dt \right\} \quad (1)$$

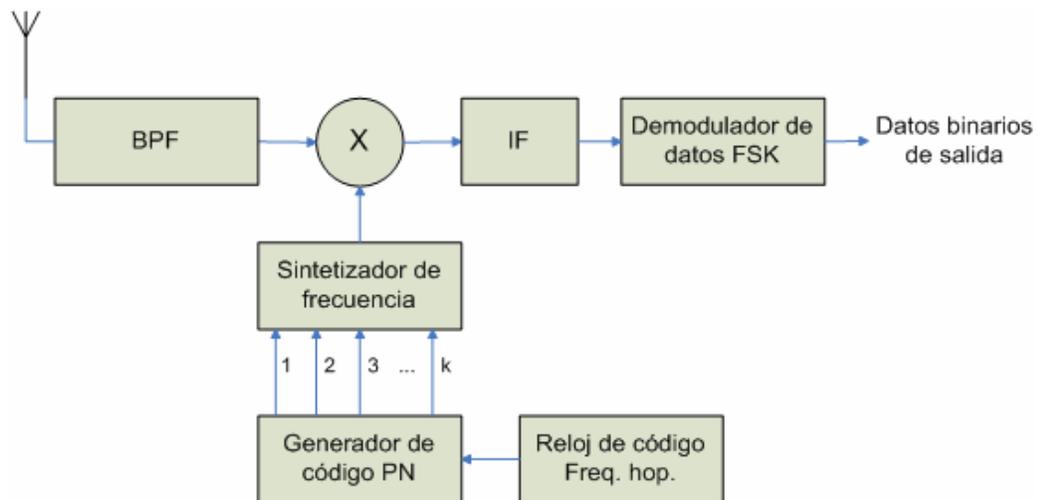
donde  $\Delta w$  es el desplazamiento de frecuencia de la portadora y  $p(t)$  es una función de conmutación binaria con estados posibles  $\pm 1$ . La frecuencia de la portadora,  $w_c$ , en la señal por salto de frecuencia es una constante para un intervalo  $T_h$  y luego cambia a otra frecuencia (que fue preseleccionada) para el siguiente intervalo de tiempo; la velocidad a la que se realizan los cambios se llama tasa de salto de frecuencia,  $f_h$ .

A continuación se muestra un diagrama de bloques de un sistema de modulación para generar la señal de espectro expandido con salto de frecuencia:



**Figura 3.9** Modulación de espectro expandido por salto de frecuencia (Tomado de [4])

De acuerdo a lo expuesto, el sintetizador de frecuencia produce una onda senoidal de amplitud constante cuya frecuencia está determinada por el código digital suministrado al sintetizador. Se dice que este es un componente esencial de los sistemas de espectro expandido.



**Figura 3.10** Demodulación de espectro expandido por salto de frecuencia (Tomado de [4])

En el receptor, el salto de frecuencia se elimina mezclando la señal de salto de frecuencia con la señal de un oscilador local que también salta en forma sincronizada con la señal transmitida lo cual produce una frecuencia intermedia que luego se demodula para obtener los datos transmitidos.

*“Una ventaja del espectro expandido de salto de frecuencia es que permite tener por separado un control de la tasa de salto y del ancho de banda. Eligiendo la frecuencia portadora de un conjunto de  $2^k$  frecuencias, cada una espaciada por el ancho de banda del espectro de datos modulados.”<sup>2</sup>*

<sup>2</sup> Stremier, F.G. Introducción a los sistemas de comunicación. 3ra edición. Addison-Wesley Iberoamericana. Página 656.

Según lo anterior existe un factor de expansión del ancho de banda para el caso del espectro expandido, el cual va a estar dado por  $2^K$  veces al ancho de banda que se necesita para la modulación de datos sin expansión del espectro.

En cuanto a la tasa de salto, como ya se mencionó se puede elegir de forma independiente del ancho de banda. Existen los sistemas de “salto lento” y los sistemas de “salto rápido”.

Un sistema de “salto lento” es aquel en el que la tasa de salto de frecuencia  $f_h$  es menor o igual a la tasa de bits de datos o tasa de símbolos  $f_b$  para FSK binaria.

Mientras que un sistema de “salto rápido” es aquel en el que  $f_h > f_b$  para FSK binaria. Esto implica que cada símbolo transmitido puede contener alguna diversidad de frecuencia y con lo cual se logra tener el mínimo de interferencia.

Se explica que la ganancia de procesamiento de un sistema de espectro expandido viene dada por la razón entre el ancho de banda del espectro expandido y el mínimo ancho de banda requerido para los datos:

$$G_p = \frac{B_{ss}}{B_{dm}}$$

donde  $G_p$  es la ganancia de procesamiento,  $B_{ss}$  es el ancho de banda de espectro esparcido y  $B_{dm}$  es el ancho de banda mínimo requerido para datos.

*“La ganancia de procesamiento es una medida de la inmunidad relativa del sistema a la interferencia.”<sup>3</sup>*

En el caso de estos sistemas como se mencionó anteriormente la energía está distribuida en  $2^K$  bandas espectrales en vez de ser en una banda espectral de modulación, es por esto que se puede aproximar la ganancia de procesamiento del sistema  $G_p$  a  $2^K$ .

Se puede ver claramente que para algún agente perturbador provoque que el receptor tenga el mismo desempeño que sin espectro expandido, el mismo debe colocar una energía uniforme a lo largo de  $2^K$  bandas.

---

<sup>3</sup> Stremler, F.G. Introducción a los sistemas de comunicación. 3ra edición. Addison-Wesley Iberoamericana. Página 656.

## **Capítulo 4: Procedimiento metodológico**

### ***4.1. Reconocimiento y definición del problema***

#### **4.1.1. Generalidades**

El robo de cable es una actividad con fines de lucro que se presenta muy frecuente en diferentes zonas del país. El ICE es el principal afectado con este tipo de delincuencia, ya que la compra de cable para estar reparando las conexiones implica gastos millonarios para esta institución.

El Proyecto Geotérmico Miravalles no es la excepción ante este problema, ya que el cableado que permite la comunicación entre los pozos y los satélites es robado con frecuencia o sufre daños por los animales roedores que lo muerden y esto ocasiona que el ICE tenga que estar cambiando o reparando frecuentemente dicho sistema de comunicación.

Anteriormente se ha planteado la posibilidad de desarrollar un sistema de comunicación inalámbrica entre los pozos y los satélites para la transmisión de las señales analógicas y digitales, pero por motivos de presupuesto y por no tener un diseño conciso para el sistema no se ha podido desarrollar el proyecto.

Existen aspectos que se desean cambiar y mejorar del sistema de comunicación actual, así por ejemplo, individualizar las alarmas presentes en el pozo, ya que actualmente se trabaja con un resumen de alarmas y no es posible conocer con exactitud cual de ellas se activó, por lo tanto, este sistema se quiere cambiar por otro que indique de manera independiente cual de las cuatro alarmas se activó.

#### **4.1.2. Descripción sintética del problema**

“La pérdida de información de la señal de presión y de las alarmas que se encuentran en los pozos, a causa de fallos y daños en el sistema de comunicación actual”.

#### **4.2. Obtención y análisis de información**

El análisis de la información se realizó de acuerdo al planeamiento de las actividades en el cronograma de trabajo establecido.

Como el diseño de la solución involucra aspectos diversos desde una investigación para conocer acerca de las tecnologías de transmisión inalámbricas que cumplen con los requerimientos de la solución, hasta el diseño de rutinas en un PLC para el manejo de datos; el análisis de la información se realizó de acuerdo a los requerimientos de diseño que se establecían en cada una de las etapas de diseño.

El conocer de forma específica el estado actual del sistema de comunicación fue una de las actividades fundamentales para orientar el proyecto, para esto fue muy importante la contribución de los funcionarios del Departamento de Mantenimiento Instrumentación de Campo del Centro de Servicio Recursos Geotérmicos Miravalles.

#### **4.3. Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución**

La solución que se propone en el capítulo 5 de este informe surgió a partir de la evolución de una propuesta más simple. Durante el planteamiento del proyecto por parte del Ing. Rodrigo Mora no se tenía una idea concisa de cual sería la posible solución y todos los aspectos que esta incluye, sino que se necesitó madurar muy bien la idea y con ello plantear un diseño que fuera el más adecuado.

En este caso la solución desarrollada cambia por completo el sistema actual de comunicación, ya que se implementa un enlace de radiofrecuencia que además de eliminar el cableado existente incluye la creación de un protocolo de comunicación y de una visualización más específica de los datos.

#### ***4.4. Implementación de la solución***

El sistema diseñado fue evaluado de forma completa por un período de 30 días con lo cual fue posible comprobar la viabilidad de la solución implementada.

Para la realización de las pruebas se tomaron las señales de dos pozos que se encuentran a una distancia aproximada de 500m respecto a la estación separadora.

Debido a que no se contaba con antenas de alta ganancia para el radio módem en el satélite fue necesaria la utilización de un repetidor que permitiera establecer con mayor seguridad el enlace entre los pozos y el satélite.

La realización de estas pruebas fue fundamental para prever problemas cuando el sistema fuera montado en el campo debido a que si se presentaba algún contratiempo era posible analizar el problema y plantear la forma de solucionarlo, ya que el tiempo lo permitía. Sin embargo, durante el período de prueba el sistema funcionó de acuerdo a los objetivos planteados con lo cual se pudo corroborar que el diseño fue exitoso.

#### ***4.5. Reevaluación y rediseño***

La utilización de radio módems (o módems inalámbricos) con un costo menor a los usados en el diseño e implementación del sistema es el aspecto más relevante a tomar en cuenta para un caso de reevaluación y rediseño del sistema. Además, se recomienda activar más señales analógicas y digitales en tarjetas de adquisición de datos, para lo cual se necesita realizar unos pequeños cambios en el circuito impreso.

## **Capítulo 5: Descripción detallada de la solución**

### ***5.1. Análisis de soluciones y selección final***

#### **5.1.1. Generalidades**

El sistema diseñado está conformado por dos partes: el sistema prototipo de transmisión en el pozo y el sistema prototipo de recepción en la estación separadora. En este sentido la estructura general de la solución no cambia aunque la solución en el pozo o en el satélite varíe.

Al diseño de estas dos soluciones se añade la elección de la tecnología de transmisión. Para esto fue indispensable conocer la tecnología actual con que se cuenta en los pozos y los satélites en los cuales se puede implementar un sistema inalámbrico para transmitir las señales en cuestión. Esto debido a que la forma de comunicarse con los dispositivos que se relacionan con las señales a transmitir fue un aspecto muy importante a tomar en cuenta a la hora de realizar el diseño.

#### **5.1.2. Tecnologías de transmisión**

La elección de la tecnología de transmisión fue muy importante ya que esta orientó en gran parte el diseño de la solución, por lo tanto investigar acerca de esta fue en una de las primeras tareas que se realizó.

A continuación se muestra las principales características requeridas como parámetros mínimos para la implementación del sistema:

**Tabla 5.1** Características buscadas en la tecnología de transmisión

<b>Características</b>	<b>Requisitos</b>
Alcance	10km o más
Puerto de Comunicación RS232 y extras	Un puerto RS232
Transmisión RF	Enlace seguro y rápido
Consumo de potencia	Bajo (corriente menor a 0.5A)
Alimentación	Rango amplio Ej. 5-30V
Modos de operación	Punto a punto, punto a multipunto, repetidor
Potencia de transmisión	Variable, hasta 1W

En la empresa se solicitó tomar en cuenta equipos de comunicación inalámbricos que contaran con entradas analógicas de 4 a 20mA y entradas digitales, por lo tanto se investigó acerca de ese tipo de equipos.

Se encontró que sí existen módulos que permiten transmitir señales digitales y analógicas (4 a 20mA). Sin embargo, la diferencia en precio respecto a los módems inalámbricos es de varios cientos de dólares, por lo que implementar un sistema con este tipo de extensor inalámbrico resulta mucho más costoso que diseñando un sistema de adquisición de datos y transmitiéndolos mediante un radio módem.

Entre las características que se encontraron en estos extensores destacan las siguientes:

**Tabla 5.2** Características de los extensores inalámbricos

<b>Característica</b>	<b>Especificación</b>
Alimentación	10-30V
Resolución ADC	8 – 16 bits
Señales Analógicas	Una entrada y salida de 4 a 20mA
Señales Digitales	Dos entradas y salidas digitales
Alcance línea de vista	5 a 10 km
Frecuencia	900/2400 MHz

### **5.1.3. Módems inalámbricos**

En las siguientes tablas se muestran los datos más relevantes para el diseño de la solución de los radio módems encontrados:

**Tabla 5.3** Datos técnicos de los módems inalámbricos

	<b>905U-D</b>	<b>RF401, RF411, RF416</b>	<b>RF115</b>	<b>FGR-115MB</b>
				
<b>Frecuencia (MHz)</b>	902-928	910 a 918, 920 a 928, 2450 a 2460	902-928	902-928
<b>Potencia de TX (W)</b>	1	0.1	0.1 a 1 (ajustable)	0.1 a 1
<b>Sensibilidad RX (dBm)</b>	-120	-110	-110	-108
<b>Rango de alcance en línea de vista (km)</b>	32	16 (con antena de alta ganancia)	32	96
<b>Modos de operación</b>	Punto-a-punto, punto-a-multipunto	Punto-a-punto, punto-a-multipunto	Punto-a-punto, punto-a-multipunto	Punto-a-punto, punto-a-multipunto, repetidor
<b>Interfase para datos</b>	RS-232 – RS485	RS-232	RS232	RS-232
<b>Modulación</b>	Spread Spectrum	Spread Spectrum	Spread Spectrum	Spread Spectrum, GFSK
<b>Alimentación (V)</b>	10 a 30	9 a 16	12	6-30
<b>Consumo de potencia (mA)</b>	350 a 12V	75	300	500 a 12V
<b>Compañía que fabrica</b>	DataTaker	Campbell Scientific Inc.	Black Box Corporation	FreeWave Technologies
<b>Costo aproximado</b>	-	-	\$1 900 c/u	\$1 350 c/u

**Tabla 5.4** Datos técnicos de los módems inalámbricos (continuación)

	<b>Hopnet 591</b>	<b>PLR5000 (PlantLinc)</b>	<b>RDM300</b>	<b>SRM6000</b>
				
<b>Frecuencia (MHz)</b>	902-927	902-928	915-928	902-928
<b>Potencia de TX (W)</b>	0.01 a 0.5 (configurable por software)	0.2 máx.	1	0.1 a 1 en 10 pasos configurables
<b>Sensibilidad RX (dBm)</b>	-104	-106	-106	-108
<b>Rango de alcance en línea de vista (km)</b>	32	6.4	8	40
<b>Modos de operación</b>	Punto-a-punto, punto-a-multipunto	Punto a punto, punto a multipunto, Repetidor	Punto a punto y multipunto	Punto-a-punto, punto-a-multipunto, Repetidor
<b>Interfase para datos</b>	RS232	RS232	RS232	RS232. Asíncronos, 10 u 11 palabras bit. Opción de RS422 y AE485
<b>Modulación</b>	GFSK	GFSK	GFSK	Spread Spectrum, GFSK 144-188 kbps
<b>Alimentación (V)</b>	9-30	10-18	9-28	10-18
<b>Consumo de potencia (mA)</b>	600	650 a 12V	1000 a 12 V	650 a 12V y 1W tx
<b>Compañía que fabrica</b>	CIRRONET	Data-Linc Group	Orbit communications	Data-Linc Group
<b>Costo aproximado</b>	-	-	-	\$300 c/u

**Tabla 5.5** Datos técnicos de los módems inalámbricos (continuación)

	<b>Spectra 910</b>	<b>Communicator II</b>	<b>9XTend-PKG-R/U/E</b>	<b>CL4490-1000 (ConnexLink)</b>
				
<b>Frecuencia (MHz)</b>	902-928	902-928 2400-2483.5	902-928	902-928
<b>Potencia de TX (W)</b>	1 (configurable) (30dBm máx)	0.1 a 1 (30dBm máx)	0.1 a 1 (30dBm máx)	1
<b>Sensibilidad RX (dBm)</b>	-108	-108	-110	-100
<b>Rango de alcance en línea de vista (km)</b>	96 (con antena de alta ganancia)	96 (con antena de alta ganancia)	64 (con antena de alta ganancia)	32
<b>Modos de operación</b>	Punto-a-punto, punto-a-multipunto, Repetidor, TDMA, Multimaster	Punto-a-punto, punto-a-multipunto, Repetidor, Esclavo, Base, TDMA	Punto-a-punto, punto-a-multipunto	Punto-a-punto, punto-a-multipunto
<b>Interfase para datos</b>	Asíncrona RS-232	RS-232/485/422	RS232, USB, Ethernet	RS-232 – RS485
<b>Modulación</b>	Spread Spectrum	Spread Spectrum, GFSK	FSK	FHSS FSK
<b>Alimentación (V)</b>	10 a 30	6-30	7-28	7-18
<b>Consumo de potencia (mA)</b>	450 max a 12V y 1W Potencia Tx	250 a 12V potencia de Tx.	110-900	400
<b>Compañía que fabrica</b>	Microhard Systems Inc.	Intuicom Inc.	MaxStream, Inc.	AEROCOMM
<b>Costo aproximado</b>	\$650 c/u	-	\$300 c/u	\$225 par

**Tabla 5.6** Datos técnicos de los módems inalámbricos (continuación)

	<b>SMR6100</b>	<b>OMWT-XREC-SER-900</b>	<b>805U (elpro)</b>	<b>SRM6210E</b>
				
<b>Frecuencia (MHz)</b>	2400-2483.5	900	869.4 - 869.65	902-928
<b>Potencia de TX (W)</b>	0.5 (programable)	0.1 a 0.5	0.5	0.1 a 1 (ajustable)
<b>Sensibilidad RX (dBm)</b>	-107	-110	-106	-108
<b>Rango de alcance en línea de vista (km)</b>	24	32 (con antena YAGI)	5	40
<b>Modos de operación</b>	Punto-a-punto, punto-a-multipunto, repetidor	Punto-a-punto, punto-a-multipunto, no sirve como repetidor se ocupa otro diferente	Punto-a-punto, punto-a-multipunto	Punto-a-punto, punto-a-multipunto
<b>Interfase para datos</b>	RS-232	RS-232	RS232 – RS485	Ethernet
<b>Modulación</b>	Spread Spectrum, GFSK	Spread Spectrum, GFSK	Spread spectrum	GFSK
<b>Alimentación (V)</b>	10.5-18	6-24	10 a 30	10 a 28
<b>Consumo de potencia (mA)</b>	650m a 12V	100mW	350 a 12V	700 a 12V
<b>Compañía que fabrica</b>	Data-Linc Group	omega	ELPRO Technologies	Data-Linc Group
<b>Costo aproximado</b>	-	\$400 c/u	-	-

Como se puede observar en las tablas anteriores se encontró una cantidad suficiente de módems como para tener un criterio adecuado y poder decidir cual es la mejor opción para la empresa y para el diseño del sistema.

Es importante señalar que los precios que se muestran son directamente con los encargados de ventas o mediante páginas que se dedican a la venta de este tipo de equipos, por lo tanto, el precio real de los equipos en el país es mayor.

A partir del análisis comparativo de los sistemas se revisó más detalladamente los sistemas de las marcas MaxStream Inc., Microhard Systems Inc. y AEROCOMM.

Se investigó en la planta del Proyecto Geotérmico Miravalles y se encontró con que ahí habían utilizado un equipo que cumple con los requerimientos de los módems inalámbricos que se estaban buscando, por lo tanto, fue posible conseguir el equipo y se decidió que como ya se contaba con ese equipo era mejor realizar el diseño tomando en cuenta estos módems para así poder llevar a cabo las pruebas correspondientes para el sistema.

El equipo proporcionado para la realización de las pruebas es el Spectra 910 de la marca Microhard Systems Inc.

#### **5.1.4. Extensores inalámbricos**

En la siguiente tabla se muestran los datos tabulados de los extensores inalámbricos encontrados:

**Tabla 5.7** Datos técnicos de los extensores inalámbricos

	<b>PLR580D-DA</b>	<b>AMETEK Drexelbrook 5605715-X-DRX</b>	<b>RAD-ISM-2400-UD</b>
			
<b>Tipo</b>	Extensor inalámbrico	Extensor inalámbrico	Extensor inalámbrico, unidireccional
<b>Frecuencia (MHz)</b>	902-928	902-928	2400
<b>Potencia de TX (W)</b>	0.2 máx. (23dBm)	1	1
<b>Sensibilidad RX (dBm)</b>	-108	-110	-110
<b>Rango de alcance en línea de vista (millas)</b>	4	4 a 5 - omni antena 20 - Yagi antena	4 a 5
<b>Modos de operación</b>	Punto a punto, punto a multipunto, repetidor	Punto a punto	Punto a punto
<b>Interfase para comunicación</b>	RS-232	Ninguna	Ninguna
<b>Modulación</b>	Spread spectrum GFSK	Spread spectrum	Spread spectrum
<b>Señales</b>	8 entradas y salidas, discretas y análogas	1 entrada y salida analógica de 4-20mA 2 entradas y salidas digitales (expandible)	1 entrada y salida analógica y dos entradas y salidas digitales (expandible)
<b>Resolución ADC</b>	8 bits	16 bits	-
<b>Alimentación (V)</b>	10.5 - 18	9 - 30	12 - 30
<b>Consumo de potencia (mA)</b>	660 máx. en transmisión	200 máx. en transmisión, más módulos extra	500 máx
<b>Compañía que fabrica</b>	Data-Linc Group	Ametek	Phoenix Contact, SA
<b>Costo aproximado</b>	-	\$1 500 (Tx & Rx)	\$1 600 (Tx & Rx)

**Tabla 5.8** Datos técnicos de los extensores inalámbricos (continuación)

	<b>WiPS 200 Series</b>	<b>105U-1</b>
		
<b>Tipo</b>	Extensor inalámbrico, transceiver	Extensor inalámbrico
<b>Frecuencia (MHz)</b>	902-928	405 - 490 / 220 – 230 / 869
<b>Potencia de TX (W)</b>	1	0.5
<b>Sensibilidad RX (dBm)</b>	-110	-115
<b>Rango de alcance en línea de vista (millas)</b>	4-5 (Antena Omni) 20 (Antena Yagi)	6
<b>Modos de operación</b>	Punto a multipunto	Punto a multipunto
<b>Interfase para comunicación</b>	-	RS232
<b>Modulación</b>	Spread spectrum	-
<b>Señales</b>	1 entrada y salida analógica y dos entradas y salidas digitales, expandible	4 entradas y salidas digitales y 2 entradas y salidas análogas
<b>Resolución ADC</b>	16 bits	15 bits
<b>Alimentación (V)</b>	9 - 30	15 - 30
<b>Consumo de potencia (mA)</b>	75 a 24V	600
<b>Compañía que fabrica</b>	SIEMENS	ELPRO Technologies
<b>Costo aproximado</b>	-	-

### **5.1.5. Ventajas de radio módem**

- La principal ventaja de utilizar radio módem es el ahorro económico que se puede obtener, ya que el costo de estos es aproximadamente la mitad de lo que cuesta un extensor inalámbrico en el caso de los módems utilizados.
- Otra ventaja que presenta este equipo, es que en los satélites solo se necesita uno de ellos para recibir información de diversos pozos, lo cual implica una solución compacta en el satélite.
- Se pueden transmitir más señales digitales sin necesidad de comprar módulos de extensión, ya que las tarjetas se diseñaron para transmitir cinco variables digitales y si fuera necesario, el diseño puede extenderse hasta más de 10 entradas.
- Se pueden transmitir más señales analógicas sin necesidad de comprar módulos de extensión, ya que las tarjetas se diseñaron para transmitir tres variables analógicas.
- Todas las señales se transmiten mediante una sola tarjeta y un radio módem.

