

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica



“Diseño e implementación de una interfaz MODBUS para la integración de grupos electrógenos a la plataforma de gestión SCADA”

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

José Miguel Monge Gómez

Cartago, Noviembre de 2006

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

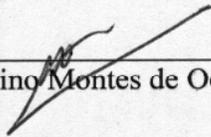
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

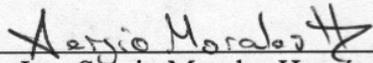
TRIBUNAL EVALUADOR

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.

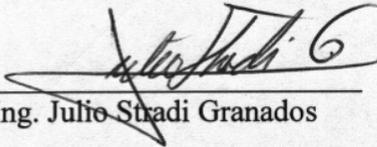
Miembros del Tribunal


Ing. Faustino Montes de Oca Murillo

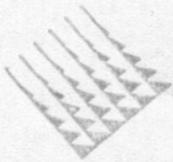
Profesor lector


Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor lector


Ing. Julio Stradi Granados

Profesor asesor


TEC
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica

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, 28 de noviembre de 2006

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema 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.

San José, Noviembre 2006



Firma del autor

José Miguel Monge Gómez

Céd: 1-1176-0380

Resumen

Los sistemas de alimentación de las redes de telecomunicaciones es una parte vital en la prestación y aseguramiento de los servicios. Es importante indicar que las pérdidas económicas ocasionadas debido a una avería en algún equipo electromecánico de los sistemas de telecomunicaciones del ICE, ya sea por el costo de la reparación de la avería o la falta de captación de ganancias por la interrupción del servicio, es el actual problema presente en la empresa, por lo que nace la necesidad de implementar un sistema de gestión y monitoreo que permita una intervención rápida y eficaz en las averías.

La plataforma SCADA es el sistema de gestión y monitoreo que está implementando actualmente el Proceso Electromecánico. La implementación de esta plataforma requiere la integración de los equipos electromecánicos al sistema de monitoreo. La integración de equipos se refiere a la comunicación de los equipos con el sistema SCADA, por medio de un protocolo de comunicación, que en este caso es el protocolo Modbus. El proyecto nace por la necesidad de integrar aquellos equipos electromecánicos que carecen del protocolo Modbus, lo que impide su integración.

Como solución al problema se diseñó e implementó una interfaz electrónica de mediación que captura las alarmas desde señales de contacto seco de los equipos electromecánicos, en este caso particular las plantas de energía, y las envía por medio de una trama Modbus, siguiendo los requerimientos y parámetros de Modbus.

Palabras clave: Redes de Telecomunicaciones; SCADA; Proceso Electromecánico; Integración de Equipo; Protocolo Modbus.

Abstract

The power supply systems of the telecommunications nets are an essential part in the application and assurance of the services. It's important to indicate that the economic losses caused by any breakdown on any electromechanical equipment of the telecommunication systems, because the cost of the breakdown repair or losses due to an interruption on the services, it is the actual problem of ICE. This is the main reason they are implementing a management and monitoring system that allows a faster and efficient intervention of any breakdown.

SCADA is the management and monitoring system that is being implemented by the Electromecanisc Process of ICE. The implementation of this platform requires the integration of the equipment located in every telecommunication station to the SCADA monitoring system. The equipment integration refers to the communication between the equipment and the SCADA system, by the MODBUS communication protocol. This project began because of the need to integrate the electromechanical equipment that lacks the Modbus protocol.

As a solution to the problem, an electronic interface that captures alarms was designed and implemented, from dry contact signals from the electromechanical equipments. In this case this project was focused on the power systems, and these alarms are sent in a Modbus frame that follows all the Modbus protocol requirements and limitations.

Keywords: Telecommunication nets; SCADA; Electromecanisc Process; Equipment Integration; Modbus Protocol.

DEDICATORIA

*A mi madre, Elizabeth Gomez Bonilla;
a mi padre, José Miguel Monge Obando
y hermanos,
que con su apoyo incondicional y sacrificio
me permitieron alcanzar esta meta
tan importante como lo es la conclusión
de mi carrera universitaria.*

Índice General

| | |
|---|----|
| Capítulo 1: Introducción | 8 |
| 1.1 Problema existente e importancia de su solución | 8 |
| 1.2 Solución seleccionada..... | 11 |
| Capítulo 2: Meta y Objetivos..... | 14 |
| 2.1 Meta | 14 |
| 2.2 Objetivo General..... | 14 |
| 2.3 Objetivos específicos | 14 |
| Capítulo 3: Marco Teórico..... | 16 |
| 3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar..... | 16 |
| 3.1.1 Grupo Electrónico..... | 16 |
| 3.1.2 Sistema de Gestión SCADA | 17 |
| 3.2 Antecedentes bibliográficos..... | 19 |
| 3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema | 20 |
| 3.3.1 Modelo OSI..... | 20 |
| 3.3.2 Protocolo MODBUS..... | 21 |
| 3.3.3 Protocolos TCP/IP | 25 |
| Capítulo 4: Procedimiento Metodológico..... | 26 |
| 4.1 Reconocimiento y definición del problema | 26 |
| 4.2 Obtención y análisis de información | 26 |
| 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 |
| Capítulo 5: Descripción detallada de la solución..... | 30 |
| 5.1 Análisis de soluciones y selección final | 32 |
| 5.2 Descripción del hardware | 36 |
| 5.3 Descripción del software | 47 |
| Capítulo 6: Análisis de Resultados | 56 |
| Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones | 68 |
| 7.1 Conclusiones..... | 68 |
| 7.2 Recomendaciones | 69 |
| Bibliografía | 70 |
| Apéndices..... | 71 |
| Anexos | 88 |

Índice de Figuras

| | | |
|---------------|--|----|
| Figura 2.1. | Integración de equipos al sistema SCADA | 12 |
| Figura 2.2. | Diagrama de primer nivel de la solución implementada..... | 13 |
| Figura 4.1. | Diagrama de bloques de la integración de equipos del grupo electrógeno al Sistema SCADA. | 17 |
| Figura 4.2. | Tipos de codificación de los mensajes MODBUS | 23 |
| Figura 5.1. | Diagrama de segundo nivel de la solución implementada | 30 |
| Figura 5.2. | Soluciones alternativas para captura de alarmas de 10 a 60 VDC. | 34 |
| Figura 5.2. | Diagrama de tercer nivel de la etapa de Alimentación. | 36 |
| Figura 5.3. | Circuito de la etapa de alimentación | 37 |
| Figura 5.4. | Diagrama de bloques de tercer nivel de la etapa de control y estado del sistema | 39 |
| Figura 5.5. | Circuito de la etapa de control y estado del sistema..... | 40 |
| Figura 5.6. | Diagrama de bloques de tercer nivel de la etapa de | 41 |
| | Comunicación serial | 41 |
| Figura 5.7. | Circuito de la etapa de comunicación serial..... | 41 |
| Figura 5.8. | Diagrama de tercer nivel de la etapa de captura de alarmas | 42 |
| Figura 5.9. | Circuito implementado para la captura de una señales de alarma entre los 12 VDC y 60 VDC..... | 44 |
| Figura 5.10. | Circuito de la captura de alarmas de la planta..... | 46 |
| Figura 5.11. | Diagrama de Flujo del programa de Recepción y Respuesta de los mensajes MODBUS. | 48 |
| Figura 5.12. | Diagrama de flujo de la rutina que genera el dato solicitado por el mensaje de solicitud MODBUS..... | 51 |
| Figura 5.13. | Ventana del programa de software..... | 54 |
| Figura 6.1. | Circuito de medición para la obtención de los datos de la tabla 6.1. | 56 |
| Figura 6.2. | Circuito de medición para la obtención de los datos de la tabla 6.3. | 57 |
| Figura 6.3. | Ventana del programa Modbus Tester. | 63 |
| Figura 6.4. | Ventana del programa Modbus Tester, con las tramas de los mensajes de solicitud y respuesta. | 64 |
| Figura 6.5. | Circuito implementado en protoboard del sistema para realizar pruebas de recepción y envío de mensajes MODBUS. | 65 |
| Figura 6.6. | Circuito implementado para la prueba de la captura de alarmas en la planta Detroit Diesel de San Antonio de Belén..... | 66 |
| Figura A.2.1. | Ventana del programa de configuración de la interfaz..... | 72 |
| Figura A.2.2. | Selección de datos por defecto | 73 |
| Figura A.2.3. | Configuración de la dirección de esclavo..... | 74 |
| Figura A.2.4. | Imagen de la Interfaz Modbus implementada en circuito impreso. | 75 |
| Figura A.2.5. | Diagrama de entradas y salidas de la interfaz Modbus. | 76 |
| Figura A.4.1. | Circuito de regulación con el regulador LM317T..... | 82 |
| Figura A.6.1. | Circuito de la captura de señales de alarma..... | 85 |
| Figura B.2.1. | Planta de Emergencia de la Localidad de | 90 |
| | San Marcos de Tarrazú. | 90 |

Índice de Tablas

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabla 4.1. | Alarmas de las plantas de emergencia..... | 19 |
| Tabla 4.2. | Capas del Modelo de Referencia OSI..... | 21 |
| Tabla 4.3. | Funciones Básicas y códigos de operación del protocolo MODBUS | 24 |
| Tabla 4.4. | Modelo de referencia del protocolo TCP/IP | 25 |
| Tabla 5.1. | Asignación de puertos del microcontrolador a cada registro de entrada del sistema diseñado | 52 |
| Tabla 6.1. | Datos de entrada y salida del circuito de alimentación del sistema..... | 56 |
| Tabla 6.2. | Datos de voltaje y corriente teóricos del circuito de captura de alarmas..... | 58 |
| Tabla 6.3. | Datos de voltaje y corriente experimentales del circuito de captura de alarmas. | 59 |
| Tabla 6.4. | Mediciones de las señales de alarma de la planta Detroit Diesel en la localidad de San Antonio de Belén. | 61 |
| Tabla 6.5. | Mediciones de algunas señales de alarma de la planta Kohler en al localidad de San Ramón de Tres Ríos..... | 61 |
| Tabla A.7.1. | Lista de componentes utilizados en el diseño. | 87 |
| Tabla B.1.1. | Costo por avería en cuatro escenarios de reporte posibles..... | 88 |
| Tabla B.1.2. | Costo total por avería en cuatro escenarios de reporte posibles | 88 |
| Tabla B.2.3. | Pérdidas percibidas por el ICE por falta de facturación..... | 89 |

Capítulo 1: Introducción

1.1 Problema existente e importancia de su solución

El proceso Electromecánico de la UEN¹ de Gestión de Red y Mantenimiento del área de Telecomunicaciones del ICE, tiene como funciones administrar la calidad y distribución de la energía, garantizar una pronta respuesta en la atención de averías y garantizar un adecuado funcionamiento de los equipos de infocomunicaciones. Por esta razón ha estado implementando una plataforma de gestión SCADA² (“Supervisory Control And Data Acquisition”, de sus siglas en inglés.) para el monitoreo nacional de una serie de equipos electromecánicos, localizados en las centrales telefónicas.

Los equipos electromecánicos se dividen en cuatro grupos: el grupo de corriente alterna, el de corriente directa, sistema puesta a tierra y el de climatización. Dentro del grupo de corriente alterna, se encuentra un subgrupo llamado grupo electrógeno, que se refiere al sistema de la planta de emergencia, en el cual se centrará el desarrollo de este proyecto. Este subgrupo está constituido por un motor de combustión interna, un generador de corriente alterna y un grupo de sistemas auxiliares. Este grupo es una fuente de energía de respaldo que entra a funcionar en caso de que falle la Red de Distribución de Energía Eléctrica.

Para la implementación de la plataforma SCADA se debe integrar una serie de equipos del grupo electrógeno, por medio del protocolo de comunicación MODBUS que usa el SCADA, debido a que el SCADA para hacer referencia a un equipo o alarma, utiliza una dirección IP y un registro MODBUS, que sirve como identificación

¹ UEN = Unidad Estratégica de Negocios

² SCADA: Supervisión de control y adquisición de datos.

del mismo. Esto ha traído una serie de problemas debido a que algunos equipos no cuentan con este protocolo de comunicación.

Los equipos que cuentan con el protocolo de comunicación MODBUS, se pueden integrar más fácilmente al sistema de gestión SCADA porque requieren solamente de un convertidor de protocolo MODBUS ETHERNET para conectarse a través de la red de Internet de Avanzada del ICE o la Intranet, para que se pueda acceder a éste desde el sistema de visualización del SCADA. Los equipos que no cuentan con este protocolo de comunicación, necesitan ser integrados al sistema.

El problema actual que presenta el proceso Electromecánico son las pérdidas económicas que se generan cuando una localidad sale de funcionamiento por un período de tiempo largo debido a una avería, esto porque cuando los técnicos acuden a atender la avería, no cuentan con un diagnóstico previo del problema, lo que conlleva a que en muchos casos no se cuente con la herramienta o repuestos necesarios en el momento, lo que requiere de movilización y por consiguiente una pérdida de tiempo en la reparación. De aquí nace la importancia de integrar los equipos de las centrales al sistema SCADA, para tener un monitoreo y eventualmente un control más directo y preciso sobre degradaciones por fatiga de los equipos y las averías que se presentan, y así garantizar el adecuado funcionamiento del sistema de telecomunicaciones.

La importancia de solucionar este problema es principalmente la escasez de personal de mantenimiento sumado al acelerado crecimiento de los sistemas (600k celular GSM, proyecto de Internet Avanzada, Frontera a Frontera) y por consiguiente el costo en el plano económico, debido a que una avería en horas normales le cuesta al ICE 96.000 colones aproximadamente, esto por concepto de viáticos para comida y combustible, disponibilidad del técnico y horas extras, y en muchos casos las pérdidas económicas que representa la afectación del servicio por dejar de percibir

los ingresos (en el Anexo B.1., se muestra una tabla con el desglose de los costos por avería y un desglose de las pérdidas por minuto que se generan para el ICE cuando se interrumpe la facturación por causa de una avería). Por lo que es importante encontrar una solución para la integración de las plantas de emergencia (grupo electrógeno) al SCADA, ya que tienen como función importante, servir de respaldo en caso de que la Red de Distribución falle.

1.2 Solución seleccionada

La solución implementada no resuelve el problema totalmente, debido a que este proyecto está enfocado a solucionar una parte del mismo, como lo es la necesidad de integrar algunos equipos del grupo electrógeno, en particular plantas eléctricas de emergencia. Para seleccionar la mejor solución al problema se tomó como punto de partida los requerimientos establecidos por la empresa, los cuales se listan a continuación.

- Permitir la integración de equipos del grupo electrógeno al sistema de gestión SCADA.
- Capturar las alarmas binarias generadas por los equipos del grupo electrógeno.
- Permitir el monitoreo de los equipos en tiempo real.
- Capacidad de manejar al menos 16 salidas de alarma de los equipos.
- Permitir que equipos del grupo electrógeno se comuniquen por el protocolo de comunicación MODBUS.
- El sistema debe funcionar como esclavo o cliente en una comunicación MODBUS, que permita la interrogación del mismo por cualquier unidad o software maestro MODBUS.
- Permitir identificar cada entrada de alarma con una dirección de registro, que cumpla las especificaciones del protocolo MODBUS.

La solución seleccionada en forma general permite capturar las principales señales de alarma binarias generadas por los equipos, a las cuales se les asigna un número de registro MODBUS que permite un direccionamiento de dichas alarmas dentro del sistema de visualización del SCADA.

La solución consistió en el diseño e implementación de una interfaz electrónica de mediación MODBUS, que funciona como una estación esclava en una comunicación MODBUS, entre el SCADA (estación maestra) y el equipo a monitorear. En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques donde se muestra la ubicación de la interfaz de mediación a diseñar dentro de la integración de los equipos al SCADA.

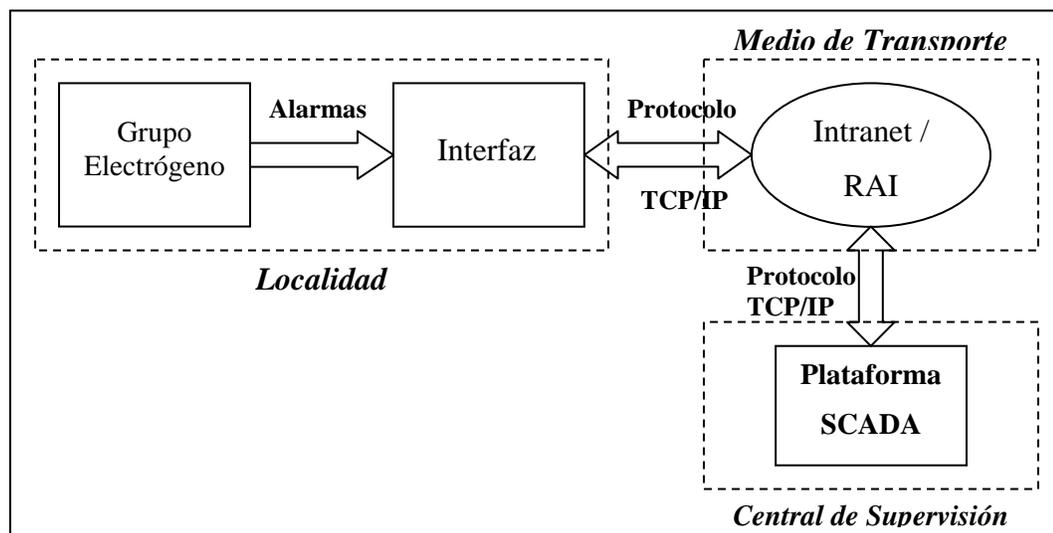


Figura 2.1. Integración de equipos al sistema SCADA

En el diagrama anterior, se pueden observar los elementos necesarios para lograr la integración de equipo del grupo electrógeno al sistema SCADA. Para la integración de equipos es necesario un medio de transporte para la información intercambiada entre ambos puntos (localidades y central de supervisión), el cual en este caso es la Intranet y/o la Red de Avanzada de Internet del ICE (RAI). Las localidades y la central de supervisión utilizan el protocolo TCP/IP como protocolo de comunicación. La plataforma SCADA y los equipos a monitorear utilizan el protocolo MODBUS RTU sobre una red de configuración Ethernet.

La solución seleccionada fue implementada en el bloque funcional llamado *Interfaz*, debido a que es la parte donde se capturan las alarmas binarias y se reciben y responden los mensajes de solicitud MODBUS. A continuación se muestra el diagrama de bloques de primer nivel de la solución implementada, la cual corresponde a un sistema que recibe señales de alarma binarias y recibe y responde mensajes de solicitud MODBUS.

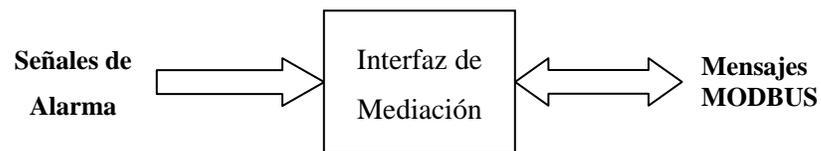


Figura 2.2. Diagrama de primer nivel de la solución implementada

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Lograr implementar un prototipo de la interfaz de mediación a diseñar en una de las estaciones de telecomunicaciones para el monitoreo de una de las plantas de emergencia.

2.2 Objetivo General

Diseñar e implementar una interfaz de mediación MODBUS que permita interconectar el grupo de electrógenos por protocolos TCP/IP a la plataforma SCADA WONDERWARE del Proceso Electromecánico.

2.3 Objetivos específicos

1. Elaborar una etapa que permita capturar señales de alarma entre los 10 VDC y 60 VDC, provenientes de los equipos.
2. Implementar una etapa que permita alimentar en forma dinámica la interfaz con las tensiones disponibles en las estaciones de telecomunicación, entre los 12 VDC y los 60 VDC.
3. Implementar una etapa de comunicación serial que permita establecer una comunicación MODBUS entre la interfaz a diseñar y cualquier terminal maestra MODBUS.
4. Implementar una etapa de comunicación serial que permita una comunicación serial entre la interfaz a diseñar y una PC.

