

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA APLICACIÓN EN  
LABVIEW PARA EL MONITOREO DE LOS PARÁMETROS  
ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS Y CONTROL DE LOS EQUIPOS DE  
CORTE DE LA SUBESTACIÓN BOSCONIA DEL ACUEDUCTO  
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA amb S.A.**

**SILVANA MARÍA NAVARRO CARRASCAL  
WILFRED YESID REYES GALVIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2007**

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA APLICACIÓN EN LABVIEW  
PARA EL MONITOREO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS  
Y CONTROL DE LOS EQUIPOS DE CORTE DE LA SUBESTACIÓN BOSCONIA  
DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA amb S.A.**

**SILVANA MARÍA NAVARRO CARRASCAL  
WILFRED YESID REYES GALVIS**

**Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico.**

**Director  
JOSÉ AMAYA PALACIO  
Magíster en Ingeniería (c)**

**Codirector  
JAIRO FABIÁN JAIMES  
Magister en Potencia Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2007**

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA APLICACIÓN EN LABVIEW PARA EL MONITOREO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y VARIABLES DE MEDIDA Y CONTROL DE LOS EQUIPOS DE CORTE DE LA SUBESTACIÓN BOSCONIA DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA amb S.A.\*

### **AUTORES:**

NAVARRO CARRASCAL, SILVANA MARÍA y REYES GALVIS, WILFRED YESID \*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

MODBUS, LabVIEW®, subestación eléctrica, PLC, analizadores de redes, monitoreo, control, lógica cableada, amb.

### **DESCRIPCIÓN:**

Este documento presenta el diseño y montaje de una aplicación en LabVIEW® para monitorear y controlar con un PC la subestación eléctrica de Bosconia del *amb*, paralelamente al sistema implementado actualmente. En esta aplicación, mediante el protocolo de comunicación MODBUS, se controla un PLC configurado como esclavo para recibir y enviar las señales de monitoreo y mando de la subestación, realizando toda la lógica de funcionamiento pertinente. También se implementa una red MODBUS con los analizadores de redes que hay en la subestación, para monitorear las medidas eléctricas y llevarlas a un registro histórico compatible con MS Excel® o *html*.

En el primer capítulo se presenta la lógica cableada que actualmente controla cada uno de los equipos de la subestación eléctrica. En el segundo capítulo se explica la topología usada para la conexión entre el computador, el PLC y los analizadores de redes; también se explican los criterios para la selección de estos equipos. En el tercer capítulo se muestra el desarrollo de la aplicación en LabVIEW, presentando la programación del protocolo MODBUS y la secuencia para el procesamiento de las señales de la subestación y sus respectivas salidas. También se muestra la programación para la generación del reporte hacia un archivo externo. En el cuarto capítulo se documenta la metodología y los resultados de las pruebas realizadas en la subestación eléctrica.

La aplicación desarrollada tiene las características básicas de un sistema SCADA, presentando de manera satisfactoria y ordenada el estado detallado de la subestación y ejecutando control sobre esta de manera segura. También deja la oportunidad para su ampliación e incorporación de otros procesos de la Planta Bosconia.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Ingeniería Electrónica. M.I. (c) José Amaya Palacio.

## ABSTRACT

**TITLE:**

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION AN APPLICATION IN LABVIEW FOR MONITORING THE ELECTRICAL PARAMETERS AND MEASURE VARIABLES AND CONTROL THE CUT EQUIPMENT OF BOSCONIA SUBSTATION THE METROPOLITAN AQUEDUCT OF BUCARAMANGA amb S.A. \*

**AUTHORS:**

NAVARRO CARRASCAL, SILVANA MARÍA and REYES GALVIS, WILFRED YESID \*\*

**KEY WORDS:**

Modbus, LabVIEW, electrical substation, PLC, power meter, monitoring, control, wired logic, amb

**DESCRIPTION:**

This document presents the design and assembly an application in LabVIEW® to monitor and control with a PC the power substation of Bosconia of amb, parallel to the system implemented at the moment. Using the Modbus communication protocol, this application controls a PLC configured as slave to receive and send the monitoring and command signals of substation, performing all the relevant operation logic. Also a MODBUS net is implemented with the network analyzers that there are in the substation, for monitor the electric measures and carry them to a historical registration compatible with MS Excel® or *html*.

The first chapter presents the wired logic that controls each one of substation equipments actually. The second chapter explains the topology used for the connection between the computer, the PLC and network analyzers; also explains the criteria for the selection of these equipments. The third chapter shows the development the application in LabVIEW, presenting the programming of MODBUS protocol and the sequence for processing the substation signals and their respective outputs. It also shows the algorithm for the generation of reports for external file. The fourth chapter documents the methodology and results of tests performed on the power substation.

The developed application has the basic characteristics of a SCADA system, showing satisfactorily and orderly the detailed state the substation and running control over this in a safe way. It also leaves an opportunity for expansion and incorporation of other processes of plant Bosconia.

---

\* Work of Grade.

\*\* Faculty of Physical-Mechanic Engineering. Electronic Engineering. M.I. (c) José Amaya Palacio.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
<b>1. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE LA PLANTA BOSCONIA 115/4.16 kV .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1. GENERALIDADES .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. CONTROL Y FUNCIONAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.1. Generalidades.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.2. Lógica cableada de la subestación eléctrica.....</b>	<b>20</b>
1.2.2.1. SECCIONADOR DE LÍNEA.....	21
1.2.2.2. SECCIONADORES DE POTENCIA .....	23
1.2.2.3. DISYUNTORES DE POTENCIA.....	25
1.2.2.3.1. CIERRE DE LOS DISYUNTORES: .....	26
1.2.2.3.2. DISPARO DE LOS DISYUNTORES.....	29
1.2.2.4. TABLEROS DE VISUALIZACIÓN DE ALARMAS Y MONITOREO DE LA RED .....	32
<b>2. TOPOLOGÍA IMPLEMENTADA .....</b>	<b>35</b>
<b>2.1. POSIBLES EQUIPOS DE INTERFAZ PC – SUBESTACIÓN ELÉCTRICA .....</b>	<b>36</b>
2.1.1. Monitoreo y mando sobre la lógica cableada.....	37
2.1.2. Monitoreo de la red eléctrica .....	37
<b>2.2. SELECCIÓN DE EQUIPOS DEFINITIVOS .....</b>	<b>37</b>
2.2.1. Criterios de selección de equipos.....	38
2.2.2. Argumentación y selección definitiva .....	38
<b>2.3. CONEXIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE.....</b>	<b>41</b>
2.3.1. Conexión del PLC <i>Vision 280</i> .....	42
2.3.1.1. Programación del PLC.....	44
2.3.2. Conexión de los analizadores de redes ( <i>PM800</i> ).....	45
<b>3. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN EN LABVIEW .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1. LECTURA DE ENTRADAS DEL PLC.....</b>	<b>50</b>

<b>3.2. PROCESAMIENTO DE ENTRADAS LEÍDAS Y DETERMINACIÓN DE SALIDAS .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.1. Seccionador de línea.....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.2. Seccionadores de potencia.....</b>	<b>56</b>
<b>3.2.3. Disyuntor de potencia .....</b>	<b>57</b>
3.2.3.1. CIERRE DEL DISYUNTOR DE POTENCIA .....	57
3.2.3.2. APERTURA DEL DISYUNTOR DE POTENCIA .....	58
<b>3.2.4. Discrepancia de polos.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3. ESCRITURA DE LAS SALIDAS EN EL PLC.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4. LECTURA DE LOS REGISTROS DE LOS ANALIZADORES DE REDES .....</b>	<b>65</b>
<b>3.5. REGISTRO HISTÓRICO DE DATOS.....</b>	<b>73</b>
3.5.1. Creación del registro histórico .....	75
3.5.2. Insertar datos al registro histórico .....	80
<b>3.6. APLICACIÓN PRINCIPAL .....</b>	<b>83</b>
<b>3.7. PANEL FRONTAL .....</b>	<b>96</b>
<b>4. PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>102</b>
4.1. PRUEBAS PARCIALES SIN MANDO DE LA SUBESTACIÓN .....	102
4.2. PRUEBAS DEFINITIVAS EN VIVO .....	104
<b>OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>108</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>110</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXO A: TABLA DE VARIABLES DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA, AGRUPADA POR EQUIPOS DE PATIO .....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO B: TABLA DE REGISTROS DEL PM800 .....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO C: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS Y SISTEMAS AUXILIARES DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE BOSCONIA.....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vista superior de la subestación eléctrica .....	16
Figura 2: Vista de perfil de la subestación eléctrica.....	17
Figura 3: Inversión del sentido de giro del actuador del seccionador de línea.....	21
Figura 4: Plano de la lógica cableada para apertura y cierre del seccionador de línea ....	22
Figura 5: Lógica cableada del seccionador de potencia 1 .....	24
Figura 6: Lógica cableada para el cierre del disyuntor de potencia 1 .....	27
Figura 7: Estado de los contactos auxiliares b5 de los seccionadores de potencia en función de la posición del mismo .....	28
Figura 8: Lógica cableada para el disparo del disyuntor de potencia 1 .....	30
Figura 9: Lógica cableada para la protección de discrepancia de polos.....	32
Figura 10: Analizador de redes PM800 de la subestación eléctrica de Bosconia .....	33
Figura 11: Esquema representativo del monitoreo y control de la subestación eléctrica de Bosconia.....	36
Figura 12: Esquema final del monitoreo y control de la subestación eléctrica Bosconia ..	41
Figura 13: Conexión utilizada para las entradas del PLC.....	43
Figura 14: Esquema para la alimentación de las bobinas de actuación mediante el PLC	44
Figura 15: Programación en Ladder para configurar el PLC Vision280 como escavo MODBUS.....	45
Figura 16: Red MODBUS implementada para la comunicación con los analizadores de redes .....	46
Figura 17: Menú de configuración de la comunicación del PM800.....	47
Figura 18: Diagrama de flujo para un ciclo de ejecución de la aplicación en LabVIEW ....	49
Figura 19: Envío de la trama de petición para la función 02.....	51
Figura 20: Diagrama de bloques para la lectura del puerto serie .....	51
Figura 21: Recepción de la trama de respuesta proveniente del esclavo.....	52
Figura 22: Mensaje emergente ante la terminación del timeout .....	53
Figura 23: Programación de la lógica del seccionador de línea.....	55
Figura 24: Programación de la lógica del seccionador de potencia del circuito 1 .....	56
Figura 25: Programación del cierre del disyuntor de potencia del circuito 1 .....	58
Figura 26: Programación de la apertura del disyuntor de potencia del circuito 1 .....	59
Figura 27: Programación para la protección de discrepancia de polos en operación normal .....	60
Figura 28: Operación para la ocurrencia por primera vez de la discrepancia de polos.....	61

Figura 29: Operación para la persistencia de la discrepancia de polos .....	62
Figura 30: Diagrama de bloques de la trama de petición de la función 15 .....	63
Figura 31: Diagrama de bloques de la lectura de la trama de respuesta de la función 15	64
Figura 32: Tramas de respuesta de la función 15 .....	64
Figura 33: Lectura de una respuesta de error de la función 15 .....	65
Figura 34: Envío de la trama de petición para la función 04 .....	67
Figura 35: Trama de respuesta devuelta por el PM800.....	68
Figura 36: Recepción de la trama respuesta para la función 04.....	69
Figura 37: Programación para cuando expira el timeout o la trama enviada y la réplica no coinciden .....	70
Figura 38: Mensaje mostrado en pantalla ante la expiración del timeout .....	70
Figura 39: Programación para la lectura de todos los registros requeridos del PM800 ....	71
Figura 40: Bloques usados en LabVIEW para la generación de reportes en html .....	74
Figura 41: Diagrama de bloques de la función crear registro hist.vi .....	76
Figura 42: Cuadro de dialogo para el registro histórico de datos.....	76
Figura 43: Parámetros para el caso de usar registro histórico existente .....	77
Figura 44: Código html que se genera para le creación de un registro histórico. ....	79
Figura 45: Visualización en Excel de la tabla creada .....	79
Figura 46: Diagrama de bloques de la función Insertar datos al hist.vi.....	80
Figura 47: Código html de la fila a insertar en el registro histórico .....	81
Figura 48: Mapa del código html del registro histórico a modificar. ....	82
Figura 49: Visualización en Excel de la tabla de historial, posterior a su modificación ....	83
Figura 50: Esquema de la programación usada para la aplicación principal .....	84
Figura 51: Etapa de inicialización de procesos dentro de la aplicación principal .....	85
Figura 52: Lectura de las entradas del PLC usando el bloque MODBUS 02.vi .....	87
Figura 53: Envío del estado de las entradas del PLC a indicadores para el panel frontal	87
Figura 54: Conexión de los bloques de lo lógica de funcionamiento de la subestación....	89
Figura 55: Uso del subvi MODBUS 15.vi y construcción del arreglo para el registro de desplazamiento.....	90
Figura 56: Esquema de la programación en LabVIEW para lectura de los PM800 y registro histórico .....	91
Figura 57: Programación del condicionante para la lectura de los analizadores de redes	92
Figura 58: Programación para la comunicación con los analizadores de redes usando el subvi MODBUS 04.vi .....	93