### **5.1.6. Desventajas del radio módem**

- Necesita ser configurado (programado).

### **5.1.7. Ventajas del extensor**

- No necesita ningún tipo de programación.
- Puede ser menos delicado en comparación con colocar y cablear las tarjetas de adquisición de datos.

### **5.1.8. Desventajas de extensor**

- Estos equipos cuestan el aproximadamente el doble que los radio módems.
- Se necesita un extensor en el satélite por cada extensor en el pozo. Esto implica más equipos en el satélite y una solución menos compacta.
- La mayoría de los módulos solo transmite una señal analógica y una o dos señales digitales, lo cual no cumple con los requerimientos de la solución.
- Si se quisiera transmitir más señales se deben comprar módulos de expansión y estos módulos harían cada vez más grande y cara la solución.
- Se necesitan módulos por aparte para transmitir señales analógicas y digitales.

La elección de la tecnología de transmisión se hizo de acuerdo a las ventajas y desventajas que presentan ambos tipos de módulos.

Tanto los extensores inalámbricos como los radio módems necesitan tener antenas que estén colocadas en línea de vista entre para poder establecer un enlace, dado que así lo especifica el fabricante en sus hojas de datos. Por lo tanto, este es un parámetro con el que ambos deben cumplir.

Debido a los aspectos anteriores se decidió que la mejor solución era la de utilizar un módem inalámbrico para transmitir las señales y diseñar por aparte las tarjetas de adquisición de datos.

### **5.1.9. Solución en el pozo**

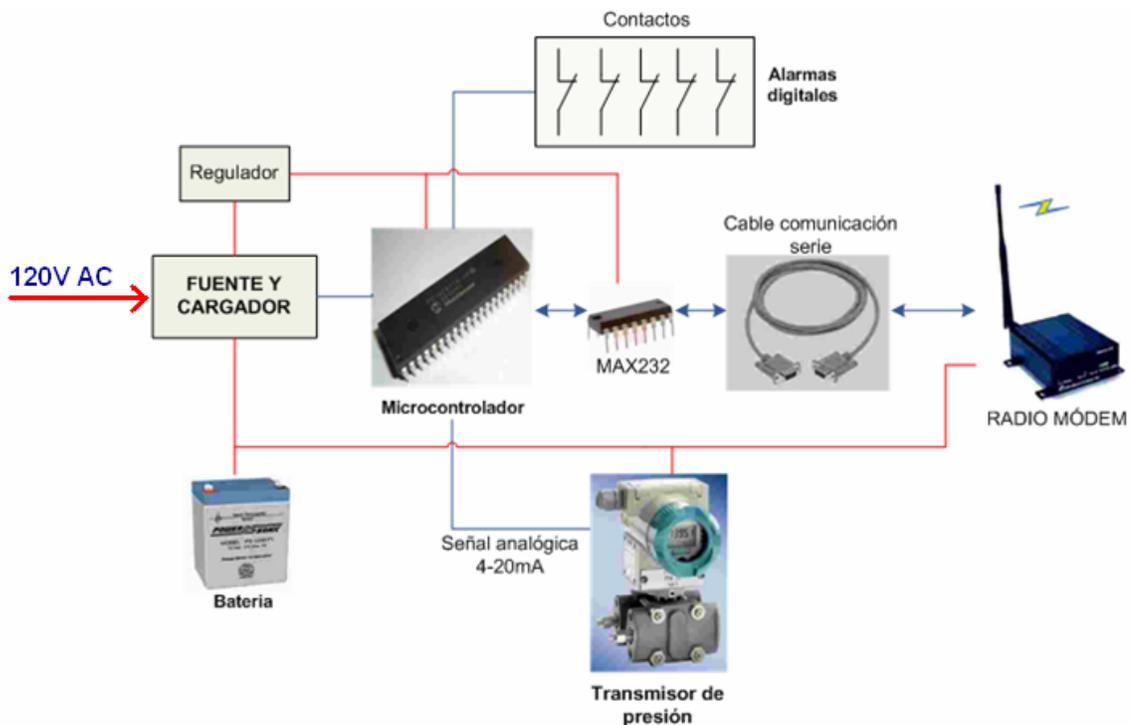
Para diseño del sistema de transmisión en el pozo existían básicamente dos opciones: utilizar un extensor inalámbrico ó un radio módem para transmitir los datos.

En el caso de utilizar un extensor inalámbrico el mayor inconveniente era por el costo que tienen los mismos ya que en comparación con un módem inalámbrico este puede ser hasta 4 veces más caro. Básicamente por este motivo fue que se decidió realizar la transmisión de datos mediante un radio módem.

Debido a lo anterior se tuvo que diseñar una tarjeta de adquisición de datos que cuenta con un microcontrolador PIC16F877A. Se utilizó este microcontrolador debido a que posee puerto de comunicación RS232 y entradas analógicas y digitales suficientes para cumplir con los requerimientos establecidos por la empresa. No se utilizó un microcontrolador más sofisticado porque en los pozos no existe tecnología tal como para requerirlo, y en el satélite el PLC solamente posee puertos de comunicación RS232.

Se diseñó una fuente de alimentación con su respectivo sistema de respaldo para suplir de energía la tarjeta de adquisición de datos, el módem inalámbrico, el transmisor de presión y para cargar la batería.

A continuación se muestra un esquema de la solución en el pozo:



**Figura 5.1** Diagrama de la solución en el pozo

Como se puede ver en el diagrama anterior, el microcontrolador es el centro de control en el pozo ya que este es el que interactúa de forma indirecta con el PLC. El mismo recolecta los datos y los envía al módem inalámbrico. La alimentación del sistema está respaldada con una batería de 12V en caso de que falle la red.

### 5.1.10. Solución en el satélite

Para el caso del sistema de recepción de datos en el satélite se analizaron varias opciones para el manejo de los datos. El detalle estuvo en como ingresarían los datos al PLC una vez que fueran recibidos por el radio módem en el satélite.

Inicialmente se planteó una solución que permitiera el ingreso de los datos por las mismas entradas digitales y analógicas del PLC. Para poder lograr esto se necesita de un decodificador que se comunique con el módem, tome los datos que son enviados desde los pozos y los separe en un lazo de 4 a 20mA y en señales binarias que pueden tener el valor de 0 ó 24V.

La principal desventaja del método anterior es que incluye la utilización de más componentes desde decodificadores, que en este caso podían ser microcontroladores, hasta los circuitos para conversión de digital a analógico. El incluir más componentes hace que el sistema sea menos exacto y más vulnerable a la presencia de fallos o errores por lo que esta opción quedó descartada.

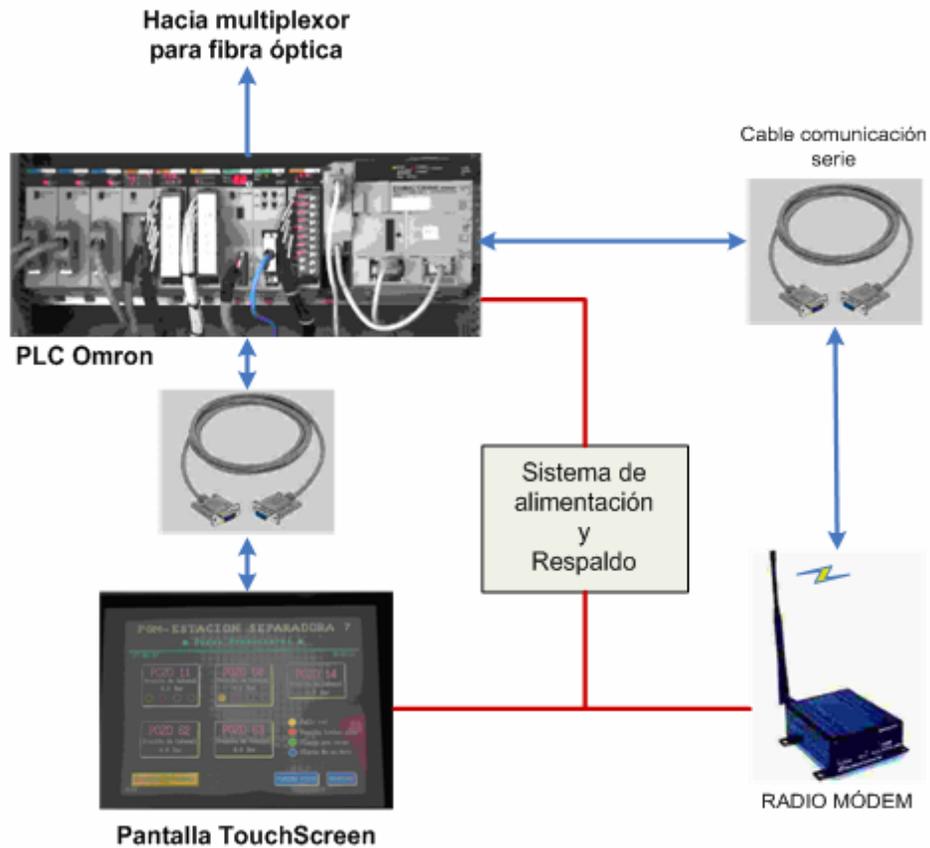
La otra opción que se planteó fue la de utilizar las entradas digitales del PLC como un bus de datos. En este caso también se necesita de la utilización de un decodificador que reciba los datos del módem inalámbrico y los transforme a un bus de datos con niveles de tensión de 0 y 24V. El mayor problema con esta solución es que el PLC no contaba con suficientes entradas digitales como para crear un bus de datos de ocho bits, por lo tanto esta solución no era factible.

Aunque se conocía que el PLC cuenta con puerto RS232, esta no era una opción tan segura de implementar debido a que dicho puerto sólo se había usado para programar el PLC y no se tenía conocimiento si se podía manejar como un puerto disponible para la transmisión de otro tipo de datos. Fue necesario investigar el funcionamiento de dicho puerto en el PLC y se descubrió que si era factible enviar y recibir datos y que sólo se requería configurarlo de manera tal que se pudiera comunicar con el radio módem.

Debido a que utilizando una comunicación directa entre el PLC y el módem vía puerto RS232 se logra que los datos ingresen de manera digital a la memoria del PLC sin realizarse ninguna conversión, se decidió que esta era la opción más adecuada para la recepción de los datos en el PLC.

Lo anterior implicó el diseño de rutinas en el PLC para el manejo del puerto de comunicación, y para la recepción, el manejo y almacenamiento de datos en el PLC. Además se diseñaron rutinas para la comunicación del PLC con la pantalla de interfaz con el usuario (tipo touch screen) ya que la visualización de los datos varió un poco.

A continuación se muestra un esquema de la solución en el satélite:



**Figura 5.2** Diagrama de la solución en el satélite

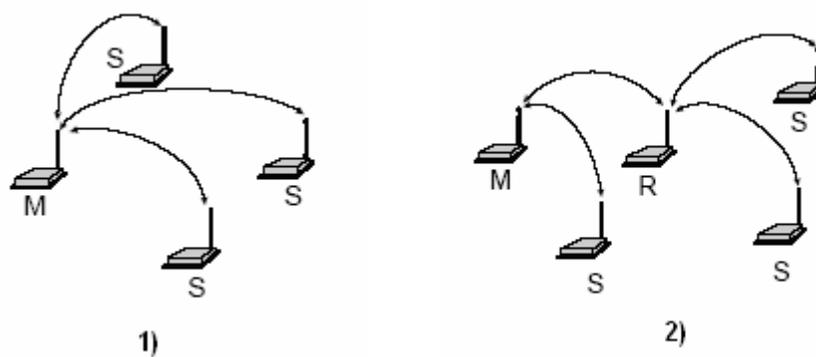
En este caso el PLC es el centro de control y en realidad lo es para todo el sistema. El mismo se comunica con el radio módem para recibir y enviar datos al pozo. El PLC se comunica además con la pantalla de interfaz de usuario en donde se muestran los datos provenientes de los pozos.

En el satélite existe un sistema de respaldo de alimentación muy confiable, ya que existe una planta de emergencia y además un banco de baterías con un inversor para generar 120V AC, por lo tanto no se tuvo que diseñar dicho sistema sino que sólo se utilizó el existente.

## 5.2. Diseño de la solución implementada

### 5.2.1. Arquitectura de la red

El sistema de transmisión implementado utiliza una arquitectura cuya topología de conexión es del tipo multipunto a punto, esto significa que una unidad maestra (M) se comunica con dos o más unidades que funcionan como esclavos (S), ya sea por medio de un repetidor(R) o sin este.



**Figura 5.3** Topologías de comunicación multipunto a punto  
1) Sin repetidor      2) Con repetidor

Para el sistema implementado las unidades utilizadas son transceptores (transceivers), es decir, pueden funcionar como transmisores y receptores, con ello se logra que en el sistema implementado la comunicación pueda ser bidireccional y del tipo half-duplex.

La arquitectura implementada permite que la información enviada a una estación separadora provenga de una cantidad de pozos que puede variar desde 1 hasta una cantidad máxima de 65535 esclavos, esto gracias a que los módems utilizados permiten esa opción.

### **5.2.2. Diseño del protocolo de comunicación**

El protocolo implementado tomó en cuenta el diseño de la capa de: aplicación. Esto debido a que las otras capas ya estaban implementadas en el módem o formaban parte del sistema como tal y únicamente se utilizaron.

La capa de aplicación formó parte del diseño debido a que se realizaron cambios en la forma en que los datos interactúan en la pantalla de interfaz con el usuario y en la de monitoreo implementada con el software Fix. Además, la creación del protocolo de aplicación y la interpretación de los datos antes de ser enviados a las pantallas y viceversa fue diseñada en la rutina del PLC. Para poder establecer el enlace de comunicación fue necesario configurar los equipos de forma tal que se detectaran entre sí.

La inicialización del proceso de intercambio de datos forma parte de la capa de aplicación debido a que mediante las peticiones de envío de datos que realiza el PLC es que se establece el flujo de información.

En cuanto a la capa física se interactuó con esta debido a que se tuvieron que realizar las conexiones y colocar las antenas para lograr que se pudiera transmitir los datos por el aire.

En los pozos en que se quiere implementar esta solución no existe ningún sistema al que sea necesario enviarle información desde el satélite para que envíe los datos referentes a la presión de cabezal y a las alarmas. Eso quiere decir, que este prototipo de comunicación va a ser el primero que requiera de un protocolo específico para poder intercambiar datos con el PLC del satélite y por esta misma razón se tuvo mayor flexibilidad a la hora de su diseño.

El protocolo de comunicación implementado permite el intercambio de datos entre el satélite (PLC) y el pozo(o los pozos) de una forma muy simple. La rutina diseñada en el PLC envía un dato por el puerto RS232 hacia el módem inalámbrico, el mismo lo transmite y todos los módems en los pozos escuchan y reciben el dato, el cual corresponde a un código de solicitud de datos. Aunque todos los pozos escuchan el dato, sólo uno de ellos está identificado con el mismo, ya que el microcontrolador que se encuentra en el pozo posee una rutina de confirmación de código de petición de datos y únicamente cuando recibe dicho código, que es específico de cada pozo (y corresponde al número de pozo), el microcontrolador se encuentra en disponibilidad de enviar la información solicitada hacia el radio módem en el pozo para que este lo envíe de vuelta hacia el PLC.

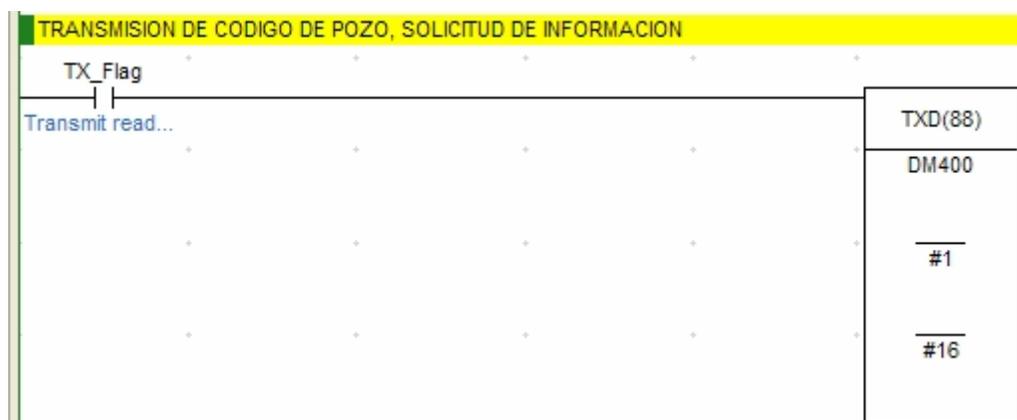
Como en el caso de las pruebas realizadas se utilizaron dos pozos para enviar datos hacia el satélite, en la rutina del PLC sólo se configuraron dos códigos de solicitud de datos diferentes, los cuales son el 11(B en hexadecimal) y 60 (3C en hexadecimal) como se puede apreciar en la siguiente figura:



**Figura 5.4** Inicialización de datos a transmitir

Como vemos en la figura anterior, la rutina desarrollada en el PLC realiza dos movimientos de datos a las direcciones de memoria DM400 y DM407. Los datos movidos a esas posiciones son los códigos que se enviarán hacia los pozos para que sean escuchados por los esclavos.

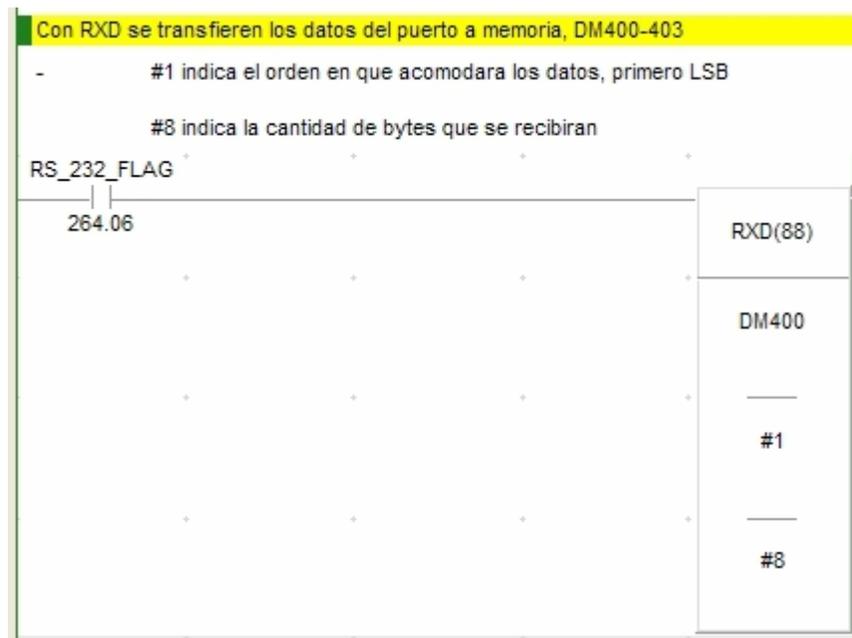
Luego mediante la instrucción TXD se envía el código de solicitud desde el PLC hacia el radio módem para que este lo transmita hacia los pozos, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 5.5** Solicitud de información por parte del PLC

Posteriormente, está la parte de escucha en el PLC. Después de haber enviado el código de solicitud de datos el PLC espera por los datos que envía el pozo. En este caso el pozo envía una trama cuyo encabezado está formado por un código de inicio de transmisión de datos, el cual es indispensable para que el PLC comience a almacenar los datos y dicho código fue configurado junto con el puerto serie.

Una vez que el PLC recibe ese código de inicio de transmisión de datos comienza a almacenar cierta cantidad de bytes (que también fue configurada respecto al tamaño de la trama) y cuando esté lleno el buffer del puerto serie, se activa una bandera que va a ser la que permita el inicio de la rutina de recepción de datos en el PLC. En la siguiente figura se muestra parte del código de recepción:



**Figura 5.6** Inicio de la rutina de recepción de datos en PLC

Como se puede observar, la variable RS\_232\_FLAG es la bandera que activa el proceso de recepción de datos. Más adelante se explica el contenido de las tramas de datos, sin embargo es importante señalar aquí que el motivo por el cual se dice que se reciben 8 bytes es porque los demás que conforman la trama no están siendo utilizados en este momento y se incluyeron en la trama por motivos de posibles cambios en un futuro. Posterior a la recepción de datos es enviado otro código de solicitud de datos para lograr obtener los datos de otro pozo.

### 5.2.3. Diseño del protocolo de aplicación

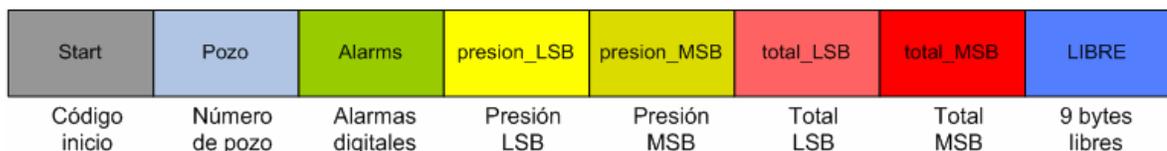
El sistema de comunicación implementado transmite paquetes de datos de manera bidireccional cuya trama se especifica adelante. En total los paquetes de datos están conformados por dieciséis bytes. Los dieciséis bytes están distribuidos de la siguiente manera para la trama que envían los pozos:

- Un byte para el código de inicio
- Un byte para el número de pozo
- Otro byte para enviar las alarmas digitales
- Dos bytes para enviar el valor de la señal analógica
- Dos bytes para enviar un código de comprobación de errores
- Nueve bytes libres

De tal forma que los dos primeros bytes conforman la cabecera de la trama, los siguientes tres bytes son para los datos y los últimos tres bytes conforman la cola de la trama.

La trama de datos enviada por el PLC desde el satélite hacia los pozos está conformada únicamente por el código de petición de datos, el cual se envía en un byte. Aunque en realidad el módem transmite dieciséis bytes que envía el PLC, sólo uno de esos bytes corresponde al código de petición de datos.

A continuación se muestra una figura que representa la trama enviada desde los pozos:



**Figura 5.7** Formato del protocolo de aplicación

- **Byte de código de inicio**

Este dato es utilizado debido a que el puerto de comunicación del PLC fue configurado para escuchar un código de inicio a partir del cual iniciar el almacenamiento de datos en el buffer asignado al puerto.

- **Byte de número de pozo**

Este byte es utilizado para identificar los datos que ingresan por el puerto con las posiciones de memoria en el PLC específicas para cada pozo.

- **Byte de alarmas digitales**

Es el primer byte con información referente a señales en el pozo, el estado de cada uno de sus bits representa una alarma presente en el pozo, aunque en la implementación sólo se habilitaron 5 y se utilizaron 4.

- **Bytes para la señal analógica**

Estos dos bytes también transportan información referente al pozo. En este caso se utilizan 16 bits debido a que la señal analógica está conformada por 10 bits.

- **Bytes de código de comprobación de errores**

Se utilizan dos bytes para enviar un código que corresponde a la suma de los bytes de alarmas digitales y señal analógica.

- **Bytes libres**

Son datos que forman parte de la trama pero con valor de cero.

Para poder comprender mejor un ejemplo de un caso aleatorio de una trama de transmisión se proporcionarán a continuación una serie de ecuaciones para relacionar el proceso. Recordemos que el convertidor del microcontrolador está escalado de forma lineal en 10bits y relacionando 1V con 0 y 5V con 1024.