5. Establecer los parámetros necesarios para la captura y manejo de los datos y los umbrales para el monitoreo.
6. Crear las rutinas de programación necesarias para la recepción y envío de los mensajes MODBUS.
7. Crear un diccionario de datos para el dispositivo de mediación
8. Crear un manual de usuario del sistema a diseñar
9. Elaborar un listado de los componentes necesarios que permita masificar el diseño
10. Diseñar un prototipo en circuito impreso del sistema a implementar.³

³ El tiempo aproximado de entrega del impreso es de 1 semana, después de entregar el diseño del impreso.

Capítulo 3: Marco Teórico

3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar

3.1.1 Grupo Electrónico

Desde el punto de vista organizacional, el Proceso Electromecánico está a cargo de los equipos electromecánicos como lo son los sistemas de puesta a tierra, los sistemas de climatización, los sistemas de corriente alterna y los sistemas de corriente directa. Este proyecto se centrará en los equipos del grupo electrónico, que son parte de los sistemas de corriente alterna.

El grupo electrónico o motores generadores, que se conocen comúnmente como plantas de emergencia, está constituido por un motor de combustión interna, un generador de corriente alterna y equipos auxiliares. El grupo electrónico tiene como función principal servir de fuente de energía en caso de que la Red de Distribución de Energía Eléctrica comercial falle, con el fin de garantizar un servicio de telecomunicaciones ininterrumpido.

El ICE cuenta con una serie de plantas de emergencia en las centrales telefónicas, las cuales difieren en marca y en muchos casos en las alarmas que generan.

3.1.2 Sistema de Gestión SCADA

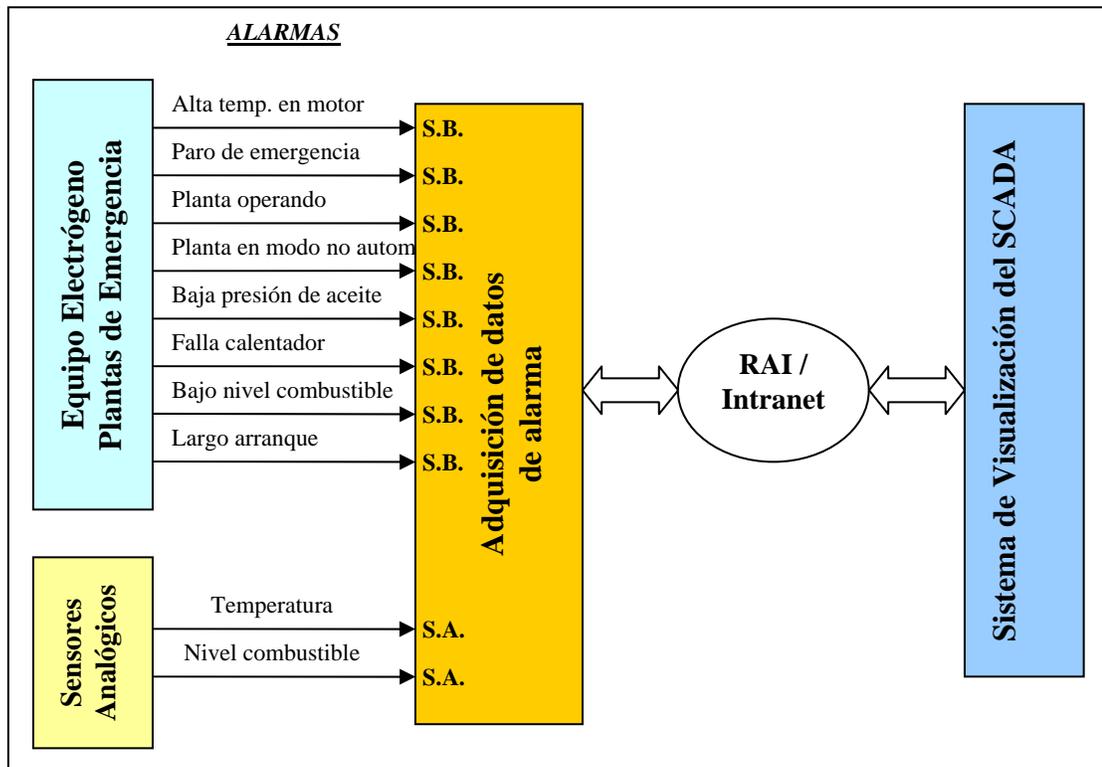


Figura 4.1. Diagrama de bloques de la integración de equipos del grupo electrógeno al Sistema SCADA.⁴

La plataforma SCADA es un sistema industrial de mediciones y control de procesos industriales, basado en una computadora principal que permite controlar y monitorear a distancia un proceso o planta industrial, y una serie de estaciones remotas (RTUs) que se encargan de la captura de datos de campo. La UEN de Gestión de Red y Mantenimiento, está implementando un sistema SCADA para el monitoreo de los equipos electromecánicos de las centrales telefónicas.

En cada central se busca monitorear una serie de datos de los equipos, los cuales son datos de tipo binario y de tipo analógico, que indican el funcionamiento de

⁴ Las alarmas binarias son las mismas para todas las plantas de emergencia. S.B. = señal binaria o digital. S.A. = señal analógica.

los equipos en las centrales. Los datos de tipo binario o digitales son alarmas que pueden tener dos estados, encendido (on) o apagado (off). Mientras que los datos de tipo analógico son números reales que se monitorean, como por ejemplo temperatura o nivel de combustible, estos datos son capturados por el SCADA, y con una lógica de programación se define un rango de valores que permite generar una alarma en caso de que se sobre pase de dicho rango.

En la figura 4.1., se muestra un diagrama a nivel de bloques, que muestra la integración de los equipos, y un ejemplo del tipo de datos que se capturan para el monitoreo de las centrales desde el sistema SCADA. A continuación se dará una breve descripción del sistema de integración de los equipos. El sistema SCADA cuenta con un software de visualización que permite monitorear los datos de alarma en cada central en tiempo real. Para acceder a una alarma de una central, el sistema hace referencia a una dirección IP y a un número de registro. La dirección IP corresponde a la ubicación del RTU ubicado en la central y el registro corresponde a un registro MODBUS que le asigna el RTU a la alarma. El RTU para capturar los datos, realiza una lectura de sus entradas, ya sea en forma automática o por solicitud. Este dato es almacenado en el registro, para ser accedido luego. La lectura de los datos de alarma se realiza cada cierto periodo de tiempo, de manera que permita un monitoreo en tiempo real.

Lo que se busca con el proyecto es un diseño de una interfaz de comunicación MODBUS que permita la integración de los equipos del grupo electrógeno, sin la necesidad de utilizar un PLC o dispositivos intermedios de comunicación, y que permita capturar datos de alarma binarios de los equipos.

En la siguiente tabla, se muestra un listado de algunas alarmas que se requiere monitorear en las plantas de emergencia, desde el sistema SCADA. Debido

a que no todas las plantas son de la misma marca, el número de alarmas que se pueden obtener de estas difiere.

Tabla 4.1. Alarmas de las plantas de emergencia.

| Equipo | Alarmas binarias y analógicas |
|----------------------|--|
| Planta de emergencia | Alta temperatura en el motor Baja presión de aceite Largo arranque de planta Sobre velocidad de planta Planta en modo no automático Paro de emergencia de planta Fallo en el calentador de planta Planta operando |

3.2 Antecedentes bibliográficos

La información requerida para el proyecto se obtuvo de Internet, donde se obtuvo información sobre el protocolo de comunicación MODBUS, sobre sus variantes, funciones que se realizan por medio de este protocolo, la trama de los mensajes, el contenido de los mensajes de solicitud y respuesta, los códigos de funciones y excepciones, tipos de interfaces a utilizar, etc. Además, fue importante para diferenciar las tramas de MODBUS RTU y MODBUS ASCII, y así definir la utilización e implementación de MODBUS RTU, debido a que es más utilizado en la industria. Por otra parte, se consultaron libros para complementar la información sobre el contenido de las tramas de los mensajes.

Además, en lo referente al sistema de gestión SCADA existe una serie de trabajos de investigación como proyectos y tesis de graduación que contienen

información sobre el SCADA como requerimientos, integración de equipos, tecnologías que se están utilizando, equipos, etc.

En el proceso Electromecánico existe un prototipo de un sistema de monitoreo y adquisición de datos donde se realizan las pruebas al sistema SCADA, además de algunos de equipos que se pueden utilizar para probar el sistema a diseñar.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1 Modelo OSI

El modelo OSI (Open Systems Interconnection), modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos de telecomunicaciones está basado en una propuesta desarrollada por la Organización de Estándares Internacional (ISO). Su función es definir la forma en que se comunican los sistemas *abiertos* de telecomunicaciones, es decir, los sistemas que se pueden comunicar con otros sistemas. Este modelo está basado en el principio “divide y vencerás”, y está pensado para las redes tipo WAN. El modelo OSI está formado por capas, las cuales realizan tareas diferentes. Las capas se pueden dividir en dos grupos, las capas de servicio de transporte (capa 1, 2, 3, 4) y las capas de servicios de soporte al usuario (capas 5, 6, 7). En la siguiente tabla se presenta una descripción de las siete capas del modelo OSI.

Tabla 4.2. Capas del Modelo de Referencia OSI.

| Capa | Descripción y funciones |
|--------------------|--|
| 7. Aplicación | Proporciona servicios de red a las aplicaciones del usuario. No provee servicios a otras capas. Es la capa más cercana al usuario (p.ej: navegadores Web, transferencia de archivos, correo electrónico, etc.). |
| 6. Presentación | Define el formato en que se intercambia la información entre aplicaciones. Se encarga de la seguridad en la red, como encriptación y desencriptación, y de la compresión y traducción (p.ej: imágenes, sonidos, códigos (ASCII, otros)). |
| 5. Sesión | Transmisión ordenada de los datos entre las capas de presentación. Permite que dos aplicaciones en diferentes computadoras establezcan una sesión. Sincroniza y mantiene la sesión. |
| 4. Transporte | Se ocupa de la segmentación, numeración y secuencia de los datos de la capa de sesión. Se encarga de las conexiones lógicas entre <i>host</i> . Responsable de la confiabilidad de la red. |
| 3. Red | Determina mejor ruta dependiendo de las condiciones de la red. Se ocupa del direccionamiento lógico. Se encarga de convertir los nombres y direcciones lógicas a físicas. |
| 2. Enlace de Datos | Se encarga de la topología de la red, forma de acceso a ésta, control de flujo y sincronización. Se ocupa del direccionamiento físico y la detección de errores. |
| 1. Física | Encargada de la transmisión de los bits a través de los circuitos de comunicación. Provee medios mecánicos, eléctricos, funcionales y de procedimiento para establecer condiciones físicas entre DCE y DTE. ⁵ |

3.3.2 Protocolo MODBUS

Protocolo

Se puede definir a un protocolo como el idioma, lenguaje o estándar que utilizan dos o n dispositivos electrónicos para "entenderse" y comunicarse entre sí.

Un protocolo define cómo se identifican dispositivos entre sí dentro de la red, el formato que debe tomar la información en tránsito y cómo es procesada dicha información una vez que llegó a su destino.

⁵ Ver Apéndice A.1. Glosario, abreviaturas y símbolos.

Protocolo MODBUS

Es un protocolo de comunicaciones estándar para la industria, debido a que es el que se utiliza más comúnmente para conectar cualquier dispositivo electrónico industrial, ya que permite un gran ahorro en cableado. La razón principal de su uso es que es un protocolo abierto que está publicado abiertamente, lo que ha producido diversas variantes y mejoras al original.

MODBUS es un protocolo de mensajes de la capa de aplicación que provee una comunicación Cliente/Servidor entre dispositivos que se encuentran conectados en diferentes tipos de buses o redes.⁶ En esta comunicación sólo un dispositivo puede iniciar la comunicación (el maestro), mientras que el esclavo o esclavos responden enviando los datos solicitados al maestro, o realizando la función que éste les indica. Un dispositivo maestro comúnmente dispone de procesadores de *host* y paneles de programación, mientras que los esclavos comúnmente incluyen controladores programables.

Estructura de la red MODBUS

El medio físico para una conexión puede ser un bus semidúplex (RS-485 o fibra óptica) o un bus dúplex (RS-422, BC 0-20 mA o fibra óptica). La comunicación es asíncrona y permite velocidades de transmisión entre los 75 y 19200 baudios. La distancia máxima entre estaciones alcanza los 1200 m, que depende en gran parte del medio físico que se utilice.

La estructura lógica es de tipo maestro-esclavo, como se comentó anteriormente. El intercambio de mensajes puede ser de dos maneras: punto a

⁶ <http://www.Modbus-IDA.org>

punto, que corresponde a una solicitud del maestro y una respuesta del esclavo; o por medio de mensajes difundidos, que es una comunicación unidireccional del maestro a los esclavos.

El protocolo establece el formato de los mensajes de solicitud del maestro y los mensajes de respuesta de los esclavos. Los mensajes de solicitud contienen la dirección del dispositivo esclavo (en caso que existen varios), un código de función con la acción requerida, algún tipo de datos que se requieran y un código de chequeo de errores. El mensaje de respuesta contiene un código de confirmación de la acción, los datos solicitados y un código de chequeo de errores. En caso de que ocurra un error, el esclavo construye un mensaje de error indicando que no pudo realizar la función solicitada.

Los datos dentro de la trama de los mensajes pueden codificarse en modo ASCII o puramente binario, según el estándar RTU (Remote Transmission Unit). En la siguiente figura se muestran ambas codificaciones.

| | | | | | |
|--------------------|-------------------------------------|-----------|--------------|---------|--|
| : | Nº esclavo | Código de | Subfunciones | CRC(16) | CR, LF |
| (3A _H) | (00 _H -3F _H) | Función | o Datos | L, H | (0D _H), (0A _H) |

a. Codificación ASCII

| | | | |
|-------------------------------------|-----------|--------------|---------|
| Nº esclavo | Código de | Subfunciones | CRC(16) |
| (00 _H -3F _H) | Función | o Datos | L, H |

b. Codificación RTU

Figura 4.2. Tipos de codificación de los mensajes MODBUS

Se puede observar que en la codificación ASCII a diferencia de la codificación RTU, se utiliza un carácter de inicio (“.” = 3A_H) y dos caracteres de fin (0D_H y 0A_H).

El código de función en la trama es codificado en un byte (0-255) por lo que existen 256 códigos, los cuales están divididos en códigos de función y códigos de excepción. Los códigos de función se direccionan de 0 a 127, y de la dirección 128 – 255 se direccionan los códigos de excepción. El protocolo MODBUS cuenta con tres categorías de códigos de función: una categoría corresponde a los códigos de las funciones públicas, otra a los códigos de funciones definidos por el usuario y los códigos reservados del protocolo. En la siguiente tabla se muestra las funciones básicas y los códigos de operación del protocolo.

Tabla 4.3. Funciones Básicas y códigos de operación del protocolo MODBUS

| Función | Código | Descripción |
|----------------|---|---|
| 0 | 00 _H | Control de estaciones esclavas |
| 1 | 01 _H | Lectura de bits de salidas o internos |
| 2 | 02 _H | Lectura de bits de entradas |
| 3 | 03 _H | Lectura de palabras de salidas o internas |
| 4 | 04 _H | Lectura de palabras de entradas |
| 5 | 05 _H | Escritura de un bit |
| 6 | 06 _H | Escritura de una palabra |
| 7 | 07 _H | Lectura rápida de 8 bits |
| 8 | 08 _H | Control de contadores |
| 9-10 | 09 _H | No utilizados |
| 11 | 0B _H | Control de contadores |
| 12-14 | 0B _H , 0B _H , 0B _H | No utilizados |
| 15 | 0F _H | Escritura de n bits |
| 16 | 10 _H | Escritura de n palabras |

En la interfaz se implementaron las funciones 1 y 2 que corresponden a la lectura de entradas y salidas de los dispositivos esclavos. Estas funciones son las requeridas debido a que lo que se busca es capturar las alarmas binarias que generan los equipos.

3.3.3 Protocolos TCP/IP

El protocolo TCP/IP no es un solo protocolo, es una familia de protocolos que permite interconectar redes muy distintas entre sí. Este es el protocolo que permite que la Internet sea una Red de redes. El protocolo TCP/IP está a un nivel superior del tipo de red empleado y debe funcionar en forma indiferente en cualquier tipo de red. Además, el protocolo TCP/IP está a un nivel inferior de los programas de aplicación particulares de cada sistema operativo. Por lo que en la siguiente tabla se muestra un modelo de referencia para el protocolo TCP/IP.

Tabla 4.4. Modelo de referencia del protocolo TCP/IP

| Capa | Características |
|-------------------------|-----------------------------|
| Capa de aplicación | http, smtp, telnet, ftp |
| Capa de transporte | UDP, TCP |
| Capa de red | IP |
| Capa de acceso a la red | Ethernet, Token Ring |
| Capa física | Cable coaxial, par trenzado |

La capa física que es el nivel más bajo se refiere al medio físico por el cual se transmite la información, puede ser un cable o cualquier otro medio como ondas o enlaces vía satélite. La capa de acceso a la red es la que determina la forma en que se envía y recibe la información a través del medio físico que proporciona la capa física. Estas dos primeras capas no forman parte del protocolo TCP/IP.

La capa de red define la forma en que un mensaje se transmite a través de distintos tipos de redes hasta llegar a su destino. Esta capa además, proporciona el direccionamiento IP y determina la ruta óptima que debe seguir un paquete desde su origen hasta su destino. El principal protocolo de esta capa es el *protocolo IP*. La capa de transporte no se preocupa por la ruta que tome la información, solo verifica si hay una comunicación de extremo a extremo y la utiliza. Además, utiliza la asignación de puertos. Una vez establecida la comunicación, la capa de aplicación nos permite hacer uso de los distintos servicios de internet, como lo son el correo electrónico, páginas WEB, etc.

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para reconocer el problema se buscó información sobre el sistema SCADA e información sobre la integración de equipos, con el fin de conocer cuales eran los requerimientos y limitaciones que se presentaban a la hora de hacer una integración de un equipo a la plataforma de gestión.

Se realizaron consultas a los compañeros de trabajo para conocer las limitaciones de ciertos equipos a la hora de la integración, como por ejemplo qué equipos cuentan con protocolos de comunicación, como generan las alarmas ciertos equipos, como se obtienen alarmas de los equipos, entre otros. Además se realizaron pruebas de campo en la Central de San Antonio de Belén y en la central de San Ramón de Tres Ríos, que cuentan con una planta Detroit Diesel Spectrum y una planta Kohler, específicamente; para conocer las señales de alarma que genera, como las genera, en que parte de la planta las genera y las tensiones de las alarmas activadas y desactivadas.

Además, se investigó la manera de comunicarse el sistema de gestión con los equipos de las centrales telefónicas, con el fin de conocer el protocolo de comunicación utilizado por el SCADA, que en este caso es el protocolo de comunicación MODBUS, desarrollado por Modicom®.

4.2 Obtención y análisis de información

La fuente más importante de información fue la experiencia y el conocimiento brindado por los compañeros de trabajo encargados del proceso de integración de equipos al SCADA, debido a que tienen un conocimiento más amplio del problema.

Una fuente de información que se utilizó ampliamente fue el Internet, para investigar y buscar la información requerida para el proyecto, sobre los protocolos de comunicación y dispositivos de comunicación. Además para la obtención y búsqueda del equipo o componentes para desarrollar el proyecto. Por otro lado, fue importante conocer las licitaciones que se han puesto para el proyecto de integración de equipos, para conocer las características y/o lineamientos que deben cumplir los equipos, y así aplicarlos en el diseño del sistema.

Para la recopilación y el análisis de la información referente a la solución del problema, se tomó en cuenta factores económicos, de funcionalidad, la facilidad de reproducir el sistema a diseñar, la disponibilidad de los componentes a utilizar en el diseño y el espacio físico en el cual se podría implementar la interfaz diseñada.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Para la evaluación de las alternativas se realizó una investigación bibliográfica sobre el sistema SCADA, protocolos y estándares de comunicación, como el protocolo MODBUS y sus variaciones, los estándares de comunicación serial RS-232 y RS-485, redes de configuración Ethernet, los cuales son la base de comunicación entre los equipos de las centrales telefónicas y el sistema SCADA.