Figura 59: Programación para la inserción de los medidas de la red eléctrica dentro del registro histórico .....	94
Figura 60: Operación realizada en caso de que el timeout haya expirado .....	95
Figura 61: Programación para la detención manual de la aplicación principal.....	96
Figura 62: Panel frontal de la aplicación desarrollada .....	97
Figura 63: Aspecto del panel frontal con la visualización del disyuntor 2 .....	99
Figura 64: Control de la visibilidad de los contenedores de las variables de los equipos de la subestación.....	101
Figura 65: Estado del disyuntor de potencia 1 mostrado en el panel frontal durante pruebas.....	106
Figura 66: Medidas del analizador de redes del circuito 1 durante pruebas .....	107
Figura 67: Medidas del analizador de redes del circuito 2 durante pruebas .....	107
Figura 68: Pararrayos de línea.....	125
Figura 69: Transformador de potencia subestación Bosconia.....	126
Figura 70: Conexión Dy5 de los transformadores de potencia .....	129
Figura 71: Transformador de corriente.....	130
Figura 72: Transformador de Potencial .....	132
Figura 73: Diagrama de conexión del transformador de potencial para la fase A.....	132
Figura 74: Seccionador de línea .....	134
Figura 75: Seccionador de potencia.....	136
Figura 76: Disyuntor de potencia .....	137
Figura 77: Autotransformador .....	138

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características del analizador de redes .....	34
Tabla 2: Características del PLC Vision280 de Unitronics.....	40
Tabla 3: Código de colores usado para el diseño de la interfaz gráfica.....	100
Tabla 4: Características técnicas de los pararrayos de línea 115kV .....	125
Tabla 5: Características de los transformadores de corriente .....	131
Tabla 6: Características de los transformadores de corriente .....	133
Tabla 7: Características técnicas del seccionador de línea .....	135
Tabla 8: Características técnicas de los disyuntores de potencia.....	137
Tabla 9: Características técnicas del autotransformador.....	139

## INTRODUCCIÓN

En las empresas actualmente se presentan diversos problemas, entre los que se involucran directamente las fallas humanas que puedan cometer los operarios, debido no precisamente a sus capacidades o conocimientos, sino a la magnitud y complejidad del proceso que se está controlando o monitoreando.

Es por ello que éstas han optado por analizar y minimizar sus fallas, buscando métodos que permitan simplificar y mejorar sus sistemas, aprovechando la tendencia de la nueva tecnología para desarrollar un software que garantice la optimización del proceso de control y/o monitoreo, reduciéndolo de forma significativa y permitiendo que el operario labore en un ambiente más cómodo, donde pueda tomar decisiones, basándose en datos precisos y exactos, logrando una mayor eficiencia y mayor producción en su área de trabajo.

La principal labor del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga **amb** es proveer el servicio de agua potable en la ciudad y su área metropolitana. Para el cumplimiento de esta tarea el **amb** cuenta con distintas zonas de aprovisionamiento y tratamiento de aguas, entre las que se encuentra la planta Bosconia; donde además se debe realizar el bombeo del alto volumen de agua requerido, con la suficiente potencia para superar la distancia y altura presentes.

El suministro de energía se realiza mediante conexión directa con la línea de 115kV de la Electrificadora de Santander ESSA, cumpliendo con unos estándares de calidad, entre los que están: nivel de tensión adecuado (115kV más o menos 10%), confiabilidad y continuidad en el servicio. Sin embargo, para alimentar los motores del bombeo de agua, este nivel de tensión se debe reducir hasta 4.16 kV por medio de la subestación eléctrica presente en la planta Bosconia. Para garantizar su correcta operación, esta subestación se controla y supervisa con un sistema de lógica cableada compuesto de un conjunto de protecciones tanto eléctricas como mecánicas.

Este trabajo de grado desarrolla en LabVIEW un programa que permite desde un computador monitorear las variables y protecciones más relevantes de la subestación, para ejecutar control sobre esta de manera segura. Lo anterior implementando el montaje y configuración del hardware requerido.

En el capítulo 1 se presenta un análisis del sistema de control y supervisión que se encuentra actualmente en la subestación, con el fin de conocer toda la lógica y seguridad tenida en cuenta para su operación. En el capítulo 2 se presenta la topología planteada para la adquisición de las variables de monitoreo y la ejecución del mando sobre la subestación. Posteriormente se plantean todos los requerimientos técnicos del hardware que podría usarse para este fin y finalmente se presenta la selección de los equipos definitivos, con su respectiva argumentación.

En el capítulo 3 se explica el diseño y programación en LabVIEW de la aplicación desarrollada y en el capítulo 4 se documentan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Al final se presentan las observaciones, recomendaciones, conclusiones y alcances obtenidos con el desarrollo de este proyecto.

# **1. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE LA PLANTA BOSCONIA**

## **115/4.16 kV**

En este capítulo se mencionan las características generales de la subestación eléctrica de Bosconia y posteriormente se presenta detalladamente el sistema de lógica cableada que se encarga de su control y monitoreo, explicando sus normas de seguridad y operación. En el ANEXO C de este documento se puede encontrar la descripción y características técnicas de cada uno de los equipos de patio que componen la subestación eléctrica.

### **1.1. GENERALIDADES**

La subestación de Bosconia tiene como finalidad realizar el proceso de distribución, corte y transformación de energía eléctrica proveniente de la línea de transmisión de 115 kV de la Electrificadora de Santander S.A. (ESSA), a un nivel de tensión de 4.16 kV.

Alimenta todo el sistema eléctrico de la planta de Bosconia, especialmente las unidades de bombeo de agua, junto con todos los circuitos auxiliares y de mando. Tiene una capacidad de corto circuito de 4300 MVA y corriente de corto circuito de 27.11 kA (en el lado de 115kV).

En la Figura 1 y Figura 2<sup>1</sup> se muestra los esquemáticos de de las vistas superior y de perfil de la subestación, respectivamente.

---

<sup>1</sup> Tomados de: amb S.A. ESP. Manual operativo del bombeo de Bosconia Volumen I. Bucaramanga, 2007.

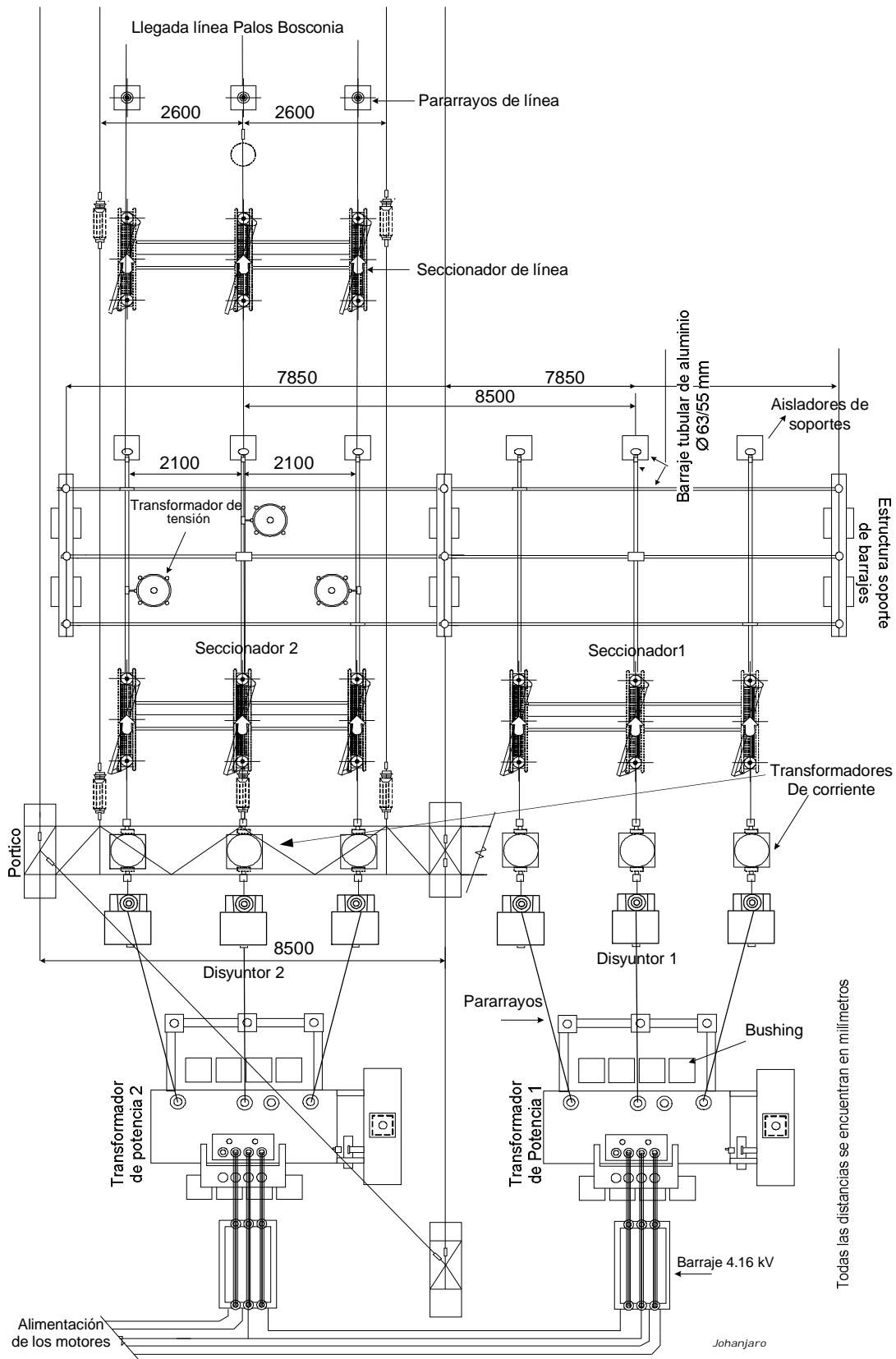


Figura 1: Vista superior de la subestación eléctrica



Algunos aspectos generales acerca de la subestación son:

- La subestación se alimenta a través de la línea de 115 kV (Palos – Bosconia) proveniente de la subestación Palos (ESSA S.A.). Tiene la posibilidad en caso de contingencia de ser alimentada desde la Subestación Florida.
- Cuenta con dos (2) transformadores de potencia conectados en Dy5 (ONAN/ONAF) y potencia de 12/16 MVA. Sin embargo la demanda del sistema sólo requiere de un (1) transformador para su normal funcionamiento.
- Cuenta con transformadores de medida, uno de ellos de tensión (PT) con relación de 115kV/115V y dos (2) de corriente (CT) cada uno con relación de transformación 300A/5A. Estos transformadores se encuentran en el lado de alta de la subestación.
- El sistema de 4.16 kV, cuenta con barra independiente para cada transformador y posibilidad de acople entre las dos semibarras a través del interruptor de media tensión de 1250 A.
- La protección contra descargas atmosféricas se realiza a través de pararrayos de 115 kV ubicados en la llegada de la línea de alimentación, pararrayos a 4.16kV ubicados sobre cada transformador de potencia y un cable de guarda sobre el pórtico de la subestación.

El monitoreo de la subestación Bosconia se realiza desde un tablero de control donde se visualizan mediante lámparas, el estado ON-OFF de los equipos de patio y de sus respectivas alarmas (estas también mediante señal audible); así como los niveles de tensión, corriente, potencias y armónicos, los cuales son recopilados por dos (2) analizadores de redes (uno por cada transformador) desde los transformadores de medida. En dicho tablero también se realiza el mando de los equipos de patio, aunque este también puede hacerse en el sitio de los equipos. También se encuentran allí todos los circuitos de control que permiten manejar los niveles de seguridad y principios de funcionamiento de la subestación.

## **1.2. CONTROL Y FUNCIONAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN**

En esta sección se explica el funcionamiento de los circuitos que controlan la subestación, especificando cual es la lógica, variables, procedimientos, mecanismos de precaución y seguridad tenidas en cuenta para el mando de cada equipo de patio de la subestación eléctrica de Bosconia. Esto se realiza con el fin de entender dicho funcionamiento, ya que desde este punto se da partida al desarrollo de la aplicación en LabVIEW®, que permitirá realizar el monitoreo y control de la subestación, siguiendo los mismos lineamientos y precauciones asumidos en el diseño del sistema de mando implementado actualmente.