En un caso de un pozo en el que el transmisor de presión esté configurado de 0 a 20bar, debido a que la relación entre la corriente y la presión es lineal, la ecuación que relaciona la presión con la corriente que genera el transmisor es la siguiente:

$$Pr\ esión(bar) = 1.25 * I(mA) - 5 \quad (2)$$

Para el caso del pozo 11, la presión se mantiene muy cerca de los 6,2 bar, por lo que despejando de la ecuación anterior, la corriente equivalente es de:

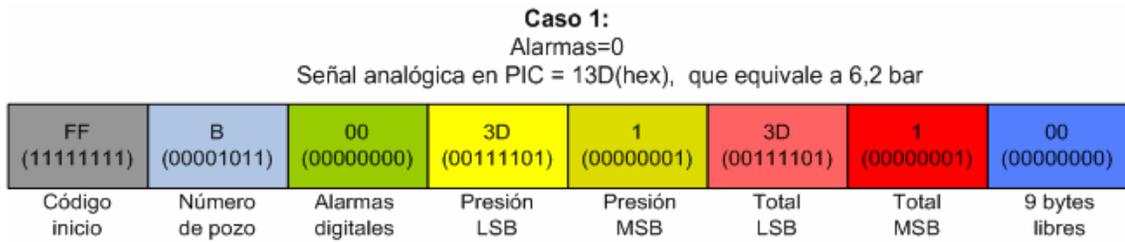
$$I \cong 8,96mA$$

Como en la entrada analógica se muestrea el valor de tensión que queda en la resistencia de  $250\Omega$ , la tensión equivalente es:

$$V \cong 2,24V$$

El valor anterior ya convertido a digital mediante el convertidor del microcontrolador equivale a aproximadamente 13D (hex).

Si tomamos un caso en que las alarmas son todas cero, o sea desactivadas y para el caso del pozo 11, la trama de datos enviada por el PIC sería la siguiente:



**Figura 5.8** Formato del protocolo enviado desde el pozo 11

Para el caso del pozo 60, la presión se mantiene muy cerca de los 6,0 bar, por lo que despejando de la ecuación 2, la corriente equivalente es de:

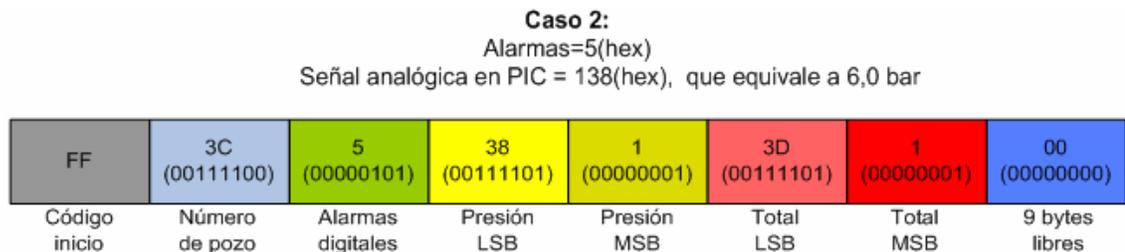
$$I \cong 8,8mA$$

Como en la entrada analógica se muestrea el valor de tensión que queda en la resistencia de  $250\Omega$ , la tensión equivalente es:

$$V \cong 2,22V$$

Este valor ya convertido a digital mediante el convertidor del microcontrolador equivale a aproximadamente 138 (hex).

Si tomamos un caso en que hay dos alarmas activadas, la alarma cero y la dos, o sea la un valor de 5(hex) y para el caso del pozo 60, la trama de datos enviada por el PIC sería la siguiente:



**Figura 5.9** Formato del protocolo enviado desde el pozo 60

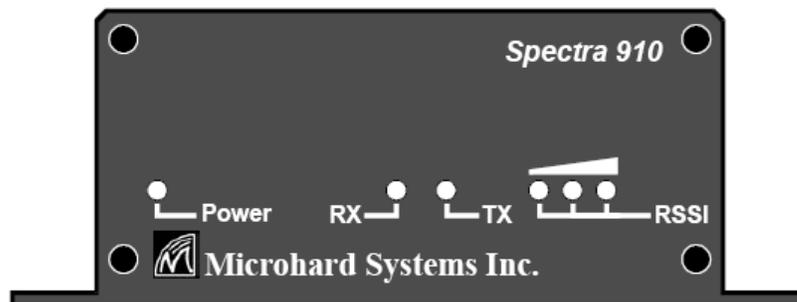
### 5.3. Descripción del hardware

#### 5.3.1. Transmisor inalámbrico de datos (Radio módem)

Para el diseño y la implementación de la solución se utilizaron módems inalámbricos de la marca Microhard Systems Inc., específicamente el modelo Spectra 910.

Este módem opera en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) entre los 902 y 928MHz, y utiliza la tecnología de espectro esparcido de saltos de frecuencia (frequency hopping spread spectrum, FHSS).

El Spectra 910 posee leds indicadores tales como: Power, RX, TX, indicador de fuerza de la señal recibida (Receive Signal Strength Indicator, RSSI) como se puede apreciar en la siguiente figura:



**Figura 5.10** LEDs indicadores del Spectra 910  
(Tomado de [5])

En el caso de los leds de RX y TX, estos parpadean cada vez que se recibe o envía un paquete de datos mediante el enlace inalámbrico.

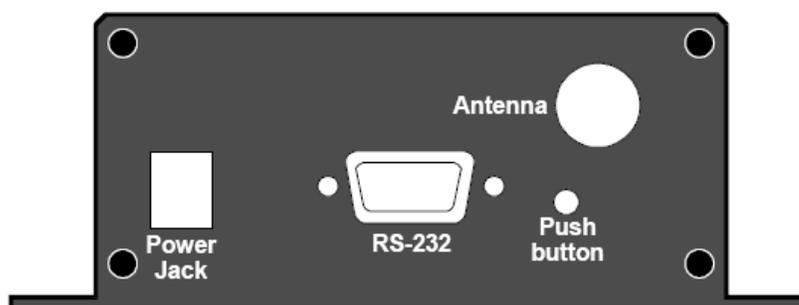
Los Leds del RSSI varían dependiendo de la potencia del enlace y permiten tener un parámetro de la potencia de la señal como se muestra en la siguiente tabla tomada de [5]:

**Tabla 5.9** Modo de operación del RSSI

Fuerza de la señal (dBm)	RSSI1	RSSI2	RSSI3
-108	Parpadeando	Apagado	Apagado
-101	estable	Apagado	Apagado
-93	estable	Parpadeando	Apagado
-86	estable	estable	Apagado
-79	estable	estable	Parpadeando
-71	estable	estable	estable

Tomado de [5]

El módem tiene un puerto de comunicación serie tipo RS232 y un conector TNC para la antena como se muestra en la Figura 5.11:



**Figura 5.11** Conectores para comunicación y antena (Tomado de [5])

La tensión de alimentación para este equipo varía desde los 10V hasta los 30V en corriente continua y requiere una corriente menor a 0.5A en el caso de que se configure a su mayor potencia de transmisión.

Para su configuración se utiliza un cable que se conecta al puerto RS232 de la PC y mediante una aplicación como Hyperterminal se le envían los comandos que requiere para modificar su configuración. Esa configuración depende del valor que tengan los registros internos que son modificados mediante en una pantalla como la siguiente:

```

BAUD = 9600
E1 Q0 V1 W0
DCD &C1    DTR &D0    Framing &E0    Handshaking &K3    DSR &S1
S0=1 S2=43 S3=13 S4=10 S5=8
Operating Mode          S101=1          Serial Baud Rate      S102=7
Wireless Link Rate     S103=2          Network Address       S104=1
Unit Address           S105=1          Hop Pattern           S106=0
Encryption Key         S107=1          Output Power          S108=2
Hop Interval           S109=4          Data Format            S110=1
Packet Min Size        S111=1          Packet Max Size       S112=43
Packet Retransmissions S113=1          Quick enter to command S119=1
Packet Repeat Interval S115=1          Character Timeout, ms S116=8
RTS/DCD Framing, ms   S120=0          DCD Timeout, ms      S121=0
Secondary Hop Pattern  S206=2          Packet Retry Limit    S213=2
Average RSSI value    S123= -0 dBm   Modbus Mode           S117=0
Roaming                S118=0          Packet Size Control   S114=0
Remote Control         S122=0
OK

```

**Figura 5.12** Pantalla para la configuración del Spectra 910  
(Tomado de [5])

### 5.3.2. Sistema prototipo de transmisión en el pozo

Este sistema se encarga de recolectar los datos de las variables en el pozo que se requieren estar monitoreando desde el Centro de Servicio Recursos Geotérmicos Miravalles.

Es sistema se alimenta de la red a partir de 120V AC, con lo cual genera su tensión de alimentación mediante un transformador a 24V y cuenta con un sistema de respaldo en caso de haya un fallo de alimentación de red. Elementos como el transmisor de presión, el radio módem, las alarmas, el cargador de baterías y el mismo circuito recolector de datos se alimentan de esta fuente.

### **5.3.3. Fuente de alimentación y cargador de baterías**

La función de esta fuente de alimentación es utilizar la tensión de línea de 120V AC para generar una tensión DC con el cual se alimenta la tarjeta de adquisición de datos, el transmisor de presión, el módem inalámbrico y además, con el que se carga la batería de respaldo. En otras palabras esta tensión DC no debe ser mayor que la máxima tensión de carga que especifica la batería.

Se utilizó el siguiente diseño debido a que el regulador permite ajustar de forma muy sencilla su salida y por la poca cantidad de componentes involucrados.

En el diseño de esta fuente se utilizaron los componentes que se describen a continuación:

#### **a) Transformador**

Se utilizó un transformador de 120V a 24V con una salida de 2A. Esto debido a que el consumo máximo se va a presentar cuando se tenga que cargar la batería, el cual va a ser menor a 1A y se decidió utilizar un transformador un poco más grande para garantizar un funcionamiento seguro y por si se desea realizar algún cambio en el futuro.

#### **b) Puente rectificador y filtro**

Se utilizó un puente rectificador de 3A y 200V y como filtro se utilizó un capacitor de 2200uF y 50V.

#### **c) Regulador de tensión ajustable**

Se utilizó este regulador para poder ajustar de forma más exacta la tensión de carga de la batería.

A través de un regulador de tensión ajustable LM317T se estableció la tensión de alimentación que requiere el circuito recolector y transmisor de datos, la batería de respaldo, el transmisor de presión y el radio módem.

La tensión regulada se ajustó a 14.2V, ya que la batería se carga a esa tensión y debe permanecer siempre cargada para que permita un respaldo seguro al sistema en caso de un fallo de alimentación de la red.

La corriente que consume el circuito recolector y transmisor (100mA máximo) junto a la corriente que consume el radio módem (200mA máximo), más la corriente que consume el transmisor de presión (20mA máximo) suman un total de 320mA. La diferencia entre la tensión de entrada y la tensión de salida del regulador es de 17V, por lo tanto la potencia disipada por este viene dada por:

$$P = V * I \quad (3)$$

$$P = 17V * 0.32A = 5.44W$$

La tensión de salida varía de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_{OUT} = 1.25 \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ADJ} (R2) \quad (4)$$

donde R2 es el potenciómetro de  $5k\Omega$  y R1 es la resistencia de  $240\Omega$ . Según las curvas características para un rango de temperatura que varía de 0 a  $125^{\circ}C$ , la corriente de ajuste puede variar entre 50 y  $60\mu A$ .

#### **d) Potenciómetro de ajuste**

La tensión de salida de esta fuente de alimentación es ajustable mediante un potenciómetro de precisión de  $5k\Omega$  que se utilizó en el pin de ajuste del LM317.

### **e) Diodo de protección del regulador de tensión**

Se utilizó un diodo de protección para el caso en que se desconecte la energía y la tensión regulada pueda llegar a ser mayor que la tensión de entrada. Este diodo va conectado de la salida del regulador a la entrada del mismo y de esa forma si se desconecta la alimentación y por algún motivo la tensión regulada llega a permanecer mayor que el de entrada, la corriente fluye por ese diodo evitando daños en el regulador.

### **f) Resistencia para limitar la corriente de carga de la batería**

Se utilizó una batería con una capacidad de 5AH, por lo tanto la corriente de carga inicial viene dada por:

$$I_L = 10\% \text{ de la Capacidad de la batería}$$

$$I_L = 0.1 * 5 = 0.5A$$

Se utilizó una resistencia de 10 Ohmios en 5W para limitar la corriente de carga de la batería.

En el peor de los casos, si la batería estuviera completamente descargada, la tensión caería todo sobre dicha resistencia, lo cual implicaría una corriente de carga para la batería de 1,42A. Pero tomando un caso real, suponiendo que la batería se descargue hasta una tensión de 11V, como la tensión de carga es 14,2V, en la resistencia de 10 Ohmios caería una tensión de 3.2V, lo cual genera una corriente máxima de carga de 320mA y la potencia en la resistencia es de:

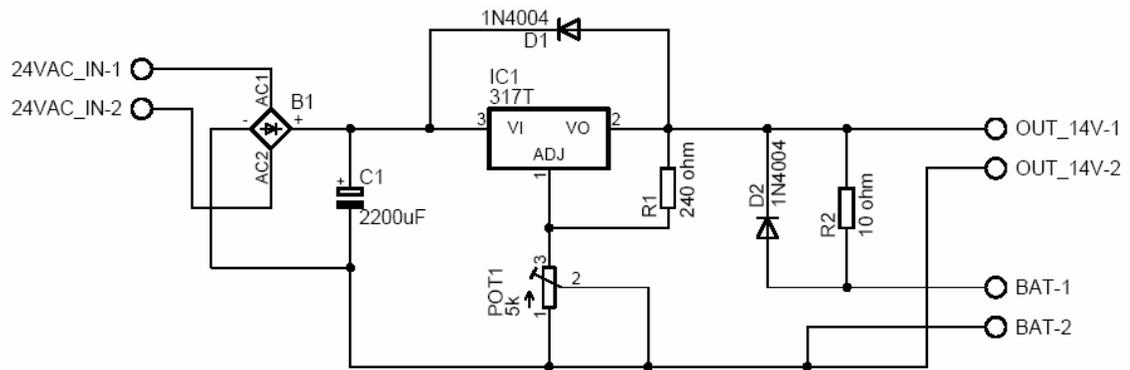
$$P = V * I$$

$$P = 3.2V * 0.320A = 1.024W$$

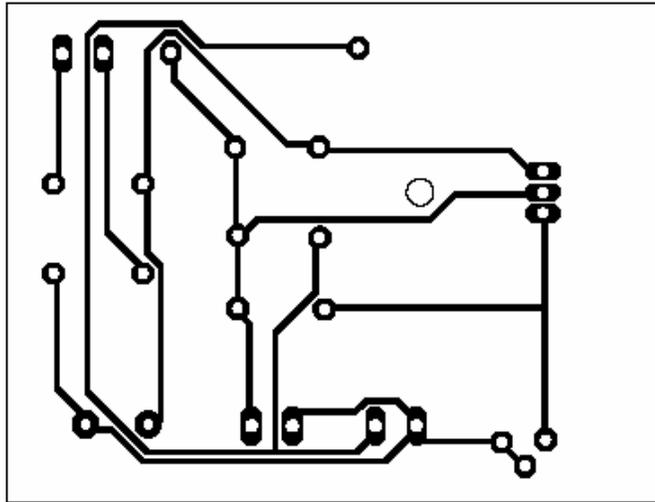
Es posible utilizar una resistencia de  $5\Omega$  en 5W, pero ocasionaría una mayor disipación de potencia en el LM317T.

Se colocó un diodo 1N4004 en paralelo a la resistencia de carga de la batería para que la corriente que suministre la batería no esté limitada por dicha resistencia, sino que fluya a través del diodo (ver Figura 5.13).

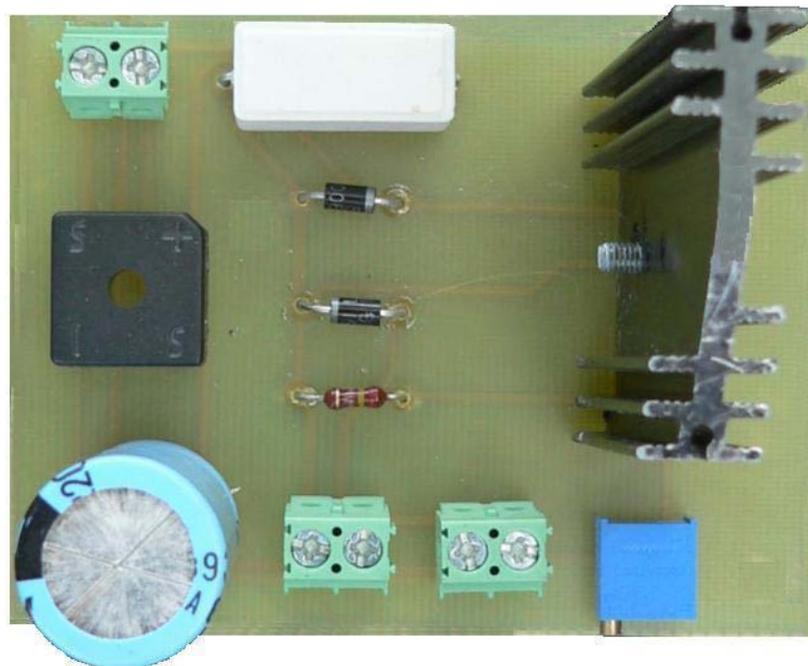
A continuación se muestran imágenes del circuito y la fuente implementada:



**Figura 5.13** Circuito de la fuente de alimentación y cargador de baterías



**Figura 5.14** Circuito impreso de la fuente de alimentación y cargador de baterías



**Figura 5.15** Vista superior del circuito cargador y regulador

### 5.3.3.1. Circuito para adquisición de datos

Este circuito se encarga de recolectar los datos de las alarmas y de la presión de cabezal del pozo y enviarlos hacia el radio módem por el puerto de comunicación. A continuación se describen los componentes utilizados en esta tarjeta:

#### a) Regulador de tensión ajustable

Este regulador tiene como tensión de entrada 14.2V que son los que se utilizan para alimentar el radio módem, el transmisor de presión y la carga de la batería.

En esta tarjeta también se utilizó el circuito integrado LM317T con el cual se reguló la referencia superior de las entradas analógicas del microcontrolador PIC16F877A a 5V y al mismo tiempo se alimentó aquellos componentes que utilizan esta tensión. A partir de esos 5V se generó la referencia inferior de las entradas analógicas del microcontrolador, la cual es de 1V.

El circuito recolector y transmisor de datos consume una corriente inferior a los 100mA, la diferencia entre la tensión de entrada y la tensión de salida es de 9,2V, por lo tanto la potencia disipada por este regulador para el caso de mayor consumo viene dada por:

$$P = V * I$$

$$P = 9,2V * 0,1A = 0,92W$$

### **b) Potenciómetros de ajuste**

Para ajustar la tensión a 5 voltios se utilizó un potenciómetro de  $1k\Omega$  en el pin de ajuste de regulador LM317, esto de acuerdo a lo establecido en la hoja de datos del mismo.

Para ajustar la referencia inferior del PIC se utilizó un divisor de tensión ajustable con un potenciómetro de  $1k\Omega$  y una resistencia del mismo valor.

### **c) Driver/Receptor para comunicación RS232**

Para poder establecer una comunicación entre el microcontrolador y el radio módem se utilizó un circuito integrado MAX232. Este circuito integrado a través de un conjunto de condensadores, permite interfazar el microcontrolador con el radio módem, ya que él eleva y reduce los niveles de tensión a los cuales se transmiten los datos. Así, los datos que salen del microcontrolador se transmiten hacia el MAX232 y este eleva los niveles de tensión para que el radio módem los entienda; de igual manera, los datos que vienen del radio módem pasan a través del MAX232 y éste disminuye los niveles de tensión para enviarlos al microcontrolador.

### **d) Entradas analógicas**

Para poder monitorear el valor de la presión de cabezal, que está dada por una corriente que varía de 4 a 20mA, se utilizaron resistencias de precisión de 250 Ohmios logrando así que la corriente genere una caída de tensión en dicha resistencia de 1 a 5V.

La entrada analógica del microcontrolador se configuró para una resolución de 10 bits, es decir, los 16mA están divididos en 1024 pasos.

Se utilizaron condensadores de 1000uF en paralelo con la resistencia de 250 Ohmios para tener un valor más estable en dicha entrada y a la hora de visualizar el valor de la presión de cabezal.

#### **e) Microcontrolador**

Se optó por utilizar un microcontrolador Microchip modelo PIC16F877A. Este microcontrolador cumple a cabalidad con los requerimientos para la implementación del sistema en los pozos, tales como comunicación mediante puerto RS232, más de 3 entradas analógicas, más de 5 entradas digitales, capacidad en memoria para almacenar y transmitir los datos.

#### **f) Cristal de cuarzo**

Se utilizó un cristal de cuarzo de 20MHz, lo que garantiza que el programa del microcontrolador se ejecutará a una frecuencia lo suficientemente alta.