Para llegar a la solución implementada, se tomaron en cuenta una serie de aspectos tanto económicos como técnicos. Lo primero fue considerar los requerimientos solicitados por la empresa, el área de trabajo en el cual se encuentran los equipos del grupo electrógeno, las características de las centrales telefónicas con el fin de conocer el espacio físico, las tensiones disponibles en la estación para asuntos de alimentación del sistema a diseñar. Además de cálculos teóricos de consumo de potencia, corriente y voltaje, mediciones de corriente y voltaje para la comprobación de los cálculos teóricos, pruebas de funcionamiento del

sistema en protoboard por periodos de tiempo considerables (periodos entre las 24 hrs. y 72 hrs., de funcionamiento continuo).

Otro aspecto muy importante para llegar a la síntesis de la solución fue los componentes y el equipo a utilizar, con fin de permitir un diseño fácil de producir, por lo que se tomó en cuenta el costo de los componentes y la disponibilidad de los mismos.

4.4 Implementación de la solución

Para la implementación de la solución se trabajó primero en cada bloque funcional propuesto para la solución, asignando una prioridad a cada bloque, con el fin de tener un plan de trabajo ordenado y así permitir trabajar en cada etapa de la solución ampliamente hasta alcanzar resultados más aceptables.

Primero se trabajo en la etapa de control que tenía como función principal la recepción y respuesta de los mensajes solicitud MODBUS. Paralelo a esta etapa, se trabajó en el programa de software para la configuración de la interfaz. Luego se trabajó en la etapa de captura y acople de las alarmas binarias y por último en la etapa de alimentación del sistema a diseñar.

Para implementar dicha solución, se realizaron pruebas de funcionamiento de cada etapa, con el fin de mejorar el funcionamiento de las mismas. Una vez implementadas cada una de las etapas, se realizó un acople de las mismas con fin de probar la funcionalidad del sistema completo, y también se procedió a realizar mejoras de funcionamiento.

Para la implementación también fue necesario realizar cálculos teóricos de potencia, corriente y voltaje que permitieran un buen funcionamiento de las etapas, y por consiguiente mediciones de parámetros para comprobación del funcionamiento.

Ya que en muchos casos los cálculos teóricos o un diseño hecho en papel, no cumplía con las expectativas esperadas, por lo que era necesario el rediseño.

Para lograr dar a conocer los resultados obtenidos del proyecto, se mostrará el sistema diseñado en funcionamiento a compañeros de trabajo, se crearán manuales de funcionamiento del sistema para futuros usuarios de manera que pueda ser utilizado o instalado por cualquier persona que desconozca los aspectos técnicos y de funcionamiento del sistema diseñado.

4.5 Reevaluación y rediseño

Un criterio importante que podría ser tomado en cuenta para reevaluar el diseño y por consiguiente rediseñar ciertos aspectos del mismo, es el funcionamiento del sistema por largos periodos de tiempo, una vez implementado en una central o estación de telecomunicaciones.

Además, se podría trabajar en ampliar los alcances del sistema en lo que respecta al protocolo de comunicación MODBUS, como por ejemplo ampliar las funciones que puede realizar, como por ejemplo monitoreo de señales analógicas que pueden ser direccionadas a un registro interno del microcontrolador, y así implementar la función MODBUS referente a la lectura de registros internos.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En la figura 2.2 se mostró el diagrama de bloques del sistema implementado, que en general debe recibir señales de alarma de los equipos y además recibir mensajes de solicitud MODBUS y enviar los mensajes de respuesta de los mismos. En la siguiente figura, se muestra un diagrama de bloques de segundo nivel de la solución implementada, donde se puede apreciar la división del problema en módulos funcionales.

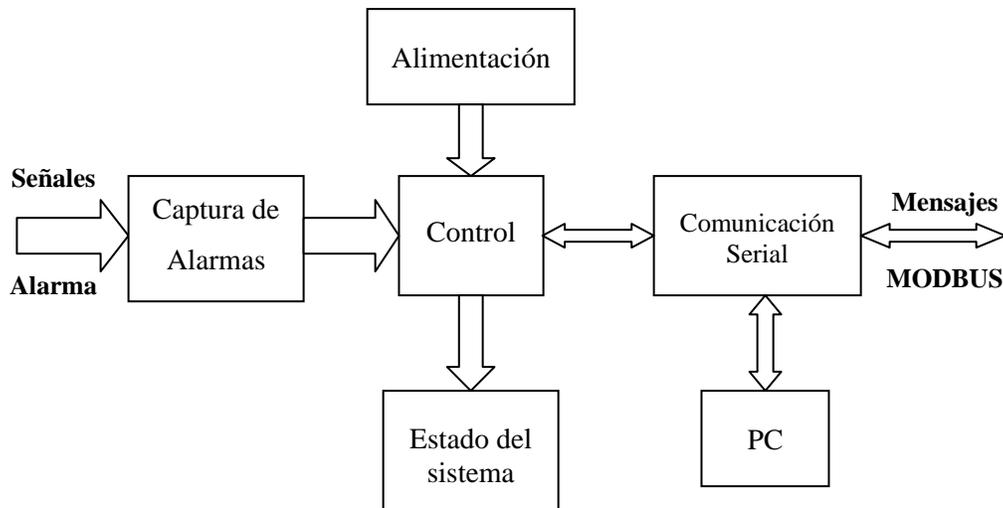


Figura 5.1. Diagrama de segundo nivel de la solución implementada

La etapa de control y la etapa de estado del sistema se implementaron en una sola etapa, debido a que el estado del sistema consta de una serie de indicadores visuales que muestran las funciones que está realizando el sistema, el cual fue implementado a base de LEDs. La etapa de control consta tanto de hardware como de software, la parte de hardware es el circuito electrónico implementado, y la parte de software corresponde a las rutinas de programa diseñadas para la recepción de datos seriales como los mensajes MODBUS y los datos de configuración, respuesta de los mensajes MODBUS con los datos solicitados e identificación de las entradas de alarma con un número de registro MODBUS. Las rutinas de control del

microcontroladores se realizaron con el programa MPLAB IDE v6.0 de Microchip, mientras que el programa diseñado para enviar datos de configuración para la interfaz se realizó en el programa Visual Basic 6.0.

La etapa de comunicación serial consiste en un circuito electrónico que permite la recepción y envío de datos seriales (mensajes MODBUS, datos de configuración desde una PC) entre el sistema diseñado y una PC (la PC funciona como estación maestra en una comunicación MODBUS, por medio de cualquier rutina o programa de software capaz de enviar mensajes de solicitud MODBUS).

La etapa de captura de alarmas binarias se encarga de conectar al sistema, las señales de alarma de los equipos e interfazarlas al sistema de control que trabaja a una tensión de 5 VDC, esto debido a que las tensiones a las cuales trabajan los equipos del grupo electrógeno varían entre los 12 VDC y los 60 VDC. En particular las plantas de emergencia trabajan con tensiones de 12 VDC o 24 VDC, conmutación y celular con tensiones de 24 VDC y/o 48 VDC, mientras que los sistemas de corriente directa trabajan con tensiones entre los 54 VDC y los 60 VDC. Esta fue la razón por la cual se hizo necesario diseñar esta etapa de manera que permitiera conectar señales de alarma entre los 12 VDC y los 60 VDC, con el fin de que la aplicación del sistema a diseñar sea amplia.

En general, el sistema diseñado puede ser aplicado para integrar cualquier equipo electromecánico al SCADA, ya que permite asignarle a cada entrada un número de registro, el cual puede ser cambiado según el equipo que se quiera integrar. Esto debido a que cada sistema a integrar cuenta con una designación de registros definida para sus entradas y salidas, para su asignación en el sistema de visualización del SCADA. Por ejemplo, los números de registro al SCADA asignados a la planta de emergencia, van desde el 1601 hasta el 1616, que corresponden a registros de Salida, o *Coils* (de su designación en inglés de bobina, debido a que por lo general una señal de salida activa una bobina), como se designa en el protocolo

Modbus. Esta es la razón por la cual el sistema fue programado con estos números de registro por defecto, ya que el sistema fue diseñado enfocado a la integración de plantas de emergencia.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

En la figura 5.1 de este capítulo, se puede observar el diagrama de segundo nivel de la solución implementada. Donde se muestra la división de la solución en bloques funcionales.

La etapa de control consiste en un microcontrolador PIC18F458 que realiza todas las funciones lógicas del sistema diseñado, como la recepción de señales de activación de alarmas, generación de señales de estado del sistema, recepción de datos seriales y envío de datos seriales. Esta etapa consta principalmente del programa de software implementado en el microcontrolador para que éste realice todas las funciones antes mencionadas. Se optó por esta solución por el bajo costo⁷ del microcontrolador, la disponibilidad de puertos para establecer comunicaciones seriales y la gran cantidad de puertos de entrada/salida disponibles del mismo, que para éste caso en particular demandaba un mínimo de 20 entradas y/o salidas para el funcionamiento del sistema.

La etapa denominada *PC*, consiste en la comunicación entre una PC y el sistema, mediante un software diseñado en Visual Basic 6.0 para la configuración de algunos parámetros del sistema, necesarios para establecer una comunicación por MODBUS. El programa permite configurar dos parámetros importantes que intervienen en una comunicación serial por MODBUS, los cuales en este caso son la dirección de esclavo, que permite distinguir un esclavo de otros en una red MODBUS, y los números de registro a los cuales está direccionada cada entrada de la interfaz. Se optó por configurar únicamente estos parámetros, debido a que por lo

⁷ Aproximadamente 6,995 colones.

general, los parámetros para establecer una comunicación MODBUS RTU son predeterminados a 9600kbps, 8 bits de datos y sin paridad, los cuales fueron programados en el microcontrolador como predeterminados.

La etapa de *Comunicación Serial*, consiste en la etapa electrónica que permite conectar el puerto serie de una PC con el microcontrolador, debido a las diferencias de tensión entre ambos. Esta etapa fue implementada haciendo uso de las especificaciones técnicas del transceiver utilizado, MAX233A, para su conexión y correcto funcionamiento.

La etapa de Adquisición de alarmas y Alimentación si presentaron una serie de variaciones durante el desarrollo del proyecto, debido a cuestiones de funcionalidad, consumo de potencia, costo de componentes y seguridad del sistema. Ambas etapas debían ser capaces de trabajar con tensiones de 10 a 60 VDC, y generar una señal de 5 VDC, tanto para la activación de una alarma en el microcontrolador como la alimentación del circuito.

En el caso de la etapa de alimentación, se optó por utilizar un regulador de tensión variable, LM317T, y un regulador de tensión a 5 VDC, LM7805C. Esta solución fue la mejor y cumple en forma excelente con el objetivo específico referente a la alimentación dinámica; debido a que es fácil de implementar y no presenta problemas de calentamiento excesivo en componentes, como sí lo presentaban otras soluciones basadas en el uso de diodos Zener como reguladores de tensión, debido a que se debían implementar varias etapas de regulación según con la tensión que se trabajara, para permitir una alimentación de 5 VDC a partir de tensiones de 10 a 60 VDC, y por otro lado se debía implementar además una etapa de selección manual a base de dip switch para cada rango de alimentación.

En la etapa de Captura de alarmas se tenía planeado utilizar la misma solución propuesta en la etapa de alimentación haciendo uso de diodos Zener como

reguladores de tensión, pero presentaba los mismos inconvenientes que en la etapa de alimentación. Por lo que se optó por utilizar optoacopladores con salida de transistor, esto debido a que su implementación no requiere de mucho espacio, ya que se debe implementar para 16 entradas de alarma y debido a que es la solución que cumple con el objetivo específico referente a la captura de alarmas binarias entre los 12 y 60 VDC.

En general, se probaron dos soluciones para la captura de alarmas y la alimentación del circuito, a partir de un rango de entrada de 10 a 60 VDC. En la siguiente figura se puede observar ambas configuraciones de un regulador de tensión a base de diodos Zener de 13 V.

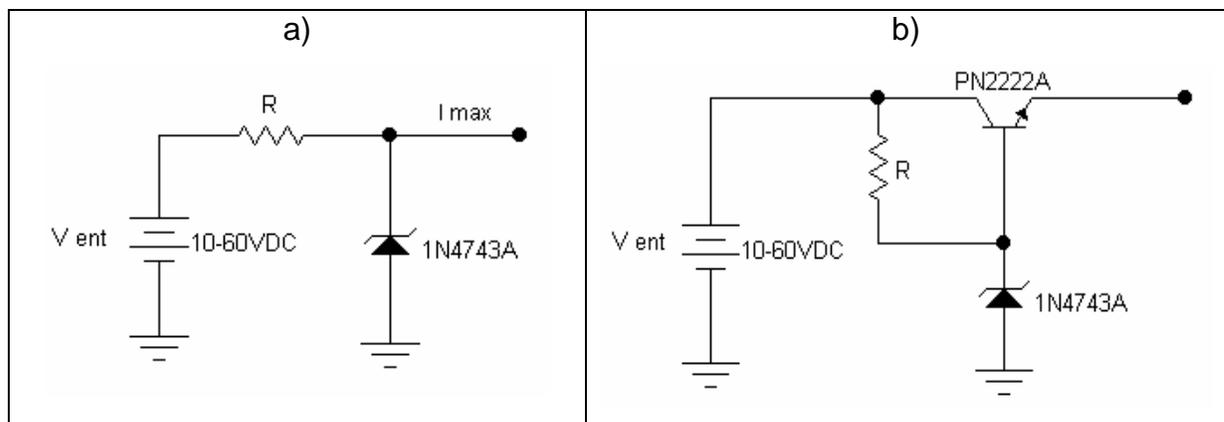


Figura 5.2. Soluciones alternativas para captura de alarmas de 10 a 60 VDC.

En la figura 5.2, se muestran dos circuitos reguladores con diodo Zener, que se utilizaron como alternativas para la captura de alarmas de 10 a 60 VDC. En el circuito a) la resistencia R se calcula tomando en cuenta el consumo máximo de la carga (I_C), la corriente del diodo Zener que no sobrepase su valor máximo (I_Z), la tensión de entrada y la tensión del Zener. A continuación se muestra la ecuación

para el cálculo de la resistencia R, tomada de un curso virtual de electrónica básica de la Universidad Nacional de Colombia⁸:

$$R = \frac{V_{entrada} - V_{zener}}{I_C + I_Z} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

El problema que presentó el circuito a) fue que no permitía una tensión de entrada de un rango amplio como el requerido para el diseño, sino que se debía implementar una resistencia para cada valor de tensión de entrada a utilizar, en este caso 12 VDC, 25 VDC y 60 VDC; esta limitante hizo que se descartara dicha solución, además de que cuando la tensión en la resistencia sobrepasaba los 15 VDC, ésta sufría un calentamiento excesivo, el cual no se debía a disipación de potencia, ya que la corriente calculada y medida no sobrepasaba los 10 mAdc y la potencia calculada no sobrepasaba un watt de potencia.

Luego se probó implementando el circuito de la figura 5.2.b, el cual se utiliza para circuitos de mayor potencia, al cambiar la resistencia por un transistor. Debido a que el diodo Zener mantiene constante su tensión, al producirse una disminución en la resistencia de la carga, la corriente en la carga tiende a aumentar, pero la corriente de entrada aumenta y por consiguiente aumenta la corriente por la resistencia R, aumentando la tensión colector-base del transistor, lo que vuelve menos conductivo el mismo, y así estabiliza el aumento inicial de corriente. Este circuito presentó el mismo inconveniente del circuito a), debido a que se debía calcular un valor de resistencia para cada valor de tensión de entrada.

En la etapa de captura de alarmas, se presentó el mismo problema con el calentamiento de la resistencia de entrada del optoacoplador para tensiones mayores a 15 VDC de entrada, por lo que se optó por utilizar 4 resistencias en serie en la entrada de los optoacopladores que sumen el valor calculado, para que en el caso

⁸ Referencia: http://encuentro.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001771/cap03/03_06_01.html

que se utilicen entradas de 60 VDC, la caída de tensión en las resistencias no supere los 15 VDC, y así evitar su calentamiento. En el siguiente apartado se explicará con más detalle el circuito de captura de alarmas.

5.2 Descripción del hardware

En la figura 5.1 de este capítulo, se muestra el diagrama de bloques de segundo nivel de la solución, en el cual se muestran los módulos funcionales del sistema diseñado. A continuación se explicará módulo por módulo el circuito diseñado para cada etapa.

Etapa de Alimentación

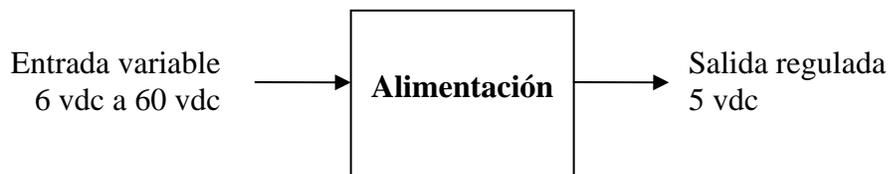


Figura 5.2. Diagrama de tercer nivel de la etapa de Alimentación.

La etapa de alimentación tiene como función proporcionar al circuito una alimentación regulada de 5 VDC, a partir de tensiones de entrada entre los 12 VDC y 60 VDC, según la disponibilidad de voltajes en las localidades. En la figura 5.2, se muestra un diagrama de tercer nivel de la etapa de alimentación, donde se muestra la entrada y salida de la etapa. Gracias al diseño realizado se logró que la entrada de alimentación maneje un rango más amplio, que va desde los 6 VDC hasta los 60 VDC, regulando la salida a 5 VDC.

En la siguiente figura, se muestra el diagrama de cuarto nivel de la etapa implementada, donde se muestra en detalle el circuito implementado y los componentes utilizados.

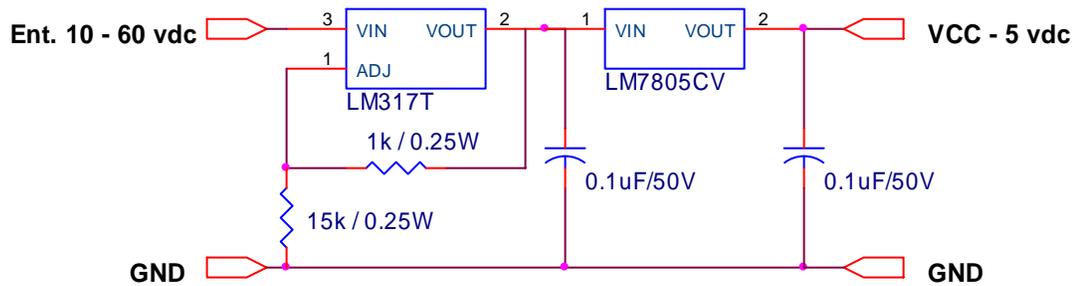


Figura 5.3. Circuito de la etapa de alimentación

El circuito de la figura anterior proporcionar una alimentación regulada de 5 VDC, a partir de señales de entrada desde los 6 VDC hasta los 60 VDC. La configuración del regulador LM317T, que es un regulador de salida variable, permite regular la entrada hasta un máximo aproximado de 20 VDC. Se utilizó este regulador porque permite una diferencia de tensión de 40 VDC entre la entrada y la salida, por lo que al calcular su salida a 20 VDC máximo, cuando se trabaja con tensiones de 60 VDC, se obtiene la diferencia máxima aproximadamente. Lo cual se adapta a los requerimientos del sistema y cumple con el objetivo planteado para la alimentación del sistema. En el Apéndice A.4 se muestran los cálculos realizados para las resistencias. La salida de este regulador permite pasar las tensiones de entrada menores a 20 VDC, pero el regulador LM7805CV, regula la tensión de salida a 5 VDC, por lo que el circuito de alimentación permite una entrada mínima aproximada de 6 VDC y una entrada máxima aproximada de 60 VDC. La salida de este circuito es utilizada como VCC⁹ para la alimentación de todos los componentes que trabajan a 5 VDC.