### **1.2.1. Generalidades**

La mayoría de los equipos de patio de la subestación tienen la posibilidad de manejarse desde el mismo sitio del equipo, o de manera remota desde el tablero de controles. Sin embargo, este mando no se realiza solo de manera manual, confiando únicamente en el criterio, conocimiento y habilidad que tenga el operario, ya que esto daría lugar a errores y daños que generarían grandes costos al amb, debido a la complejidad y relevancia del sistema. Es por esto, que en Bosconia se tiene implementado actualmente un sistema de automatización parcial, cuyas funciones son las siguientes:

- Ante el disparo de alarmas y protecciones de los equipos de patio, realizar la desconexión automática de la alimentación de las bombas, mediante los equipos de corte de la subestación eléctrica, (específicamente disyuntores de potencia).
- Evitar la reconexión de la subestación, después de haber ocurrido el disparo de algunas de las alarmas. Esto con el fin de que si el operario desconoce la ocurrencia de la anomalía, se impida energizar la subestación sin antes inspeccionar la causa de la falla y desactivar el bloqueo manualmente.
- Dar aviso sonoro y visual, ante el disparo de alguna alarma o protección.

- Impedir que los dos (2) transformadores de potencia sean usados simultáneamente para alimentar la planta de bombeo.
- Monitorear el estado (abierto-cerrado, local-remoto, mantenimiento-servicio) de los equipos de corte, tales como seccionadores y disyuntores de potencia; mediante el uso de indicadores visuales (lámparas).
- Con el monitoreo de las variables *mantenimiento-servicio* y *local-remoto*, impedir que los equipos de patio sean operados cuando estos se encuentren en mantenimiento, o puedan ser manejados simultáneamente desde su sitio y el tablero de control.
- Restringir la operación de los seccionadores mientras algún disyuntor se encuentre cerrado.
- Monitorear la tensión, corriente, potencias, factor de potencia, energía consumida y terceros armónicos, en el lado de alta de cada transformador de potencia.

Ante la ausencia de tensión por parte del operador de la red (ESSA), la subestación puede ser operada y monitoreada, ya que como se menciona en el apéndice C, la totalidad del tablero de control está alimentado a través de un sistema auxiliar compuesto por baterías de corriente continua.

### **1.2.2. Lógica cableada de la subestación eléctrica<sup>2</sup>**

La automatización descrita en la sección anterior está implementada en lógica cableada o de contactos, mediante circuitos alimentados con un nivel de tensión de 125 Vdc; donde cada una de las alarmas y protecciones se manifiestan a

---

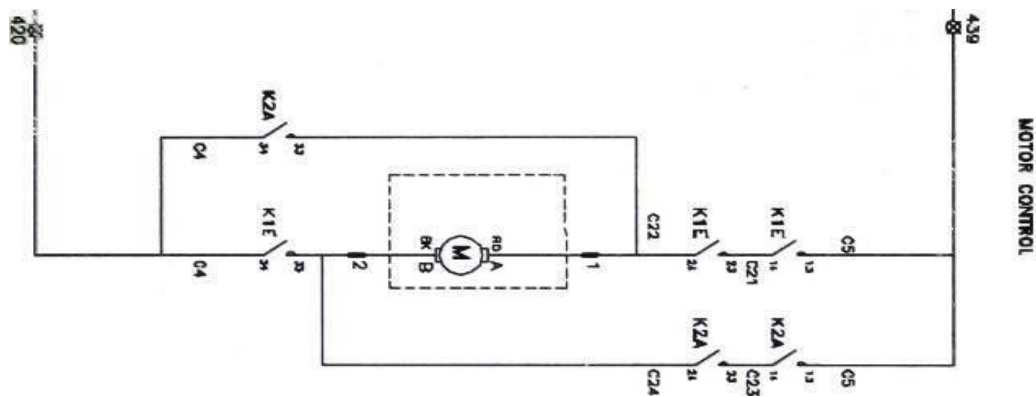
<sup>2</sup> Planos tomados de: ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. Subestación Bosconia 115/4.16 kV. Diagramas de control. Bucaramanga, Diciembre 1982

través del estado ON-OFF de un contacto. Los motores y demás mecanismos de actuación para la apertura o cierre de los equipos de corte, son activados por medio del contacto de un relé cuya bobina es alimentada por la lógica de los contactos mencionados.

A continuación se explican la lógica y condicionamientos necesarios para el mando de cada equipo de corte de la subestación eléctrica.

### 1.2.2.1. SECCIONADOR DE LÍNEA

El seccionador de línea cuenta con un motor DC a 125 V, al cual se le invierte la polaridad dependiendo si se va a abrir o cerrar. Esto se hace por medio de dos (2) relés cuyos contactos (*K1E* y *K2A*) alimentan el motor tal como se muestra en la Figura 3. Cuando se energiza la bobina *K1E* el motor queda alimentado en sentido directo para abrir el seccionador, mientras que con la bobina *K2A* está en sentido inverso para cerrarlo.



**Figura 3:** Inversión del sentido de giro del actuador del seccionador de línea

La lógica de contactos que enciende las bobinas de los relés *K1E* y *K2A* se muestra en la Figura 4\*.

\* NOTA: Todos los elementos en los planos que se encuentran dentro de líneas punteadas, están ubicados en la caja de controles de los equipos de patio, mientras que los demás están en el tablero de controles.

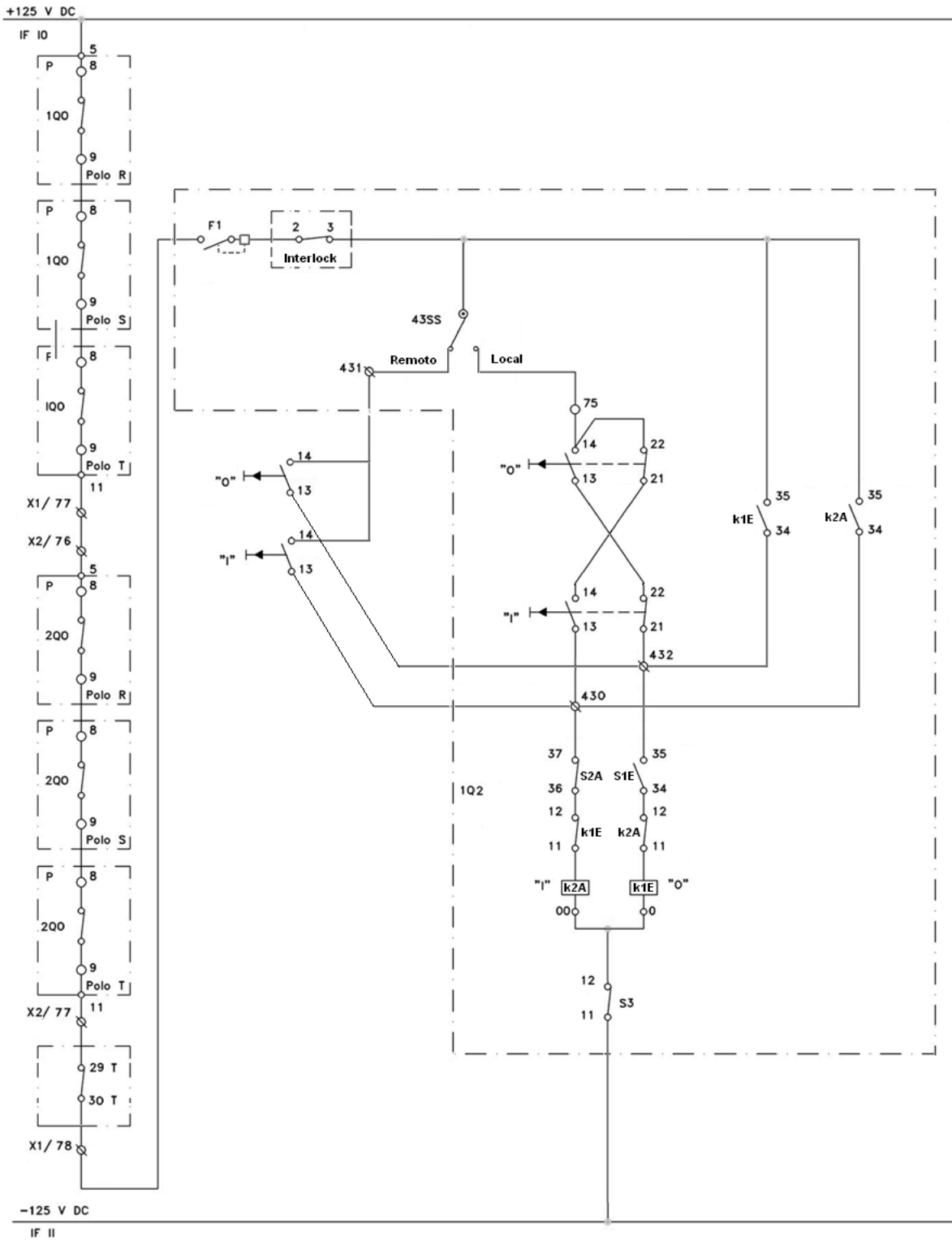


Figura 4: Plano de la lógica cableada para apertura y cierre del seccionador de línea

Del plano de la Figura 4 se puede inferir los siguientes condicionamientos lógicos:

- Los contactos *1Q0* y *2Q0* correspondientes al estado abierto-cerrado de los polos R, S y T de los disyuntores 1 y 2 respectivamente, condicionan a que ambos disyuntores de potencia deben estar abiertos (contactos cerrados) para que las bobinas de los relés *K1E* y *K2A* puedan llegarse a energizarse, y así el seccionador de línea pueda abrirse o cerrarse.
- Se tiene un selector local-remoto para conmutar la operación al sitio del equipo o en el tablero de controles.
- De los relés *K1E* y *K2A* se tienen contactos para realizar el enclavamiento de sus bobinas una vez sea accionado alguno de los pulsadores para abrir o cerrar. Además en serie con la bobina de cada relé se encuentra un contacto del relé opuesto para evitar que se accionen al mismo tiempo la apertura y el cierre.
- Los contactos *S1A* y *S2E* corresponden respectivamente al estado “totalmente abierto” y “totalmente cerrado” del seccionador y desactivan sus respectivas bobinas cuando el seccionador ha llegado a alguna de esas dos posiciones.

#### 1.2.2.2. SECCIONADORES DE POTENCIA

El mecanismo de actuación usado para abrir y cerrar estos dispositivos es el mismo que se usa en el seccionador de línea. Esto es, controlando la polaridad de un motor DC, tal como se muestra en la Figura 3.

Sin embargo, la lógica cableada que maneja las bobinas de los relés de energización del motor presenta diferencias. El plano correspondiente al seccionador de potencia 1 (que alimenta el transformador de potencia 1) se muestra en la Figura 5. Allí se observan las bobinas de los relés de cierre y apertura, *C1* y *C2* respectivamente.

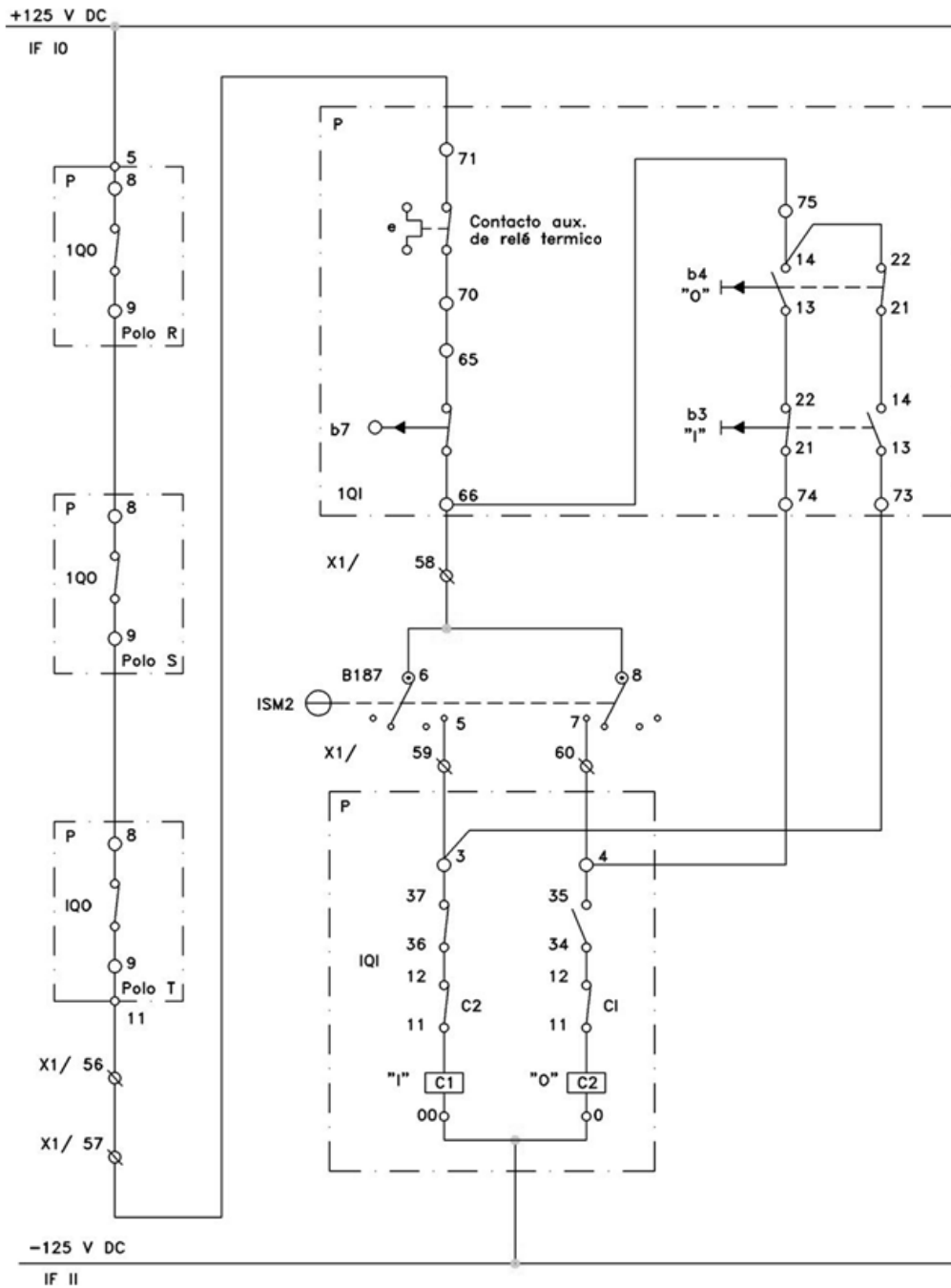


Figura 5: Lógica cableada del seccionador de potencia 1

Del plano de la Figura 5 se obtienen las siguientes premisas lógicas:

- Los contactos 1Q0 correspondientes al estado abierto-cerrado de los polos del disyuntor 1, se encuentran en serie con el resto del circuito, lo cual implica que estos deben estar abiertos (contactos cerrados) para poder accionar este

seccionador de potencia. Obsérvese que en este caso no hay dependencia del disyuntor 2, ya que este pertenece al circuito del otro transformador (ver Figura 1), lo cual no afecta el funcionamiento del circuito 1.