A continuación se muestran imágenes del circuito desarrollado:

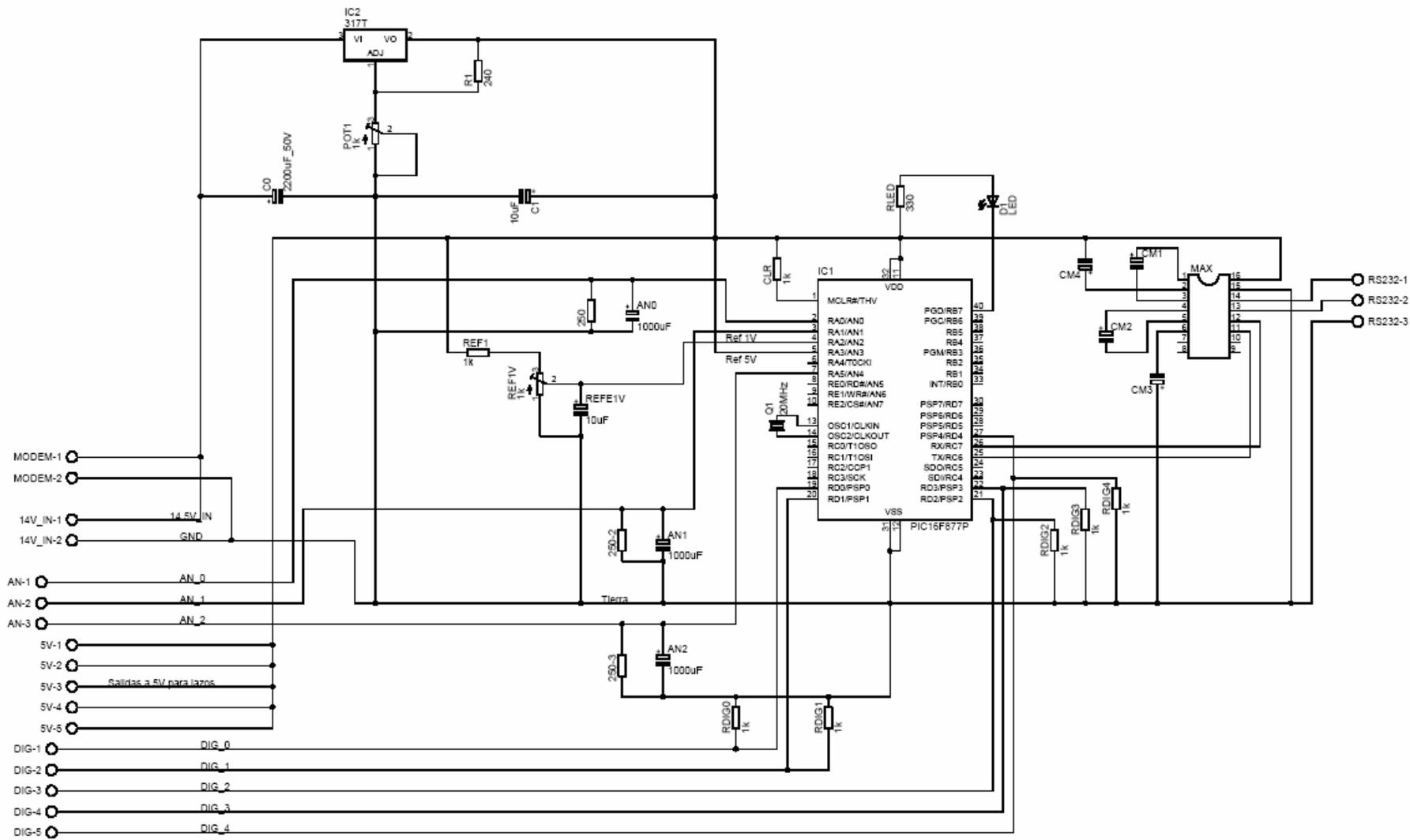


Figura 5.16 Diagrama esquemático de la tarjeta de adquisición de datos

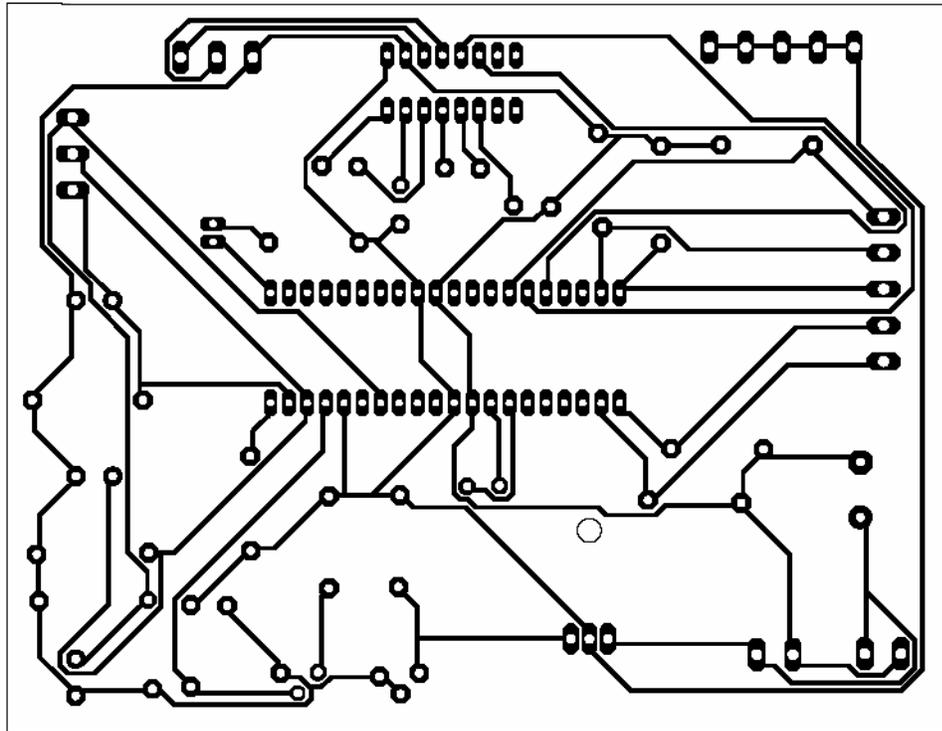


Figura 5.17 Circuito impreso de la tarjeta de adquisición de datos

### 5.3.3.2. Radio módem (Esclavo)

En cada pozo se instalará un módem inalámbrico cuyo modelo es Spectra 910, el cual recibirá los datos enviados por el microcontrolador vía puerto RS232 y los transmitirá por un enlace de radiofrecuencia.

#### a) Antena

En los pozos se recomienda utilizar antenas Yagi de 9 ó 11dBi dependiendo de la distancia y la topografía entre el pozo y el satélite. Pueden existir casos en los que no se necesite utilizar una antena diferente a la que trae el radio módem, ya que con la ganancia de esta puede ser suficiente.

#### **5.3.4. Sistema prototipo de recepción en la estación separadora (satélite)**

Es el encargado de recibir los datos transmitidos desde el pozo y almacenarlos en el PLC. Básicamente, está conformado por el radio módem, el PLC y una pantalla tipo touch screen en la que se visualizan los datos provenientes de los pozos.

##### **5.3.4.1. Radio módem (Maestro)**

En la estación separadora se colocó un radio módem que va a recibir los datos de los pozos asociados a dicho satélite y los transmite al PLC que se encuentra en el satélite en donde se encuentran pantallas que muestran la información referente a cada pozo y además para que el sistema de monitoreo que se encuentra en el centro de Guayabo lea los datos guardados en PLC y los pueda mostrar a través de un sistema SCADA.

Este radio módem se comunica con un repetidor que es el que realmente se comunica con los radio módems ubicados en los pozos. Este repetidor se colocó en un pozo que actualmente está fuera de servicio y que se encuentra muy cerca del satélite pero a una mayor altura. La idea con esto fue solventar el problema de no contar con una antena omnidireccional que pudiera ser colocada en la estación separadora.

##### **a) Antena**

El sistema de recepción en el satélite debe poseer una antena que reciba señales de varios emisores, es decir una antena omnidireccional de 6dB o más, para que así varios pozos puedan enviarle datos a ese satélite.

Esta antena es necesaria para poder establecer un enlace más sólido en la red, ya que las antenas que incluye el equipo son de poca ganancia.

### 5.3.4.2. PLC OMRON C200-HS

Este PLC es el centro del control en el satélite, el tiene asignado el control de válvulas de proceso, iluminación, plantas de emergencia, entre otras, y además recibe la información proveniente de los pozos más la información recolectada en el mismo satélite para enviarla al sistema de monitoreo en Guayabo.



Figura 5.18 PLC ubicado en el satélite

El puerto encerrado en el círculo rojo en la figura anterior es le que se utiliza para la comunicación con el módem inalámbrico. El mismo está configurado como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.10 Configuración del puerto RS232

Parámetro	Valor
Velocidad	9600 bps
Bits de datos	8
Paridad	Ninguna
Bits de parada	1

### 5.3.4.3. Pantalla de interfaz con usuario

Mediante esta pantalla se realiza el control manual de una serie de sistemas que existen en el satélite y se visualizan los datos provenientes de los pozos, además de otra gran cantidad de datos presentes en la estación separadora.

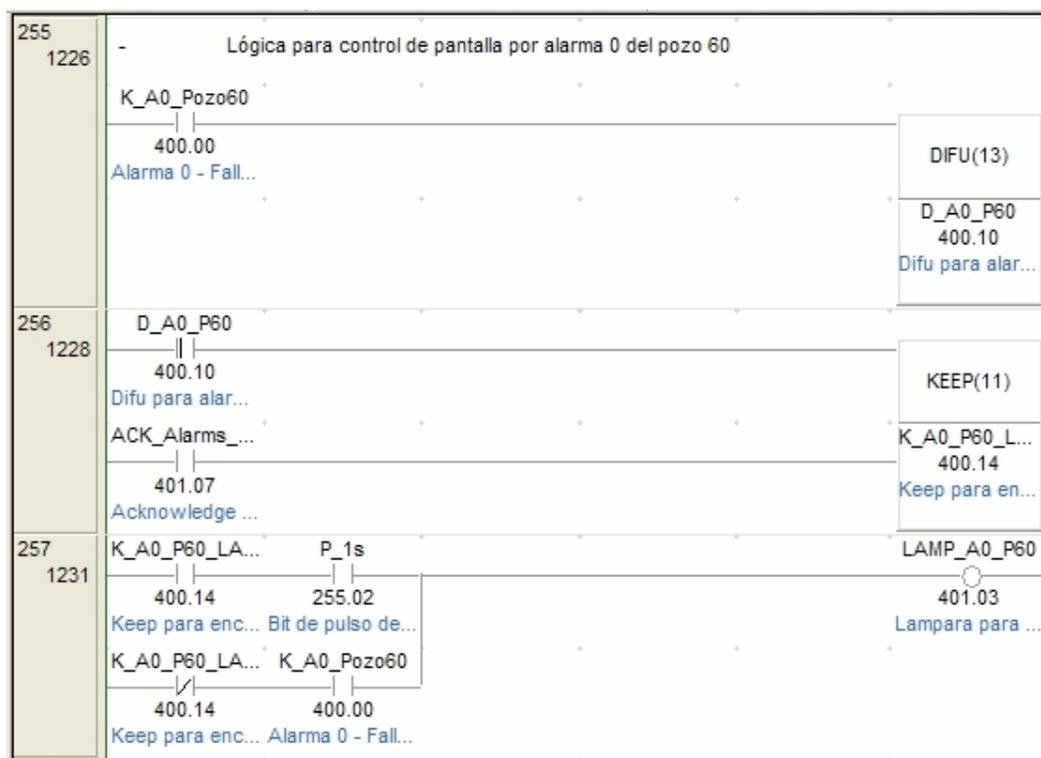
En esta pantalla se realizaron los cambios necesarios para poder visualizar las alarmas de los pozos de forma individual. Se agregaron indicadores para cada alarma que se activan desde la rutina que se diseñó en el PLC en la cual se verifica el estado de las alarmas que están asignadas a posiciones de memoria específicas.

A continuación se muestra la pantalla de interfaz de usuario presente en el satélite 7, en este caso sólo los pozos 11 y 60 muestran las alarmas por separado y es posible observar como hay un indicador de fallo de red para el pozo 60:



Figura 5.19 Pantallas de interfaz de usuario

Para la monitorear las alarmas se utilizaron salidas de memoria del PLC que están asignadas al manejo de los indicadores de la pantalla de interfaz, dichas salidas se manejan mediante una lógica creada a partir de contactos e instrucciones en la rutina del PLC. A continuación se muestra un trozo del código para el manejo de estos indicadores:



**Figura 5.20** Lógica para el manejo de las alarmas

#### **5.3.4.4. Modificaciones a la pantalla de monitoreo creada con el software Fix**

En el sistema de monitoreo instalado en la computadora en el Centro de Servicio Recursos Geotérmicos se efectuaron cambios similares a los realizados en las pantallas de interfaz de usuario en el satélite. Se agregó un recuadro en el que se puede observar de forma separada cual de las alarmas es la que está presente en un pozo en un momento específico.

En la siguiente figura se muestran los recuadros que aparecen al hacer clic sobre el link encerrado en un círculo en la esquina superior izquierda. Cuando se presenta una alarma, el pequeño cuadro en verde de la izquierda referente a un pozo específico parpadea y es cuando en los recuadros también parpadea la lámpara correspondiente a la alarma.

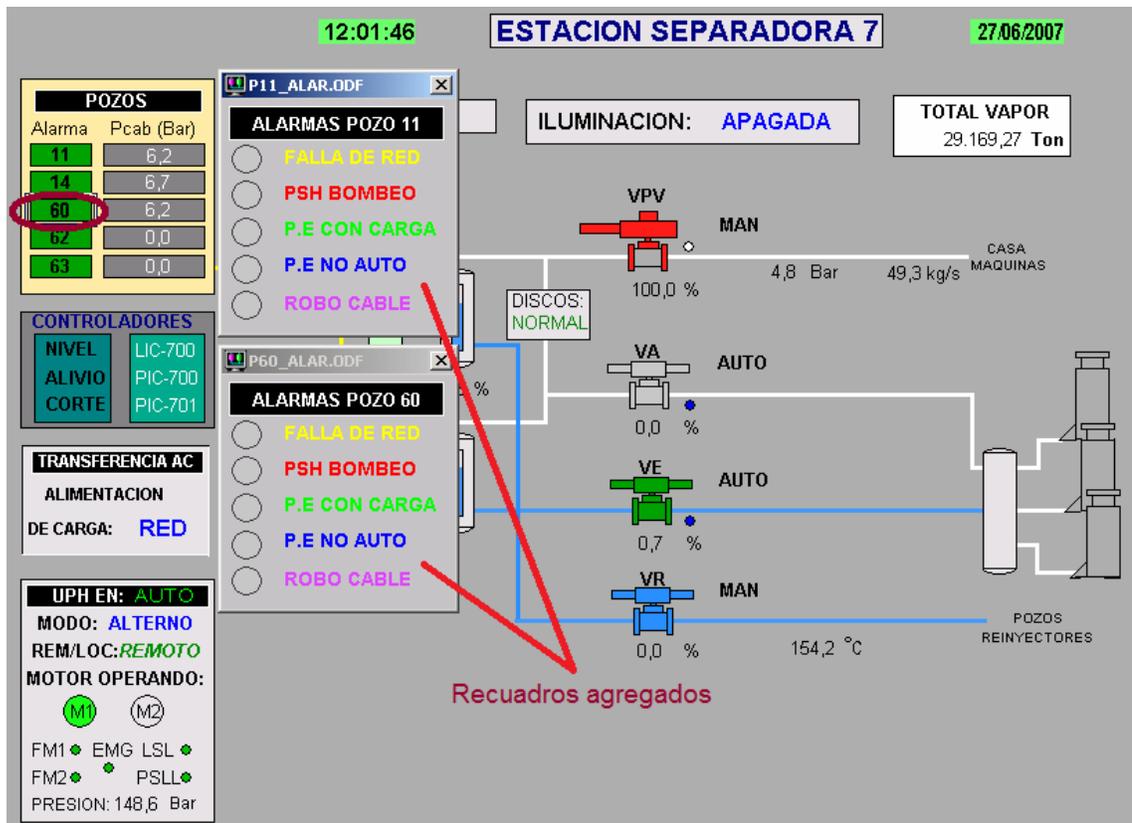


Figura 5.21 Pantalla de monitoreo específica del satélite 7

## 5.4. Descripción del software

### 5.4.1. Programa del PLC

El PLC utilizado es el modelo de Omron C200HS – CPU31 – E y fue programado con el software de nombre CX-One Programmer. Las rutinas diseñadas en el PLC tienen la estructura que se muestra en el siguiente diagrama:

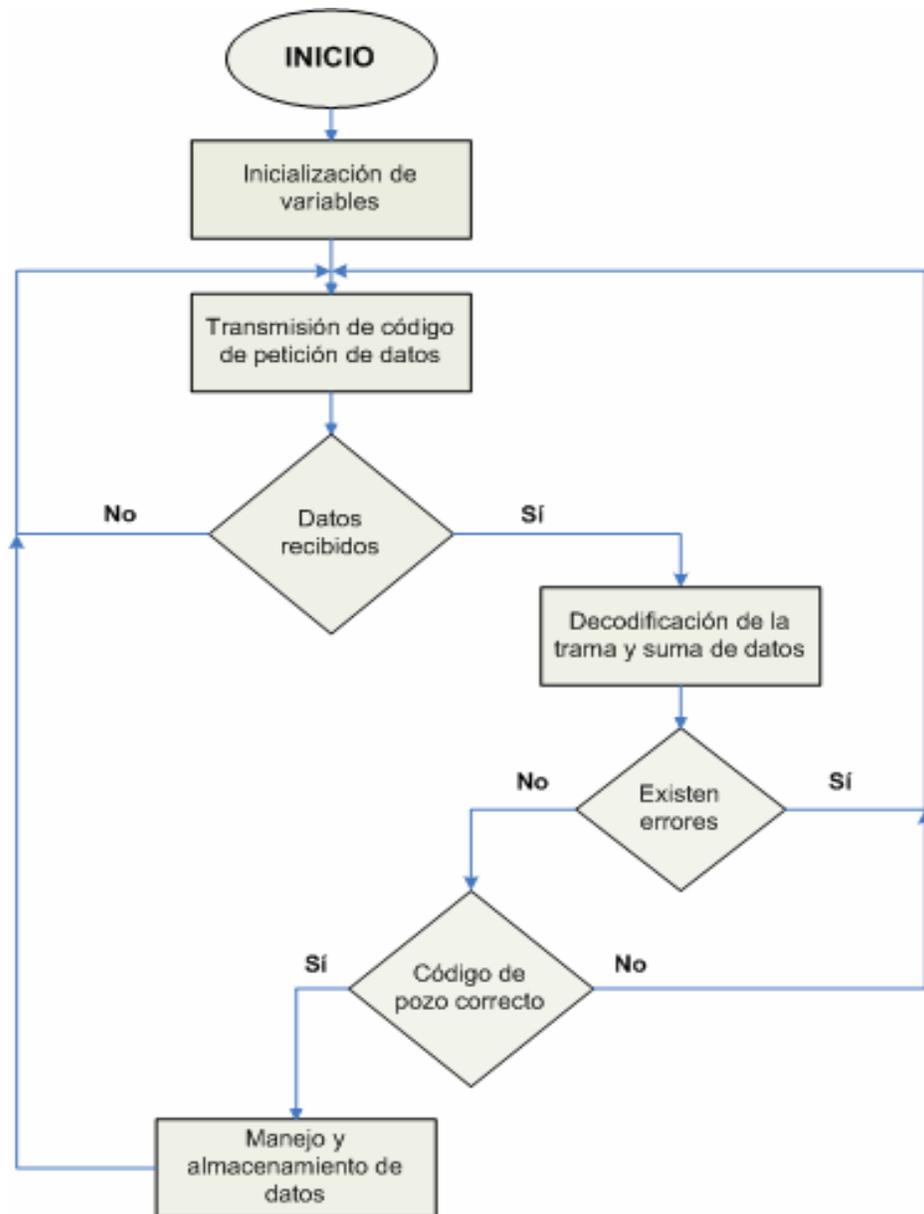


Figura 5.22 Diagrama del programa del PLC

#### 5.4.1.1. Configuración del puerto de comunicación Host Link del PLC

- Velocidad

Se trabajó a una velocidad de 9600 baudios, aunque el sistema puede trabajar a mayores velocidades, se decidió que esta era suficiente para la transmisión de los datos debido a experiencias anteriores en cursos prácticos de carrera.

- Formato

Se utilizó el formato 8N1, el cual se refiere a: 8 bits de datos, ningún bit de paridad y un bit de parada.

- Modo

El modo se refiere al protocolo que se utilizó para la transmisión de los datos, en este caso RS232.

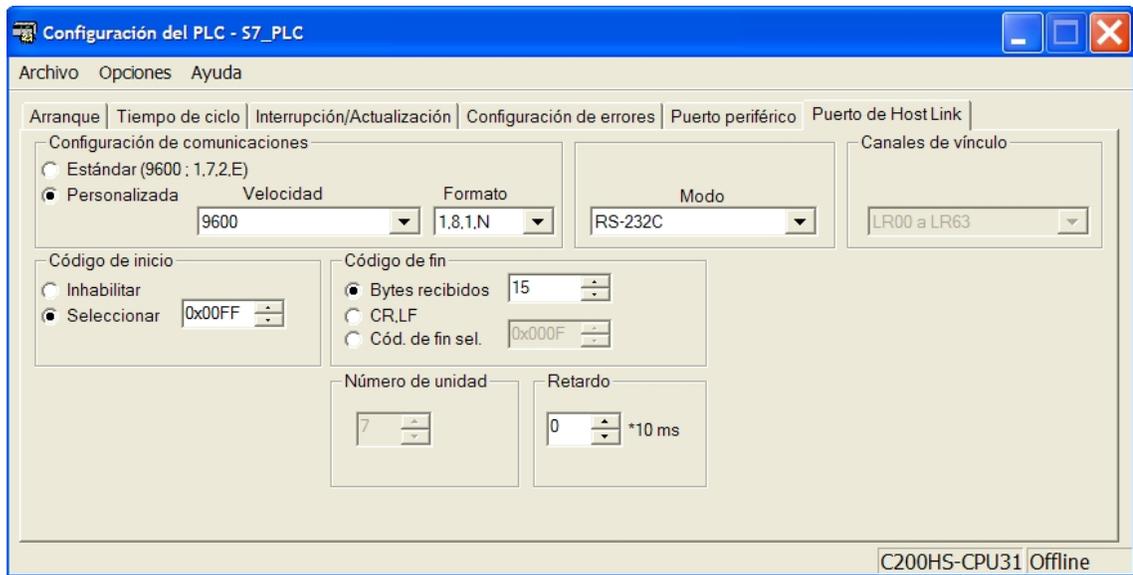
- Código de inicio

El PLC utilizó un código de inicio para detectar a partir de cuando comenzar a almacenar los datos que le están ingresando por el puerto. En este caso se utilizó el código FF(hex).

- Bytes recibidos

A partir de un código de inicio, el PLC almacena una cantidad de bytes específica en un espacio de memoria reservado para dicha tarea, el cual puede ser como máximo de 256 bytes. Para esta aplicación específica este número se configuró a 16 bytes.

En la siguiente figura se muestra la pantalla donde se realizaron las configuraciones anteriores:

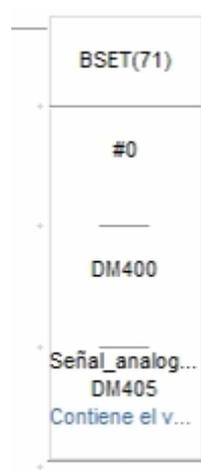


**Figura 5.23** Pantalla de configuración del puerto serie del PLC

#### 5.4.1.2. Descripción del programa

- Inicialización general de variables
  - o Función BSET

Con la función BSET (Block set) se logró asignar un valor específico a un bloque de memoria (conformado por variables de 16 bits) que se especifica en los parámetros que recibe esta función. Mediante esta herramienta se inicializaron las variables utilizadas en 0 y con ello se evitó que existan problemas por información no deseada en el PLC.



**Figura 5.24** Instrucción block set

- Transmisión de datos

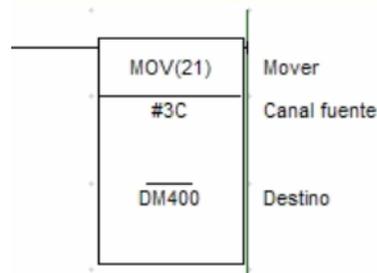
Antes de transmitir datos hubo que hacer dos cosas:

- Primero mover los datos que se desean transmitir a las localidades de memoria de las cuales se extraerá la información
  - Luego configurar la función que permite la transferencia de esos datos, la función TXD.
- Inicialización de datos a transferir
    - Función MOV

Esta función es similar a BSET a diferencia de que esta mueve un dato específico a una sola localidad de 16bits (word). Con esta función se desplazó el número de pozo a una localidad de memoria cuyo contenido sería transferido posteriormente mediante el puerto RS232.

En el caso específico de la aplicación solo se realizaron dos movimientos de número de pozo, pero se debe hacer la cantidad de mov que se necesite de acuerdo a la cantidad de pozos que se incluyan.

Como se puede apreciar en la siguiente figura, el valor del número de pozo que se mueve es el #3C(hex) que en decimal equivale a 60:

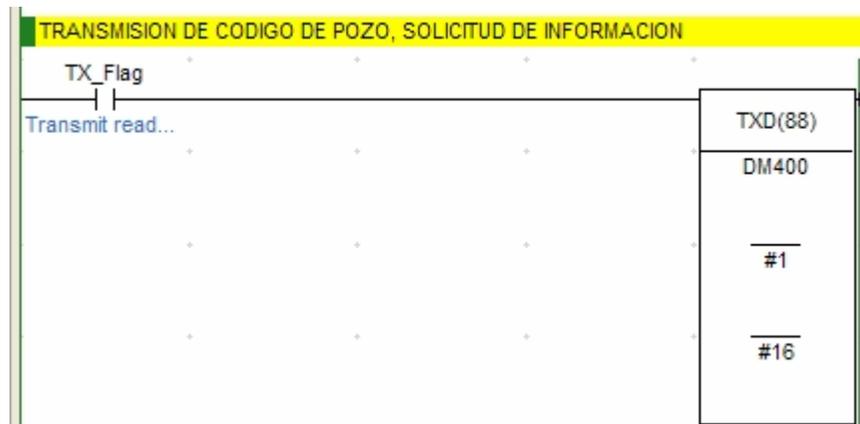


**Figura 5.25** Función para realizar movimientos de datos

- Transmisión de código de solicitud de datos
  - Función TXD

TXD fue la instrucción encargada de realizar la transmisión de datos de la memoria del PLC al puerto RS232 para enviarlos a los pozos. Se ejecuta cada vez que la bandera denominada como TX\_Flag se activa.