⁹ VCC: indica una alimentación de +5 VDC para los componentes electrónicos utilizados en el diseño.

Etapa de control y estado del sistema

La etapa de control tiene como función recibir las señales de alarma convertidas a 5 VDC, recibir y enviar datos seriales como mensajes MODBUS, mensajes de respuesta MODBUS y recibir datos de configuración desde una PC, además tiene como función mostrar el estado del sistema.

Esta etapa consta de un microcontrolador PIC18F458 de Microchip, debido a que se requería para el diseño una cantidad considerable de entradas/salidas (20 aproximadamente) y puertos de comunicación serial. Además con el fin de dejar previsto mejoras para el sistema, se optó por utilizar este microcontrolador porque cuenta con comparadores de señales analógicas y entradas analógicas, que pueden ser utilizadas para el monitoreo de datos analógicos de los equipos.

La etapa de estado del sistema se encuentra como parte de la etapa de control, debido a que esta etapa consta de cuatro señales visuales de funcionamiento del sistema, los cuales fueron implementados con LED's y que son activados por señales del microcontrolador según las funciones que esté realizando. Las cuatro señales corresponden a la recepción de datos seriales, envío de datos seriales, sistema en funcionamiento y una señal que indica que el sistema fue configurado, después de haber recibido los datos necesarios para la configuración. En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques de tercer nivel que muestra las entradas y salidas de esta etapa de control. Las entradas corresponden a las 16 entradas de 5 VDC, provenientes de la etapa de captura de señales de alarma, y la señal de recepción de datos seriales, donde se reciben mensajes MODBUS y datos de configuración desde una PC. Las señales de salida corresponden a las señales que se activan cuando se reciben y envían mensajes MODBUS, cuando se recibieron datos de configuración del sistema y una señal de sistema funcionando.

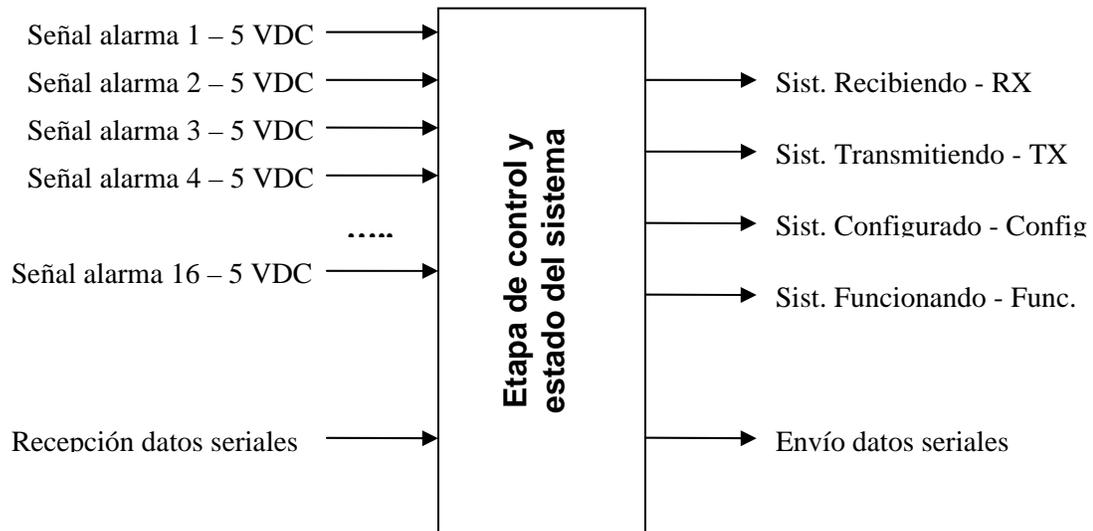


Figura 5.4. Diagrama de bloques de tercer nivel de la etapa de control y estado del sistema

Por otra parte, en la siguiente figura se muestra el circuito implementado para esta etapa donde se muestra la conexión de entradas y salidas, alimentación y componentes utilizados. Los pines 2 hasta el 10, se dejaron libres ya que corresponden a entradas analógicas de 0 a 5 VDC, que se pueden implementar para la ampliación de los alcances del sistema, como el manejo de datos analógicos, señales de control, entre otros. Estos puertos pueden ser programados como señales de salida que se pueden implementar como señales de control para la excitación de relés y así aumentar aún más los alcances del sistema en cuanto a funciones que puede desempeñar, por ejemplo la lectura de registros internos que contienen información sobre el estado de un dato analógico, información que puede ser accedida haciendo referencia a un registro interno Modbus de la interfaz.

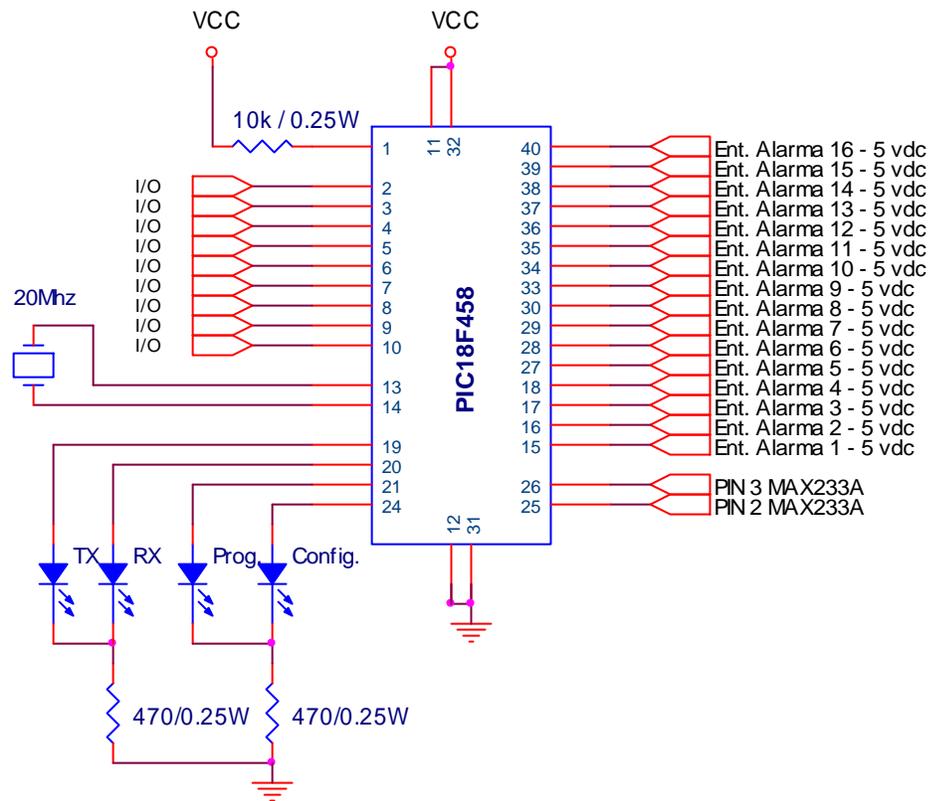


Figura 5.5. Circuito de la etapa de control y estado del sistema

Etapa de comunicación serial

La función de esta etapa es interfazar el puerto serie del microcontrolador con el puerto serie de una PC o cualquier otro dispositivo, lo que permite pasar los datos seriales de +- 12 VDC provenientes del puerto RS232 de una PC a señales de 5 VDC para el microcontrolador, y viceversa. En la figura 5.6 se muestra el diagrama de tercer nivel que muestra las entradas y salidas de esta etapa.

Esta etapa fue implementada haciendo uso de un transceiver MAX233A, que convierte señales seriales TTL/CMOS a señales de +-12 VDC con que las que trabaja el puerto RS232 de una PC. Se optó por utilizar este transceiver debido a su fácil implementación y funcionamiento.

Las señales que van al puerto RS232 de la PC, se conectaron a una terminal DB9 hembra con el fin de que la comunicación pueda realizarse por medio de un cable serial, entre el sistema y la PC. Estas mismas señales son tomadas y conectadas a unos conectores de tornillo que permiten conectar el sistema por medio del protocolo RS232 a cualquier dispositivo maestro MOSBUS que se comunique por RS232, como lo es el caso del convertidor de protocolos Lantronix UDS-10-IAP, con el cual se realizaron las pruebas del sistema para la interrogación del mismo a través de la red. En la figura 5.7, se muestra el circuito implementado para esta etapa.



Figura 5.6. Diagrama de bloques de tercer nivel de la etapa de Comunicación serial

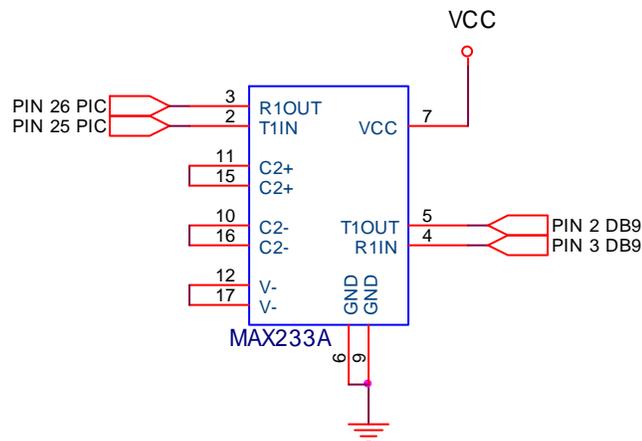


Figura 5.7. Circuito de la etapa de comunicación serial

Etapa de captura de alarmas

La función de esta etapa es capturar las señales de alarma provenientes de los equipos y convertir dichas señales en señales de 5 VDC para el microcontrolador. Esta etapa cumple con el objetivo basado en la captura de alarmas binarias de los equipos. En la siguiente figura se muestra un diagrama de tercer nivel de esta etapa, donde se observan las señales de entrada y salida.

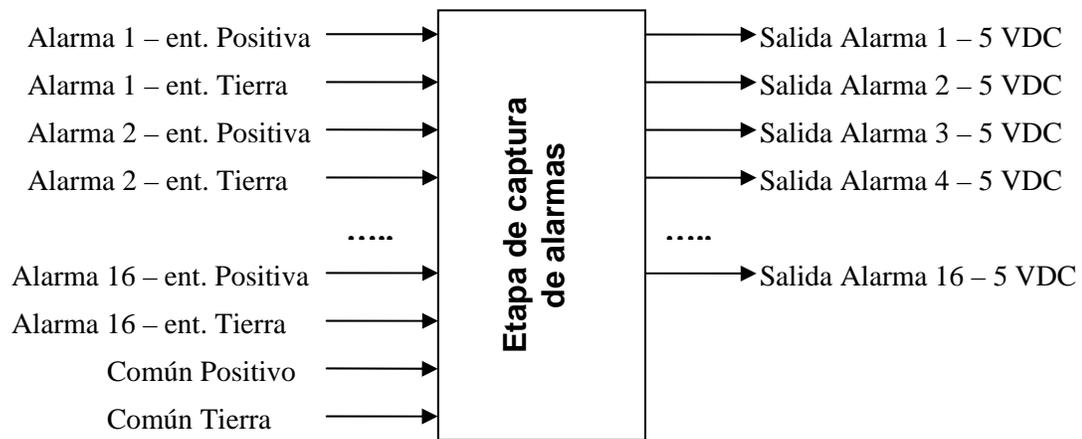


Figura 5.8. Diagrama de tercer nivel de la etapa de captura de alarmas

En el diagrama anterior se puede observar que esta etapa cuenta con dos entradas por cada señal de alarma y además con dos entradas de alimentación común. Esta configuración permite que se puedan acoplar señales de alarma que se activen en bajo o en alto, y así utilizar un común positivo en el caso de señales activas en bajo, o tierra común en el caso de señales activas en alto. Además se pueden acoplar señales de alarma que cuentan con una línea positiva y una línea a tierra, que permita cerrar el circuito de la alarma.

Este diseño se implementó porque al realizar una medición de las señales de alarma en un controlador *Kohler Digital 550*¹⁰, se determinó que las señales de alarma son activas en bajo, y que tienen una señal de referencia común de 26 VDC, por lo que cuando están desactivadas están normalmente a 26 VDC, y cuando se activan están a 0 VDC aproximadamente. Entonces en este caso se debe conectar la referencia común del controlador a la entrada **Común Positivo** y cada alarma se debe conectar a la entrada **ent. Negativa** de la interfaz.

Esta etapa de captura de señales de alarma se implementó haciendo uso de optoacopladores con el fin de aislar la etapa de control de la parte de las señales de las plantas. Se optó por utilizar el optoacoplador 4N25, debido a que la sensibilidad de su salida permitió trabajar con los rangos de entrada requeridos, y así cumplir con el objetivo referente a la captura de señales de alarma de 12 VDC a 60 VDC. Además, como se debía implementar el diseño para 16 entradas de alarma, la solución con este optoacoplador era la más óptima, por costo y disponibilidad de los componentes a utilizar.

En la siguiente figura se muestra el circuito implementado para cada señal de alarma, que permite conectar señales desde los 10 VDC hasta los 60 VDC, y obteniendo una salida de 5 VDC, requerida para activar una entrada de alarma en el microcontrolador.

¹⁰ Controlador de la planta Detroit Diesel Spectrum, ubicada en la localidad de San Antonio de Belén en Heredia.

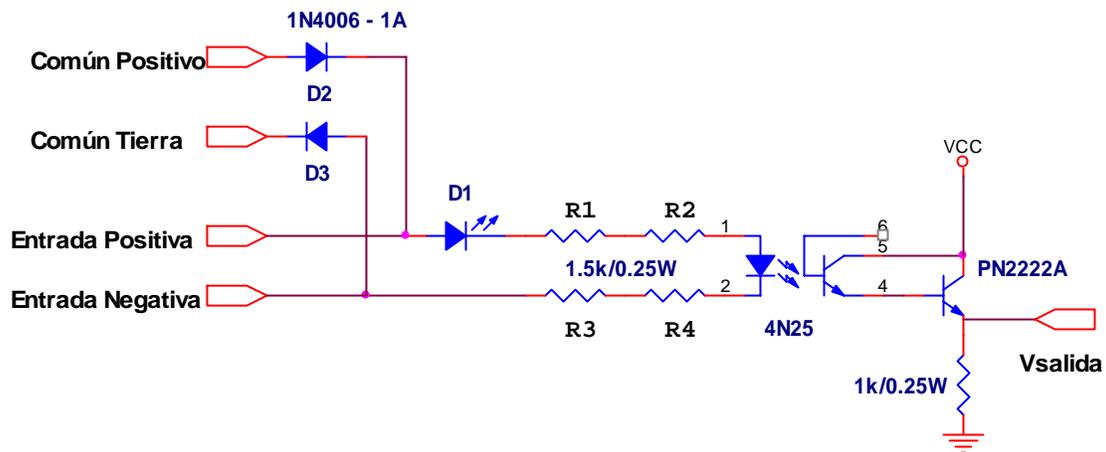


Figura 5.9. Circuito implementado para la captura de una señales de alarma entre los 12 VDC y 60 VDC.

El optoacoplador cuenta con un LED como entrada que permite regular la corriente. Según los datos técnicos del optoacoplador, la entrada soporta una corriente máxima de 60 mA, por lo que se calculó una resistencia de entrada para el caso en que la tensión de entrada fuese máxima (60 VDC) y a un valor de corriente mucho menor al máximo soportado por la entrada (10 mA aproximadamente). A continuación se muestra la ecuación para el cálculo de la resistencia de entrada. Haciendo uso de esta ecuación, y utilizando como tensión de entrada 60 VDC, tensión en LED 1,5 VDC y una corriente máxima de entrada de 10 mA, se obtuvo un valor de resistencia de 6000 ohmios. Además, se debía tomar en cuenta la potencia consumida por la resistencia con el fin de seleccionar la adecuada. La potencia máxima suponiendo una entrada de 60 VDC y una corriente de 10 mA, equivale a 0.6 W, por lo que se utilizó una resistencia de 1 W.

$$R_{ENTRADA} = \frac{V_{entrada} - V_{LED}}{I_{MAX}} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Al implementar el circuito en protoboard se presentó el problema que la resistencia se calentaba excesivamente cuando la tensión de entrada sobrepasaba los 20 VDC, hasta el punto de que se quemaba. Se probó utilizando una resistencia de igual valor pero de mayor potencia (2 W) pero el problema continuó. Al realizar mediciones de corriente y voltaje, se recalculó la potencia en la resistencia pero de igual manera no sobrepasaba 1 W de potencia. Para solucionar el problema se colocaron 4 resistencias de igual valor equivalente al valor calculado y el problema del calentamiento de las mismas se solucionó.

El led D1 que se encuentra en la entrada positiva del circuito de entrada, permite visualizar en forma local el estado de la alarma conectada en una entrada determinada. Además, el circuito de entrada permite conectar señales de alarma de equipos diferentes, conectando el positivo y el común de la señal de alarma en las entradas del sistema. Por otro lado en caso de que se implemente la interfaz en un solo equipo, por lo general se cuenta con una señal común para todas las señales de alarma, por lo que se hace uso de los comunes del sistema, ya sea común positivo en caso de señales activadas en bajo o común tierra para señales activadas en alto. Los diodos D2 y D3 utilizados en las entradas de los comunes, se utilizan para proteger el optoacoplador en caso de que se conecte erróneamente la señal de los comunes.

Esta etapa de captura de alarmas se implementó en dos etapas de 8 entradas de alarma, debido a que se tomó en cuenta el diseño del circuito impreso, en lo que respecta a tamaño y posición de los componentes.

Además en la salida del optoacoplador se utilizó un transistor PN2222A, ya que para tensiones menores a 60 VDC en la entrada, el transistor de salida no alcanzaba la conductividad máxima entre colector-emisor que permitiera tomar una salida de 5 VDC en el emisor del transistor de salida, por lo que se utiliza el transistor como un seguidor de tensión, como se muestra en la figura 5.9.

En la siguiente figura (Figura 5.10.) se muestra el circuito completo de una etapa de captura de alarmas de 8 entradas. La tensión de alimentación VCC (5 VDC) y la tierra del circuito salida de alarmas, son tomadas de la etapa de alimentación del circuito, por lo que la etapa de captura de alarmas y la alimentación del circuito están aisladas.

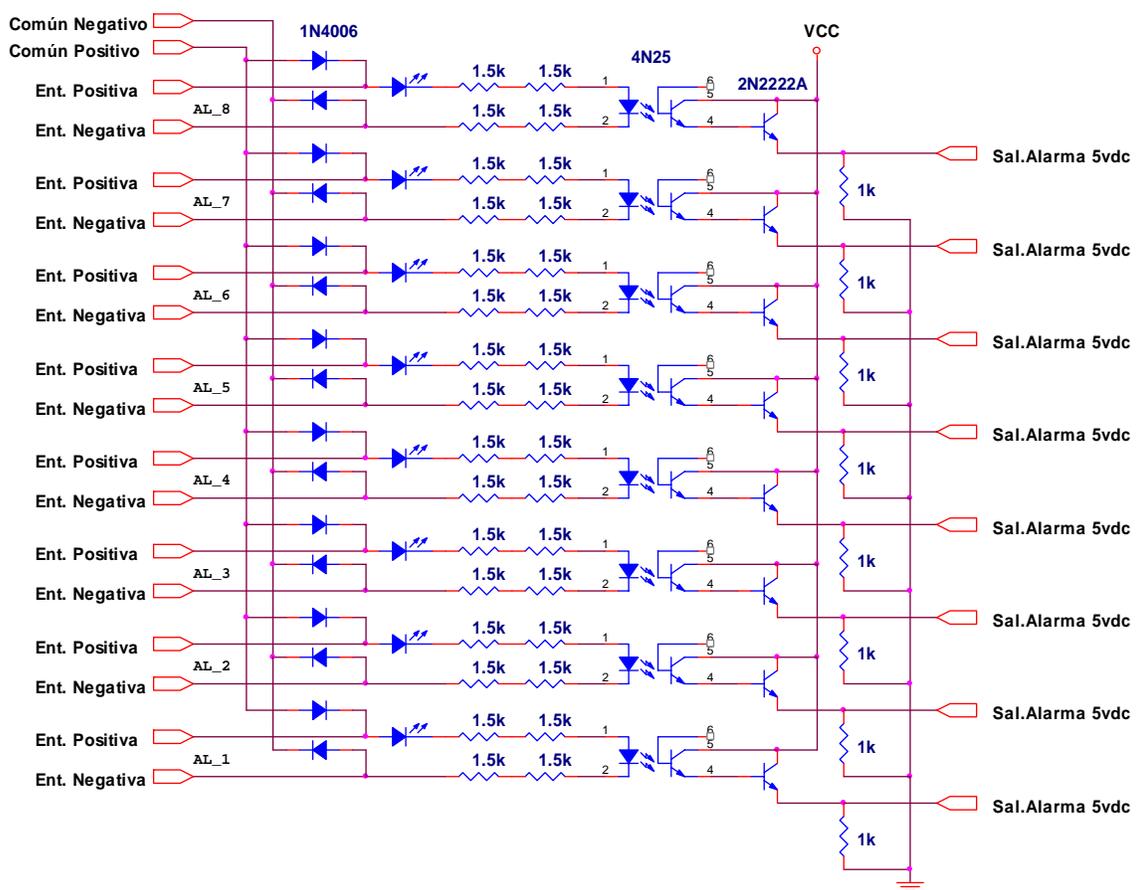


Figura 5.10. Circuito de la captura de alarmas de la planta

5.3 Descripción del software

La solución planteada cuenta con dos etapas de software, una referente a la programación del microcontrolador para la etapa de control y la otra referente al programa de software que permite enviar datos de configuración desde una PC al microcontrolador para establecer la comunicación MODBUS.