- A diferencia del seccionador de línea, con este seccionador se puede realizar manejo local o remoto sin necesidad de modificar selector alguno. Simplemente las dos ramas de pulsadores para abrir y cerrar (*b3*, *b4* e *1SM2*) se encuentran en paralelo, siendo una operación lógica *OR*.
- Lo anterior no implica que la apertura y cierre se puedan presentar simultáneamente, ya que para el selector *1SM2*, sus posiciones son mutuamente excluyentes, al igual que el accionamiento de los pulsadores *b3* y *b4*. Además, al igual que en el seccionador de línea, en serie con las bobinas de cierre y apertura *C1* y *C2* se encuentra puesto un contacto de la bobina opuesta.
- Para este seccionador no existe enclavamiento cuando se accionan los pulsadores de mando, lo que implica que es necesario que el operario debe mantener la acción sobre el pulsador, tanto en la operación local como en la remota.

La lógica del seccionador de potencia 2 es idéntica a la de la Figura 5, con la diferencia de que en este, la dependencia es del disyuntor 2 en vez del 1, ya que este se encuentra en su mismo circuito (ver Figura 1).

### 1.2.2.3. DISYUNTORES DE POTENCIA

El mecanismo de apertura y cierre de los disyuntores de potencia es más complejo que el usado en los seccionadores, ya que en estos es necesario activar dos grupos de bobinas por separado para realizar su apertura o cierre. Además, se involucran variables adicionales debido a que estos dispositivos operan bajo carga.

#### 1.2.2.3.1. CIERRE DE LOS DISYUNTORES:

En la Figura 6 se muestra la lógica cableada para el cierre del disyuntor de potencia 1. Se puede ver que aparecen tres (3) bobinas para cierre *Y1*, una por cada fase, y en serie con estas se encuentran los contactos *S1* y *S2* que corresponden al estado (abierto o cerrado) de cada polo y al limitador de cierre del disyuntor, respectivamente. En la parte superior se encuentra conectado en serie el contacto *1k16* del relé de bloqueo del circuito 1.

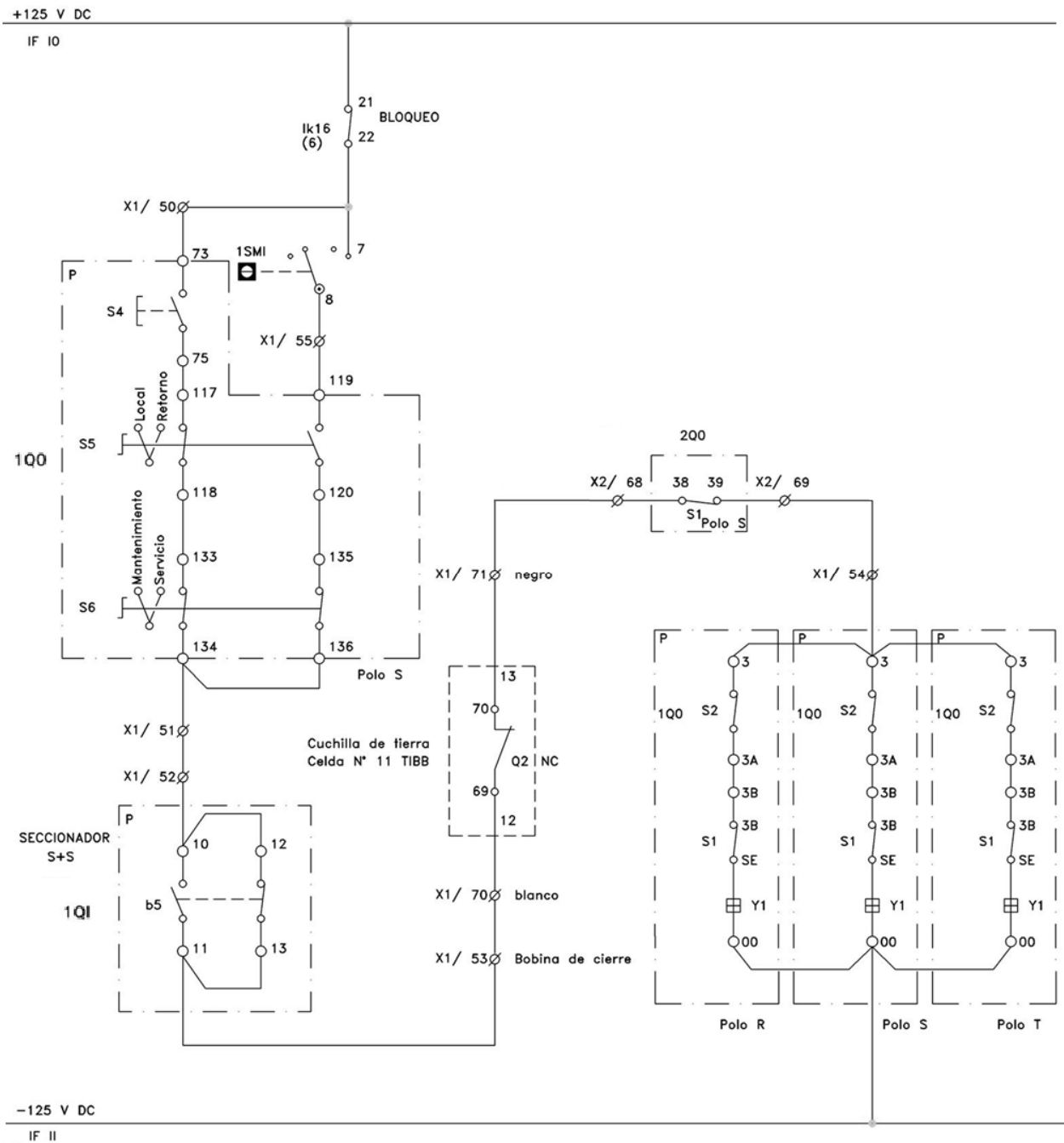


Figura 6: Lógica cableada para el cierre del disyuntor de potencia 1

De la lógica cableada de la Figura 6 se tienen los siguientes condicionamientos lógicos:

- Se tiene la posibilidad del manejo local o remoto mediante la posición del selector S5, siendo el pulsador S4 el encargado de la activación en el sitio y el selector 1SM1 de manera remota.

- El selector *S6* es modificado para colocar el disyuntor en operación o en mantenimiento. Si el disyuntor se encuentra en mantenimiento no puede ser cerrado, ya que el contacto del *S6* lo impediría.
- Si el relé de bloqueo *1k16* se ha activado ante la ocurrencia de una alarma (ver la apertura del disyuntor en la sección siguiente), el disyuntor de potencia no podrá ser cerrado hasta que se realice el desbloqueo manual.
- Para cerrar el disyuntor 1 es necesario que el seccionador de potencia 1 se encuentre completamente abierto o completamente cerrado. Esto se controla con la conexión en paralelo de los contactos auxiliares (b5) de dicho seccionador, ya que el contacto NA (10-11) se cierra cuando el seccionador está cerrado y el contacto NC (12-13) permanece cerrado sólo cuando el seccionador está abierto. El funcionamiento de los contactos auxiliares se muestra en el diagrama de la Figura 7.

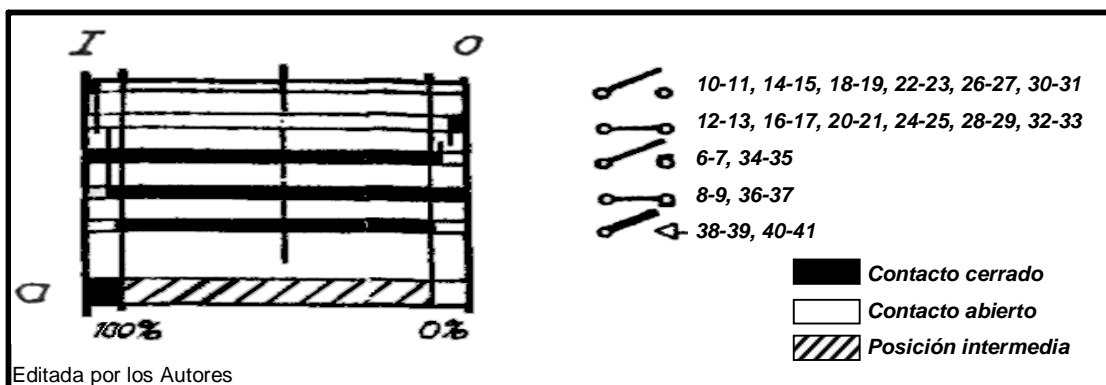


Figura 7: Estado de los contactos auxiliares b5 de los seccionadores de potencia en función de la posición del mismo

- Los disyuntores no pueden cerrarse simultáneamente para evitar que ambos transformadores se pongan en funcionamiento. Esto se hace con el contacto en serie *S1* del polo S del disyuntor 2 (2Q0).
- Las bobinas de cierre *Y1* serán alimentadas mientras sus respectivos polos no estén cerrados (contactos *S1* cerrados) y el limitador al cierre del motor lo permita (contactos *S2* cerrados).

- Todas las condiciones anteriores deben ocurrir simultáneamente para que se pueda cerrar el disyuntor (condición *AND*).

La lógica del disyuntor de potencia 2 es idéntica a la del 1 (Figura 6), con la diferencia de que en este aparecen los elementos del disyuntor 2 (2Q0) y el seccionador 2 (2Q1).

#### 1.2.2.3.2. DISPARO DE LOS DISYUNTORES

En la Figura 8 se muestra la lógica cableada para el disparo (apertura) del disyuntor de potencia 1. Las bobinas destinadas para el disparo se denominan Y2. Los contactos *kR*, *kS* y *kT* corresponden a las alarmas de la presión del aceite *SF6* del disyuntor 1. Allí se observa la presencia de las protecciones y alarmas del transformador de potencia 1 y del mismo disyuntor.