Esta función requiere de 3 parámetros para poder ejecutarse. El primero corresponde al primer canal de envío, es decir, a la palabra a partir de la cual se iniciará la transmisión de datos. El segundo, corresponde a una palabra de control con la cual se indica cual byte se transmite primero en una palabra, el más significativo o el menos significativo. El último parámetro se refiere a la cantidad de bytes que serán transmitidos tomando en cuenta el primer canal de envío.

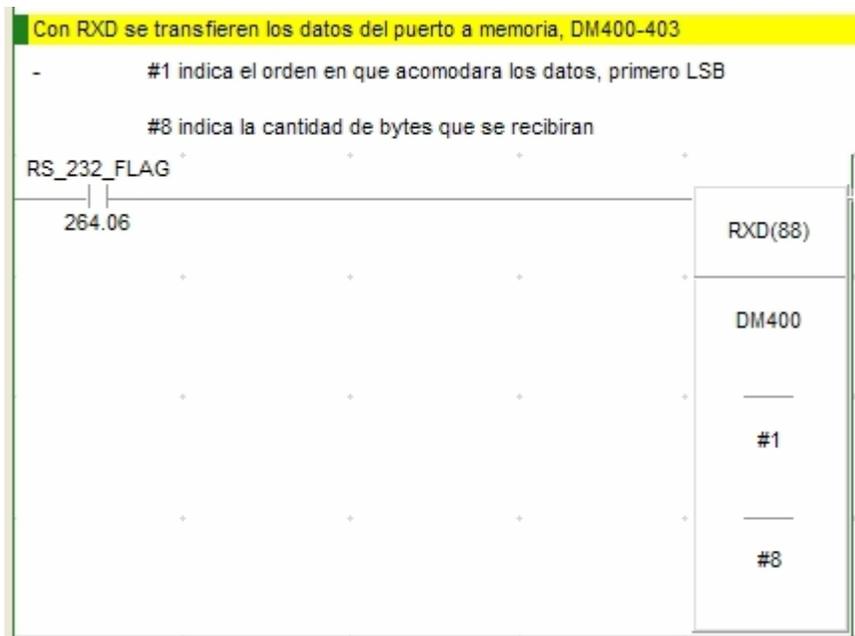


**Figura 5.26** Función para transmitir datos por el puerto serie

- Recepción de datos
  - o Inicialización del puerto
    - Función RXD

La instrucción RXD fue la encargada de recibir los datos que llegan al puerto RS232 y almacenarlos en la memoria del PLC. Esta función se ejecuta cada vez que se activa la bandera de recepción del puerto.

Se deben configurar 3 parámetros para su funcionamiento, el primero indica el primer canal a partir del cual se almacenarán los datos; el segundo es para indicar el orden como se almacenarán los datos, puede ser primero el byte más significativo o el menos significativo. El último parámetro corresponde a la cantidad de bytes que se almacenarán del total que se encuentran en el puerto de recepción.

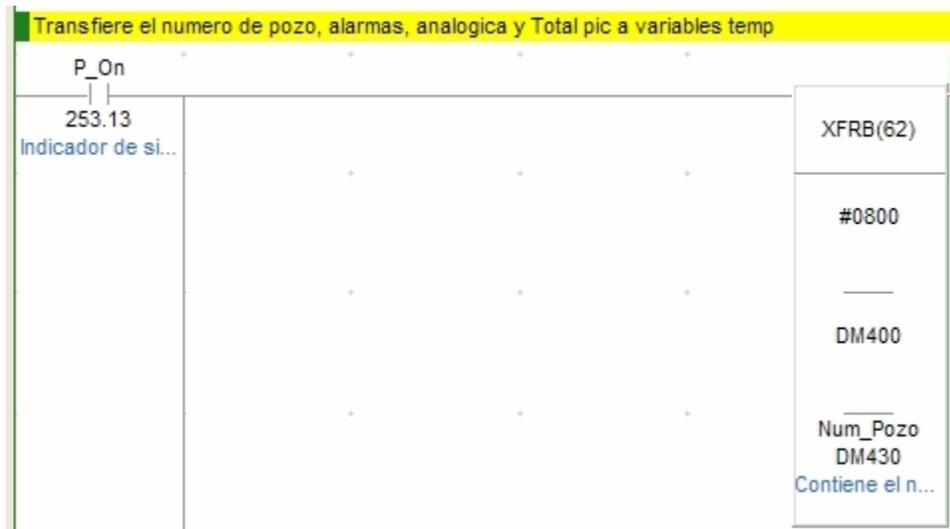


**Figura 5.27** Función para recibir datos por el puerto serie

- Transferencia temporal de datos
  - Función XFRB

Una vez que la función RXD realiza una transferencia de datos a memoria, se utilizó la instrucción XFRB (transferir bits) para almacenar por separado los datos recibidos. Esto se hace debido a que por ejemplo, la función RXD guarda el número de pozo y las alarmas en una misma palabra y mediante la instrucción XFRB se separan y se colocan en canales distintos.

Por cada pozo se realizan cuatro transferencias de este tipo: número de pozo, alarmas, variable analógica y la variable total\_PIC.



**Figura 5.28** Función para transferir bits

- Suma de datos

- Función ADB

Mediante esta instrucción, el valor que llegaba al PLC correspondiente a las alarmas y a la señal analógica se suma y almacena en una variable denominada TOTAL\_PLC, la cual se utilizó para verificar que no hayan errores en los datos recibidos.



**Figura 5.29** Función del PLC que realiza la suma binaria

- Almacenamiento de datos
  - o Verificación de información(Chequeo de errores)
    - Función CMP

Con la instrucción CMP (compare) se comparó la variable recibida que corresponde a la suma de las señales digitales y la analógica denominada Total\_PIC con la variable creada en el PLC denominada Total\_PLIC. Si ambas son iguales se procede con otra comparación. Esta función permitió asegurar de que los datos que se van a almacenar son totalmente correctos.

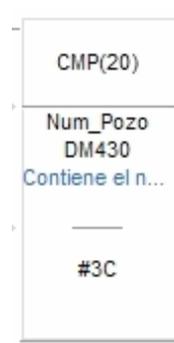


**Figura 5.30** Función para comparación de datos

- Verificación de ID(número de pozo)

- Función CMP

Haciendo uso de nuevo de la función CMP se comparó el número de pozo recibido con uno establecido internamente, de ser iguales, los datos recibidos son almacenados en las localidades de memoria correspondientes a dicho pozo. En la siguiente figura se muestra la comparación para corroborar si los datos corresponden al pozo 60.



**Figura 5.31** Función para comparación de datos

- Almacenamiento de datos

- Función XFRB

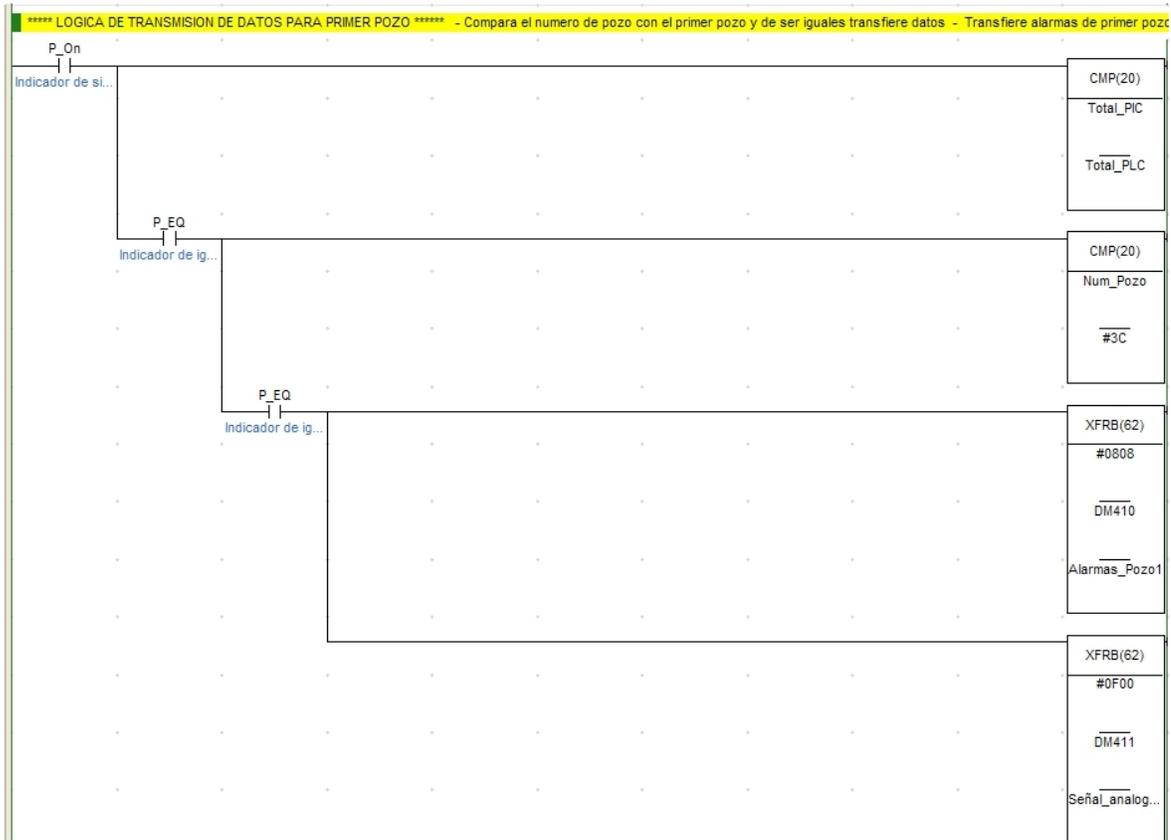
Esta instrucción se utilizó para realizar la transferencia de los datos correspondientes a las alarmas y a la señal analógica de su localización temporal a los canales que corresponden a cada pozo como se puede apreciar en la Figura 5.32.

- Alarmas

La palabra que contiene todas las alarmas es trasladada a una nueva posición de memoria. En el caso del pozo 60, la variable donde se almacenan los datos se llama Alarmas\_Pozo1.

- Señal analógica

La palabra que contiene la variable analógica es trasladada a una nueva posición de memoria.



**Figura 5.32** Proceso de verificación y almacenamiento temporal de datos

- Escalado señal analógica

El valor de la señal analógica es almacenado de forma binaria en una palabra de memoria cuyo valor varía entre 0 y 1024 de acuerdo al dato generado por el convertidor analógico digital, sin embargo, se necesitó representar este valor en notación BCD que variara entre 0 y 200 para el caso específico de los pozos

utilizados que varían entre 0 y 20 bares. Para ello se utilizó una instrucción denominada SCL que realiza un escalado del dato binario.

- Inicialización de función SCALING (SCL)

La función SCL requirió de tres parámetros para su funcionamiento, el primero corresponde a la posición de memoria donde se encuentra ubicada la variable que se desea escalar; el segundo al primer canal a partir del cual se ubican las configuraciones para los límites de la función y el tercer parámetro corresponde a la posición de memoria donde se almacenará la nueva variable escalada.

- Límites superiores e inferiores – Función MOV

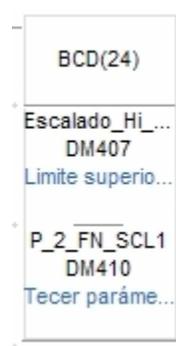
Le indican a la instrucción las variaciones máximas y mínimas de las variables.

Se le ingresó el límite superior e inferior entre los cuales variaba la señal de entrada, es decir, el dato binario. Estos límites deben ingresarse en forma hexadecimal. En este caso, estos eran 0 y #03FF(1024), ya que son los valores extremos entre los cuales variará el convertidor analógico.

Se tuvo que ingresar el límite superior e inferior entre los cuales variaba la salida de la función SCL, estos se deben colocar en BCD. En este caso estos fueron 0 y 200.

- Conversión HEX a BCD – Función BCD

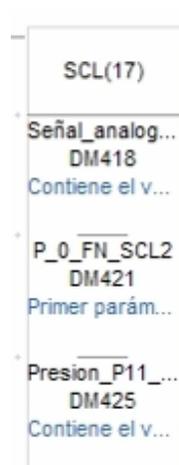
Debido a que no fue posible ingresar un 200 en BCD de forma directa, se tuvo que ingresar primero su equivalente en hexadecimal #C8 y almacenarlo en la y luego convertirlo a BCD con una función del mismo nombre.



**Figura 5.33** Función de conversión de binario a BCD

- Conversión y almacenamiento de presión
  - Función SCL

Mediante esta instrucción se convirtió el dato binario correspondiente a presión de cabezal en un dato BCD con un escalado definido por los parámetros que se le establecen a la función por medio de las cuatro variables tipo word que se mencionaron anteriormente.



**Figura 5.34** Función para realizar escalados

- Individualización de alarmas

Las alarmas se guardaron inicialmente de manera conjunta en un canal de memoria, pero luego fue necesario separarlas para monitorearlas de forma independiente.

o Función MOV B

La instrucción MOV B (move bit) se utilizó para almacenar por separado los bits correspondientes a las alarmas. A partir de la palabra que contiene todas las alarmas del pozo se realizaron los movimientos de bits a palabras por separado, así cada una de esas nuevas palabras va a variar sólo en ese bit que representa la alarma. A continuación se muestra parte del código relacionado:

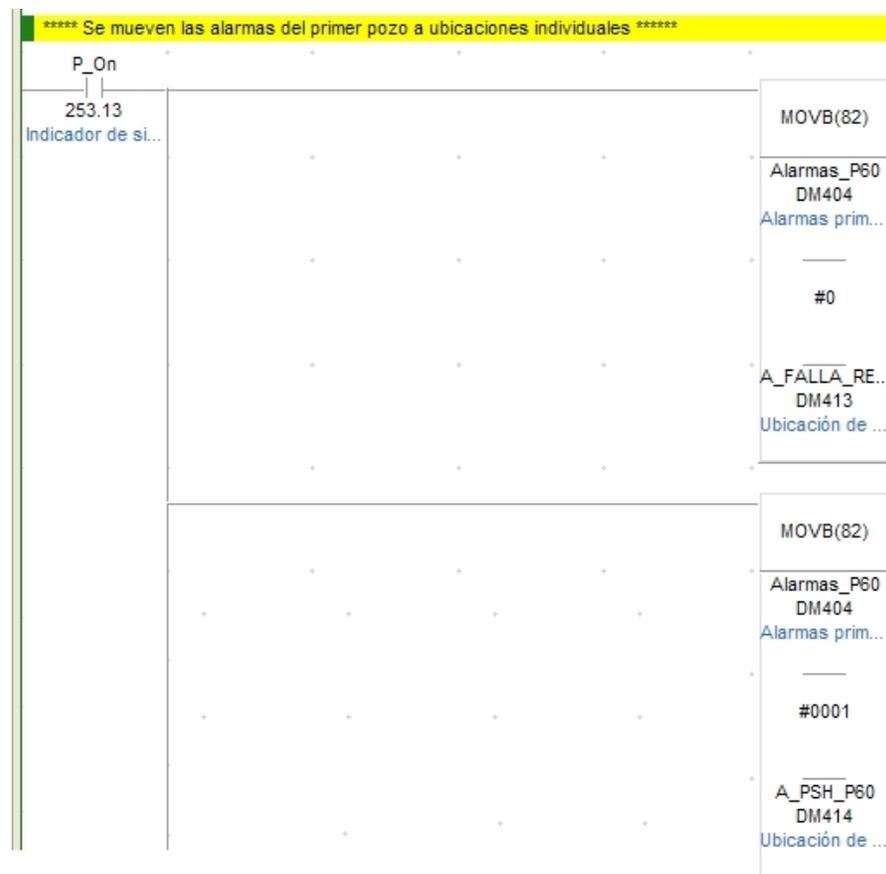


Figura 5.35 Función move bit

- Generación de contacto para pantallas

Con las alarmas almacenadas de forma individual se pudo generar los contactos para controlar los indicadores de las lámparas de las pantallas de interfaz de usuario y los indicadores en el sistema de monitoreo que contienen las PCs.

- o Memoria SR

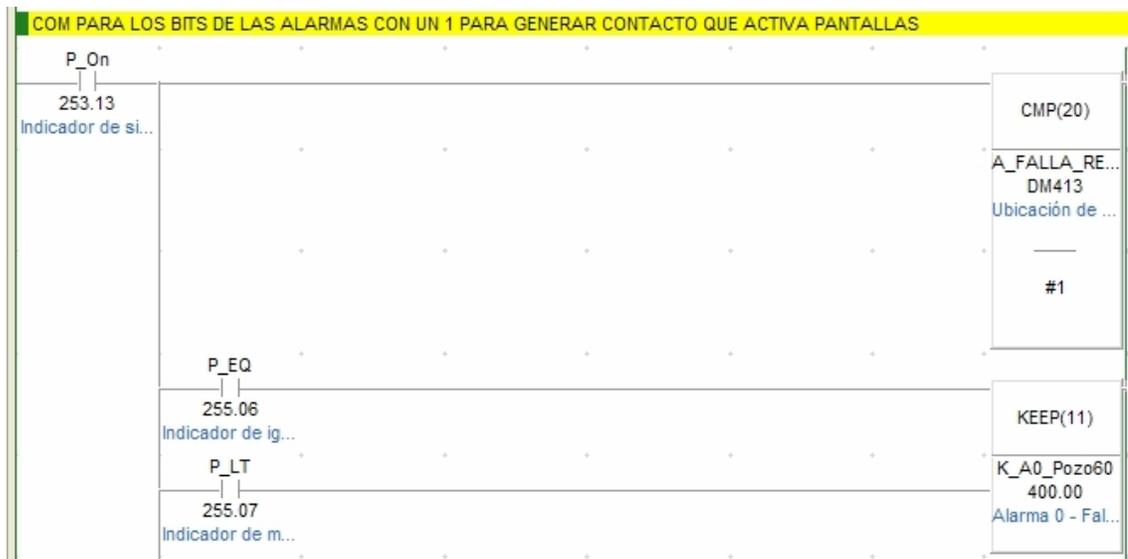
Para lograr generar dichos contactos se utilizó memoria del tipo SR. Esta contiene posiciones de memoria de un bit que corresponden a un contacto y en este caso se activan mediante una comparación.

- o Función CMP(20)

Se comparó una posición de memoria que sólo varía en su bit menos significativo con un "1", para determinar si la alarma está en alto o en bajo. De ser iguales se activa la instrucción keep.

- o Función KEEP(11)

La instrucción KEEP mantiene una posición de memoria activa si su condición de activación se presenta; y siempre y cuando la condición de desactivación no se presente.



**Figura 5.36** Generación de contactos con la función keep

Una vez que las alarmas están almacenadas en una posición de memoria adecuada e individual se procedió a realizar la lógica de control para la visualización de los datos en las pantallas, tanto la touch screen como la de la PC de monitoreo.

- Control de visualización de datos

o Función DIFU

A partir de la señal que manejan los keep específicos de cada alarma se activó una instrucción DIFU que significa differentiate up y se activa mediante un flanco positivo.

o Función keep

Se utilizó de nuevo una instrucción keep que se activa con la señal del DIFU anterior y se desactiva con la señal ACK\_Alarms que se genera al presionar un botón en la pantalla touch screen.

A partir de una lógica combinacional se creó la señal que se encarga de encender o apagar la lámpara que indicaba alarma en la pantalla de interfaz. A continuación se muestra una imagen de una porción del código de control de visualización:



**Figura 5.37** Lógica de control para la visualización de las alarmas

### 5.4.1.3. Ubicaciones de memoria utilizadas

El PLC cuenta con memorias que se utilizan de acuerdo a la aplicación. En el caso de las rutinas diseñadas para la recepción de datos por medio del puerto RS232, se utilizó para el manejo de los datos la memoria de datos o DM (data memory) que es como la memoria de uso general. Fue necesario utilizar memoria denominada SR (special relays), para generar los contactos necesarios para las alarmas, debido a que se tenía que activar unas lámparas que estaban en función de contactos.

Nombre	Tipo de ...	Dirección ...	Ubicaci...	Uso	Comentario
Alarmas_P60	CHANNEL	DM404		Tr...	Alarmas primer pozo
Señal_analog_P60	CHANNEL	DM405		Tr...	Contiene el valor de la s...
Escalado_Hi_P60	CHANNEL	DM407		Tr...	Límite superior del escal...
P_0_FN_SCL1	CHANNEL	DM408		Tr...	Primer parámetro utiliza...
P_1_FN_SCL1	CHANNEL	DM409		Tr...	Segundo parámetro utili...
P_2_FN_SCL1	CHANNEL	DM410		Tr...	Tecer parámetro utilizad...
P_3_FN_SCL1	CHANNEL	DM411		Tr...	Cuarto parámetro utiliza...
Presion_P60_SCL	CHANNEL	DM412		Tr...	Contiene el valor escala...
A_FALLA_RED_P60	CHANNEL	DM413		Tr...	Ubicación de memoria q...
A_PSH_P60	CHANNEL	DM414		Tr...	Ubicación de memoria q...
A_PE_CARGA_P60	CHANNEL	DM415		Tr...	Ubicación de memoria q...
A_PE_NOAUTO_P60	CHANNEL	DM416		Tr...	Ubicación de memoria q...
Alarmas_P11	CHANNEL	DM417		Tr...	Contiene las alarmas del...
Señal_analog_P11	CHANNEL	DM418		Tr...	Contiene el valor binario...
Escalado_Hi_P11	CHANNEL	DM420		Tr...	Límite superior del escal...
P_0_FN_SCL2	CHANNEL	DM421		Tr...	Primer parámetro utiliza...
P_1_FN_SCL2	CHANNEL	DM422		Tr...	Segundo parámetro utili...
P_2_FN_SCL2	CHANNEL	DM423		Tr...	Tercer parámetro utiliza...
P_3_FN_SCL2	CHANNEL	DM424		Tr...	Cuarto parámetro utiliza...
Presion_P11_SCL	CHANNEL	DM425		Tr...	Contiene el valor de la p...
A_FALLA_RED_P11	CHANNEL	DM426		Tr...	Ubicación de memoria q...
A_PSH_P11	CHANNEL	DM427		Tr...	Ubicación de memoria q...
A_PE_CARGA	CHANNEL	DM428		Tr...	Ubicación de memoria q...
A_PE_NOAUTO	CHANNEL	DM429		Tr...	Ubicación de memoria q...
Num_Pozo	CHANNEL	DM430		Tr...	Contiene el numero de ...
Alarmas	CHANNEL	DM431		Tr...	Contiene el valor de las ...
Analogica	CHANNEL	DM432		Tr...	Valor de la señal analogica
Total_PIC	CHANNEL	DM433		Tr...	Contiene un numero qu...
Total_PLC	CHANNEL	DM434		Tr...	Contiene el valor de la s...