El software implementado para la etapa de control se diseñó para realizar las funciones de captura de mensajes de solicitud MODBUS, captura de datos de configuración, decodificación de los mensajes de solicitud para la generación y envío de mensajes de respuesta y mensajes de error; además de la verificación de errores en las tramas recibidas (CRC-16) y la generación de señales de control del sistema. Además de las funciones de envío y recepción de datos seriales para realizar las funciones de captura y envío de los mensajes de solicitud y respuesta. Para la implementación de las rutinas de software para el microcontrolador, se utilizó el programa MPLAB IDE 6.0 con el compilador MPLAB C18 v2.2, que es lenguaje de programación C para los microcontroladores PIC18xxx de MICROCHIP.

La rutina de software que permite la comunicación entre el sistema diseñado y una PC, fue diseñado en Visual Basic 6.0. Este software cuenta con una ventana para el usuario, que permite configurar la identificación de esclavo del sistema¹¹ y los números de registro asociados a las entradas de alarma. El programa se comunica con el sistema por medio del puerto serie RS232 de la PC, enviando una trama de 4 bytes con los datos antes mencionados.

Se dará una explicación detallada de cada software diseñado a continuación con el fin de conocer las principales de funciones implementadas.

¹¹ Permite diferenciar a un esclavo dentro de una red MODBUS, donde hay varios esclavos y un servidor.

Programa de software del microcontrolador PIC18F458

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo general del programa de recepción de la trama de los mensajes de solicitud MODBUS y la generación de los mensajes de respuesta.

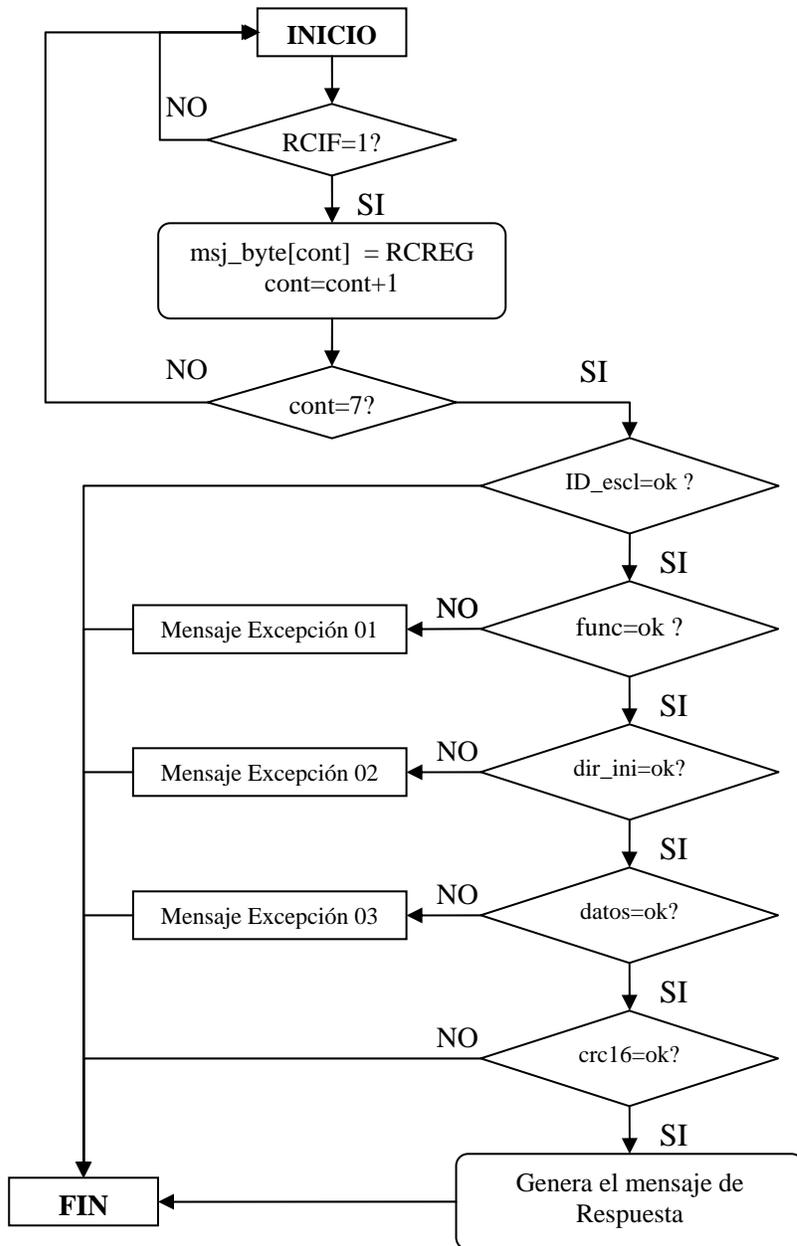


Figura 5.11. Diagrama de Flujo del programa de Recepción y Respuesta de los mensajes MODBUS.

Esta es la rutina principal de la recepción de la trama de datos del mensaje MODBUS, que consta de 8 bytes de datos recibidos por el puerto de recepción serial de microcontrolador. Para la recepción de los datos, el microcontrolador cuenta con un bit bandera, RCIF, que indica cuando el registro de recepción (RCREG) de datos seriales está lleno. Por lo que la rutina lo que hace es preguntar primero si la bandera de recepción serial está activada, para así copiar el contenido del registro en una variable tipo arreglo, que cuenta con 8 espacios de almacenamiento. Para indicar la posición de cada dato recibido se utiliza un contador que apunta la posición en la cual se almacenará el dato recibido, en el orden que se reciben. Esto se observa en el diagrama de flujo, donde el la variable de almacenamiento de los datos se denota como *msj_byte [cont]* y el contador como *cont*. Una vez que se recibe un byte de la trama de datos, se verifica si ya han llegado 8 bytes de datos, con el fin de empezar a decodificar la trama de datos y realizar la función solicitada.

La trama de los mensajes de solicitud MODBUS cuentan con 8 bytes de datos, los cuales contienen la siguiente información: un byte con la dirección del esclavo (identificación del dispositivo esclavo), un byte con la función que se solicita realizar, dos bytes para la dirección de inicio de donde se empezarán a tomar los datos, de los cuales el primero contiene la parte alta y el segundo la parte baja de la dirección; luego dos bytes para indicar el número de entradas/salidas o registros que se desea ver a partir de la dirección de inicio, los cuales contienen parte alta y parta baja; y por último dos bytes que contienen el CRC-16¹² de la trama, con el fin de validar la trama y que llegue libre de errores.

Una vez capturados los 8 bytes de datos, se verifica que la dirección de esclavo sea igual a la dirección de esclavo que tiene el sistema (el cual está almacenado en la memoria ROM del microcontrolador), sino corresponde no hace nada debido a que no se refiere a este esclavo. Si corresponde, se verifica que la función que se está solicitando pueda ser realizada por el sistema, que en este caso

¹² CRC: chequeo de redundancia cíclica, para el chequeo de errores en una trama de datos.

solo puede realizar la función 01 de lectura de salidas (coils). Luego, verifica que la dirección de inicio indicada en el mensaje concuerde con algún registro disponible del sistema; si corresponde se verifica que el número de registros que se quieren ver a partir de la dirección de inicio, no sobrepasen la dirección del último registro disponible en el sistema. Y por último se verifica que los bytes de chequeo de errores, CRC16, estén correctos para validar los datos recibidos.

El sistema diseñado cuenta con 16 entradas de alarma, las cuales pueden ser acezadas por medio de la función 01 (lectura de salidas, coils) o la función 02 (lectura de entradas). Se debe utilizar en forma correcta la función 02 debido a que se refiere a señales binarias de entrada al dispositivo, pero el sistema SCADA trabaja con lectura de señales binarias de salida, o sea la función 02, que se implementa de igual manera. Por lo que el sistema está programado para permitir solo la función 01 de lectura de salidas. Estas entradas están direccionadas por defecto en el sistema, desde el registro 01601 hasta el registro 01616, un registro por cada entrada. Pero pueden ser programadas desde el número de registro 0 hasta 9983, haciendo uso del programa de configuración de la PC.

El sistema además es capaz de enviar mensajes de error en caso de que no pueda realizar alguna función solicitada, o reciba algún dato erróneo de dirección de inicio o número de registros. Esto se puede observar en el diagrama de flujo como los Mensajes de Excepción 01, 02, 03; los cuales se mencionaron en el capítulo del marco teórico.

Un servidor MODBUS puede acceder a cualquiera de las entradas del sistema para conocer su estado, indicando el primer registro que desea ver y luego el número de registros que desea ver a partir de este registro de inicio. Estos datos que corresponden a un bit para cada entrada, indicando si está activado, 1 o desactivado, 0; van almacenados en bytes, por lo que cada byte puede almacenar 8 registros de alarma. Por lo que el número de bytes del mensaje de respuesta varía según la

cantidad de registros de entrada con que cuente el sistema, en este caso se tiene un máximo de 2 bytes, para un máximo de 16 entradas. En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de la rutina que obtiene los datos solicitados en el mensaje MODBUS. Esta rutina trabaja con una dirección de inicio de 1 hasta la 16, sin importar el número de registro que se le asigne a cada entrada. Por lo que a cualquier dirección de inicio que se programe se le asigna 1 hasta llegar a 16, para las siguientes. Esta función se realiza siempre y cuando todos los datos recibidos en el mensaje sean válidos, por lo que no realiza ninguna verificación de ningún dato recibido.

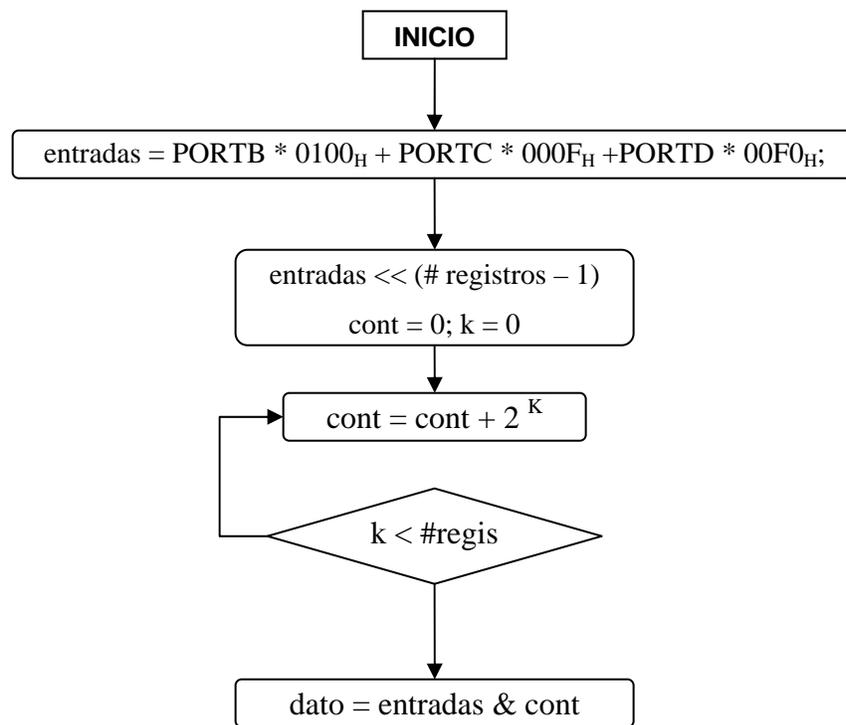


Figura 5.12. Diagrama de flujo de la rutina que genera el dato solicitado por el mensaje de solicitud MODBUS

Las entradas de alarma son tomadas de los puertos B, C y D del microcontrolador como se muestra en el diagrama de flujo, desde el bit más significativo que es el puerto RB7 hasta el RB0 del puerto B, luego los puertos RC7,

RC6, RC5 y RC4 del puerto C, y los menos significativos que son los puertos RD3, RD2, RD1 y RD0 del puerto D. En la siguiente tabla se muestra el direccionamiento de los registros de entrada con los puertos del microcontrolador, desde el bit más significativo (MSB) hasta el menos significativo (LSB).

Tabla 5.1. Asignación de puertos del microcontrolador a cada registro de entrada del sistema diseñado

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| M S B | | | | | | | | | | | | | | | L S B |
| 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| R B 7 | R B 6 | R B 5 | R B 4 | R B 3 | R B 2 | R B 1 | R B 0 | R C 7 | R C 6 | R C 5 | R C 4 | R D 3 | R D 2 | R D 1 | R D 0 |

En la tabla anterior, se muestra en la fila del medio los número de registros asignados en la rutina y en la fila inferior el puerto de entrada asignado a cada registro de entrada.

Una vez almacenadas todas las señales de entrada en una variable, *entradas*, se desplaza a la derecha esta variable el número de veces que indica la cantidad de registros solicitados en el mensaje menos uno. Esto debido a que se debe colocar en el bit menos significativo del primer byte de datos del mensaje de respuesta, el registro referente a la dirección de inicio. Por lo que al desplazar la variable con las entradas el número de veces que indica el número de registros por ver, se obtiene en el bit menos significativo el registro de inicio solicitado. Luego para enviar solo el número de registros solicitados se debe realizar la función lógica AND, con el fin de enviar solamente los datos solicitados. Esto debido a que si se quiere ver solo el bit menos significativo de un dato se hace una AND de este dato con 1, si se quieren ver los dos bits menos significativos se hace una AND del dato con 3 (11_B), etc. Entonces se realiza un ciclo que permite obtener estos valores en la variable *cont* del diagrama de flujo de la figura 5.12. Una vez que se tiene el dato *cont* se realiza la función AND entre el dato *cont* y la variable que contiene los

registros de entrada (ver Apéndice A.5 donde se muestra un ejemplo de la rutina de captura de datos).

Debido a que el sistema debe contar con un número de identificación de esclavo y que cada entrada de alarma debe tener un número de registro asignado, con el fin de que estos datos pudiesen ser cambiados en la interfaz, se almacenaron en un espacio de la memoria ROM del microcontrolador. La interfaz cuenta con una dirección de esclavo por defecto que es la 01 y los registros están direccionados por defecto a los números de registro MODBUS del 1601 al 1616, que son los registros asignados en el SCADA para las alarmas provenientes de las plantas de emergencia.

Cuando el microcontrolador se programa y se pone a funcionar por primera vez, la rutina principal del programa, lee el dato en memoria que se encuentra en la dirección de almacenamiento de la dirección de esclavo, y verifica si el espacio en memoria está vacío (FF_H) y si lo está, guarda estos datos por defecto a partir de esta dirección; si no continúa con las demás rutinas de espera de mensajes MODBUS.

Para cambiar estos parámetros por defecto se hace uso de un programa de usuario, que envía por el puerto serie de una PC, los datos que contienen una nueva dirección de esclavo y un nuevo número de registro desde el cual se van a ver las entradas del sistema. Estos datos son enviados en 4 bytes. Cuando se están recibiendo datos seriales, se verifica que al llegar 4 bytes, el primer byte de datos recibido sea igual a FF_H , que indica que están llegando datos de configuración, esto con el fin de diferenciar los mensajes de solicitud MODBUS de los datos de configuración.

Programa de configuración del sistema para la PC

La solución implementada cuenta con un programa de software escrito en Visual Basic 6.0 que permite configurar los datos de dirección de esclavo y números de registro de las entradas de alarma, por medio del puerto RS232 de la PC. En la siguiente figura, se muestra la ventana del programa diseñado.

Configuración de la Interfaz

Ingrese el número de esclavo:

Esclavo: Rango permitido: 0 a 255

Ingrese el rango de registros de salidas del esclavo:

Dirección de inicio:

Dirección final:

Configurar con los valores por defecto

Configurar Salir

Configuración por defecto de la Interfaz:

- # Esclavo: 1
- Registros de salida: 01601 a 01616 (16 en total)

Figura 5.13. Ventana del programa de software

La ventana cuenta con un espacio de texto para ingresar el número de esclavo que se desea y un espacio para ingresar la dirección de inicio de las entradas, el espacio de dirección final depende de la dirección de inicio, por lo que se le suma en forma automática el número 15 al registro inicial. El programa no permite ingresar letras en los espacios, y maneja los límites permitidos tanto de caracteres como de la cantidad permitida en cada espacio. El número de esclavo sólo puede ser un número

comprendido entre 1 y 254. La dirección de inicio puede ser cualquier número desde 0 hasta 9984, debido a que para una dirección de inicio de 9984 la dirección final será 9999, que es el registro máximo que se acepta en el protocolo MODBUS.

La rutina implementada solo se encarga de enviar los datos obtenidos en los cuadros de texto por medio del puerto serie. Para lograr enviar un dato por el puerto serie en Visual Basic, se debe abrir el puerto de comunicaciones, colocar el dato a enviar en un registro determinado y luego cerrar el puerto de comunicaciones. Los métodos intermedios que se utilizaron fue la conversión de los datos tipo *String* en datos tipo *char*, que es un dato de 1 byte.

El programa envía 4 bytes como se mencionó en el apartado anterior, el primero corresponde a FF_H (255_D), el segundo la dirección de esclavo y los últimos dos, corresponden a la parte alta y parte baja de la dirección de inicio.

Capítulo 6: Análisis de Resultados

En la siguiente figura se muestra el circuito de medición utilizado para la medición del voltaje de salida de la etapa de alimentación para diferentes tensiones de entrada. Las mediciones fueron tomadas con la carga conectada al circuito.