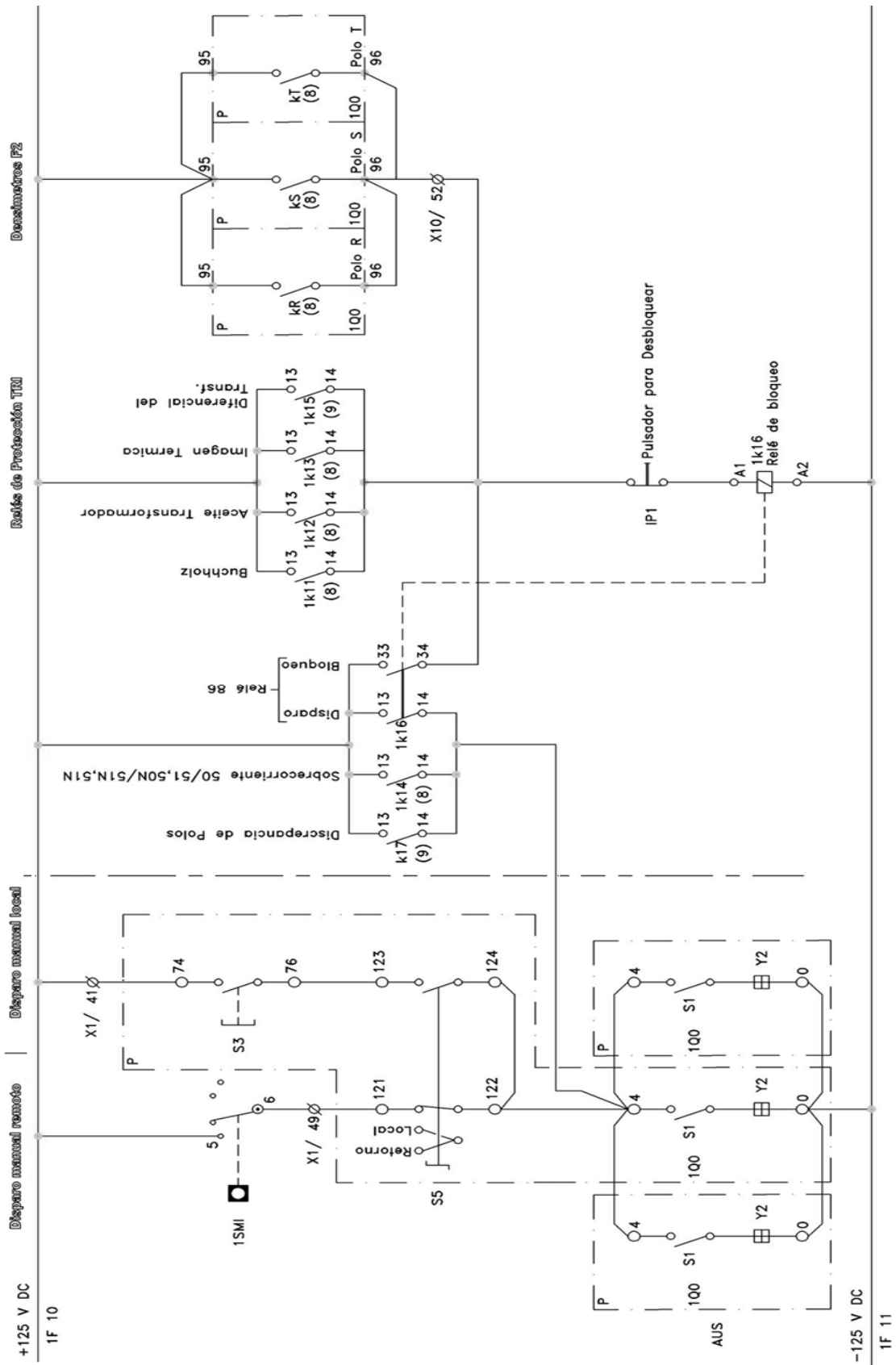
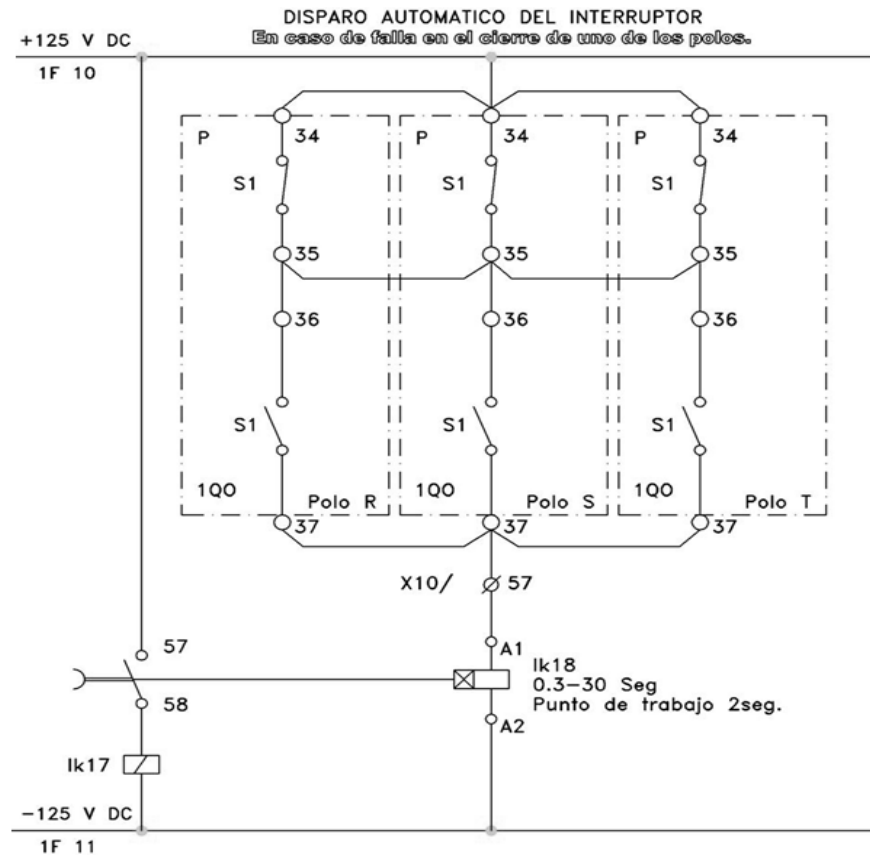


Figura 8: Lógica cableada para el disparo del disyuntor de potencia 1

Los condicionamientos lógicos que se obtienen a partir la Figura 8 son los siguientes:

- Operación local o remota por medio del selector S5 ubicado en el sitio del disyuntor, siendo el selector 1SM1 y el pulsador S3 los encargados de realizar el disparo manual de manera remota y en el sitio, respectivamente.
- La parte baja del plano corresponde a la operación manual, mientras que la parte superior es la relacionada con el disparo automático ante la ocurrencia de alarmas. Al estar en paralelo estas dos, son equivalentes a una operación OR.
- La presencia de cualquier alarma ocasiona el disparo inmediato del disyuntor, siendo la única restricción los contactos S1 que están en serie con las bobinas de disparo.
- La ocurrencia de alguna de las alarmas (Buchholz, aceite del transformador, imagen térmica, diferencial del transformador y presión del SF6) activa la bobina del relé de bloqueo 1k16, enclavándose a sí mismo y además manteniendo la subestación bloqueada hasta que se realice el desbloqueo manual con el pulsador IP1. Nótese que las alarmas de *discrepancia de polos* y de *sobrecorriente* no activan el relé de bloqueo ya que estas no representan un daño permanente en el transformador o en el disyuntor, que requieran atención obligatoria del operario.
- La *discrepancia de polos*, como su nombre lo indica, es una protección que produce una señal de alarma cuando se detecta una diferencia entre el estado de los polos del disyuntor durante más de dos (2) segundos, indicando que alguno de ellos no se cerró totalmente, lo que causa desbalances en la alimentación de la subestación eléctrica. Esta protección está implementada como se muestra en la Figura 9, usando los contactos auxiliares del estado de los polos del disyuntor (S1); el arreglo presentado ocasiona que el relé temporizado al cierre (1k18) inicie conteo cuando el estado de los tres (3)

polos del disyuntor sea distinto entre sí. Si transcurren dos (2) segundos y la discrepancia permanece se cierra el contacto del relé temporizado, energizando así la bobina 1k17 correspondiente a la alarma de discrepancia de polos.



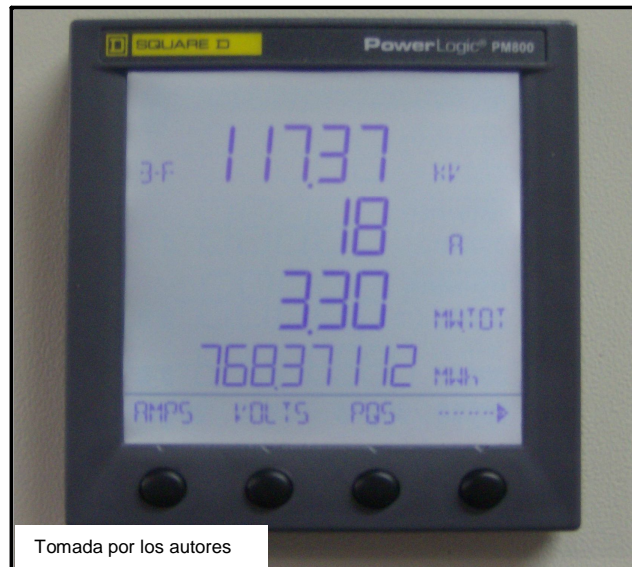
**Figura 9:** Lógica cableada para la protección de discrepancia de polos

El disparo del disyuntor de potencia 2 se realiza con la misma lógica del disyuntor 1 (Figura 8), con la diferencia de que las protecciones y alarmas que se presentan corresponden al transformador de potencia de la misma línea del disyuntor 2 (esto es, el transformador 2) y al mismo disyuntor 2.

#### 1.2.2.4. TABLEROS DE VISUALIZACIÓN DE ALARMAS Y MONITOREO DE LA RED

Además del control por lógica cableada de los elementos de la subestación eléctrica descrito anteriormente, también se tienen otros circuitos encargados de

dar aviso sonoro y visual ante el disparo de alarmas, y de monitorear los niveles de tensión, corriente, potencias aparente, activa y reactiva, energía y tercer armónico; de cada una de las tres (3) fases de los dos (2) circuitos que componen la subestación eléctrica. Para esta última tarea, se tienen dos analizadores de redes (uno para cada circuito) (Figura 10) conectados a los transformadores de corriente (CT) y de tensión (PT) mencionados en el ANEXO C.



**Figura 10:** Analizador de redes PM800 de la subestación eléctrica de Bosconia

Estos analizadores de redes son programables e incluyen módulos adicionales, para enviar pulsos para conteo de energía, reportes de eventos (alarmas), salidas de 4-20 mA asociadas las variables medidas y comunicación con protocolo MODBUS. Sus características principales se muestran en la Tabla 1.

<b>ANALIZADOR DE REDES</b>	
Marca	Merlin Gerin + Power Logic
Modelo	PM800
Alimentación auxiliar	90 a 457 Vac, 11 VA
Entradas de tensión (Fase-fase)	0 a 600Vac
Entrada de intensidades	0 a 10 A
Rango de frecuencia	45 a 67 Hz y 350 a 450 Hz
Periodo de actualización	1 s
Comunicación	RS-485 2 hilos, hasta 38.400 baudios, MODBUS

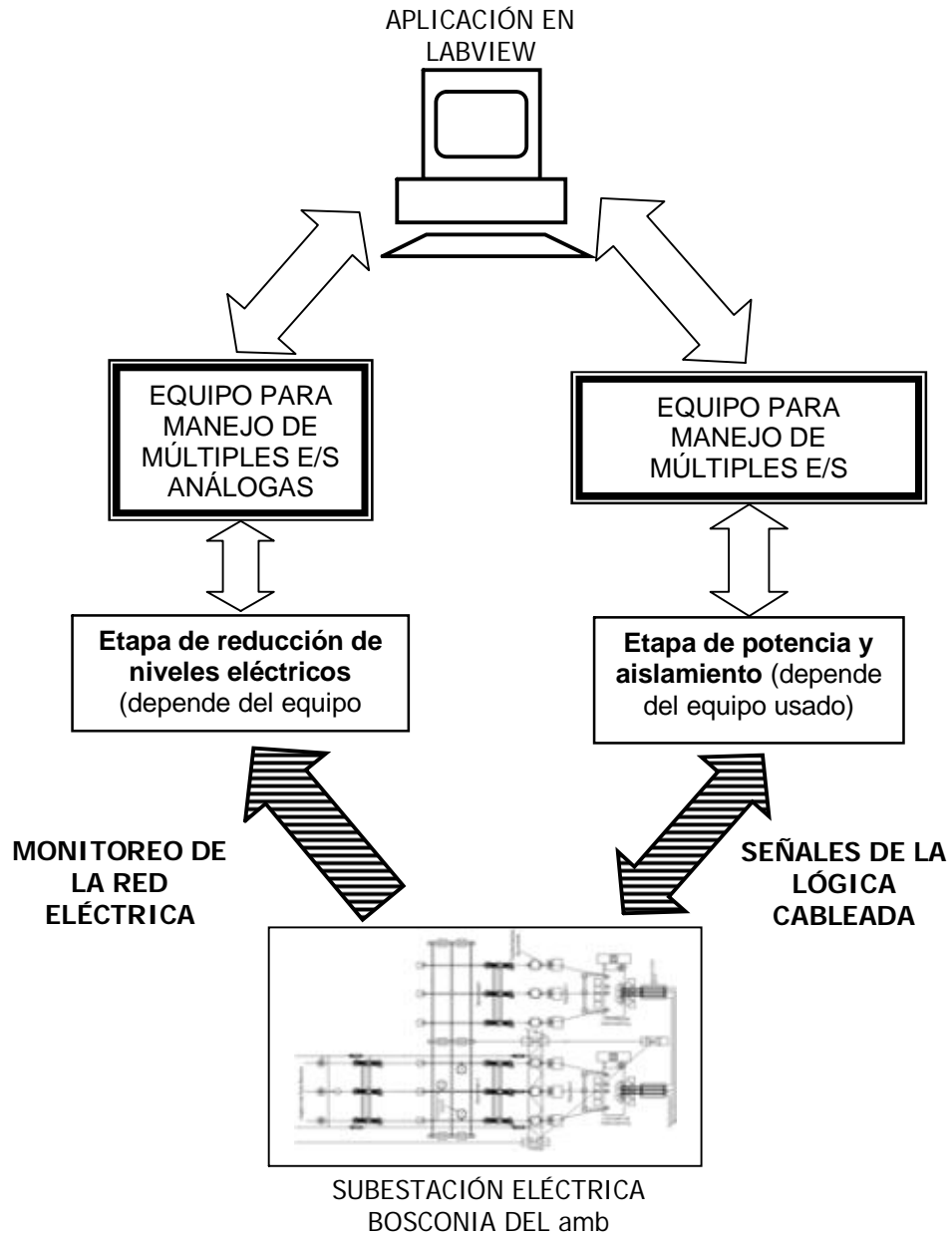
**Tabla 1:** Características del analizador de redes

## 2. TOPOLOGÍA IMPLEMENTADA

En este capítulo se presenta la topología y los dispositivos involucrados, para llevar las señales de lógica cableada y variables de medida hacia el computador, así como las acciones de mando para la subestación eléctrica.