**Figura 5.38** Variables tipo DM utilizadas para el almacenamiento de datos

Nombre	Tipo de ...	Dirección...	Comentario
* K_A0_Pozo60	BOOL	400.00	Alarma 0 - Fallo de red del pozo 60
* K_A1_Pozo60	BOOL	400.01	Alarma 1 - Pres. de bomb del pozo 60
* K_A2_Pozo60	BOOL	400.02	Alarma 2 - Planta con carga del pozo 60
* K_A3_Pozo60	BOOL	400.03	Alarma 3 - Planta en no auto del pozo 60
* K_A0_Pozo11	BOOL	400.04	Alarma 0 - Fallo de red del pozo 11
* K_A1_Pozo11	BOOL	400.05	Alarma 1 - Pres. de bomb del pozo 11
* K_A2_Pozo11	BOOL	400.06	Alarma 2 - Planta con carga del pozo 11
* K_A3_Pozo11	BOOL	400.07	Alarma 3 - Planta en no auto del pozo 11
* D_A0_P60	BOOL	400.10	Difu para alarma 0 para encender lampara de pantalla
* D_A1_P60	BOOL	400.11	Difu para alarma 1 para encender lampara de pantalla
* D_A2_P60	BOOL	400.12	Difu para alarma 2 para encender lampara de pantalla
* D_A3_P60	BOOL	400.13	Difu para alarma 3 para encender lampara en pantalla
* K_A0_P60_LAMP	BOOL	400.14	Keep para encender lampara de alarma 0 del p60
* K_A1_P60_LAMP	BOOL	400.15	Keep para encender lampara de alarma 1 del p60
* K_A2_P60_LAMP	BOOL	401.00	Keep para encender lampara de alarma 2 del p60
* K_A3_P60_LAMP	BOOL	401.01	Keep para encender lampara de alarma 3 del p60
* LAMP_A0_P60	BOOL	401.03	Lampara para indicar alarma 0 del p60
* LAMP_A1_P60	BOOL	401.04	Lampara para indicar alarma 1 del p60
* LAMP_A2_P60	BOOL	401.05	Lampara para indicar alarma 2 del p60
* LAMP_A3_P60	BOOL	401.06	Lampara para indicar alarma 3 del p60
* ACK_Alarms_P60	BOOL	401.07	Acknowledge for alarms from P60
* D_A0_P11	BOOL	401.08	Difu para alarma 0 para encender lampara de pantalla
* D_A1_P11	BOOL	401.09	Difu para alarma 0 para encender lampara de pantalla
* D_A2_P11	BOOL	401.10	Difu para alarma 2 para encender lampara de pantalla
* D_A3_P11	BOOL	401.11	Difu para alarma 3 para encender lampara de pantalla
* K_A0_P11_LAMP	BOOL	401.12	Keep para encender lampara de alarma 0 del p11
* K_A1_P11_LAMP	BOOL	401.13	Keep para encender lampara de alarma 1 del p11
* K_A2_P11_LAMP	BOOL	401.14	Keep para encender lampara de alarma 2 del p11
* K_A3_P11_LAMP	BOOL	401.15	Keep para encender lampara de alarma 3 del p11
* LAMP_A0_P11	BOOL	402.00	Lampara para indicar alarma 0 del p11
* LAMP_A1_P11	BOOL	402.01	Lampara para indicar alarma 1 del p11
* LAMP_A2_P11	BOOL	402.02	Lampara para indicar alarma 2 del p11
* LAMP_A3_P11	BOOL	402.03	Lampara para indicar alarma 3 del p11
* ACK_Alarms_P11	BOOL	402.04	Acknowledge for alarms from P11
* L_Alarms_P60	BOOL	402.07	Alarmas P60
* L_Alarms_P11	BOOL	402.08	Alarmas P11

**Figura 5.39** Variables tipo SR utilizadas para generar contactos

### 5.4.2. Estructura del programa del microcontrolador PIC16F877A

El código completo del software implementado en el PIC se adjunta en el Apéndice A.2.

El programa implementado en el microcontrolador se puede dividir en los siguientes procesos:

- *Configuración de dispositivos y puerto serie*

Es el encabezado del programa, aquí se configuró: el modelo del PIC, la resolución del convertidor analógico/digital, la velocidad del reloj, los parámetros del puerto serie y una serie de fuses que utiliza el PIC.

- *Definición e inicialización de puertos y variables*

En esta parte del programa lo que se hizo fue definir las variables que serían utilizadas para el manejo de datos o cualquier otra necesidad, además los puertos del PIC que se iban a necesitar se activaron, de lo contrario no se podían utilizar. Los puertos de entradas y salidas digitales y las variables de uso común son inicializados con un valor adecuado dependiendo del valor inicial que se necesite, algunas después del encabezado y otras en el método **main**.

- *Configuraciones internas del microcontrolador*

Estas configuraciones se realizaron dentro del método **main** y lo que hacen en la mayoría de los casos es habilitar o deshabilitar funciones en el micro. Así por ejemplo, el manejo de los puertos analógicos fue configurado aquí.

- *Interrupción para recibir datos por el puerto serie*

Esta interrupción se ejecutó en el momento en que existen datos disponibles para ser leídos por el microcontrolador en el puerto serie. Esta interrupción recibe el nombre **#int\_RDA** y lo que está dentro del método **RDA\_isr()** forma parte de lo que se hace cuando se recibe un dato serie.

- *Lectura de la variable analógica*

Existe un pin del microcontrolador en el cual se monitoreó el valor analógico que representa la presión de cabezal. En el proceso de lectura de esa variable lo que se hizo fue llamar al método **sensor01()**, el cual se encargaba de leer el valor del canal 0, es decir la entrada analógica 0 y este método retornaba el valor digital correspondiente a dicha entrada en la variable **int16 sensor1**.

Previamente se debió haber configurado y ajustado los pines que definen los valores analógicos extremos en que va a variar dicha variable más conocidos como referencias.

- *Lectura de las variables digitales*

Este muestreo se incluyó en el método **main()** y lo que se ejecutan son una serie de preguntas mediante el comando **if()**. Si la condición por la que se pregunta en el **if()** se cumple se le asigna un "1" a una posición de memoria específica de un bit mediante la instrucción **bit\_set(Alarms,0)** que en este caso asigna un uno a la posición cero de la variable **Alarms**.

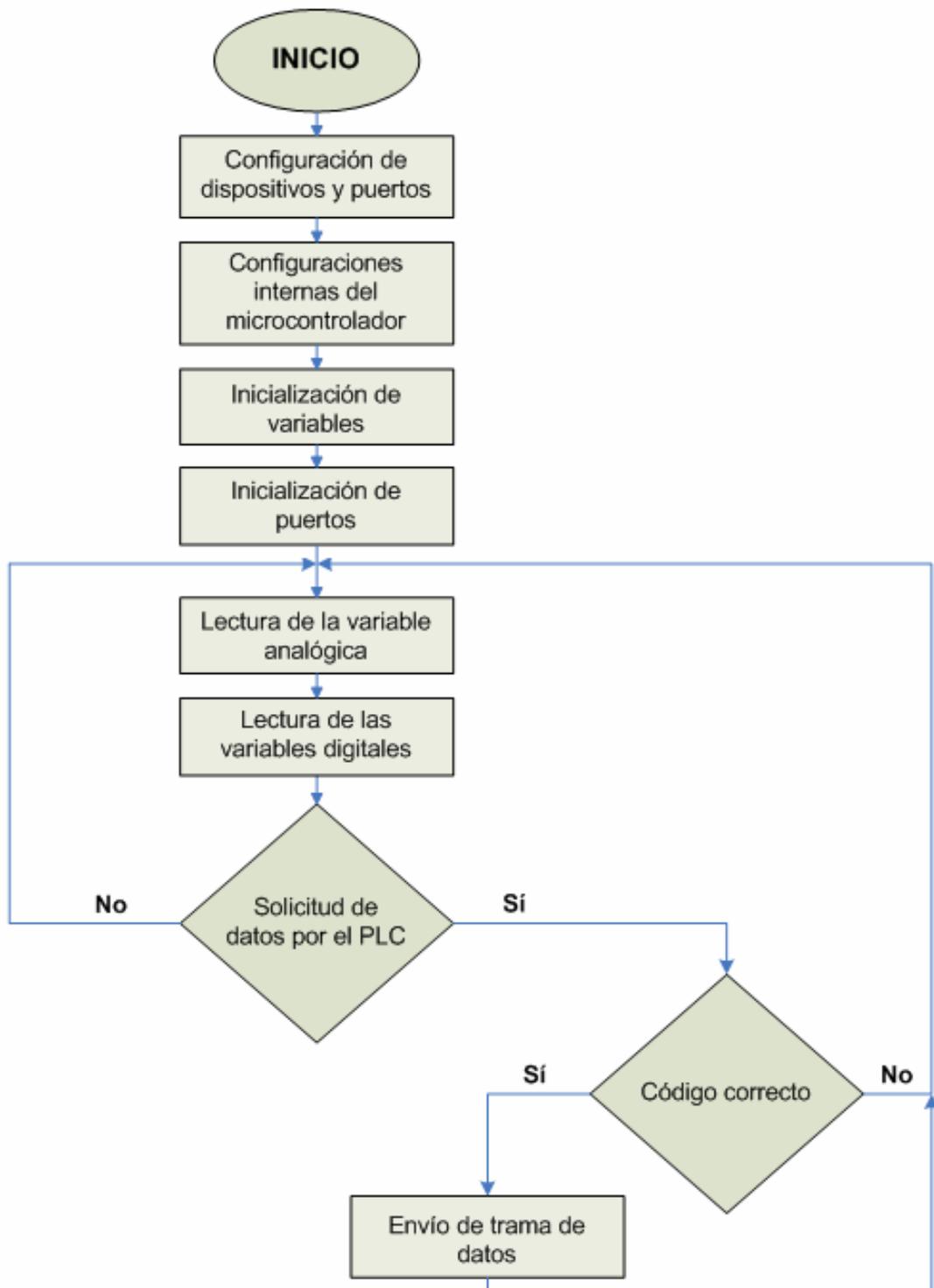
- *Confirmación de código de petición de datos*

El programa constantemente preguntaba por una bandera denominada **RS232\_data** que se activaba únicamente si el dato que le llegaba al PIC por el puerto serie correspondía al código de petición correcto, el cual era el número de pozo asociado. La verificación de este código se hizo en el mismo método que lee los datos que ingresaban por el puerto serie el cual se llamó **RDA\_isr()** y ahí mismo se activaba la bandera en caso de que el código concordara.

- *Rutina de envío de datos*

Una vez confirmado el código de petición de datos que envía el PLC, el microcontrolador iniciaba la rutina de envío de datos hacia el módem inalámbrico para que este los transmitiera hacia el satélite. Para enviar los datos se utilizó la instrucción **putc(var)** y en lugar de la variable var se colocó la variable de 8 bits que se deseaba enviar.

En el siguiente diagrama se presenta un esquema del programa implementado en el microcontrolador:



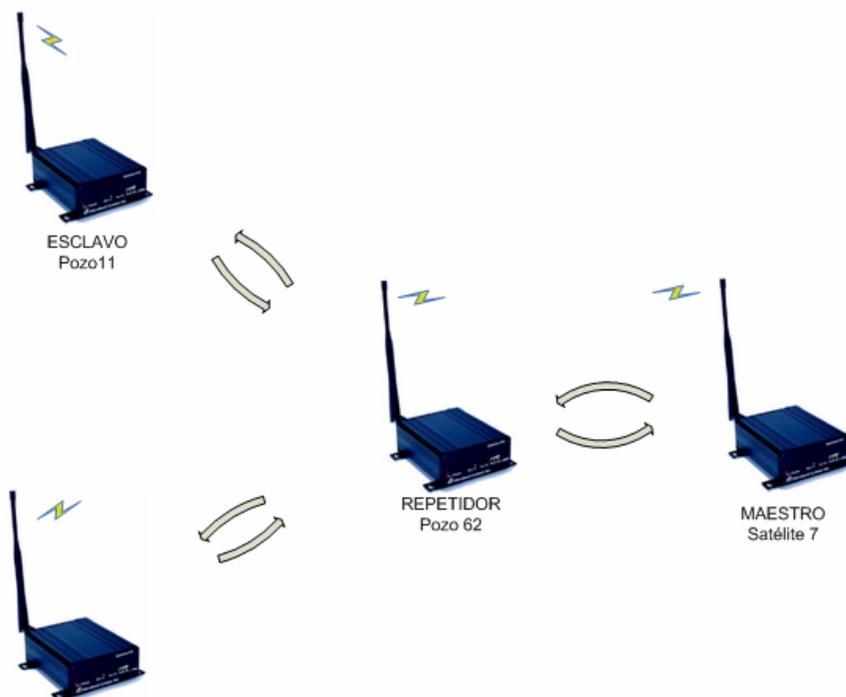
**Figura 5.40** Diagrama del programa implementado en el PIC

### 5.4.3. Configuración de los radio módems

Los radio módems Spectra 910 poseen una memoria configurable en la cual se establecieron los diferentes parámetros que determinaron su funcionamiento dependiendo de las características del enlace establecido.

Esta configuración se realizó mediante comandos AT conectando el equipo a una PC a través del puerto serie y mediante una aplicación como Hyperterminal de windows. Para ello el puerto serie debió tener la misma configuración que se muestra en la Tabla 5.10.

Los Spectra 910 se configuraron para formar una red como la que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 5.41** Topología de la red implementada

En las siguientes tablas se muestran las configuraciones utilizadas en el maestro, el repetidor y el esclavo:

**Tabla 5.11** Configuración para el maestro

E1, Q0, V1, W0, S0=1, S2=43, S3=13, S4=10, S5=8	
DCD	&C1 (On)
DTR	&D0 (DTR ignorado)
Framing	&E0 (Desactivado)
Handshaking	&K0 (Desactivado)
DSR	&S1
Operating Mode	S101=1 (Maestro P-MP)
Serial Baud Rate	S102=7 (9600 bps)
Wireless Link Rate	S103=2 (Rápido, No FEC)
Network Address	S104=1
Unit Address	S105=1
Primary Hop Pattern	S106=0
Encryption Key	S107=1
Output Power	S108=3 (1W)
Hop Interval	S109=4
Data Format	S110=1 (8N1)
Packet Minimum Size	S111=16
Packet Maximum Size	S112=24
Packet Retransmissions	S113=1
Packet Size Control	S114=0
Packet Repeat Interval	S115=1
Character Timeout (ms)	S116=8
Modbus Mode	S117=0
Roaming	S118=0
Quick Enter to Command	S119=1
RTS/DCD Framing (ms)	S120=0
DCD Timeout (ms)	S121=0
Remote Control	S122=0
TDMA Duty Cycle	S124=0
TDMA Max Address	S125=200
Data Protocol	S126=0
Address Filtering	S127=0
Multicast Group	S128=0
Secondary Master	S129=0
Secondary Hop Pattern	S206=2
Packet Retry Limit	S213=2

**Tabla 5.12** Configuración para el esclavo

E1, Q0, V1, W0, S0=1, S2=43, S3=13, S4=10, S5=8	
DCD	&C1 (On)
DTR	&D0 (DTR ignorado)
Framing	&E0 (Desactivado)
Handshaking	&K0 (Desactivado)
DSR	&S1
Operating Mode	S101=3 (Esclavo)
Serial Baud Rate	S102=7 (9600 bps)
Wireless Link Rate	S103=2 (Rápido, No FEC)
Network Address	S104=1
Unit Address	S105=3 (4 para el otro esclavo)
Primary Hop Pattern	S106=2
Encryption Key	S107=1
Output Power	S108=3 (1W)
Hop Interval	S109=4
Data Format	S110=1 (8N1)
Packet Minimum Size	S111=16
Packet Maximum Size	S112=24
Packet Retransmissions	S113=1
Packet Size Control	S114=0
Packet Repeat Interval	S115=1
Character Timeout (ms)	S116=8
Modbus Mode	S117=0
Roaming	S118=0
Quick Enter to Command	S119=1
RTS/DCD Framing (ms)	S120=0
DCD Timeout (ms)	S121=0
Remote Control	S122=0
TDMA Duty Cycle	S124=0
TDMA Max Address	S125=200
Data Protocol	S126=0
Address Filtering	S127=0
Multicast Group	S128=0
Secondary Master	S129=0
Secondary Hop Pattern	S206=2
Packet Retry Limit	S213=2

**Tabla 5.13** Configuración para el repetidor

E1, Q0, V1, W0, S0=1, S2=43, S3=13, S4=10, S5=8	
DCD	&C1 (On)
DTR	&D0 (DTR ignorado)
Framing	&E0 (Desactivado)
Handshaking	&K0 (Desactivado)
DSR	&S1
Operating Mode	S101=4 (Repetidor)
Serial Baud Rate	S102=7 (9600 bps)
Wireless Link Rate	S103=2 (Rápido, No FEC)
Network Address	S104=1
Unit Address	S105=2
Primary Hop Pattern	S106=0
Encryption Key	S107=1
Output Power	S108=3 (1W)
Hop Interval	S109=4
Data Format	S110=1 (8N1)
Packet Minimum Size	S111=16
Packet Maximum Size	S112=24
Packet Retransmissions	S113=1
Packet Size Control	S114=0
Packet Repeat Interval	S115=1
Character Timeout (ms)	S116=8
Modbus Mode	S117=0
Roaming	S118=0
Quick Enter to Command	S119=1
RTS/DCD Framing (ms)	S120=0
DCD Timeout (ms)	S121=0
Remote Control	S122=0
TDMA Duty Cycle	S124=0
TDMA Max Address	S125=200
Data Protocol	S126=0
Address Filtering	S127=0
Multicast Group	S128=0
Secondary Master	S129=0
Secondary Hop Pattern	S206=2
Packet Retry Limit	S213=2

## Capítulo 6: Análisis de Resultados

### 6.1. Resultados

Fue posible diseñar y programar las rutinas para la recolección, manejo y envío de datos en el microcontrolador PIC16F877A que se ubica en el pozo. Para la compilación del programa en el PIC se utilizó el software CCS Compiler.

Los circuitos de las tarjetas fueron diseñados y desarrollados mediante el software Eagle Layout Editor 4.13 y el circuito impreso fue desarrollado en el laboratorio del ICE en Colima de Tibás. El proceso de acople (soldadura) de los componentes a la tarjeta se realizó en el laboratorio de Mantenimiento Instrumentación de Campo en Guayabo.

A partir de los circuitos impresos del cargador y del circuito de adquisición de datos se implementaron las tarjetas que se muestran a continuación:

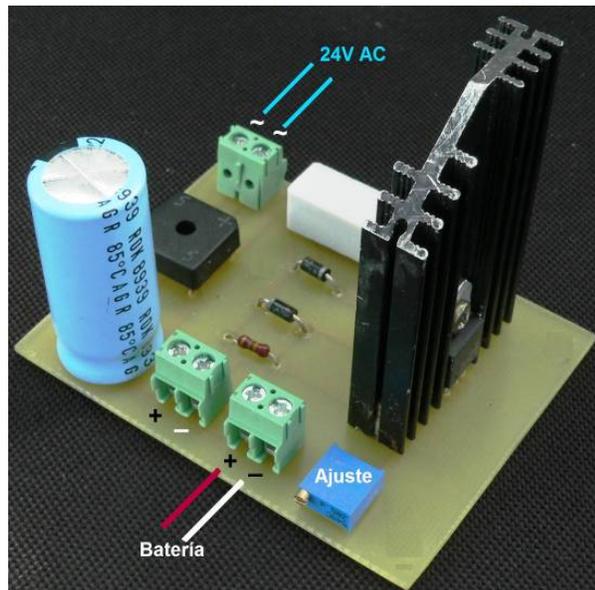
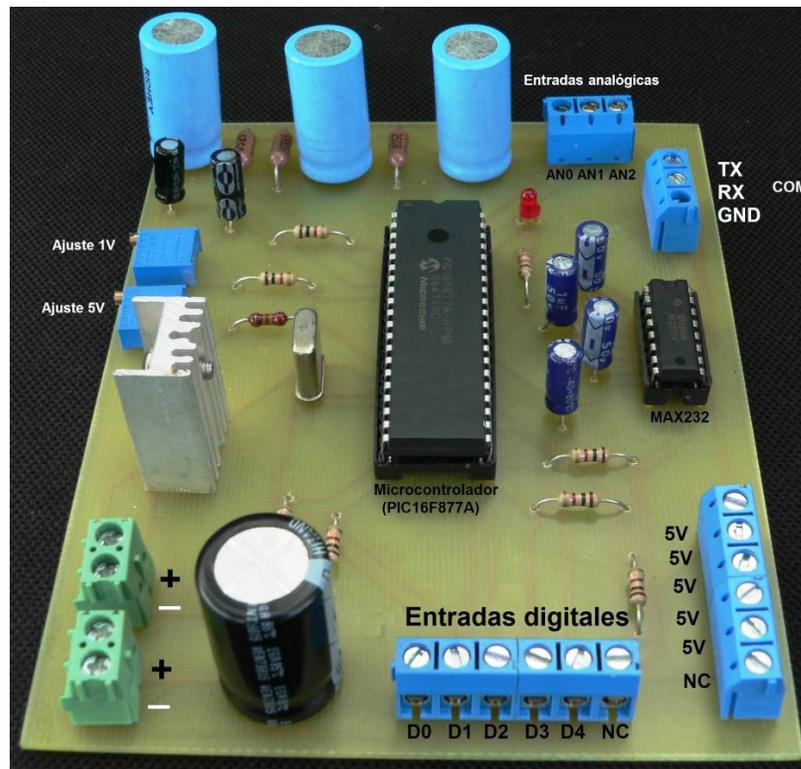


Figura 6.1 Tarjeta del circuito cargador y regulador



**Figura 6.2** Tarjeta del circuito de adquisición de datos

Fue posible configurar los módems inalámbricos Spectra 910 como esclavo, repetidor y maestro; y además se logró desarrollar el diseño de las rutinas que se encargan del manejo de datos en el PLC en conjunto con las modificaciones a las pantallas de monitoreo tanto en el satélite como en el laboratorio en Guayabo.

Después de probar el sistema durante aproximadamente 30 días se obtuvieron resultados muy positivos respecto a su funcionamiento.

La variable de presión se pudo monitorear constantemente y se verificó que la resolución de 10 bits que utiliza el microcontrolador PIC16F877A en su entrada analógica es adecuada para medir el valor de la presión dado que las variaciones que se percibían en la pantalla de monitoreo eran iguales a las que presentaban los otros pozos que utilizaban el sistema de monitoreo mediante cables. Es importante dar a conocer que no se presentó ningún problema con el monitoreo de esta variable durante todo el período de prueba.

Las variables digitales se pudieron monitorear de forma continua e individual y se verificó su adecuado funcionamiento ante diferentes situaciones de alarma que se presentaron, en las cuales fue posible observar como el sistema de monitoreo mostraba la información acorde a lo que estaba sucediendo en el campo. Así por ejemplo, se presentaron situaciones de fallo de red y por lo tanto la entrada en funcionamiento de las plantas de emergencia en los pozos, con lo que fue posible corroborar que el sistema indicaba de manera congruente y de forma individual las alarmas presentes en el pozo por estos motivos.

En la Figura 6.3 se muestra la pantalla del sistema de monitoreo que tienen en el Centro de Servicio Recursos Geotérmicos Miravalles donde se visualizan los datos que están presentes en los pozos y satélites del Proyecto Geotérmico Miravalles. Los datos de los pozos asociados al satélite 7 encerrados en los círculos rojos pequeños se monitorearon de forma inalámbrica, así por ejemplo el pozo 11 muestra una presión de cabezal de 6.1bar y el pozo 60 muestra una presión de 6.3bar.