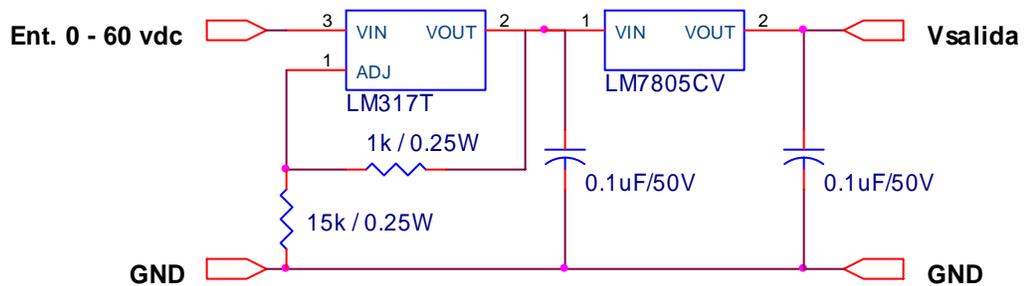


Figura 6.1. Circuito de medición para la obtención de los datos de la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Datos de entrada y salida del circuito de alimentación del sistema
NOTA: pruebas realizadas con una fuente de CD en el laboratorio

| Tensión de entrada (V) | V salida (V) |
|------------------------|--------------|
| 0 | 0 |
| 1 | 0 |
| 2 | 0 |
| 3 | 0 |
| 4 | 0.7 |
| 5 | 1.6 |
| 6 | 2.1 |
| 7 | 4.2 |
| 8 | 5.05 |
| 10 | 5.12 |
| 20 | 5.12 |
| 30 | 5.12 |
| 40 | 5.12 |
| 50 | 5.12 |
| 60 | 5.12 |

En la tabla anterior se puede observar datos de la tensión de salida del circuito de alimentación para tensiones de entrada desde los 0 VDC hasta los 60 VDC. Debido a que el diseño debía permitir ser alimentados con tensiones desde los 12

VDC hasta los 60 VDC, por la disponibilidad de tensiones en las localidades. Estas mediciones se realizaron haciendo uso de una fuente de corriente directa. Los datos de tensión fueron medidos con la carga conectada al circuito.

En la tabla se puede observar que para una tensión mayor a 7 VDC en la entrada hasta los 60 VDC, la señal de salida se mantiene constante aproximadamente en 5 VDC, lo que alimenta sin ningún problema el circuito, por lo que el circuito cuenta con un rango de alimentación desde los 8 VDC hasta los 60 VDC. Con esto se puede concluir que se alcanzó el objetivo referido al diseño de una etapa de alimentación dinámica para el sistema. Esto se logro con dos reguladores en cascada, el LM317T y el LM7805, como se muestra en la Figura 6.1.

La figura 6.2, muestra el circuito utilizado para la medición de los datos de corriente y voltaje de la etapa de captura de alarmas. Las resistencias de entrada R1, R2, R3 y R4 son del mismo valor, 1500 ohmios, por lo que la tensión en ambas en la misma. Como se mostrará más adelante en la tabla 6.2.

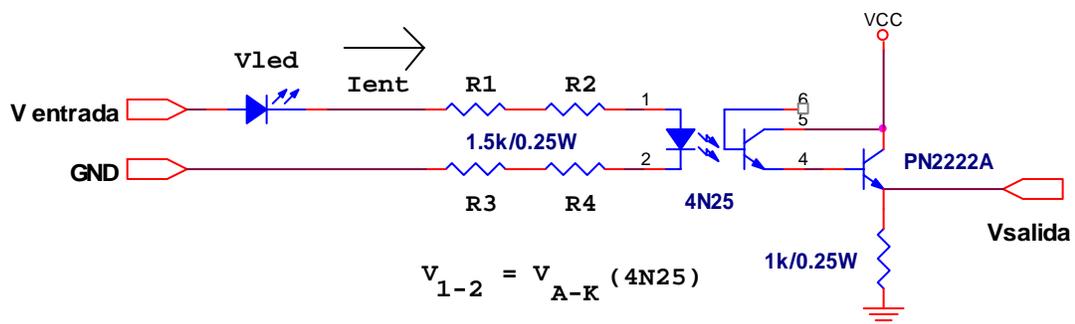


Figura 6.2. Circuito de medición para la obtención de los datos de la tabla 6.3.

Tabla 6.2. Datos de voltaje y corriente teóricos del circuito de captura de alarmas.

*Nota: tensiones en voltios y corriente en miliamperios.

| Tensión entrada | Corriente entrada | V _{R1} | V _{R2} | V _{R3} | V _{R4} | V _{AK} (4N25) | V _{AK} (led) |
|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|
| 5 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.5 | 1.5 |
| 10 | 0 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.5 | 1.5 |
| 20 | 2.83 | 4.25 | 4.25 | 4.25 | 4.25 | 1.5 | 1.5 |
| 30 | 4.50 | 6.75 | 6.75 | 6.75 | 6.75 | 1.5 | 1.5 |
| 40 | 6.17 | 9.25 | 9.25 | 9.25 | 9.25 | 1.5 | 1.5 |
| 50 | 7.83 | 11.75 | 11.75 | 11.75 | 11.75 | 1.5 | 1.5 |
| 60 | 9.50 | 14.25 | 14.25 | 14.25 | 14.25 | 1.5 | 1.5 |

En la tabla 6.2, se muestran los datos teóricos de corriente y voltaje para la etapa de captura de señales de alarma. En el apéndice A.6., se muestra el cálculo de algunos de los datos de la tabla anterior. Se puede observar que la corriente de entrada máxima calculada no sobrepasa los 10 mA, con el fin de que el optoacoplador no sufra una alta corriente en el led de entrada, que lo pueda quemar. En la siguiente tabla se muestran los datos experimentales obtenidos en el laboratorio con el mismo rango de tensiones de entrada, haciendo uso de una fuente de corriente directa. Además se puede calcular la potencia en una de las resistencias con la siguiente ecuación, para el caso en que la corriente es máxima y así determinar la potencia máxima consumida por las resistencias. En este caso la corriente máxima en la resistencia es de 9,5 mA y la tensión máxima de 14,25 VDC.

$$\begin{aligned}P_{RESISTENCIA} &= V_R \cdot i_R \\P_{RESISTENCIA} &= 14.25V \cdot 9.50mA \\P_{RESISTENCIA} &= 135.4mW\end{aligned}$$

Con los datos anteriores, se obtiene una potencia máxima en las resistencias de 135,4 mW, por lo que se concluyó en utilizar resistencias de entrada de 0,25 W.

Tabla 6.3. Datos de voltaje y corriente experimentales del circuito de captura de alarmas.
*Nota: tensiones en voltios y corriente en miliamperios.

| Tensión entrada | Corriente entrada | V_{R1} | V_{R2} | V_{R3} | V_{R4} | V_{AK} (4N25) | V_{AK} (led) | V_{SALIDA} |
|-----------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|--------------------|-------------------|--------------|
| 1.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.13 |
| 5 | 1 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.9 | 1.6 | 4.11 |
| 10 | 2 | 1.77 | 1.77 | 1.77 | 1.77 | 0.9 | 1.7 | 4.29 |
| 12 | 2 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 1.0 | 1.7 | 4.30 |
| 15 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1.0 | 1.7 | 4.31 |
| 20 | 3 | 4.1 | 4.1 | 4.1 | 4.1 | 1.0 | 1.7 | 4.33 |
| 30 | 5 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 1.0 | 1.8 | 4.35 |
| 40 | 6 | 9 | 9 | 9 | 9 | 1.0 | 1.8 | 4.36 |
| 50 | 7 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 11.5 | 1.0 | 1.8 | 4.37 |
| 60 | 8 | 14 | 14 | 14 | 14 | 1.0 | 1.8 | 4.37 |

Al comparar la tabla de datos teóricos y experimentales, se puede observar que los datos son muy similares entre sí. Por lo que se puede concluir que los datos obtenidos concuerdan con lo esperado. Además, se puede observar que la corriente de entrada máxima medida fue de 8 mA a 60 VDC. En la tabla 6.3, se puede observar además que se adjuntaron los valores de la tensión de salida, con el fin de determinar la tensión de entrada mínima para activar el optoacoplador y obtener una tensión de 5 VDC en la salida, que pueda ser detectada por el microcontrolador con un 1 lógico, en este caso para una entrada de 10 VDC, la salida es de 4,29 VDC lo cual ya es detectado por el microcontrolador como un 1 lógico en la entrada.

Por otro lado, se puede observar que la tensión máxima en las resistencias es de 14 VDC, lo cual evita que las mismas sufran un calentamiento excesivo debido a la tensión, ya que al calcular la potencia en una resistencia con la corriente y tensión máximas medidas se obtuvo una potencia menor a la que soportan las resistencias utilizadas en el diseño, como se muestra en el cálculo siguiente.

$$\begin{aligned}P_{RESISTENCIA} &= V_R \cdot i_R \\P_{RESISTENCIA} &= 14V \cdot 8mA \\P_{RESISTENCIA} &= 112mW\end{aligned}$$

El cálculo anterior dió como resultado 112 mW, lo que permite utilizar las resistencias de 250 mW en el diseño.

Con las tablas de datos experimentales y datos teóricos, se puede demostrar la etapa de captura de alarmas binarias cumple con el objetivo planteado de la captura de señales de alarma entre los 10 VDC y los 60 VDC.

En las siguientes tablas (Tabla 6.4 y Tabla 6.5), se muestran algunos datos de tensión obtenidos en las plantas de emergencia de las localidades de San Antonio de Belén y San Ramón de Tres Ríos, específicamente. Estos datos de tensión corresponden a la medición de las tensiones de las señales de alarma cuando están desactivadas y activadas. En ambos casos las señales son activas en bajo, por lo que se realizaron las mediciones con referencia en el positivo de la batería en las plantas y en el negativo, con el fin de comprobar que son activas en bajo. En el caso de la planta Detroit Diesel en Belén, las señales de alarma son de 26 VDC, mientras que en el caso de la planta Kohler son de 13 VDC, aproximadamente. En el Anexo B.2., se muestra una foto interna del controlador de la planta Detroit Diesel, ubicado en San Antonio de Belén.

Tabla 6.4. Mediciones de las señales de alarma de la planta Detroit Diesel en la localidad de San Antonio de Belén.

| Señal de alarma | Tensión con referencia en el positivo de la batería de la planta | Tensión con referencia en tierra de la planta |
|------------------------------|---|--|
| Parada de emergencia | 0 VDC | 26 VDC |
| Baja presión de aceite | 0 VDC | 26 VDC |
| Alta temperatura del motor | 0 VDC | 26 VDC |
| Sobre velocidad de arranque | 0 VDC | 26 VDC |
| Planta en Modo no automático | 0 VDC | 26 VDC |
| Bajo nivel de combustible | 0 VDC | 26 VDC |
| Baja temperatura del agua | 0 VDC | 26 VDC |

Tabla 6.5. Mediciones de algunas señales de alarma de la planta Kohler en al localidad de San Ramón de Tres Ríos.

| Señal de alarma | Tensión, referencia en el positivo de la batería de la planta | Tensión, referencia en tierra de la batería de la planta |
|------------------------------|--|---|
| Parada de emergencia | 0 VDC | 13 VDC |
| Baja presión de aceite | 0 VDC | 13 VDC |
| Alta temperatura del motor | 0 VDC | 13 VDC |
| Sobre velocidad de arranque | 0 VDC | 13 VDC |
| Planta en Modo no automático | 0 VDC | 13 VDC |
| Bajo nivel de combustible | 0 VDC | 13 VDC |
| Baja temperatura del agua | 0 VDC | 13 VDC |

A continuación se muestran dos figuras con las ventanas del programa utilizado para la interrogación del sistema diseñado por medio del puerto RS232 de la PC, el cual utiliza MODBUS RTU igual que el sistema. El programa se llama *Modbus Tester* y fue adquirido en Internet en la dirección <http://www.modbus.pl>, en forma gratuita. En la siguiente figura se observa la ventana donde se muestra el estado de

la conexión, se digita la información de la unidad esclava Modbus, en este caso los datos del sistema diseñado, además de que se puede observar el valor de cada uno de los registros consultados.

Para este caso en particular se tenía programada la interfaz con una dirección de esclavo 1 y una dirección de registro de inicio 100, como se muestra en la figura. En la casilla **Length** de la ventana, se digita el número de registros que se quieren consultar a partir de la dirección de inicio ingresada; en este caso se observan las 16 entradas del sistema, las cuales estaban siendo simuladas por medio de dip switches conectados a tierra y a Vcc, con el fin de simular la activación de las entradas.

Además, es posible variar el período de muestro desde 1 ms, en este caso se estaba realizando cada 1 seg. Pero se han realizado pruebas con un periodo de muestreo de 1 milisegundo, y el sistema responde a dicha velocidad de recepción y respuesta de mensajes Modbus.

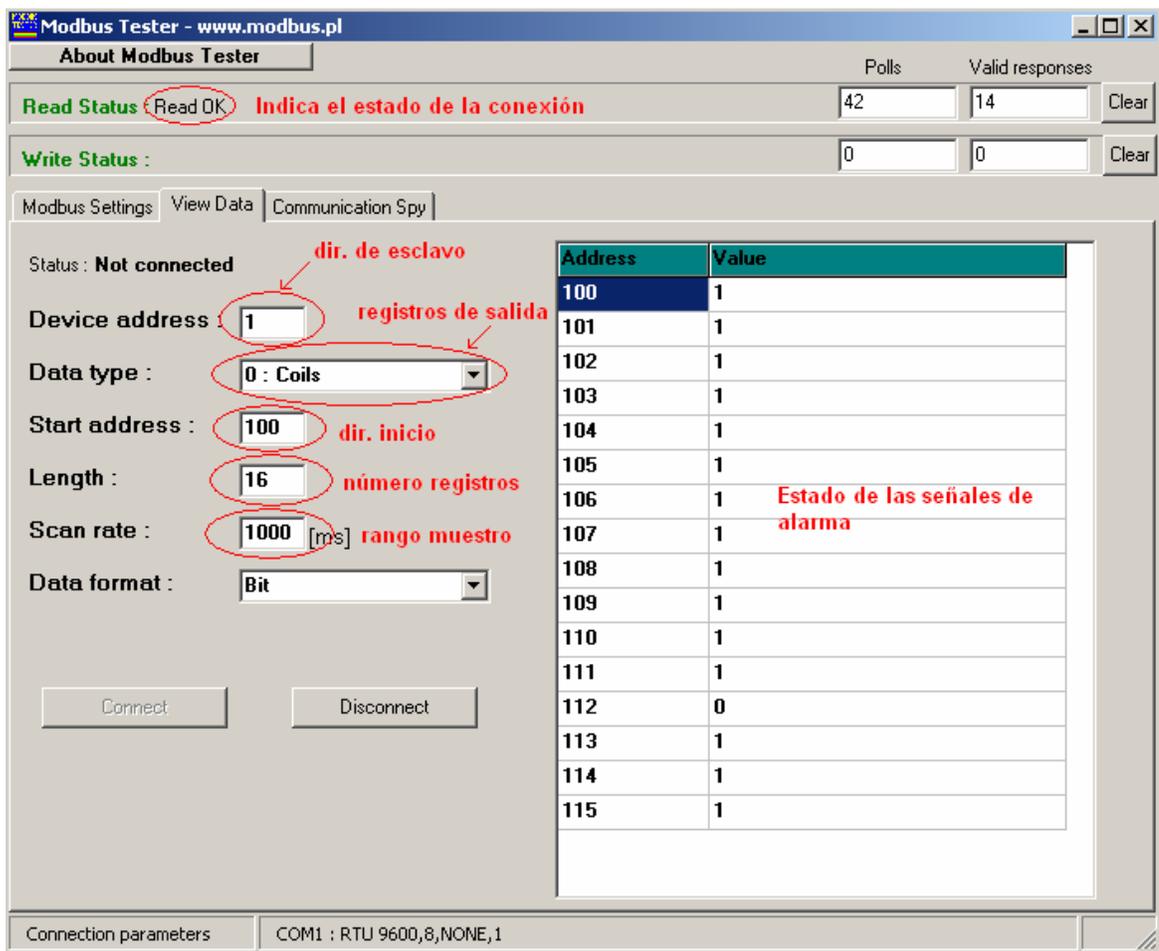


Figura 6.3. Ventana del programa Modbus Tester.

En la siguiente figura, se muestran las tramas enviadas y recibidas, las cuales pueden ser vistas con el programa Modbus Tester, al seleccionar la carpeta **Coommunication Spy**. La trama en azul, consta de 8 bytes hexadecimales, y es la trama del mensaje de solicitud enviado a la interfaz diseñada. Mientras que la trama en negro, equivale a una trama válida de mensaje de respuesta, el cual es generado por el sistema con datos válidos. Este programa permitió comprobar el funcionamiento de la interfaz con respecto a la recepción y envío de mensajes MODBUS, lo que permitió comprobar que se alcanzaron los objetivos referidos a la comunicación Modbs, tanto a nivel de hardware y software. En específico, se puede comprobar que se alcanzó implementar una etapa de comunicación serial para establecer una comunicación entre el sistema y cualquier sistema maestro y/o una

PC. Y por otro lado, se lograron crear las rutinas de programación necesarias para la recepción y envío de mensajes MODBUS. Además de que los parámetros requeridos para la captura y manejo de los datos, como el número de bytes a recibir y enviar y la decodificación de la información contenida en la trama de los mensajes, permitieron que se logrará diseñar e implementar el sistema de comunicación MODBUS, tanto a nivel de software como de hardware.

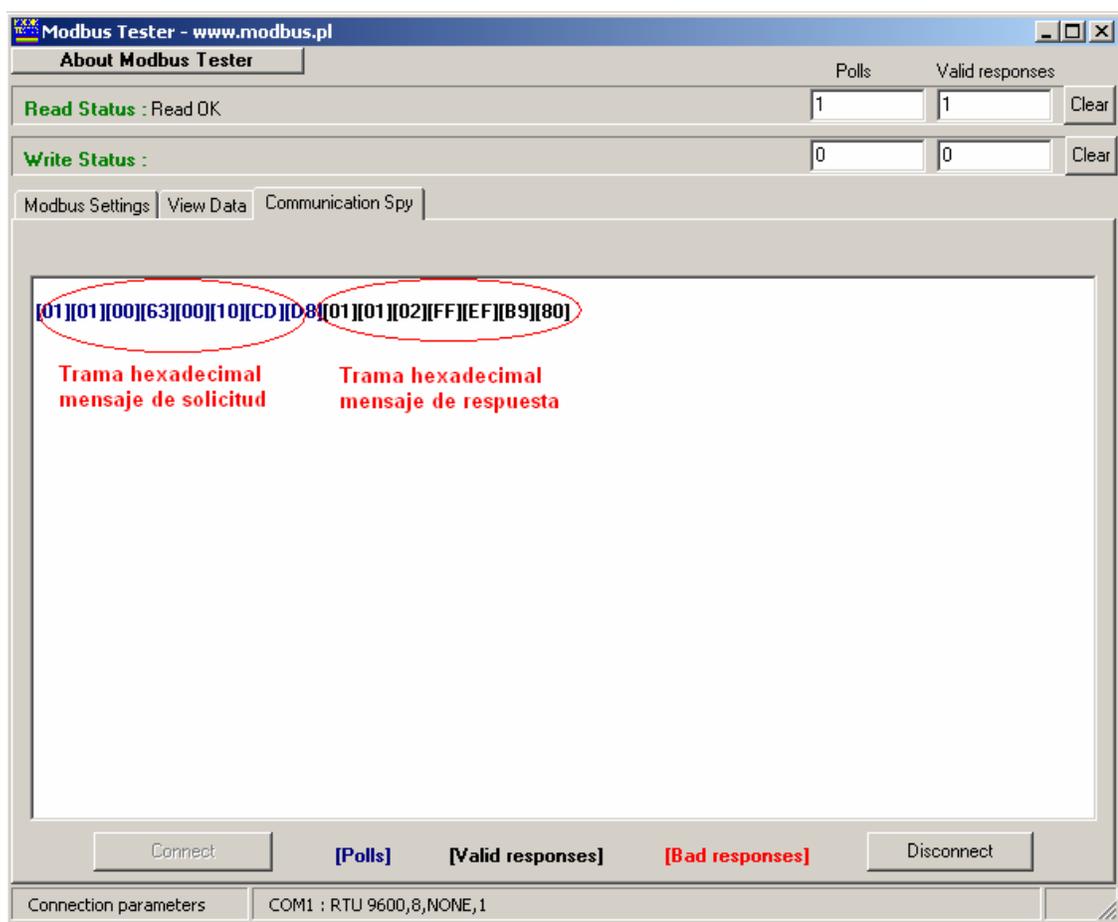


Figura 6.4. Ventana del programa Modbus Tester, con las tramas de los mensajes de solicitud y respuesta.