En la Figura 11 está el diagrama correspondiente a la implementación utilizada para el monitoreo y control de la subestación. Allí se observa que existen dos tipos de señales a monitorear, las señales provenientes de la lógica cableada y las medidas para el monitoreo de la red procedentes de los CT y PT. Por tanto, se tienen dos (2) tipos de dispositivos para realizar la interfaz entre el PC y la subestación. Se escogió esta topología, en vez de una donde un sólo dispositivo hiciera la interfaz con todas las señales (tanto las digitales como las análogas), debido a las diferencias entre los dos tipos de señales, tanto en niveles de tensión, como en comportamiento esperado, importancia para la operación y limitaciones en cuanto a los equipos disponibles para realizar esta interfaz, las cuales se verán posteriormente.

Debido a la gran cantidad de entradas y la diferencia entre los niveles de tensión que se manejan en la subestación y los presentes en el computador, se hace necesario utilizar elementos de interfaz que mantengan el aislamiento, manejen altos niveles de potencia relativos y que permitan llevar de manera eficiente la cantidad de entradas y a su vez proteger el ordenador, especialmente en las mediciones, ya que estas presentan los más altos niveles de tensión y corriente, con respecto a éste.



**Figura 11:** Esquema representativo del monitoreo y control de la subestación eléctrica de Bosconia

## 2.1. POSIBLES EQUIPOS DE INTERFAZ PC – SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

A continuación se presentan la gama de opciones de dispositivos que se tuvieron en cuenta, para llevar tanto las señales de lógica cableada, como las de monitoreo de la red eléctrica desde y hacia el computador.

### **2.1.1. Monitoreo y mando sobre la lógica cableada**

Para llevar este tipo de señales se plantearon las siguientes opciones:

- Etapa de potencia construida con dispositivos de estado sólido con aislamiento óptico para las entradas (optocopladores, optotransistores), y relés para las salidas de mando.
- Elementos de interfaz de entradas – salidas de la marca National Instruments, compatibles con LabVIEW; con entradas de contacto y salidas a relé (digitales). Específicamente se analizaron los *FieldPoint* y los *Compact FieldPoint*.
- Controlador Lógico Programable (PLC) con entradas de contactos y salidas a relé (I/O digitales).

### **2.1.2. Monitoreo de la red eléctrica**

Para obtener las medidas de tensión, corriente, potencias, factor de potencia, etc., se propusieron los siguientes métodos:

- Dispositivo de la marca National Instruments con entradas análogas, compatible con LabVIEW, conectado a los CT y PT a través de transformadores o circuitos secundarios de reducción.
- Comunicación directa con los analizadores de redes presentes en Bosconia, usando alguno de sus módulos adicionales.

## **2.2. SELECCIÓN DE EQUIPOS DEFINITIVOS**

En esta sección se discuten algunos criterios tenidos en cuenta para la selección de los equipos de interfaz subestación – computador, para posteriormente presentar aquellos que se dejarían definitivos, argumentando la razón de su escogencia.

### **2.2.1. Criterios de selección de equipos**

Para seleccionar la configuración de equipos a usar se tuvo en cuenta varios criterios, algunos con más relevancia que otros.

El dispositivo usado debe soportar niveles de tensión de 125Vdc en la entrada, si los contactos necesarios de cada equipo de patio están usados dentro de la lógica cableada de los circuitos de control; en caso de que esos contactos estén libres, se pueden usar sin ningún tipo de aislamiento. Debe tener capacidad para cuarenta y un (41) entradas digitales y diez (10) salidas digitales a relé, especificadas en el ANEXO A. Las salidas deben soportar la tensión y corriente de alimentación de las bobinas de actuación de los equipos de patio, que operan a 125Vdc y con corriente máxima de 1A.

Para el monitoreo de la red eléctrica se debe tener en cuenta, que si se usa algún dispositivo con entradas análogas, se deben usar dispositivos secundarios para reducir las tensiones y corrientes provenientes de los CT y PT, a niveles comunes para dispositivos con entradas análogas, como por ejemplo 0-10V; además debe tener por lo menos nueve (9) de estas entradas (3 para las tensiones de línea y 3 para las corrientes de fase de cada circuito de la subestación). En el caso de usar alguna conexión con los analizadores redes, se debe tener en cuenta que estos presentan varias opciones de conectividad:

- Salidas análogas de 4-20mA
- Comunicación Modbus
- Monitoreo mediante SMS

### **2.2.2. Argumentación y selección definitiva**

Teniendo en cuenta las anteriores especificaciones, para la interfaz entre el PC y la subestación se optó por seleccionar un PLC (Controlador Lógico Programable)

dotado con alguna conectividad con PC's o un módulo de comunicaciones. Las ventajas de estos equipos es que poseen entradas por contacto y salidas a relé y por tanto, no es necesario agregar etapa de aislamiento y potencia en las salidas; además, su costo es menor que el de los equipos de National Instruments, aunque estos últimos tengan la ventaja de funcionar de manera directa con LabVIEW, sin usar ningún protocolo de comunicación. Para el caso de la etapa de potencia con dispositivos de estado sólido, esta opción se descartó, debido a que es una solución poco práctica para la gran cantidad de entradas que se tiene; además, el uso de estos dispositivos requiere un equipo adicional para conectarlos con el computador.

Específicamente, el PLC utilizado es de marca *Unitronics*, modelo *Vision280*. La razón principal para su escogencia es que el *amb* cuenta con este PLC's y por tanto no es necesaria su compra. En la Tabla 2 se presentan las características del *Vision280*.

Este PLC cuenta con el módulo principal *V200-18-E2B* para el manejo de diversos tipos de entradas y salidas. Sin embargo, tiene la posibilidad de adicionarle otros módulos de expansión (hasta ocho) para incrementar su capacidad de I/O's, permitiendo conectar la gran cantidad de entradas digitales necesarias en la aplicación. El módulo de comunicaciones maneja el protocolo MODBUS RS232, el cual le permite a un dispositivo maestro, acceder y modificar sus entradas y salidas; para este caso, como el maestro es el PC se debe realizar en LabVIEW toda la programación del protocolo MODBUS, la cual se explica en el capítulo 3.

<b>PLC<sup>3</sup></b>	
Marca	Unitronics
Modelo	Vision 280 (pantalla táctil incorporada)
Fuente de alimentación	12 Vdc o 24 Vdc
<b>Módulo de I/O's</b>	<b>V200-18-E2B</b>
Entradas digitales (aisladas)	16 pnp/npn (24 Vdc)
Entradas análogas	2 entradas de 10 bits, 0-10V, 4-20mA
Salidas digitales (aisladas)	4 pnp/npn (24 Vdc)
	10 salidas a relé
<b>Expansión de I/O's</b>	Vía adaptador, hasta 8 módulos de expansión comprendiendo hasta 128 I/O's adicionales. Número de I/O's varía de acuerdo al módulo.
<b>Comunicación</b>	<b>2 puertos RS232 (COM1: 57600 bps, COM2: 115200 bps) 1 puerto Ethernet (opcional)</b>
Protocolos soportados	Ethernet, GPRS, GSM/SMS, MODBUS, CANbus, OPC/DDE server, DataXport (a Excel)

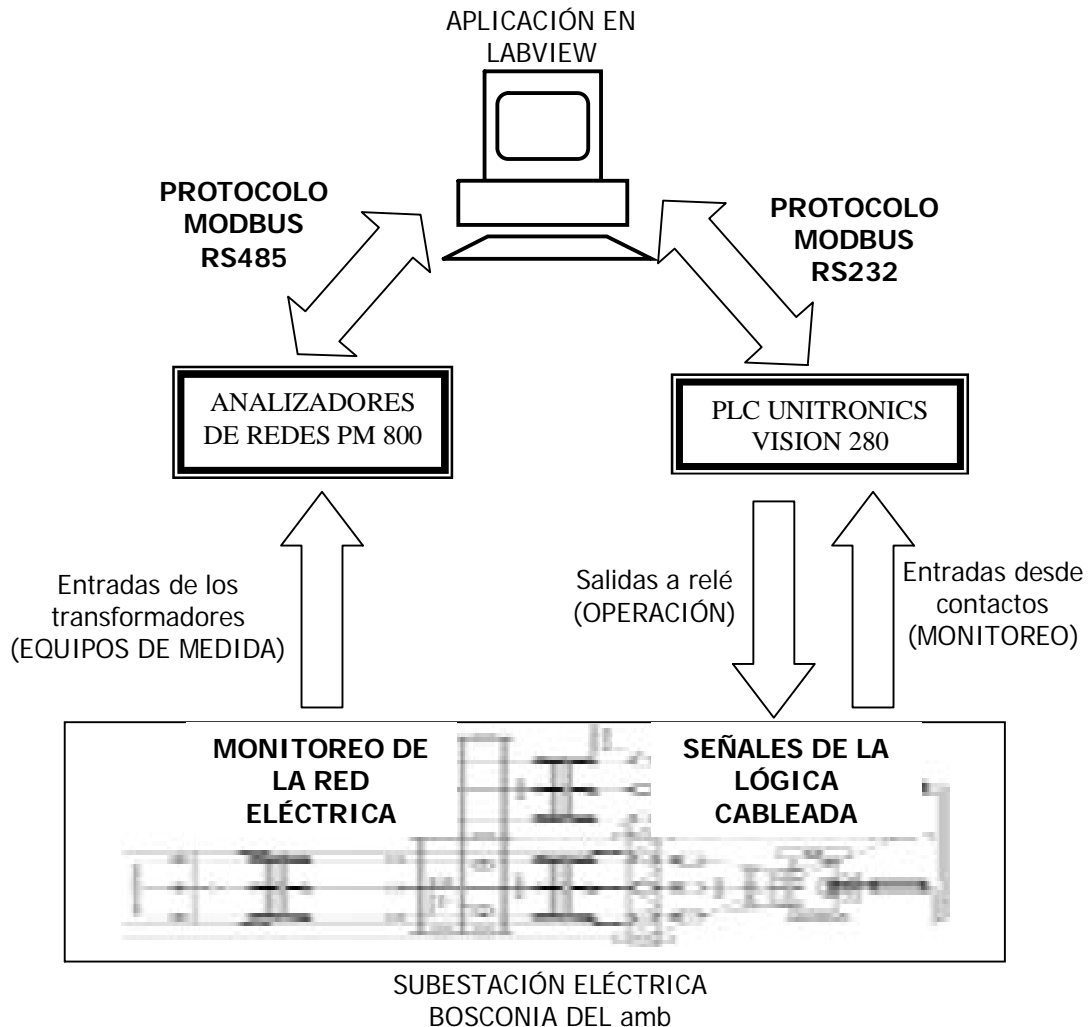
**Tabla 2:** Características del PLC Vision280 de Unitronics

Para el monitoreo de la red eléctrica, se seleccionó la comunicación directa con los analizadores de redes, ya que no es necesario usar algún equipo adicional para la adquisición de los datos analógicos provenientes de los CT y PT. Para llevar los datos hacia el computador, se optó por usar su modulo adicional de comunicación MODBUS RS485; de esta manera, se pueden usar los mismos conceptos y técnicas que se aplican en la comunicación con el PLC. El equipo de National Instruments fue descartado para evitar el manejo de entradas analógicas y el uso de transformadores intermedios.

---

<sup>3</sup> Tomada de la hoja de datos del PLC *Vision280*. Construida solo con las características más relevantes para este proyecto

Una vez seleccionados los equipos, el esquema definitivo del monitoreo y control de la subestación eléctrica de Bosconia es el siguiente:



**Figura 12:** Esquema final del monitoreo y control de la subestación eléctrica Bosconia

### 2.3. CONEXIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE

A continuación se explica la conexión física del PLC con las entradas y salidas provenientes de la lógica cableada de la subestación eléctrica, así como la programación realizada en él para usarlo como esclavo del computador. Posteriormente, se presenta de igual forma la topología de la red para la comunicación con los analizadores de redes.