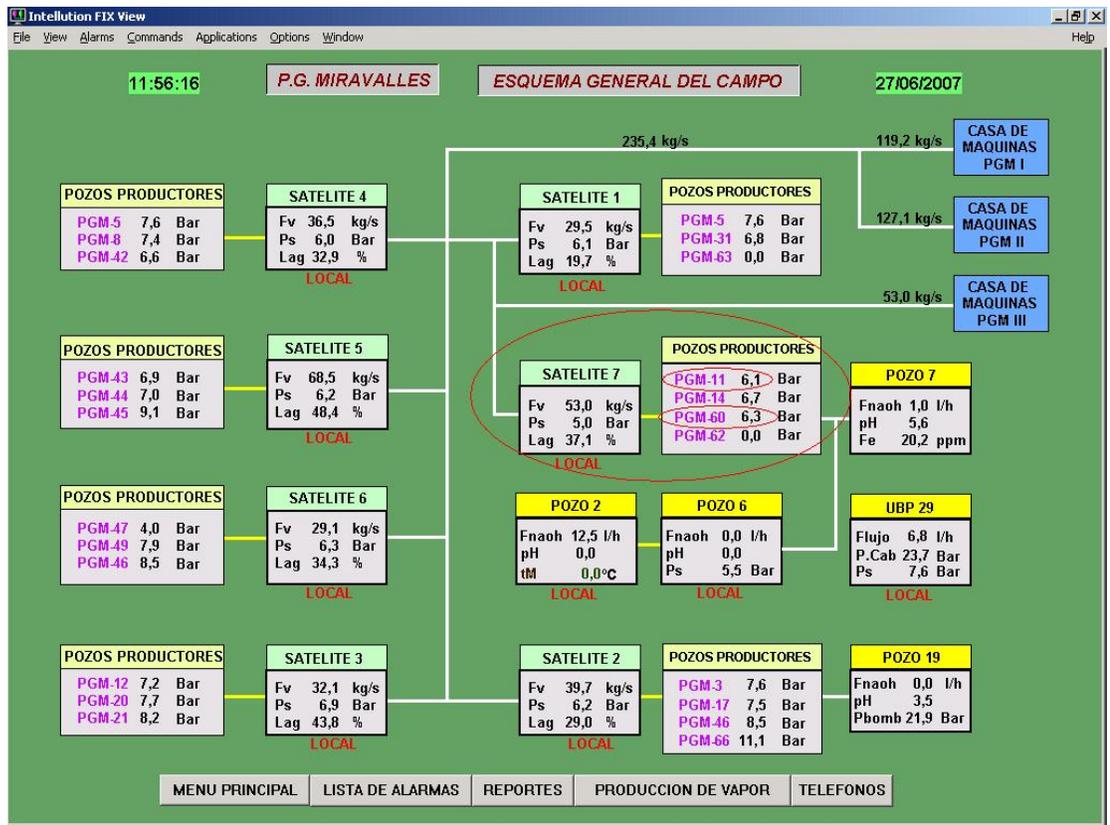


Figura 6.3 Pantalla principal de monitoreo

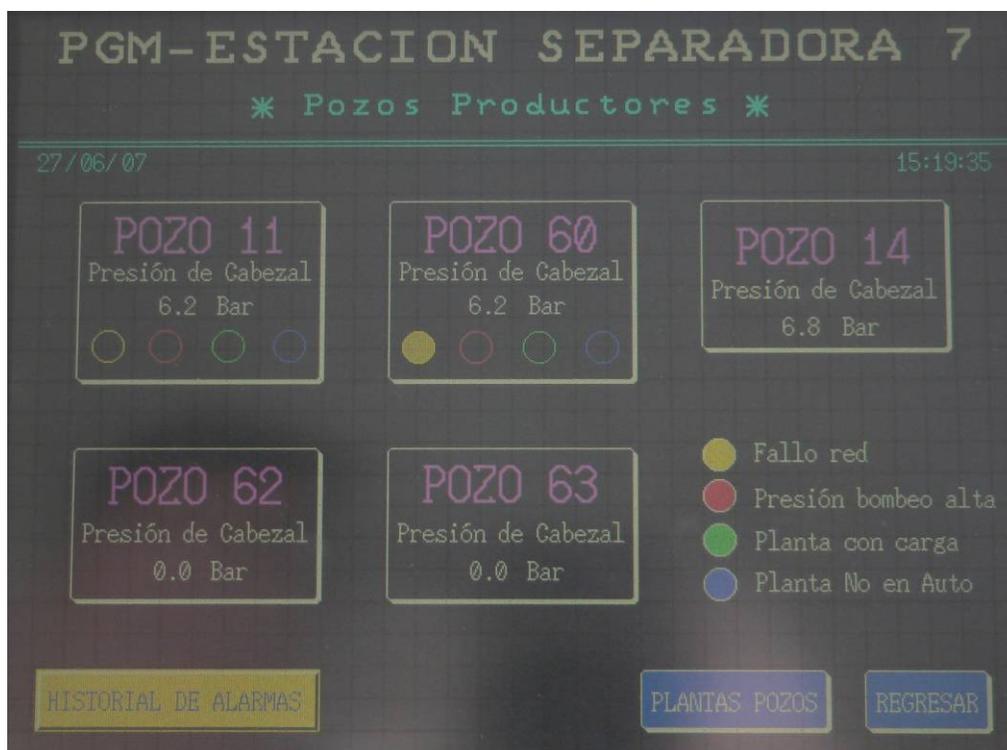
Cuando se presenta alguna alarma el recuadro que dice pozos productores encerrado en el circulo rojo grande en la pantalla anterior parpadeaba; y dando clic en el mismo se podía apreciar la alarma o las alarmas que estaban presentes en un pozo específico, ya que aparecía una pantalla como la de Figura 5.21 en la que se encuentra un recuadro como el siguiente:



Figura 6.4 Recuadro que muestra las alarmas presentes en el pozo

El recuadro anterior muestra las diferentes alarmas que pueden estar presentes en el pozo, y si alguna de ellas está presente el indicador tipo lámpara parpadeaba. En este caso se capturó una imagen cuando se presentó una alarma por fallo de red en el pozo 11.

En el satélite fue posible visualizar los mismos datos anteriores en la pantalla de interfaz de usuario. En la Figura 6.5 se muestra una imagen de la pantalla de interfaz de usuario, en la cual se puede apreciar una presión de cabezal de 6.2bar en el pozo 11 y en el pozo 60; además en el pozo 60 se puede apreciar una alarma por fallo de red.



**Figura 6.5** Pantalla de interfaz del satélite

Con respecto al sistema de respaldo de alimentación se pudo probar su adecuado funcionamiento debido a que el repetidor no estaba respaldado más que con la batería de 12V, y fue posible corroborar que en situaciones en las cuales se presentó fallo de alimentación de red los datos de las alarmas y de la señal analógica se podían observar sin ningún problema.

Según la Tabla 5.9 y de acuerdo a los leds indicadores del módem la fuerza de la señal para el enlace entre el módem del pozo 60 y el repetidor fue de aproximadamente -93dBm. Para el caso del enlace entre el pozo 11 y el repetidor la fuerza de la señal fue de -79dBm.

Con lo anterior se pudo conocer con seguridad que los módems si requieren de antenas que estén en línea de vista para su óptimo funcionamiento. Esto porque para el caso entre el pozo 60 y el pozo donde está ubicado el repetidor existe una pequeña montaña que atenúa la señal en aproximadamente 14dBm respecto al enlace del pozo 11, el cual era un caso que se aproximaba mucho al 100% de línea de vista.

El funcionamiento del sistema mediante la utilización de un repetidor funcionó de manera óptima. Aunque según la teoría el incluir un repetidor degrada el sistema ya que introduce un retardo en la transmisión de los datos, en este caso el retardo que se pudo haber presentado es insignificante debido a que la cantidad de datos transmitidos es relativamente baja.

Se desarrolló un manual de usuario en formato de página web en el cual se especifican desde los pasos para la puesta en marcha del sistema, así como el mantenimiento preventivo del mismo. El manual está conformado por 10 secciones:

- *Principal:* es la página de inicio, aquí se muestra una descripción general del departamento para el cual se desarrolló el proyecto y se presentan los enlaces que llevan a la descripción del proyecto.
- *Sistema:* en esta sección se hace una descripción general del sistema desarrollado y se establecen los enlaces a los demás apartados.
- *Oper. Pozo:* en este apartado se muestra el procedimiento necesario para poner en marcha el sistema de transmisión en el pozo además de las medidas de seguridad para realizar las operaciones. Se presentan imágenes con las conexiones y demás información necesaria.
- *Oper Satélite:* de forma similar a la sección anterior se muestran las pautas y las medidas de seguridad para la puesta en marcha pero para el sistema de transmisión en el satélite y se agregan las imágenes correspondientes.
- *Mant. Pozo:* en este apartado se muestran los diferentes pasos para llevar a cabo el mantenimiento preventivo del sistema en el pozo junto con las medidas de seguridad necesarias a tomar en cuenta.
- *Mant. Sat.:* aquí se presentan los pasos y las medidas de seguridad necesarias para llevar a cabo el mantenimiento preventivo en el satélite.
- *Programación:* esta sección incluye los aspectos necesarios para realizar la programación del microcontrolador, el PLC y el módem inalámbrico.
- *Vent. y desvent.:* es una sección que tiene como fin el mostrar cuales son las ventajas y desventajas del sistema inalámbrico respecto a un sistema de comunicación mediante cables.

- *Problemas:* aquí se muestran cuales pueden ser algunos posibles problemas, su causa y la respectiva solución a la hora de poner en marcha el sistema de transmisión en el pozo y en el satélite.
- *Créditos:* en esta página se muestra la información general del diseñador.

## **6.2. Análisis**

### **Análisis de costos**

La opción de poder utilizar un sistema de transmisión inalámbrico para poder hacer llegar la información desde los pozos hasta el satélite llega a significar un importante ahorro de costos tanto económicos como de tiempo instalación.

De acuerdo a la información proporcionada por el departamento de Mantenimiento Instrumentación de Campo se pudo conocer que para lograr instalar los cables para enviar los datos de cuatro pozos a una distancia aproximada de 500m cada uno respecto a la estación separadora, los gastos económicos totales de instalación son muy elevados, de aproximadamente 20 millones de colones.

En el Anexo B.1 se muestra de manera más desglosada los gastos realizados para implementar el sistema de comunicación por cable para el caso entre los pozos 11, 60, 14 y 66 y la estación separadora 7. El tiempo que se requirió para realizar dichos trabajos de instalación fue de aproximadamente 22 días debido a que el terreno por donde viajan los cables es montañoso y de difícil acceso, tomando en cuenta que para este caso no se cavaron zanjas para introducir los cables sino que el trabajo fue por la superficie. El costo por planilla que tiene un trabajo de estos es de aproximadamente 4 800 000 colones como se muestra en la Tabla 8.4 del Anexo B.1.

En el Apéndice A.1 se pueden apreciar los costos en que se debe de incurrir para instalar parte del sistema inalámbrico en un pozo y tomando en cuenta los gastos por el cable para realizar las conexiones tanto en el pozo como en el satélite. Es posible observar que el total es de aproximadamente 60 mil colones, lo cual es relativamente bajo. A esto se le debe agregar los costos por la compra de los módems y antenas cuya cotización se presenta en el Anexo B.2 y se puede observar que por la compra de dos módems incluyendo las antenas y el cable coaxial se incurre en un gasto aproximado de 2 800 dólares, lo cual equivale a un monto de

1 470 000 colones que sumándole los gastos por las tarjetas se convierte en 1 530 000 colones. A lo anterior se le debe agregar los costos por tiempo de instalación que son muy reducidos, ya que es posible instalar la conexión entre un pozo y un satélite en un tiempo máximo de un día.

Si hacemos una relación entre el costo aproximado que tiene realizar la instalación mediante cables entre un pozo y un satélite a una distancia cercana a los 500m que es de 5 000 000 de colones (dividiendo el total entre 4); y el coste en realizar dicha conexión de forma inalámbrica que es de 1 530 000 colones; es posible notar que el ahorro es de 3 500 000 colones aproximadamente y esto corresponde a un 70% de ahorro.

Si se toman en cuenta los gastos para instalar el sistema inalámbrico en cuatro pozos se obtienen resultados aún más considerables. En este caso se necesitan 5 módems inalámbricos, y si se toma un precio de 1400 dólares por módem con su respectivo equipo de acuerdo al Anexo B.2, el total sería de 7000 dólares que corresponde a 3 700 000 colones aproximadamente, y a esto hay que sumarle los costos que se muestran en el Apéndice A.1 por pozo, dando un total que se puede aproximar a los 4 000 000 de colones. Esto comparado con los gastos que se realizaron en el satélite 7 (aprox. 20 millones) implicaría un ahorro de 16 000 000 de colones que equivale a un 80% de ahorro, considerando también el gran ahorro en tiempo de instalación.

Es importante destacar que las compras de los materiales para el sistema cableado se realizaron en el año 2005, por lo tanto actualmente los precios deben ser mayores, lo cual implica que el ahorro real puede ser mayor al señalado.

## **Confiabilidad del sistema**

El sistema diseñado utilizó radios FHSS que incorporan la ya probada técnica de transmisión de FM con la adición de que los radios están cambiando continuamente de frecuencia. A manera de ejemplo, los módems utilizados transmiten en un ancho de banda de 26 MHz, de 902 a 928 MHz, lo cual significa que poseen aproximadamente 1000 veces más ancho de banda que los radios tradicionales de FM. Cada radio opera en 63 diferentes frecuencias, al azar, permaneciendo únicamente 20 ms en cada una de acuerdo al registro S109 que indica la frecuencia con que los módems cambian de canal.

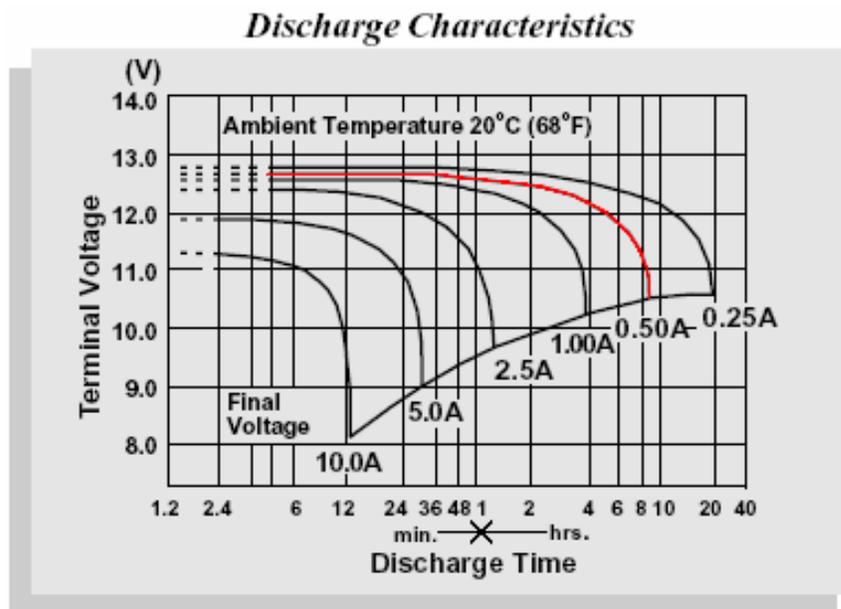
Para los usuarios de sistemas de radio control esto significa:

- Mayor resistencia a interferencias. Cualquier otro radio trabajando cerca puede bloquear un sistema FHSS por una fracción de segundo únicamente en tal frecuencia, lo que no es notable para aplicaciones industriales.
- Libertad de coordinación. Como los radios FHSS permanecen tiempos tan cortos en una frecuencia específica, no hay interferencia notable entre ellos. Hasta 100 sistemas FHSS pueden operar dentro de una misma área sin degradación notable de operación.

Se implementó un procedimiento para la revisión de errores en el sistema de transmisión de datos que consiste en una comparación de los datos transmitidos. Lo que se hace es utilizar los dos últimos bytes de la trama que envía el microcontrolador para incorporar una información que corresponde a la suma de las señales digitales de las alarmas y la señal analógica. En el PLC se recibe la trama de datos y se separa en sus respectivos contenidos para sumarlo y compararlo con el contenido de la última palabra que viene en la trama; por lo tanto si son iguales se realizan las demás operaciones en el PLC como lo son el almacenamiento de datos y control de señales, sino se espera por otra nueva trama para realizar otra nueva comparación.

El procedimiento descrito anteriormente garantiza que los datos que se vayan a almacenar en el PLC son efectivamente válidos y exactos a los enviados desde el microcontrolador.

En el pozo se implementó el sistema de alimentación de respaldo para evitar que la comunicación salga de su funcionamiento por motivos de fallo de red. El consumo total del sistema de transmisión en el pozo fue de aproximadamente 320mA, y para respaldar esa corriente se utilizó una batería de 12V y 5AH. Si observamos la curva de característica de descarga de la batería:



**Figura 6.6** Curvas características de descarga de la batería

(Tomado de [11])

En la línea marcada con rojo se indica la curva de descarga de la batería cuando se le extrae una corriente constante de 0.5A, lo cual supera en casi 200mA el consumo real del sistema en el pozo; y para este caso la batería dura en descargarse desde su tensión nominal de carga hasta una tensión aproximada de 11V un total de 8 horas y esto representa un tiempo de respaldo suficiente tomando

en cuenta que no se presentan casos de fallo de red durante tanto tiempo. Además, el tiempo real de respaldo sería mayor debido a que se está tomando un parámetro de consumo de corriente bastante superior al real.

En caso de querer utilizarse una batería de más capacidad (más amperios – hora) para lograr mantener un tiempo de respaldo mayor, lo cual es posible debido a que el sistema la puede cargar, lo recomendable es variar (reducir) la resistencia limitadora de carga para lograr que la batería se cargue más rápido, aunque esto no es indispensable. Así por ejemplo, si se desea utilizar una batería de 7AH, cambiando la resistencia limitadora de carga de  $10\Omega$  a  $5\Omega$  se lograría un parámetro de carga adecuado.

### **Escalabilidad**

El tipo de topología implementada requiere de un coste menor a las otras, su mantenimiento, configuración y detección de averías es sencilla, y también hay que considerar que es robusta ya que el fallo de un enlace afecta únicamente a un dispositivo lo que garantiza independencia de los demás.

La posibilidad de agregar una gran cantidad de esclavos no está limitada por ninguno de los componentes que conforman el sistema, llámese el microcontrolador, los módems inalámbricos, el PLC o hasta el protocolo implementado; esto quiere decir que se pueden muestrear los datos de una gran cantidad de pozos hacia un solo satélite. De igual manera y todavía más independiente es la cantidad de repetidores que se pueden utilizar en caso de ser necesario por problemas de cobertura, ya que basta con configurar el módem como repetidor y dependiendo de la cantidad de redes sólo se debe cambiar la dirección de la red en la configuración del módem para diferenciarla de las demás.

Es suficiente con realizar pequeños cambios en la configuración de los módems, en el software del PIC y en la rutina del PLC para agregar más pozos asociados al sistema diseñado. Si se quisiera agregar el muestreo de otro pozo en la rutina del PLC basta con copiar y pegar una de las rutinas de los otros pozos y asignar las variables de este nuevo pozo a otras posiciones de memoria que se encuentren libres.

La cantidad de entradas analógicas y digitales que se pueden muestrear de un pozo quedó definida por los requerimientos de diseño solicitados, en este caso se implementaron 3 entradas analógicas y 5 entradas digitales. Sin embargo, existe la posibilidad de monitorear hasta 6 entradas analógicas y 16 entradas digitales realizando cambios en las tarjetas de adquisición de datos, ya que se necesitan conectar las demás entradas disponibles.

### **Mantenimiento preventivo**

Como cualquier otro sistema eléctrico o electrónico, el sistema de transmisión implementado requiere de un mantenimiento preventivo para garantizar un adecuado funcionamiento del mismo, el cual es relativamente rápido, sencillo y puede ser hasta poco frecuente; sin embargo es indispensable. Básicamente, los cuidados del mismo se limitan al seguimiento del nivel de carga de la batería de respaldo en el pozo (que es el que se debe realizar con mayor frecuencia), a estar revisando el estado de las conexiones en general, a la revisión de los conectores del cable de la antena y al estado de la última. Sin embargo, los tres últimos aspectos no requieren un mantenimiento muy frecuente porque no son muy delicados y no están expuestos a situaciones extremas que lo ameriten.

Se planteó que el mantenimiento preventivo del sistema se realice en conjunto con el proceso de recorrido que realiza el personal de Mantenimiento Instrumentación de Campo de Centro de Servicio, el cual se realiza de forma semanal y con esto garantizar un seguimiento adecuado del desempeño del sistema. En el manual del sistema se profundiza más sobre este tema.

### **Ventajas del sistema inalámbrico**

De acuerdo a los aspectos que muestra el sistema implementado fue posible notar que presenta ventajas considerables respecto al sistema de comunicación mediante cables. Dentro de las ventajas de este sistema se pueden anotar las siguientes:

- La mano de obra para la instalación que requiere es mínima, es posible que una sola persona instale el sistema.
- Posibilidad de muestrear mayor cantidad de variables a un menor costo, esto debido a que no se requiere de costosos cables ó de módulos de expansión.
- El tiempo de instalación es muy reducido, ya que la instalación para la transmisión entre un pozo y un satélite se puede realizar en horas.
- El sistema es muy flexible ya que presenta mucha facilidad en caso de tener que cambiarse de un pozo a otro.
- Se eliminan las pérdidas por robo de cable.
- Se eliminan los problemas por el daño que causan los roedores.

### **Desventajas del sistema inalámbrico**

Por otra parte fue posible encontrar las siguientes debilidades del sistema diseñado:

- Es necesario programar una mayor cantidad de equipos a parte del PLC.
- Los equipos pueden considerarse más delicados.
- Existe peligro de daño por rayos.
- Puede requerir instalar torres en caso de no estar en línea de vista.

## **Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones**

### **7.1. Conclusiones**

1. El ahorro económico al implementar un sistema de comunicación inalámbrico en comparación con un sistema cableado es de un 70% aproximadamente para el caso de un pozo y un satélite a una distancia cercana a los 500m.
2. El protocolo permite el crecimiento gradual de incluir una gran cantidad de esclavos transmitiendo hacia un maestro.
3. La topología punto - multipunto implementada garantiza que si el enlace entre el maestro y una de las unidades esclavas falla, los demás enlaces no se ven afectados y continúan con su funcionamiento normal.
4. El sistema de alimentación de respaldo funciona de forma eficiente permitiendo mantener la comunicación pozos – satélite por horas aunque exista fallo de alimentación de red en el campo.
5. El radio módem del satélite puede recibir datos de diversos esclavos sin incurrir en el problema de colisiones debido al protocolo implementado.
6. Un sistema de comunicación implementado con módems inalámbricos es más rentable y permite una transmisión de una mayor cantidad de datos en comparación a utilizar extensores inalámbricos ó cables.
7. Se pudo determinar que una resolución de 10 bits en el convertidor analógico digital del microcontrolador es adecuada para manejar la señal de 4 a 20mA tomando en cuenta una posición decimal a la hora de mostrar la presión.