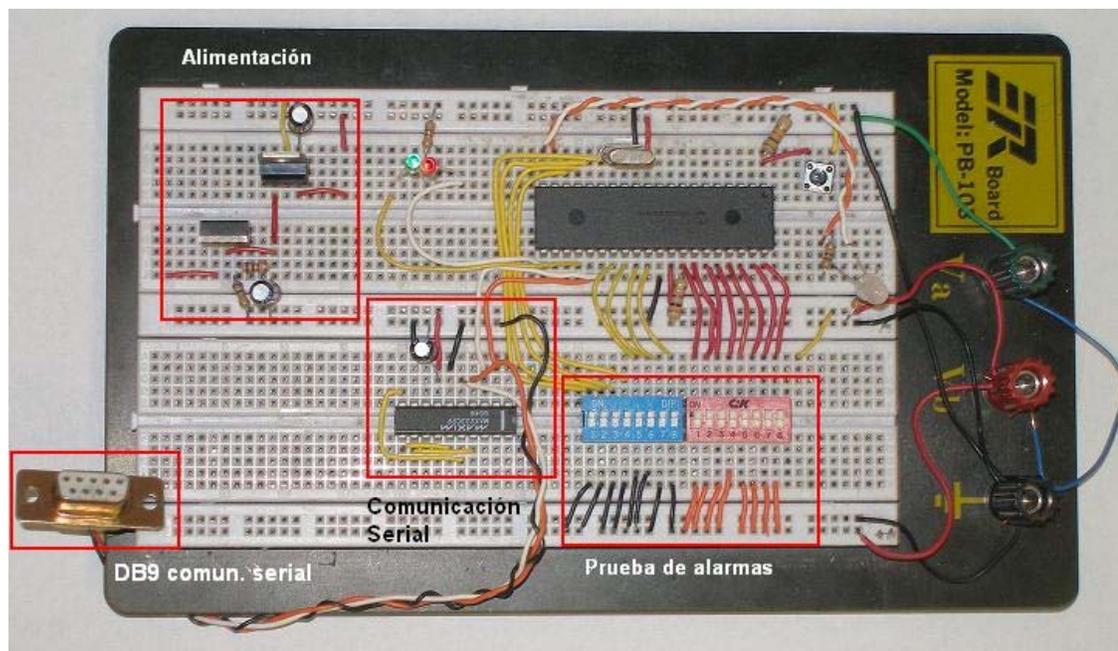


Figura 6.5. Circuito implementado en protoboard del sistema para realizar pruebas de recepción y envío de mensajes MODBUS.

En la figura anterior se muestra el circuito implementado en protoboard para la realización de las pruebas de recepción y envío de mensajes MODBUS. Donde se muestra la etapa de alimentación, la etapa de comunicación serial y una etapa de prueba para simular la activación de señales y verlas en el programa Modbus Tester mencionado anteriormente, a base de dip-switches. Además para realizar las pruebas con la etapa de captura de señales de alarma se removieron los dip-switch y las conexiones a la alimentación, y se conectaron las salidas del circuito de captura de señales, que se muestra en la siguiente figura. En la figura se muestran las diferentes etapas implementadas.

En la siguiente figura, se muestra una imagen del circuito de captura de las señales de alarma. En el cuadro en rojo en la parte superior de la imagen, se observa una conexión para realizar pruebas haciendo uso de las entradas de alimentación común (común positivo y común tierra) y de las entradas por separado, como se explicó en el capítulo anterior. En la parte inferior se muestra las salidas de esta etapa, que se conectan en las entradas del microcontrolador, como se mencionó anteriormente. La alimentación de 5 VDC para la etapa de acople con el microcontrolador se tomó de la etapa de alimentación del circuito mostrado en la figura anterior.

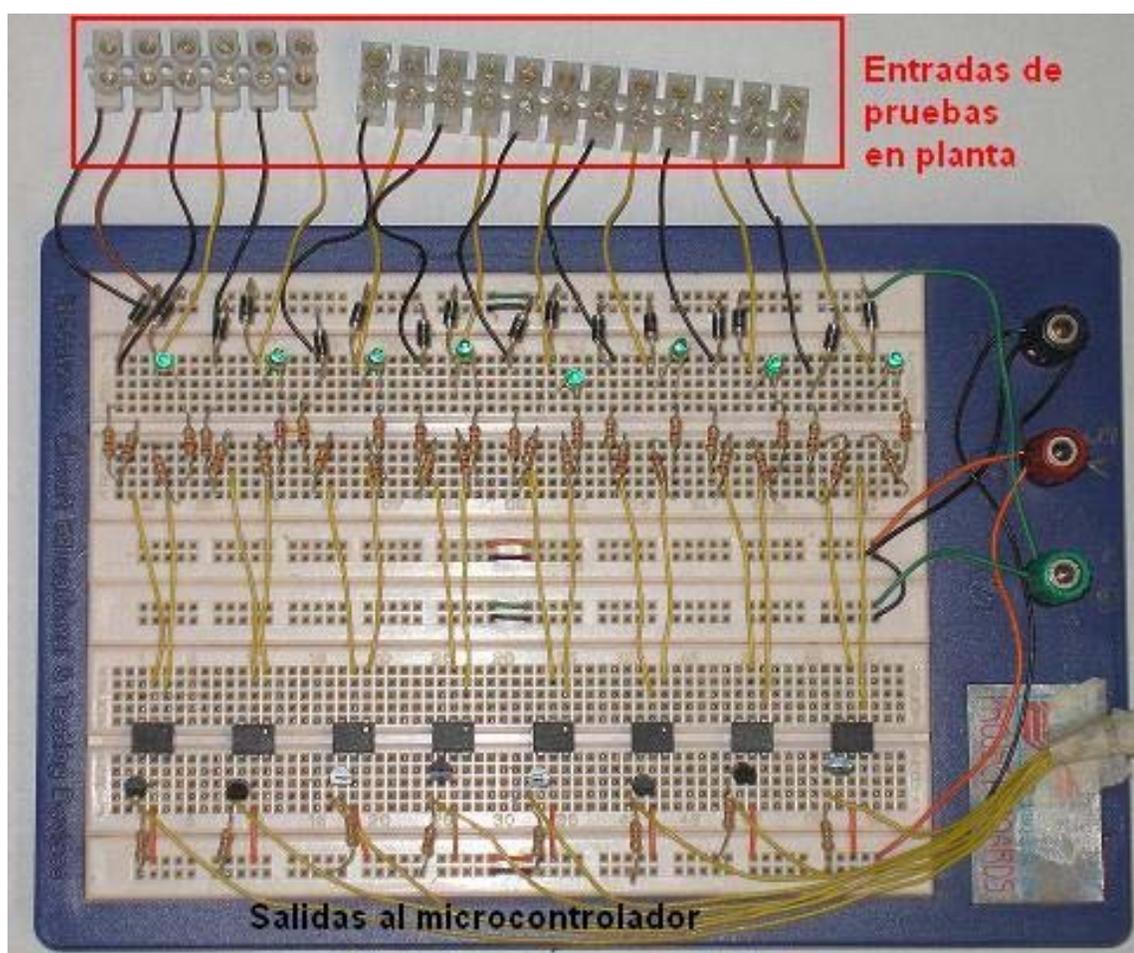


Figura 6.6. Circuito implementado para la prueba de la captura de alarmas en la planta Detroit Diesel de San Antonio de Belén.

Por otro lado, el diseño en impreso del sistema fue realizado tomando en cuenta la disponibilidad y costo de los componentes a utilizar, con el fin de que permitiera la masificación del mismo en caso de que se aplique el sistema para la implementación de otros equipos, por lo que se tenía como objetivo elaborar una lista de los componentes necesarios para el diseño, la cual se adjuntó en el Apéndice A.7, y que cuenta con información de precios y cantidad necesaria.

El diseño del impreso cuenta de tres circuitos impresos, los cuales se ubican uno encima del otro, formando un circuito de tres etapas, los cuales están interconectados haciendo uso de conectores con fajas, para pasar señales de un circuito al otro. La base principal cuenta con conexión para 8 entradas y las alimentaciones comunes; la base del medio cuenta con conexión para las 8 entradas restantes y de igual manera las entradas de alimentación común. El circuito de la parte superior es el circuito que contiene la etapa de control, alimentación y comunicación serial, y además se dejó previsto las entradas a los puertos analógicos del microcontrolador por medio de conectores, para la implementación de captura de señales analógicas. Este circuito superior, recibe todas las señales de alarma de 5 voltios de los circuitos de captura de alarmas de las etapas inferiores. Además cuenta con una terminal DB9 hembra y tres conectores para la comunicación serial ya sea con la PC o con el convertidor de protocolos, que es necesario para la conexión del sistema a la red. En la siguiente figura, se muestran algunas fotos del circuito impreso diseñado como prototipo del sistema.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. El amplio rango de alimentación (10-60 VDC) permite que el sistema sea adaptable a las condiciones variables de tensión presentes en las centrales de telecomunicaciones.
2. El rango de tensiones de entrada para la captura de alarmas permite la implementación del sistema para la captura de alarmas de diferentes equipos electromecánicos.
3. El sistema tiene implementada la función de lectura de salidas (coils) del protocolo Modbus, lo que permite su adaptabilidad al sistema de Gestión SCADA, que utiliza esta función para la lectura de alarmas binarias.
4. El sistema tiene la capacidad de ser escaneado cada 1 ms, lo que le permite cumplir con el tiempo de escaneo del sistema SCADA que se realiza cada 2 segundos.
5. La posibilidad de variar los números de registro Modbus asignados a cada señal de entrada del sistema, amplía la aplicación del mismo, ya que a cada equipo electromecánico se le asignó una serie de registros para las alarmas que son identificados en el SCADA.
6. La posibilidad de variar el número de identificación de esclavo del sistema, permite que se pueda implementar una red Modbus para la integración de varios equipos al sistema SCADA, conectados a un mismo convertidor de protocolos Modbus Ethernet.

7.2 Recomendaciones

1. El sistema diseñado está previsto para implementar la lectura de señales analógicas de 0 a 5VDC, por lo que se puede crear una rutina de programación para el microcontrolador que genere una alarma interna cuando se sobrepase un valor, el cual puede ser determinado por el usuario. Con esto se podría utilizar la interfaz para hacer mediciones de temperatura o presión utilizando interfaces de salida de 0 a 5VDC.
2. Con respecto al protocolo Modbus implementado en el sistema, se puede mejorar implementando el protocolo Modbus por TCP/IP lo que permitiría que el sistema diseñado sea conectado directamente a la red para su integración al SCADA, en lugar de utilizar un convertidor de protocolos Modbus Ethernet.

Bibliografía

1. Autómatas Industriales [en línea]: página dedicada a los autómatas (PLCs). <<http://ww.automatas.org/redes/scadas.htm>> [Consulta: Junio 2006]
2. Autómatas Industriales [en línea]: página dedicada a los autómatas (PLCs). <<http://www.automatas.org/modbus/index.html>> [Consulta: Junio 2006]
3. Balcells, Josep; Romeral, José Luis. **Autómatas Programables**. México: Alfaomega Grupo Editor, 1999.
4. Escuela de Ingeniería en Electrónica, ITCR. [en línea]: página de la escuela. <<http://www.ie.itcr.ac.cr/faustino/Redes/Clase1/1.1ModeloOSI.pdf>>.[Consulta: Junio 2006]
5. Geocities [en línea]: página de trabajos y monografías. <http://www.geocities.com/txmetsb/el_modelo_de_referencia_osi.htm>.[Consulta: Junio 2006]
6. MODBUS-IDA [en línea]: the architecture for distributed automation. <http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1a.pdf>.[Consulta: Junio 2006]
7. MOSBUS-IDA [en línea]: the architecture for distributed automation. <http://www.modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf> [Consulta: Junio 2006].
8. PCHardware.com [en línea]: revista de informática en Internet. <http://pchardware.org/redes/redes_osi.php>.[Consulta: Junio 2006]
9. Prado Zúñiga, Daniel. **Red para la gestión de los equipos electromecánicos del Sistema Nacional de Telecomunicaciones**. Tesis. Universidad Latina de Costa Rica, 2003.
10. Rodríguez Lizano, Roberto. **Diseño del sistema de monitoreo de alarmas de los Grupos Motogeneradores en el proceso Electromecánico**. Tesis. Universidad Internacional de las Ameritas, 2006.

Apéndices

Apéndice A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

UEN: Unidad Estratégica de Negocios.

HMI (Human Machine Interface): interface de maquina humana

OSI (Open System Interconnection): Interconexión de sistemas abiertos.

RTU (Remote Transmission Unit): unidad remota de transmisión.

VDC (voltage - direct current): tensión en corriente directa

SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition): Supervisión y Control de Adquisición de Datos.

GRM : Gestión de Red y Mantenimiento.

mAdc: miliamperios en corriente directa.

Apéndice A.2 Manuales de usuario

Manual de usuario del programa de software “Configuración de la Interfaz”

El programa para la configuración del sistema tiene como funciones la asignación de la dirección de esclavo y el registro de inicio de la interfaz, para establecer la comunicación Modbus entre el SCADA y el equipo conectado a la interfaz.

La interfaz cuenta con valores por defecto de ambos datos, los cuales se presentan en un recuadro de la ventana principal del programa, donde la dirección de esclavo es 1 y el registro de inicio es 1601. Estos datos por defecto se programaron de esta manera, porque el diseño está enfocado para la implementación de las plantas de emergencia al sistema de Gestión SCADA, y se determinó que los registros para las señales de alarma de las plantas iniciarían con 16xx.

Configuración de la Interfaz

Ingrese el número de esclavo:

Esclavo: Rango permitido: 0 a 255

Ingrese el rango de registros de salidas del esclavo:

Dirección de inicio:

Dirección final:

Configurar con los valores por defecto

Configuración por defecto de la Interfaz:

- # Esclavo: 1
- Registros de salida: 01601 a 01616 (16 en total)

Figura A.2.1. Ventana del programa de configuración de la interfaz.

El programa de configuración del sistema cuenta con la ventana mostrada de la figura anterior. El cuadro donde se solicita ingresar el número de esclavo, solo

permite ingresar números y en un rango de 1 hasta 253. El cuadro donde se ingresa la dirección de inicio sólo permite un número de 4 dígitos, desde la dirección 0 hasta la dirección 9984, debido a que el cuadro de dirección final depende de la dirección inicial. Por eso es que el límite para el registro de inicio es 9984, ya que como la interfaz cuenta con 16 entradas, la dirección final sería en este caso 9999.

Cómo configurar la interfaz con los datos por defecto?

Para configurar la interfaz con los datos por defecto se debe seleccionar con un check el cuadro que indica **Configurar con los valores por defecto** y aparecen en los espacios indicados los datos por defecto, como se muestra a continuación.

Configuración de la Interfaz

Ingrese el número de esclavo:

Esclavo: Rango permitido: 0 a 255

Ingrese el rango de registros de salidas del esclavo:

Dirección de inicio:

Dirección final:

Configurar con los valores por defecto

Configuración por defecto de la Interfaz:

- # Esclavo: 1
- Registros de salida: 01601 a 01616 (16 en total)

Figura A.2.2. Selección de datos por defecto

Una vez seleccionada la configuración con los datos por defecto, se presiona el botón denominado **Configurar**. Para comprobar la configuración del sistema, se debe encender la luz roja de la interfaz.

Cómo configurar la dirección de esclavo sin cambiar los registros?

Para cambiar únicamente la dirección de esclavo de la interfaz, se debe dejar en blanco la casilla de la dirección de inicio y por consiguiente la de la dirección final y seleccionar el botón **Configurar**, luego aparecerá una ventana de confirmación y seleccionar el botón **Sí**. En la siguiente figura que se muestra la ventana de confirmación.

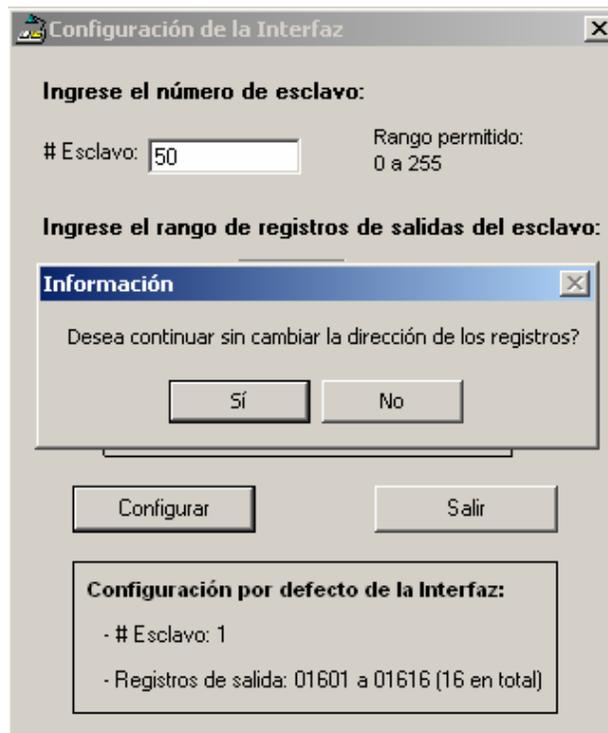


Figura A.2.3. Configuración de la dirección de esclavo.

En caso de que no se desee configurar únicamente la dirección de esclavo se selecciona **No**.

Cómo configurar la dirección de esclavo y la dirección de inicio?

Para configurar ambos datos, solo se debe ingresar los datos deseados en los espacios determinados y seleccionar el botón **Configurar**.

Manual de usuario de la interfaz diseñada.

Características de la interfaz:

1. Cuenta con 16 entradas para conexión de señales de alarma.
2. Permite conectar señales de alarma activas en alto o en bajo.
3. Cuenta con el protocolo de comunicación Modbus RTU, soporta la función de lectura de salidas (coils).
4. Comunicación serial RS-232.
5. Alimentación: 10 – 60 VDC.
6. Rango de voltaje de las señales de entrada: 12 – 60 VDC.

En la siguiente figura se muestra una imagen de la interfaz Modbus diseñada y montada, además de un diagrama con los puertos de conexión de la interfaz Modbus.



Figura A.2.4. Imagen de la Interfaz Modbus implementada en circuito impreso.

El diseño implementado en circuito impreso consta de tres placas impresas, que conforman un sistema de tres niveles. En el nivel inferior e intermedio se encuentra la etapa de conexión para 8 señales de alarma cada una, mientras que en la etapa superior se encuentra la etapa de alimentación, comunicación serial y control del sistema.

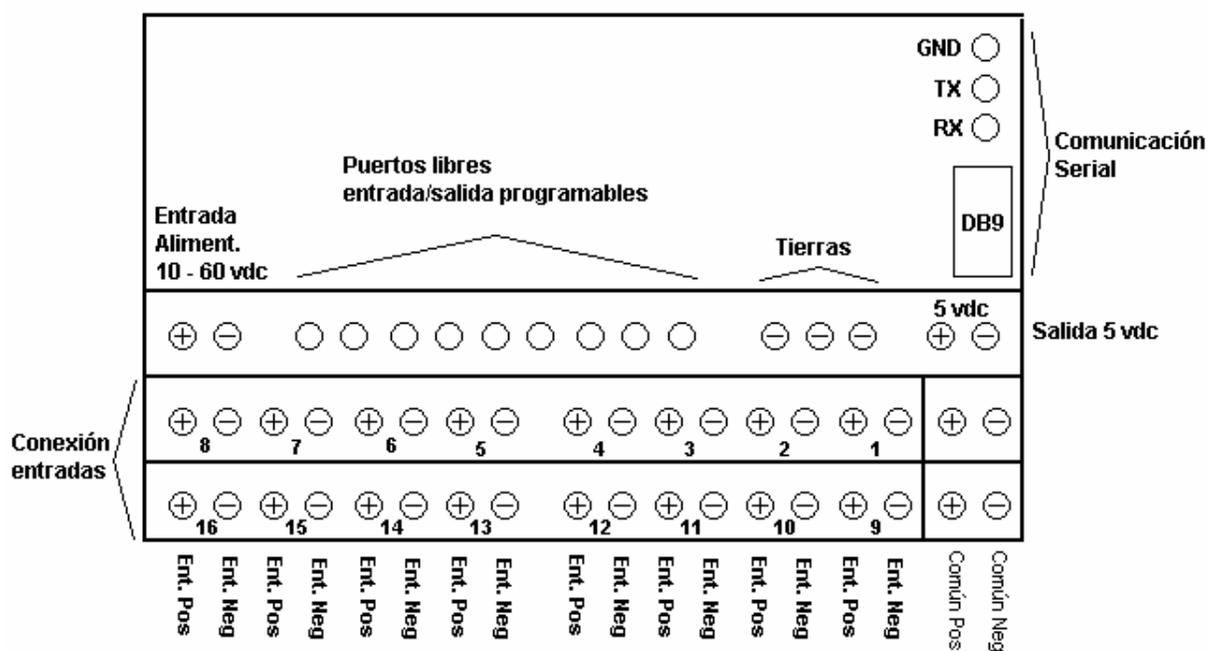


Figura A.2.5. Diagrama de entradas y salidas de la interfaz Modbus.