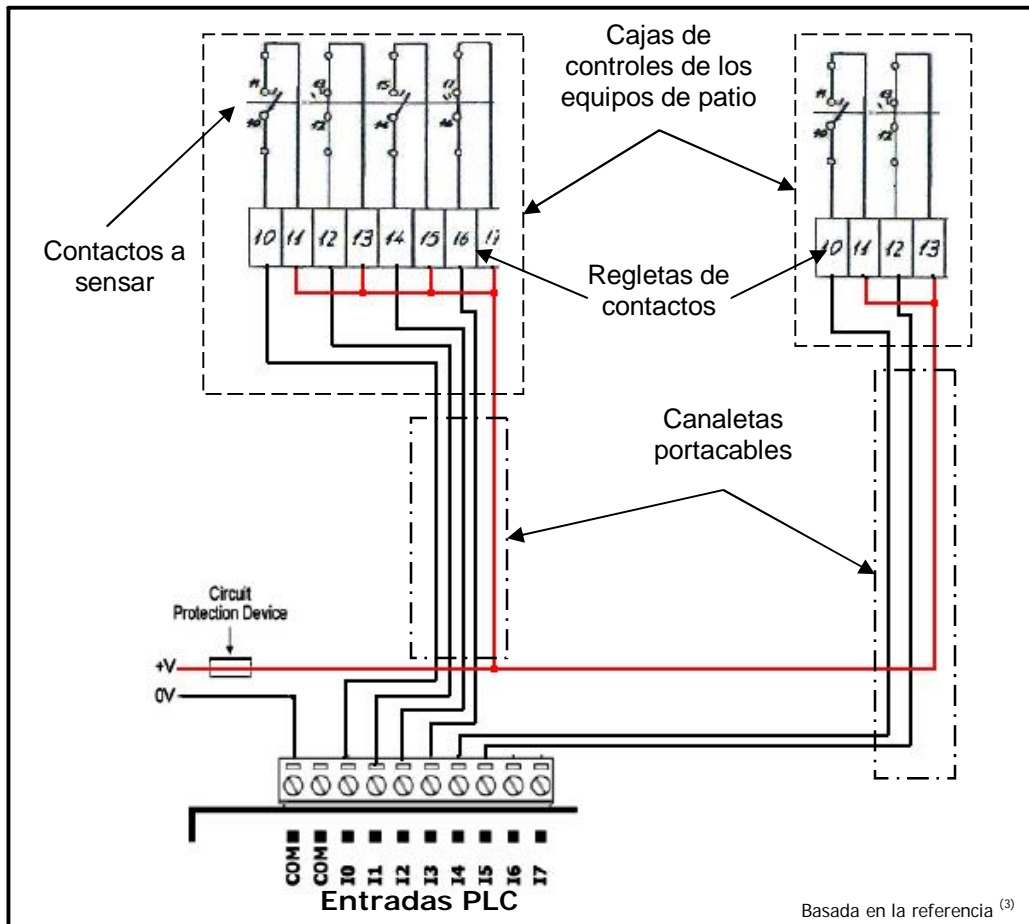
### **2.3.1. Conexión del PLC *Vision 280***

Como ya se ha mencionado, todas las entradas de lógica cableada requeridas para el monitoreo y mando de la subestación eléctrica de Bosconia se manifiestan a través de contactos ON-OFF. Cada equipo mencionado en el ANEXO C tiene varios contactos correspondientes a la misma variable, y al no estar todos utilizados dentro de la lógica cableada, se da la oportunidad de usar los que se encuentren libres para el uso de esta aplicación. Esto presenta la ventaja que al no estar energizados al nivel de 125Vdc, estos contactos se pueden alimentar al nivel de tensión de 24Vdc propio del PLC, ahorrando a su vez el uso de elementos intermedios entre la subestación y el PLC para reducir tensiones.

Para los contactos de las entradas, la conexión se realizó de acuerdo a los requerimientos del PLC para el manejo de entradas digitales<sup>4</sup>. En la Figura 13 se muestra la configuración utilizada.

---

<sup>4</sup> UNITRONICS INDUSTRIAL AUTOMATION. *V200-18-E2B Snap-in I/O Module*. 2004, p. 3.

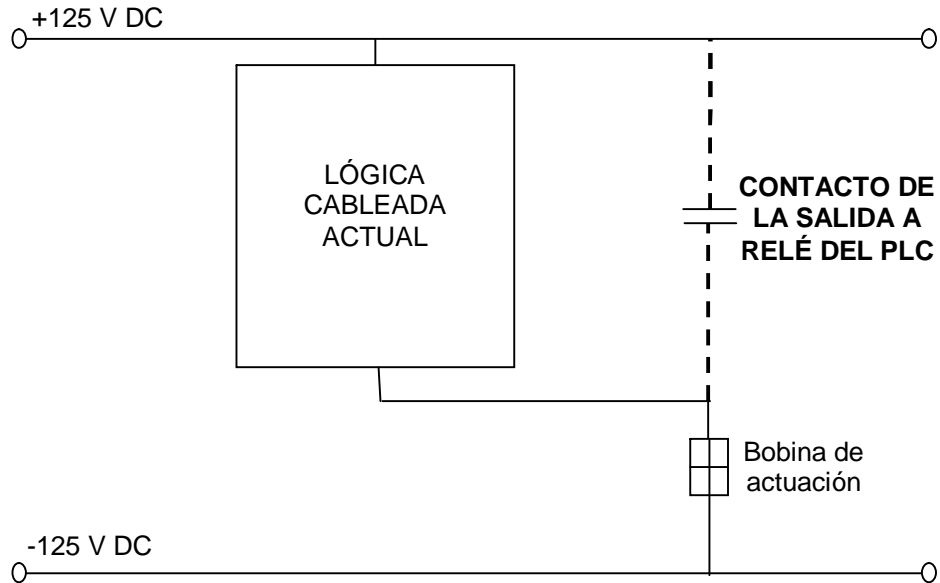


Basada en la referencia <sup>(3)</sup>

Figura 13: Conexión utilizada para las entradas del PLC

En esta figura se puede observar que todos los contactos de los equipos de patio tienen un terminal común conectado a la alimentación +V del PLC (24 Vdc), mientras que el otro terminal se une con cada una de las entradas de este. Esta es la configuración *pnp* de las entradas del PLC.

Para ejecutar el mando sobre los equipos de corte, se utilizan las salidas a relé que posee el PLC. Como el objetivo es realizar control de manera paralela con el que ya se encuentra implementado, los contactos de estas salidas se deben ubicar dentro de los circuitos de control (la lógica cableada explicada en la sección 1.2.2), de tal manera que puedan alimentar las bobinas de actuación de apertura y cierre de cada equipo de corte. En la Figura 14 se presenta el esquema para la alimentación de estas bobinas.



**Figura 14:** Esquema para la alimentación de las bobinas de actuación mediante el PLC

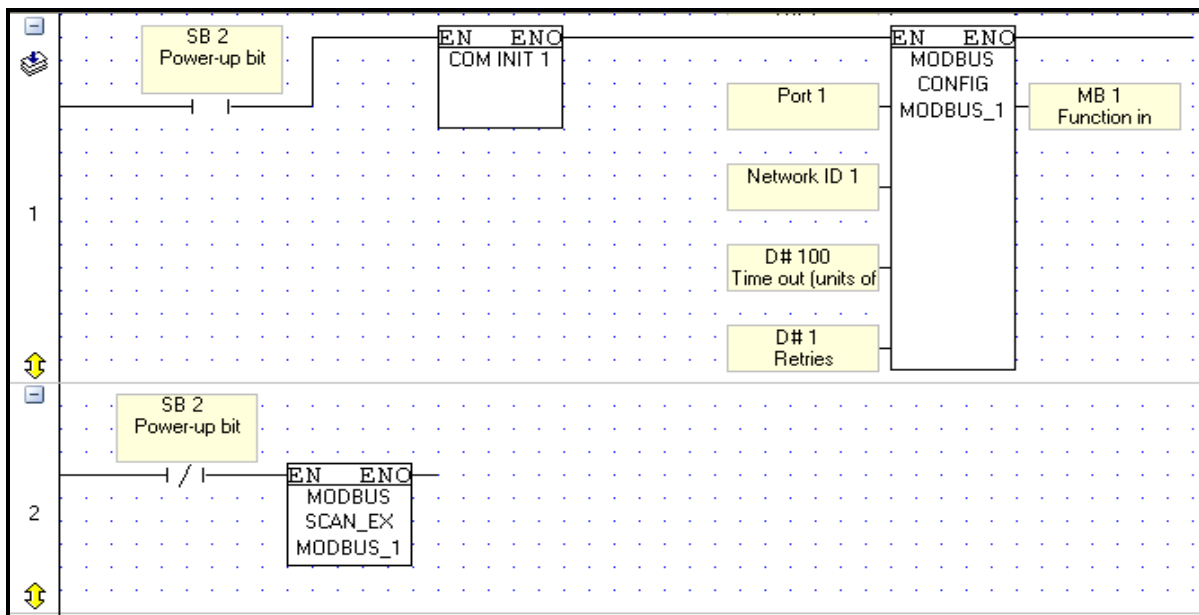
### 2.3.1.1. PROGRAMACIÓN DEL PLC

Para usar el PLC como esclavo, debe programarse usando el software suministrado por *Unitronics* llamado *VisiLogic*<sup>5</sup>; el cual, permite realizar programas en LADDER y descargarlos directamente al PLC.

En la Figura 15 se muestra el diagrama LADDER de éste programa, el cual se compone de tres (3) tareas básicas. La primera es inicializar el puerto del PLC que se usa para la comunicación con el maestro. Esto se hace en el bloque *COM INIT 1* de la Figura 15, dando doble click sobre él; allí se definen parámetros como el nombre del puerto a configurar (COM 1), rata de baudios (entre 9600 y 57600), el timeout (1s), bits de datos (8 bits), paridad (ninguna), bits de parada (1bit) y el tipo de comunicación (RS232). La segunda parte se hace con el bloque *MODBUS CONFIG* en donde se crea y configura el enlace MODBUS, en este bloque se definen los siguientes parámetros (ver Figura 15): un nombre para identificar la comunicación que se está creando (MODBUS\_1), el puerto serie que se usa (port

<sup>5</sup> UNITRONICS. VisiLogic Software Manual Function Blocks. 2004, p 92

1), el ID del esclavo en la red MODBUS (01), el timeout (100\*(10ms)) y la cantidad de veces que el PLC intentará enviar un mensaje (1 intento). Estas tareas se llevan a cabo cuando el PLC se enciende o inicia su ejecución, por tanto, la operación de los dos (2) bloques mencionados debe controlarse por la bandera *Power-up bit* la cual se activa durante el encendido del PLC. La tercera tarea se lleva a cabo en el bloque *MODBUS SCAN\_EX* y permite habilitar al PLC para comunicarse a través de una conexión configurada previamente (*MODBUS\_1*); por tanto, se debe ejecutar indefinidamente, de ahí su dependencia inversa de la bandera *Power-up bit*.

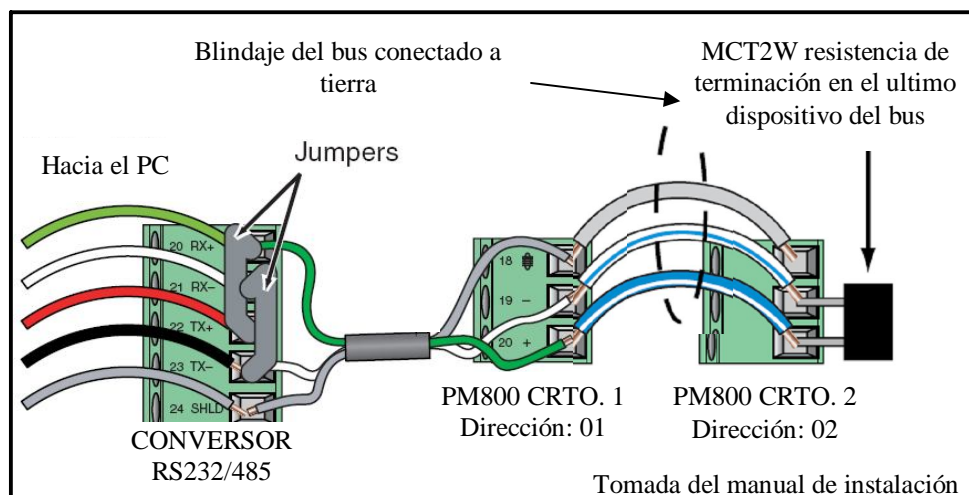


**Figura 15:** Programación en LADDER para configurar el PLC Vision280 como esclavo MODBUS

### 2.3.2. Conexión de los analizadores de redes (PM800)

El puerto físico de comunicación MODBUS del PM800 es de tipo half dúplex, y por tanto se usa el mismo par de hilos para la transmisión y recepción de los datos. Permite la incorporación del dispositivo a una red MODBUS para su manejo por medio de un maestro, que en este caso es el computador.