8. Debido a que el flujo de datos es relativamente pequeño, es posible utilizar la cantidad de repetidores y esclavos que sea necesario sin que eso afecte la transmisión eficiente de datos.
9. Fue posible diseñar un sistema de adquisición de datos que permita recolectar el valor de 3 señales analógicas de 4 a 20mA y 5 digitales, con la posibilidad de que se puedan realizar cambios en el diseño para incluir hasta 5 señales analógicas y 10 digitales.
10. Se pudo diseñar las rutinas necesarias en el PLC de la estación separadora para llevar a cabo el manejo de datos e implementar el protocolo de comunicación junto con el método de detección de errores.
11. Se pudo comprobar el funcionamiento del sistema y se obtuvieron resultados que cumplen a cabalidad con los requerimientos establecidos por la empresa y con los objetivos del proyecto.
12. La implementación de un manual en formato web garantiza que el sistema quede muy claramente explicado como para ser implementado por el personal del Departamento de Mantenimiento Instrumentación de Campo.

## **7.2. Recomendaciones**

1. Se recomienda utilizar una antena omnidireccional en el satélite y antenas tipo Yagi en los pozos para lograr un enlace más robusto.
2. Se puede utilizar una batería de más capacidad (amperios – hora) para lograr un tiempo de respaldo mayor.
3. Es recomendable instalar supresores de rayos (supresores de picos) para evitar que se den daños en el equipo de transmisión.
4. Utilizar módems inalámbricos con un costo menor a los utilizados en las pruebas.
5. Se recomienda utilizar un método de detección de errores en este tipo de sistemas de comunicación para tener una mayor confiabilidad de los datos transmitidos.
6. Brindar un mantenimiento preventivo al sistema en conjunto con las labores de recorrido que se ejecutan todas las semanas.
7. El sistema diseñado debe poseer antenas colocadas en línea de vista para un funcionamiento óptimo.
8. Es recomendable no tener alimentadas las tarjetas a la hora de realizar las conexiones de las alarmas, del trasmisor de presión y del módem.

## Bibliografía

- [1] García Ramírez, Ronny. Diseño e implementación de las capas de enlace de datos, y de red para una red inalámbrica de sensores en el Bosque. Tesis. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2006.
- [2] Omron. Sysmac Programmable Controllers C200HS, CPU 31-E Operation Manual. 1996.
- [3] Siemens AG. Manual de usuario Siemens SITRANS® P 7MF4032. Instrumentación Industrial. Impreso en Alemania. 1993.
- [4] Stremmer, F.G. Introducción a los sistemas de comunicación. 3 ed. Addison-Wesley iberoamericana.
- [5] Microhard Systems Inc. *SPECTRA 910 Operating manual* [en línea]. Revision 1.42, August 27, 2001.  
<<http://www.bb-elec.com/bb-elec/literature/manuals/spectra910REV142.pdf>> [Consulta: 26 febrero 2007]
- [6] MaxStream, Inc. *9XTend-PKG-R™ RS-232/485 RF Modem Product Manual* [en línea].  
<[http://www.maxstream.net/products/xtend/product-manual\\_XTend\\_PKG-R\\_rs-232-rs-485-RF-Modem.pdf](http://www.maxstream.net/products/xtend/product-manual_XTend_PKG-R_rs-232-rs-485-RF-Modem.pdf)> [Consulta: 27 febrero 2007]
- [7] Aerocomm. *Industrial 900MHz ConnexLink User's Manual* [en línea].  
<[http://www.aerocomm.com/docs/User\\_Manual\\_CL4490.pdf](http://www.aerocomm.com/docs/User_Manual_CL4490.pdf)> [Consulta: 1 marzo 2007]
- [8] *Capítulo 2: El modelo OSI y los protocolos de red* [en línea].  
<<http://presupuesto-participativo.mef.gob.pe/Descargas/OSI.pdf>> [Consulta: 4 abril 2007]
- [9] Microchip. *PIC16F87XA Data Sheet* [en línea].  
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf>> [Consulta: 15 febrero 2007]
- [10] Fairchild semiconductor. *LM317 3-Terminal Positive Adjustable Regulator* [en línea].  
<[www.fairchildsemi.com/ds/LM%2FLM317.pdf](http://www.fairchildsemi.com/ds/LM%2FLM317.pdf)> [Consulta: 4 abril 2007]
- [11] *PS-1250* [en línea]: Power sonic sales & marketing, USA.  
<<http://www.power-sonic.com/site/doc/prod/86.pdf>> [Consulta: 10 abril 2007]
- [12] *Sistemas de transmisión de datos* [en línea]: Universidad el País Vasco, España.  
<[www.redes.upv.es/stdfi/ficheros/01\\_Introduccion.ppt](http://www.redes.upv.es/stdfi/ficheros/01_Introduccion.ppt)> [Consulta: 22 abril 2007]
- [13] Andrew Corporation. *DB498 and DB499 Series Yagi Antennas Instruction Sheet* [en línea]. U.S.A. 2006.  
<[www.andrew.com/products/antennas/bsa/instruction/095362-000.pdf](http://www.andrew.com/products/antennas/bsa/instruction/095362-000.pdf)> [Consulta: 03 mayo 2007]

[14] González Dacosta, Jacinto. *Topología de redes LAN* [en línea]: Universidad de Vigo, España.

<<http://www.lsi.uvigo.es/lsi/jdacosta/documentos/apuntes%20web/Topologia%20de%20redes.pdf>> [Consulta: 08 mayo 2007]

[15] Lewis, F. *Wireless Sensor Networks* [en línea]: Automation and Robotics Research Institute, University of Texas, Arlington.

<<http://arri.uta.edu/acs/networks/WirelessSensorNetChap04.pdf>> [Consulta: 22 abril 2007]

[16] Álvarez, Gonzalo. *Desarrollo de un protocolo para comunicaciones inalámbricas e implementación en dispositivos de lógica reconfigurable* [en línea]: Universidad del País Vasco, España.

<[http://www.sc.ehu.es/acwamurc/JCRA\\_Protocolo.pdf](http://www.sc.ehu.es/acwamurc/JCRA_Protocolo.pdf)> [Consulta: 10 abril 2007]

## Capítulo 8: Apéndices y anexos

### 8.1. Apéndices

#### Apéndice A.1. Costos de por instalación del sistema inalámbrico

**Tabla 8.1** Costos aproximados para instalación del sistema inalámbrico por pozo

ITEM	Descripción	Cantidad	Costo aproximado
Cable red	Para establecer la conexión entre el PIC y el módem	10m	¢5 000
Cable de control	Para realizar conexiones en la caseta de pozo	10m	¢20 000
Batería de respaldo	Respaldo del sistema	1	¢15 000
Tarjetas para PIC y cargador de baterías	Para adquisición y envío de datos	1	¢20 000
➤ Total			: ¢60 000

#### Apéndice A.2. Programa del microcontrolador

A continuación se presenta el código implementado en el PIC16F877A, el cual maneja el sistema de transmisión en el pozo:

```
//Sistema inalámbrico de comunicación entre pozos y satélites.

//Software para el PIC16877A de la tarjeta de adquisición de datos
//instalada en el pozo

//Diego Badilla Elizondo - ITCR - ICE

// $$$$ START OF PROGRAM $$$$

#include <16F877A.h>           //PIC model
#define adc=10                //ADC resolution
#include delay(clock=2000000) //Oscillator speed
#define fuses HS,NOVDT,NOLUP,NOBROWNOUT
#include rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
```

```

//Variables

#byte PB = 0x06 //PORT B
#byte PD = 0x08 //PORT D

#byte RS232_data=0x20 //Variable used to enable data TX if PLC send request
char c = ' '; //Variable used to get RS232 data

int start=0; //Transmission beginning code
int16 total=0; //Var used to check errors

int total_LSB=0; //To separate total in hi n' low
int total_MSB=0;

int pozo=0; //Number of pozo
int Alarms=0; //Alarms of pozo
//Alarms[0] = Energy failure (Fallo de red)
//Alarms[1] = High press. of pumping(Pres alta de bomb)
//Alarms[2] = Emerg. Plant with load (Planta con carga)
//Alarms[3] = Emerg. Plant at no auto (Planta en no auto)
//Alarms[4] = Available

int16 presion = 0; //Head pressure, a 16-bit variable is used
//cause ADC was configured for 10-bit of resolution

int presion_MSB = 0; //Head pressure bits 8-15
int presion_LSB = 0; //Head pressure bits 0-7
int16 sensor1 = 0; //Contains the pressure value

//Routines

//Read the value of pressure sensor
int16 sensor01(){

    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    sensor1 = read_adc();
    return sensor1;
}

//Interruption for data reception
#int_RDA //Indicates that there is data available in buffer
RDA_isr() {

    c = getc(); //Data received

    if(c==14) //If code request is correct a flag is changed
    RS232_data=1;
    else
    RS232_data=0;
}

```

```

void main() {

    setup_adc_ports(A_ANALOG_RA3_RA2_REF);    // Defines all port A as analog
                                              //RA2 and RA3 are the references

    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(FALSE);
    setup_counters(RTCC_INTERNAL,RTCC_DIU_2);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(global);

    set_tris_b(0x00);    //All pins of Port B as outputs
    set_tris_d(0x1F);    //Pins 0-4 are inputs, 5-8 are outputs

    PB=0x00;            //Initializing PORT B
    PD=0x00;            //Initializing PORT D

    pozo=0;
    Alarms=0;
    presion=0;
    start=0xFF;
    total=0;
    RS232_data=0;

    do{

        pozo=14;        //Number of pozo

        presion = sensor01();    //Variable presion contains the 10-bits
                                //digital value of analog variable

        presion_LSB = make8(presion,0); //To divide variable presion
        presion_MSB = make8(presion,1); //at hi and low to be sent

//Reading the digital variables

        if(!input(PIN_D0)){
            bit_set(Alarms,0);
        }

        if(!input(PIN_D1)){
            bit_set(Alarms,1);
        }

        if(!input(PIN_D2)){
            bit_set(Alarms,2);
        }

        if(!input(PIN_D3)){
            bit_set(Alarms,3);
        }

        if(!input(PIN_D4)){
            bit_set(Alarms,4);
        }
    }
}

```

```

//Creating the variable to check errors
total=Alarms + presion;

total_LSB= make8(total,0); //The variables is divided in bytes to be
total_MSB= make8(total,1); //sent by the USART (RS232 port)

//Checking for data request
if(RS232_data==1){ //If request ok, data is send

//Start of the data transmission
putc(start);

putc(pozo);
putc(Alarms);

putc(presion_LSB);
putc(presion_MSB);

putc(total_LSB);
putc(total_MSB);

putc(0);
putc(0);

putc(0);
putc(0);

putc(0);
putc(0);

putc(0);
putc(0);

putc(0);

delay_ms(500);

RS232_data=0; //Flag is changed again
}

//Variables are cleaned
Alarms=0;
presion=0;
presion_LSB=0;
presion_MSB=0;

} while( TRUE ); //Indicates that is a constant process

}
/// $$$$ END OF PROGRAM $$$$

```

### **Apéndice A.3. Descripción específica de la configuración de los módems**

Los primeros 4 comandos, Command Echo, Quite Mode, Result Codes Display y Connection Result ya están pre-configurados y se pueden dejar tal y como vienen de fábrica.

Respecto a los comandos DCD, DTR, Framing y DSR se dejan tal y como vienen pre-configurados y solamente el comando de handshaking se configura a K0 para deshabilitarlo.

#### **Registros S**

##### **Modo de operación (Operating Mode) S101**

Dentro de las posibles configuraciones para este registro, destacan:

S101 = 1, Maestro punto a multipunto

S101 = 2, Maestro punto a punto

S101 = 3, Esclavo

S101 = 4, Repetidor

Para el proyecto fueron utilizadas las configuraciones 1, 3 y 4. Es importante destacar que en una red sólo puede haber un maestro.

##### **Velocidad de transmisión serie (Serial baud rate) S102**

Los posibles valores para este registro varían entre 1 y 11, donde 1 corresponde a la mayor velocidad, 115200 baudios y 11 corresponde a la menor velocidad, 2400 baudios.

Para el caso del sistema implementado se utilizó la configuración 7 que corresponde a 9600bps.

##### **Velocidad de la conexión inalámbrica (Wireless link rate) S103**

Se refiere a la velocidad con que los módems se comunican mediante el vínculo de radiofrecuencia.

Existen dos configuraciones para este registro:

**\*2 Fast without Forward Error Correction**

**4 Fast with Forward Error Correction**

Por defecto los radios vienen configurados con la primera opción y es la que se recomienda en la hoja de datos.

##### **Dirección de red (Network address) S104**

Define a que red pertenecen las unidades. Todas las unidades que se quieren incluir en una misma red deben tener la misma dirección de red.

**Dirección de unidad (Unit address) S105**

Es la identificación de cada radio módem. En una configuración multipunto todas las unidades deben tener una dirección única. Esta dirección puede variar desde 1 hasta 65535.

**Patrón de salto primario (Primary hopping pattern) S106**

En estos módems, la frecuencia portadora cambia periódicamente de acuerdo a una de 64 diferentes opciones definidas por la frecuencia de salto primaria y secundaria.

Las entradas válidas para este registro van desde 0 hasta 63.

**Modelo secundario de salto (Secondary hopping pattern) S206**

Su funcionalidad se hace notar cuando se utilizan repetidores, debido a que un repetidor utiliza los canales de salto primario y secundario. Con el canal primario el módem se comunica con una unidad y el canal de salto secundario se utiliza para comunicarse con otra unidad diferente a la primera.

**Llave de encriptación (Encryption key) S107**

Provee de un medio de seguridad y privacidad para la comunicación. En una misma red todas las unidades deben tener la misma llave para que la comunicación se de de forma satisfactoria.

**Nivel de potencia de salida (Output power level) S108**

Mediante este registro se define la potencia de transmisión de los Spectra 910. Las posibles posibilidades para este registro son las siguientes:

- S108 = 0, corresponde a 1mW
- S108 = 1, corresponde a 10mW
- S108 = 2, corresponde a 100mW
- S108 = 3, corresponde a 1000mW

Para mantener un margen de ganancia seguro en el sistema los radios se configuraron en 3, o sea con 1W de potencia de salida.

**Intervalo de salto (Hopping interval) S109**

Con este registro se configura la frecuencia con que los módems cambian de canal. El registro se puede configurar de 1 a 9 donde 1 corresponde a 8 msec y 9 corresponde a 100 msec.

**Formato de datos (Data format) S110**

Este registro determina el formato de los datos en el puerto serie, los valores varían entre 1 y 11. La configuración utilizada es S110 = 1, la cual corresponde a:

- 8 bits de datos, ningún bit de paridad y un bit de parada.

### **Tamaño mínimo del paquete (Packet minimum size) S111**

Los valores válidos para este registro van desde 1 hasta 255 bytes. Con esto se define la mínima cantidad de bytes a ser recibidos desde el equipo transmisor de datos antes de encapsularlos en un paquete y transmitirlos por el aire.

### **Tamaño máximo del paquete (Packet maximum size) S112**

El rango permitido para este registro va desde 2 hasta 255 y representa el máximo número de bytes que recibe el módem de un equipo transmisor de datos, los cuales van a ser encapsulados en un paquete.

### **Control del tamaño del paquete (Packet size control) S114**

Cuando este registro se configura con un valor de 1, para una conexión punto a punto, se le permite a las unidades repetidoras y esclavas sobrescribir a los registros S111 y S112, de acuerdo a la configuración que establece la unidad master.

### **Tiempo máximo de espera por paquetes (Packet character timeout) S116**

Las entradas válidas para este registro van desde 0 hasta 254 ms. Es un temporizador que se activa únicamente después de que el tamaño mínimo del paquete ha sido acumulado en el radio módem. Con este temporizador se ajusta el tiempo que esperará el módem para transmitir los datos después de que la cantidad mínima de bytes que constituyen el paquete ha sido acumulada.

### **Retransmisiones del paquete (Packet Retransmissions) S113**

La configuración de este registro aplica sólo para unidades configuradas como maestros y repetidores. En una configuración multipunto a punto, el maestro retransmitirá los datos exactamente la cantidad de veces definidas por este registro.

### **Límite de retransmisiones del paquete (Packet Retry Limit) S213**

Este registro tiene una funcionalidad similar a la del S113, pero específicamente para esclavos y repetidores. Los valores permitidos para este registro van desde 0 a 255.

### **Intervalo de repetición de paquete (Packet Repeat Interval) S115**

El rango de valores configurables para este registro va desde 1 hasta 255. El valor por defecto es 1. El esclavo transmitirá más frecuentemente cuando se selecciona un intervalo de repetición con un menor rango, sin embargo cuando se tienen muchos esclavos transmitiendo se recomienda utilizar un rango más grande para evitar colisiones.

### **Modo Modbus (Modbus Mode) S117**

Los Spectra 910 se pueden configurar para funcionar con el protocolo Modbus. A este registro se le puede asignar el valor de uno ó cero, para activarlo o desactivarlo. Esta configuración no se utilizó para el caso del sistema por lo tanto la opción se deshabilitó asignando un cero al registro.

### **Roaming S118**

Mediante este registro los esclavos y repetidores buscan sincronización con el maestro pero sin considerar la frecuencia de salto. A este registro se le puede asignar el valor de uno ó cero, para activarlo o desactivarlo, sin embargo para el caso del sistema esta opción se desactivó.

### **Cambio a modo comando (Quick Enter to Command) S119**

Asignando un uno a este registro se logra que el Spectra 910 introduzca un retraso cuando se enciende para que no cambie de forma inmediata a modo de datos. Así si se desea realizar algún cambio en la configuración se puede digitar el comando 'mhx' y el módem cambia a modo comando.

### **RTS/DCD Framing S120**

#### **DCD Timeout S121**

Estos dos registros se configuraron en cero porque no se utilizó este tipo de manejo de datos.

### **Control remoto (Remote Control) S122**

Este comando únicamente puede ser activado o desactivado. Lo que permite es que el maestro tenga acceso de forma remota a la configuración del esclavo o repetidor. Si está desactivado (cero) el maestro puede leer de forma remota la configuración pero no modificarla, mientras que si está activado(uno) el maestro puede leer y modificar la configuración de la unidad.

### **Ciclo de trabajo de TDMA (TDMA Duty Cycle) S124**

#### **Máxima dirección de TDMA (TDMA Max Address) S125**

Estos dos registros son válidos cuando el Spectra 910 es configurado como maestro en punto a punto. Sin embargo, estos registros se dejaron como vienen pre-configurados de fábrica ya que no se trabajó con este tipo de configuración.

### **Protocolo de datos (Data Protocol) S126**

Este registro maneja la forma en que los datos salen y entran al módem. Los datos pueden manejarse de forma transparente o con un tipo de codificación.

### **Filtrado de dirección (Address Filtering) S127**

#### **Multicast Group S128**

#### **Maestro secundario (Secondary Master) S129**

La configuración de estos registros se dejó tal y como venía de fábrica ya que no eran parte de la solución o influían en esta.

## 8.2. Anexos

### Anexo B.1. Costos por instalación del sistema de transmisión mediante cables

**Tabla 8.2** Costos de la transmisión de señales de control mediante cables desde los pozos 11, 60, 14 y 66 hacia el satélite 7

<b>FORMULA #1, Tubería flexible y accesorios</b>					
<b>ÍTEM</b>	<b>CANT.</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>P/UNITARIO</b>	<b>TOTAL</b>
1	2250	m	Tubo 19mm diámetro interno (3/4)" en rollos de 30m, azul	\$2,1420	\$4 819,50
2	200	c/u	Conector recto para tubería de 19mm	\$1,6000	\$320,00
3	50	c/u	Unión adaptador para tubería de 19mm	\$2,8600	\$143,00
4	2400	c/u	Gasa cerrada tipo collarín para tubo de 19mm	\$0,2058	\$493,92
5	330	m	Tubería de 25mm diámetro interno (1)" en rollos de 30m, azul	\$2,9680	\$979,44
6	30	c/u	Conector recto para tubería de 25mm con caja rectangular	\$2,0800	\$62,40
7	10	c/u	Unión adaptador para tubería de 25mm	\$1,4494	\$14,49
8	350	c/u	Gasa cerrada y tipo collarín(atornillable y remachable) para tubo de 25mm	\$0,4602	\$161,07
9	240	m	Tubería de 40mm diámetro interno(1½)" en rollos, azul	\$5,5200	\$1 324,80
10	24	c/u	Conector recto para tubería de 40mm con caja rectangular	\$4,9680	\$119,23
11	6	c/u	Unión adaptador para tubería de 40mm	\$95,4648	\$572,79
12	250	c/u	Gasa cerrada tipo collar(atornillable y remachable) para tubo 40mm	\$0,3500	\$87,50
13	100	c/u	Caja rectangular sin perforaciones de 22x17x8,5cm	\$12,2674	\$1 226,74
➤ Subtotal			: \$10 324,88		
➤ 13% I.V.			: \$ 1 342,23		
➤ Total monto adjudicado			: \$11 667,11		

**Fuente:** Contratación directa N° 120696  
Solicitud N° 4301-1166-2005

**Tabla 8.3** Costos del cable de control para la transmisión de señales de control mediante cables desde los pozos 11, 60, 14 y 66 hacia el satélite 7

ÍTEM	CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	P/UNITARIO	TOTAL
1	3500	metro	Cable p/control, 10 hilos cobre, uso industrial	¢1 596,00	¢5 586 000,00
➤	Subtotal				: ¢5 586 000,00
➤	13% I.V.				: ¢ 726 180,00
➤	Subtotal				: ¢6 312 180,00

**Fuente:** Contratación directa N° 120696  
Solicitud N° 4301-1166-2005

**Tabla 8.4** Costos por planillas para el trabajo de instalación de cables de control desde los pozos 11, 60, 14 y 66 hacia el satélite 7

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	TOTAL
1	Mantenimiento Instrumentación de campo	¢4,784,157.23

**Fuente:** Orden de servicio 0167200S0700695

**Tabla 8.5** Costos totales para el trabajo de instalación de cables de control desde los pozos 11, 60, 14 y 66 hacia el satélite 7

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	TOTAL
1	Trabajos realizados en el satélite 7 para instalación de cables de control desde los pozos 11, 60, 14 y 66	¢20,815,567.62

**Fuente:** Orden de servicio 0167200S0700695

## Anexo B.2. Cotización de radio módems, antenas y cable coaxial

**p.i.s.e.s.a.** proyectos de ingeniería y suministro de equipos, s. a.

Apdo. 53-4005 Belén, Heredia, Costa Rica  
Teléfono (506) 293.0111 Fax (506) 293.0112  
e-mail: pisesa@racsa.co.cr

Fecha: Miércoles, 11 de Julio de 2007  
Para: Ing. Diego Badilla  
Centro de Generación Miravalles  
Instituto Costarricense de Electricidad  
Referencia: N/Ref. Cotización 157-07

Presentamos nuestra oferta formal para entrega local.

### Oferta Base

Ítem	Cant.	Unid.	Descripción	Precio unit. (US\$)	Precio total (US\$)
1	10	pieza	Radio modem, 900MHz, 1200 a 115,2 kbps, 10 a 30 VCD.	840,00	8.400,00
2	7	pieza	Antena Yagi, 11dB, 900Mhz	420,00	2.940,00
3	7	pieza	Cable LMR-4004 para antena Yagi, 4,5m	140,00	980,00
4	3	pieza	Antena Omni, 6dB, 900Mhz	420,00	1.260,00
5	3	pieza	Cable LMR-4004 para antena Omni, 4,5m	140,00	420,00
SubTotal				US\$	14.000,00
13% IV				US\$	1.820,00
Total				US\$	15.820,00

### Condiciones:

1)	Los precios son en dólares.
2)	Vigencia: 30 días naturales.
3)	Forma de pago: Crédito a 30 días.
4)	Tiempos de entrega: 4-6 semanas
5)	Lugar de entrega: Sus bodegas, ICE

Atentamente,

Ing. Esteban Monge  
P.I.S.E.S.A.