Los puertos enumerados del número 1 al 16, corresponden a las entradas de las señales de alarma, las cuales cuentan con una entrada positiva y una negativa, en caso de señales de alarma de dos líneas. Además cuenta con dos entradas de alimentación común, en el caso de los equipos que tienen todas sus alarmas referenciadas a una tensión común, que puede ser la señal viva o tierra, en caso de que se activen en alto o en bajo.

Además en la parte superior cuenta con una entrada de alimentación de 10 a 60 VDC y una salida de alimentación de 5 VDC, en caso de expandir el diseño. En esta parte superior del sistema, se implementaron 9 puertos en entrada/salida que pueden ser programados para ampliar las funciones de la interfaz.

La interfaz cuenta con dos posibilidades de conexión, una terminal DB9 hembra y un conector triple con las tres señales de comunicación serial, transmisión, recepción y tierra. Esta comunicación corresponde al estándar RS-232.

Cómo programar la Interfaz Modbus con el software de configuración?

1. Se debe alimentar el sistema con una señal de corriente directa entre los 10 VDC hasta los 60 VDC.
2. Verificar que al conectar la alimentación, se mantenga encendida una luz verde, que indica que el sistema está en funcionamiento.
3. Conectar por medio de un cable serial, la terminal DB9 del sistema al puerto serial de la PC, que cuenta con el programa de configuración.
4. Cuando la interfaz es configurada con los nuevos datos, se debe encender una luz roja por 1 segundo, que indica que se configuró satisfactoriamente la interfaz.

Cómo conectar señales de alarma al sistema?

Existen tres maneras de conectar señales de alarma al sistema, y no se pueden mezclar las maneras de conexión de las señales de alarma:

1. En el caso de que las señales de alarma cuenten con dos líneas de activación, positivo y negativo, se conectan estas señales en las entradas respectivas.
2. En caso de que las señales de alarma sean activas en bajo, se debe hacer uso de las entradas de alimentación común, en este caso ÚNICAMENTE la entrada común positiva. Y la línea activa de las señales de alarma se deben conectar en las entradas negativas. **RECORDAR NO CONECTAR AMBAS ALIMENTACIONES COMUNES.**
3. Cuando las señales de alarma son activas en alto, se debe hacer uso de la entrada de alimentación común negativa, y la línea activa de las señales de alarma se deben conectar en las entradas positivas. **RECORDAR NO CONECTAR AMBAS ALIMENTACIONES COMUNES.**

Apéndice A.3 Información sobre la empresa

A.3.1 Descripción de la empresa

El Grupo ICE representa una corporación que está compuesto por las siguientes empresas: Instituto Costarricense de Electricidad, ICE-Telecomunicaciones, ICE-Electricidad, Radiográfica Costarricense S.A. (RACSA) y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL).

El Grupo ICE debe promover el desarrollo económico-social del país, mediante el suministro adecuado de energía eléctrica y servicios de infocomunicaciones, manteniéndose a la vanguardia tecnológica, actuando siempre con apego a las normas éticas y en la búsqueda de la excelencia, tanto en la utilización de los recursos como en el servicio al cliente.

A.3.2 Descripción del departamento en que se realizó el proyecto

El proyecto se realizó en el proceso Electromecánico de la UEN de Gestión de Red y Mantenimiento, que pertenece al sector de telecomunicaciones del ICE. El proceso Electromecánico se ubica en San Francisco de Dos Ríos, San José. Tiene como principales funciones administrar la calidad y distribución de la energía, garantizar condiciones de temperatura adecuadas para el funcionamiento de los equipos de infocomunicaciones, velar por el mantenimiento preventivo en la especialidad, garantizar una pronta respuesta en la atención de averías tanto en horario normal como fuera de horas hábiles, evaluar las condiciones de los equipos electromecánicos y realizar mejoras y sustituciones que se requieren en estos sistemas, y velar por la supervisión y monitoreo de los elementos de la red de telecomunicaciones relacionados con su especialidad.

A.3.3 Antecedentes prácticos

Para solucionar el problema el proceso Electromecánico de la UEN GRM puso a concurso por medio de la Licitación 70-01-T, la adquisición de un sistema de información que fuese capaz de integrar aplicaciones y componentes para la recolección, visualización, almacenamiento, administración de datos e información de los diferentes equipos de suministro de energía y climatización del Sistema Nacional de Telecomunicaciones, con el fin de controlar el proceso y monitorear los equipos. Este proyecto tenía como fin adquirir las licencias del software y desarrollar la ingeniería del proyecto para un plan piloto en el área metropolitana.

Se han integrado alrededor de 13 centrales telefónicas en forma parcial al sistema SCADA como plan piloto. Actualmente se está realizando un prototipo de adquisición de datos y monitoreo a base de controladores lógicos programables (PLC's), los cuales tienen como función capturar datos binarios y analógicos de alarma que se generan en las centrales y/o que generan algunos equipos.

El sistema SCADA opera sobre una red de configuración Ethernet, pero se comunica por medio del protocolo MODBUS, ya que a pesar de que el protocolo Ethernet está presente, éste solo se utiliza como medio de enlace para realizar la comunicación entre el SCADA y los equipos de las centrales o estaciones. El protocolo de comunicación MODBUS se utiliza porque es un protocolo abierto y flexible que permite implementar una red libre y disponible para el fácil intercambio de datos.

En el caso del grupo electrógeno (plantas de emergencia) no se ha logrado integrar ningún equipo al SCADA, debido a que no cuentan con un protocolo de comunicación MODBUS, que permita la comunicación de los equipos con el SCADA. Con el fin de realizar los direccionamientos adecuados, el protocolo TCP/IP ha sido montado sobre la red, la cual es de tipo RS-485.

Recientemente se realizó una investigación de tesis para buscar la manera de integrar los equipos del grupo electrógeno al sistema SCADA, esta investigación se centro en la integración de una de las plantas *Spectrum Detroit Diesel*, ubicada en la central de Santa Ana. Dicha investigación generó dos propuestas basadas en el uso de dispositivos de mediación para la adquisición de los datos de la planta. El problema que se presenta con la integración de esta planta es que la misma cuenta con una terminal de comunicación serial con estándar RS-485 para comunicación MODBUS, pero no se ha logrado tener acceso a los registros de la planta donde se encuentran los datos de alarma. En el Anexo B.3., se muestra un diagrama de la propuesta de integración de la planta Spectrum Detroit Diesel, propuesta por el Ing. Roberto Rodríguez Lizano.¹³

Otra posibilidad de integrar los equipos al SCADA, es capturar los datos directamente de las señales de alarma que generan los equipos. Por esta razón el ICE a través de la Licitación 20040075¹⁴, puso a concurso la adquisición de módulos PLCs o RTUs y dispositivos de medición de variables eléctricas para la integración de equipos al sistema SCADA. En esta licitación se requería que los módulos contaran con la capacidad de adquirir datos discretos y analógicos. En las centrales, además de monitorear alarmas discretas es necesario monitorear datos como la temperatura o nivel de combustible de las plantas, los cuales corresponden a datos de tipo analógico.

¹³ Tomado de la tesis “Diseño del Sistema de monitoreo de alarmas de los Grupos Motogeneradores en el proceso Electromecánico” del Ing. Roberto Rodríguez Lizano.

¹⁴ Licitación por Registro No. LPR 20040075. Documento entregado por el Ing. Daniel Prado

Apéndice A.4 Cálculo de las resistencias del circuito de alimentación del sistema.

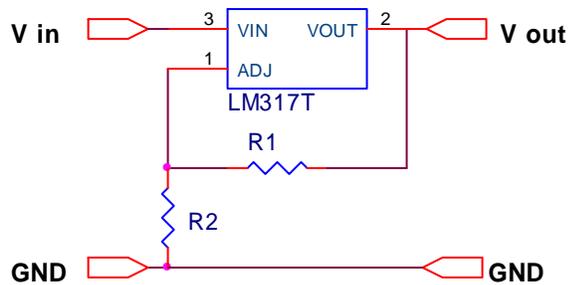


Figura A.4.1. Circuito de regulación con el regulador LM317T.

$$V_{out} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) \quad \text{Ecuación A.4.1}$$

Para el diseño de la etapa de alimentación se calculó la salida a 20 VDC, y a partir de este valor se calcularon las resistencias del circuito.

$$\begin{aligned} V_{out} &= 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) \\ 20vdc &= 1,25 + 1,25 \cdot \frac{R2}{R1} \\ \frac{R2}{R1} &= \frac{20 - 1,25}{1,25} = 15 \\ R2 &= 15 \cdot R1 \end{aligned}$$

Con la ecuación anterior se decidió utilizar una resistencia de 1000 ohmios como valor de R1, y por consiguiente una resistencia de 15000 ohmios como valor de R2.

Apéndice A.5 Ejemplo de la rutina de captura de datos, implementada en el microcontrolador PIC18F458.

Para este ejemplo, se supone que se quieren ver cuatro registros a partir de la dirección 5, sin importar el número de registros que se utilizan, los datos que recibe esta rutina creada, son la dirección de inicio que va desde la 1 hasta la 16, y el número de registros que se quieren ver.

Por ejemplo, si se tienen los siguientes datos binarios en las entradas del microcontrolador, 10101010 01010010, siendo el bit más significativo la entrada 16 y el menos significativo la entrada 1, tenemos que:

$$\text{entradas} = 1010\ 1010\ 0101\ 0010\ _B = AA52\ _H$$

$$\# \text{ registros} = 5$$

$$\# \text{ registros} - 1 = 4$$

Una vez que se tienen todas las entradas de alarma almacenadas en la variable **entradas**, se desplaza a la derecha esta variable, el número de veces que indica la diferencia del número de registros menos 1, que en este caso corresponde a 4, por lo que se tiene como resultado:

$$\text{entradas} = 0000\ 1010\ 1010\ 0101\ _B = 0AA5\ _H$$

k representa el número de registros dentro de un ciclo desde cero hasta llegar al valor del número de registros que se desean ver:

al realizar el ciclo, se obtiene el valor final de la variable *cont*.

$$k = 0, \text{ cont} = 0, \text{ cont} = 0 + 2^0 = 1$$

$$k = 1, \text{ cont} = 1, \text{ cont} = 1 + 2^1 = 3$$

$$k = 2, \text{ cont} = 3, \text{ cont} = 3 + 2^2 = 7$$

$$k = 3, \text{ cont} = 7, \text{ cont} = 7 + 2^3 = 15$$

Ahora tenemos que, $k = \#regis$, por lo que termina el ciclo, y como *cont* es una variable de 16 bits, tipo **integer**, tenemos que:

$$cont = 15_D = 000F_H = 0000\ 0000\ 0000\ 1111_B$$

Se realiza la función lógica **AND** entre la variable *entradas* desplazada y la variable *cont*, con el fin de obtener solo el número de registros solicitados, que en este caso son 4 desde el registro 5 hasta el 8, y que se deben colocar en los bits menos significativos del byte de datos del mensaje de respuesta:

$$dato = entradas \mathbf{AND} cont$$

$$dato = 0AA5_H \mathbf{AND} 000F_H$$

$$dato = 0005_H$$

Con lo anterior tenemos en los bits menos significativos los registros de entrada 8, 7, 6 y 5 solicitados, que corresponden a los bits 3, 2, 1, 0 de la variable *dato*.

Apéndice A.6 Cálculo de los datos de corriente y voltaje teóricos para el circuito de captura de señales de alarma.

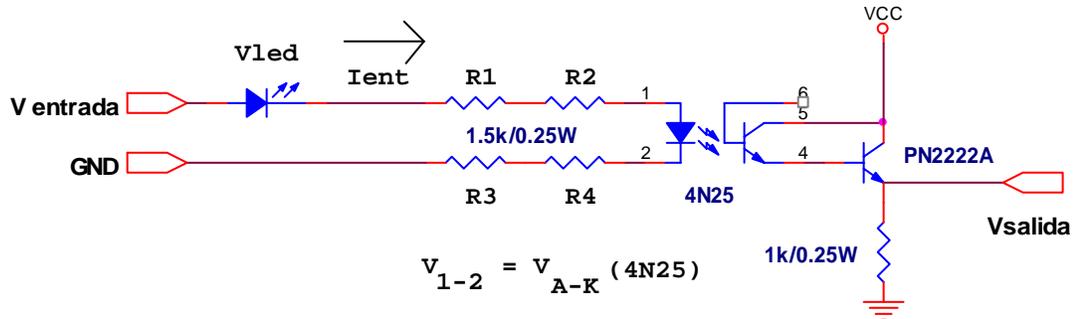


Figura A.6.1. Circuito de la captura de señales de alarma

En el circuito anterior se utilizaron 4 resistencias de igual valor equivalente al valor de resistencias calculado para la tensión y corriente de entrada máxima. La tensión de entrada máxima es de 60 VDC y se calcularon los datos para una corriente de entrada de 10 mA, que es un valor mínimo calculado a partir del valor de corriente máxima de entrada del optoacoplador, que es 60 mA.

$$R = \frac{V_{ENTRADA} - V_{LED} - V_{A-K}}{I_{MAXIMA}}$$

$$R = \frac{60 - 1.5 - 1.5}{10mA}$$

$$R = \frac{57V}{10mA}$$

$$R = 5700\Omega \approx 6000\Omega$$

La resistencia calculada fue de 6000 ohmios, por lo que se utilizaron 4 resistencias de 1500 ohmios cada una. Con este valor de resistencia se calculó la corriente de entrada y las tensiones en las resistencias para diferentes valores de tensión de entrada. Para el cálculo de la corriente de entrada de la Tabla 6.2, se utilizó la siguiente ecuación.

$$I_{ENTRADA} = \frac{V_{ENTRADA} - V_{LED} - V_{A-K}}{6000} \quad \text{Ecuación A.6.1.}$$

y para el cálculo de la tensión en las resistencias de la Tabla 6.2, se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_{RESISTENCIA} = \frac{V_{ENTRADA} - V_{LED} - V_{A-K}}{4} \quad \text{Ecuación A.6.2.}$$

Apéndice A.7 Lista de componentes necesarios para la construcción del sistema diseñado.

Tabla A.7.1. Lista de componentes utilizados en el diseño.

| Componente | Cantidad |
|-----------------------------------|-----------------|
| PIC18F458 40 MHz | 1 |
| Optoacoplador 4N25 | 16 |
| LED 3 mm | 20 |
| Transistor PN2222A | 16 |
| Regulador LM317T | 1 |
| Regulador LM7805CV | 1 |
| Diodos 1N4006 – 1 Amperio | 16 |
| Resistencias 1500 ohmios / 0.25 W | 64 |
| Resistencias 470 ohmios / 0.25 W | 10 |
| Resistencia 15000 ohmios / 0.25 W | 1 |
| Resistencia 1000 ohmios / 0.25 W | 1 |
| Transceiver MAX233A CP | 1 |
| Terminal DB9 hembra para impreso | 1 |
| Conector/tornillo 2entradas | 8 |
| Conector/tornillos 3entradas | 12 |
| Cristal 20 MHz | 1 |
| Conector 40 pines macho | 2 |
| Conector 20 pines hembra | 4 |
| Capacitor 0.1 microF | 3 |
| Impresos (12x7)(12x9)(12x11) cm | 1 c/u |
| Separadores con 2 tornillos | 7 |
| Base para impreso 40 pines | 1 |
| Base para impreso 20 pines | 1 |

Anexos

B.1. Desglose del costo promedio que representa una avería para el ICE y el costo de las pérdidas en que el ICE incurre por falta de facturación.

Tabla B.1.1. Costo por avería en cuatro escenarios de reporte posibles.
*Todos los costos están en colones.

| Reporte | Horas | # técnicos | Viático/ cuadrilla | Total km recorridos ¹⁵ | Costo guardia | Costo horas extras ¹⁶ |
|---------------|-------|----------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| 754 | 8 | 2 | 21.680,00 | 98 | 11.115,15 | 50.708,40 |
| 758 | 6 | 2 | 8.000,00 | 5 | 11.115,15 | 38.031,30 |
| 798 | 6 | 2 | 8.000,00 | 5 | 11.115,15 | 38.031,30 |
| San Francisco | 6 | 2 | 8.000,00 | 17 | 11.115,15 | 38.031,30 |
| | | | Total km | 125 | | |
| | | <i>Totales</i> | <i>45.681,00</i> | <i>20.000,00</i> | <i>44.460,60</i> | <i>164.802,30</i> |

Tabla B.1.2. Costo total por avería en cuatro escenarios de reporte posibles
*Todos los costos están en colones.

| Gasto | Costo total |
|-------------------------------------|-------------------|
| Viático por cuadrilla | 45.681,00 |
| Total km recorridos | 20.000,00 |
| Costo de la guardia | 44.460,60 |
| Costo horas extras | 164.802,30 |
| | |
| <i>Total de gastos en 4 averías</i> | <i>274.942,90</i> |
| + gastos administrativos | 13.747,15 |
| <i>Total</i> | <i>288.690,05</i> |
| | |
| Costo promedio por avería | 96.230,02 |

¹⁵ Costo por kilómetro promedio es de 160,00 colones.

¹⁶ Costo por hora promedio normal por técnico es de 2.112,85 colones.

Tabla B.2.3. Pérdidas percibidas por el ICE por falta de facturación¹⁷.
 *Todos los costos están en colones.

| Reporte | Monto total | Pérdida por minuto por central |
|----------------|--------------------|---------------------------------------|
| 754 | 428.040,00 | 7.134,00 |
| 758 | 7.125.390,00 | 118.756,50 |
| 798 | 7.483.320,00 | 124.722,00 |
| San Francisco | 22.770.990,00 | 379.516,50 |

¹⁷ Esta tabla es un muestreo en horas pico de las pérdidas por minuto fuera de servicio en cuatro escenarios posibles.

B.2. Foto del controlador de la planta Detroit Diesel Spectrum.



Controlador Kohler local de una planta
Detroit Diesel Spectrum

Planta Detroit Diesel en la Localidad
de San Marcos de Tarrazú

Figura B.2.1. Planta de Emergencia de la Localidad de San Marcos de Tarrazú.

Los controladores de planta son los dispositivos que manejan las señales de alarma provenientes de las plantas, las cuales provienen de sensores que emiten las señales de alarma. Estas señales de alarma son tomadas de una placa que se encuentra dentro de los controladores, por lo que se pretende ubicar el sistema diseñado dentro de éste.

B.3. Diagrama de integración de las plantas de emergencia marca SPECTRUM

Este diagrama muestra una alternativa de integrar las plantas SPECTRUM Detroit Diesel al Sistema SCADA, donde se observa que para el controlador Digital 550 solo se requiere un convertidor de protocolos ya que este controlador de planta cuenta con el protocolo de comunicación MODBUS por RS485. Pero en el caso de los controladores Digital, estos carecen del protocolo de comunicación MODBUS, por lo que se requería adquirir una tarjeta de comunicación RS232 que extrae información del controlador y la envía por RS232, luego una tarjeta de comunicación que enviara la información por protocolo MODBUS y por último un convertidor de protocolos para su integración por TCP/IP al SCADA.

Fuente: Ing. Roberto Rodríguez Lizano

Integración Planta de Emergencia marca SPECTRUM