Siguiendo las indicaciones dadas por el fabricante<sup>6</sup>, se implementa una red MODBUS con el computador y los dos (2) analizadores de redes. En la Figura 16 se muestra la configuración de esta red. Es necesario usar un conversor RS232/485 ya que el computador sólo tiene puertos de tipo RS232. La resistencia de terminación utilizada es la que el fabricante del PM800 recomienda y que viene dentro su equipamiento.



**Figura 16:** Red MODBUS implementada para la comunicación con los analizadores de redes

En cuanto a la configuración interna de estos equipos, a diferencia del PLC, no es necesario usar un software externo para su programación, simplemente se accede a su menú de programación (ver Figura 17) usando sus teclas de navegación, para definir los parámetros de comunicación que son: protocolo de comunicación (MBUS-RTU), dirección del esclavo en la red (01 o 02 dependiendo del analizador que sea), tasa de baudios (9600) y la paridad (ninguna).

<sup>6</sup> SCHNEIDER ELECTRIC. Manual de instalación, Central de medida de la serie 800. 2006, cap. 5

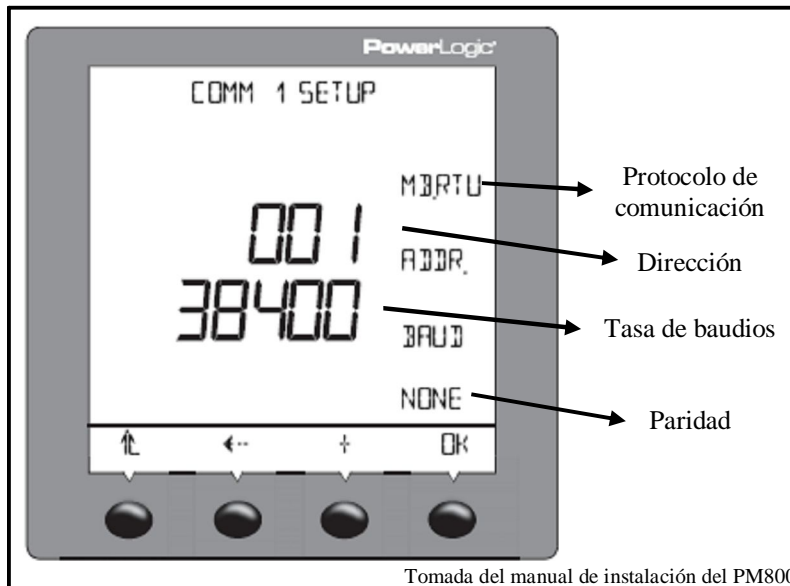


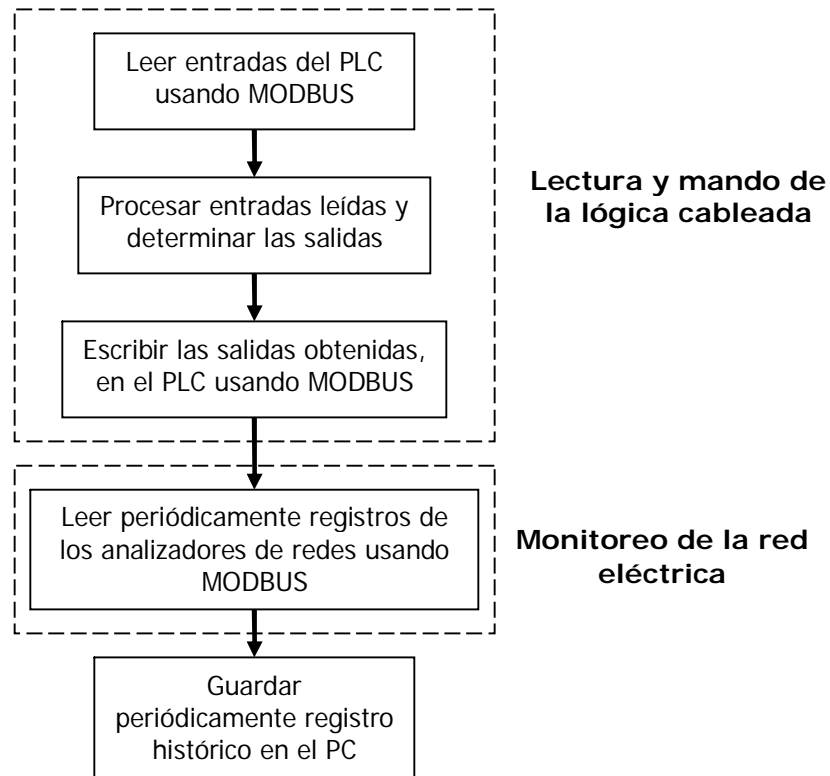
Figura 17: Menú de configuración de la comunicación del PM800

### **3. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN EN LABVIEW**

En este capítulo se explica la metodología utilizada para el desarrollo de la aplicación en LabVIEW, basándose en el funcionamiento y la lógica de la subestación eléctrica de Bosconia presentada en la sección 1.2.2. Posteriormente se explican los aspectos involucrados a lo largo de este desarrollo hasta llegar al producto final.

Debido a que el proceso de monitoreo y control de la subestación eléctrica de Bosconia comprende diversas tareas, como la comunicación con el PLC en ambos sentidos, la lectura de los analizadores de redes y la lógica de funcionamiento entre otras, es necesario proponer un orden o secuencia para la ejecución de la aplicación en LabVIEW, la cual se convierte en el ciclo básico de funcionamiento de esta.

En la Figura 18 se presenta el diagrama de flujo para el ciclo de ejecución principal del programa desarrollado. Allí se observa el monitoreo de los dos (2) tipos de señales presentes en la subestación.



**Figura 18:** Diagrama de flujo para un ciclo de ejecución de la aplicación en LabVIEW

El monitoreo de la red eléctrica y el registro histórico no se hacen continuamente, sino de manera periódica, esto con el fin de hacer más eficiente el programa y a su vez para dar prioridad a las tareas críticas, como son el monitoreo y mando sobre la lógica cableada, puesto que éstas requieren de un tiempo de respuesta corto.

Antes de comenzar con la explicación formal de la programación en LabVIEW, en el ANEXO A se muestra una compilación de las entradas y salidas tenidas en cuenta para la programación en LabVIEW de la operación de cada uno de los equipos de patio de la subestación eléctrica. Las variables se agrupan según el equipo que las usa de acuerdo a los planos presentados en la sección 1.2.2 y por tanto la mayoría se repiten varias veces, aclarando que para el conteo total, solo una de ellas se tiene en cuenta.

A continuación se presenta la programación correspondiente a cada una de las etapas del diagrama anteriormente mostrado. Posteriormente, se explica la

aplicación principal que se encarga de reunir todos los bloques que aquí se presentan y que contiene el ciclo de ejecución principal, así como la interfaz grafica con el usuario.

### **3.1. LECTURA DE ENTRADAS DEL PLC**

Este proceso está fundamentado en el protocolo MODBUS. Como este se basa en la técnica de Maestro – Esclavo para tener acceso al medio, en esta aplicación el computador funciona como el Maestro mediante LabVIEW y los demás dispositivos se configuran como esclavos. La lectura de entradas se realiza con la función 02 de este protocolo.

Lo relacionado con la programación en LabVIEW de los bloques del protocolo MODBUS, está basado en la tesis: *MODBUS. MONITOREO DE LA RED EMPLEANDO LABVIEW* de los autores Sinle Marcela Carreño Martínez y Pedro Ardila Albarracín, año 2005. Sin embargo, se hacen algunas modificaciones a los bloques desarrollados en la tesis mencionada.

La primera modificación importante consiste en eliminar lo relacionado con la conversión para el modo de transmisión ASCII, ya que todo el hardware usado trabaja únicamente en modo RTU, por tanto se dejan fijas todas las operaciones RTU, sacándolas de las estructuras *case*. El uso de la estructura *stacked sequence* para el manejo de las dos partes de la función MODBUS, que son envío de la petición y lectura de la respuesta, permanece inmodificado. En la Figura 19 se muestra el diagrama de bloques para el envío de la petición para la función 02. Allí se observa que de la estructura *flat sequence* de la derecha se eliminaron los fotogramas en los que se cambia de estado el pin *RTS* del puerto serie, ya que para el PLC no se usa conversor RS232 a RS485, el cual sí requiere control para el sentido de transmisión del canal físico.

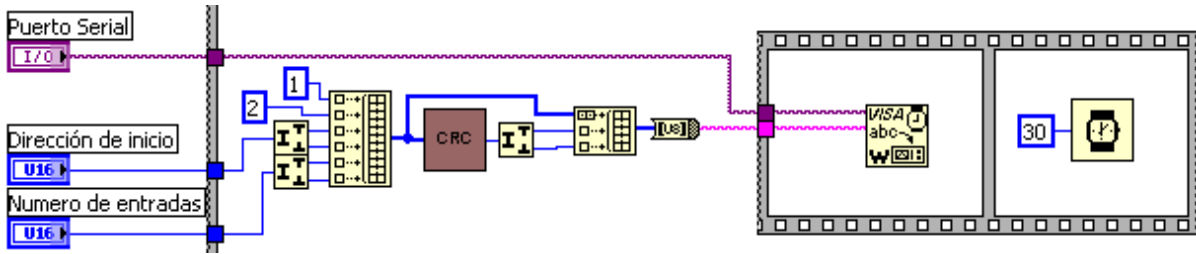


Figura 19: Envío de la trama de petición para la función 02

La recepción de la trama respuesta se modificó buscando básicamente generar una variable de parada y un mensaje en pantalla, para reportar al usuario y al programa principal cuando el esclavo no responde (expiración del *timeout*). Para lograr esto, inicialmente se debe generar una señal que indique que el *timeout* ha expirado. En la Figura 20 se observa el diagrama de bloques del subvi *leer puerto* usado en la parte de la lectura de la trama respuesta, la cual se explicará más adelante. En ese diagrama se puede observar la salida *expiro timeout?*, la cual es agregada a través de una compuerta *not*, después de realizar la comparación del tiempo actual con el *timeout*. La salida del comparador va a ser un 0 lógico cuando el tiempo actual sea mayor o igual que el *timeout* ingresado, que al negarlo se convierte en una bandera de aviso que se pone en 1 lógico.

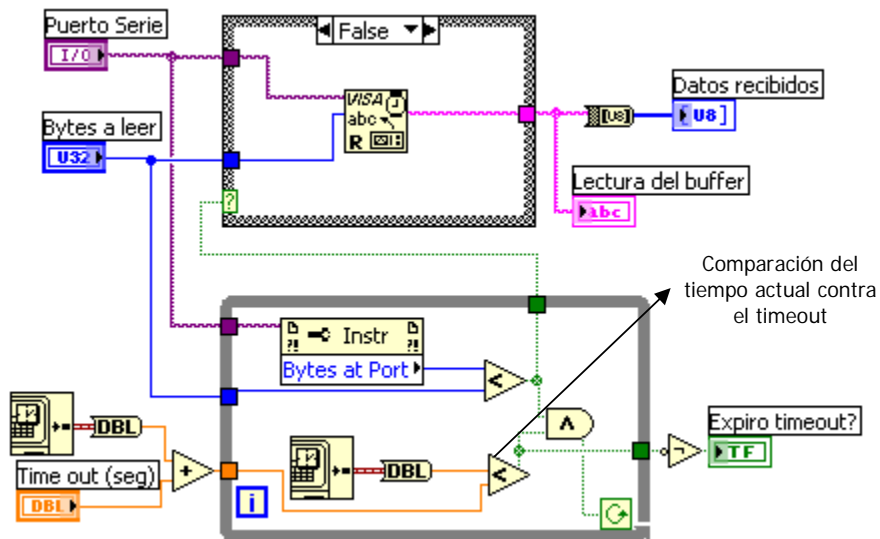


Figura 20: Diagrama de bloques para la lectura del puerto serie

Una vez generada la bandera de expiración del *timeout*, esta es usada en la lectura de la trama de respuesta del PLC para generar el aviso al usuario y al programa principal. En la Figura 21 se presenta el diagrama completo de la lectura de la trama de respuesta; el bloque de color amarillo corresponde al subvi *leer puerto* mostrado en la Figura 20. Puede verse que la salida de color verde que corresponde a la variable *expiro timeout?* se conecta a una estructura *case* (encerrada en el cuadro rojo superior en la Figura 21), dentro de la cual, para el caso *true* se modifican dos (2) variables globales: *expiro timeout?* y *stop*, las cuales son leídas por el programa principal para tomar las precauciones pertinentes ante esta anomalía; con el uso del bloque *Display message to user* se genera un mensaje en pantalla, advirtiendo al operario del problema ocurrido.

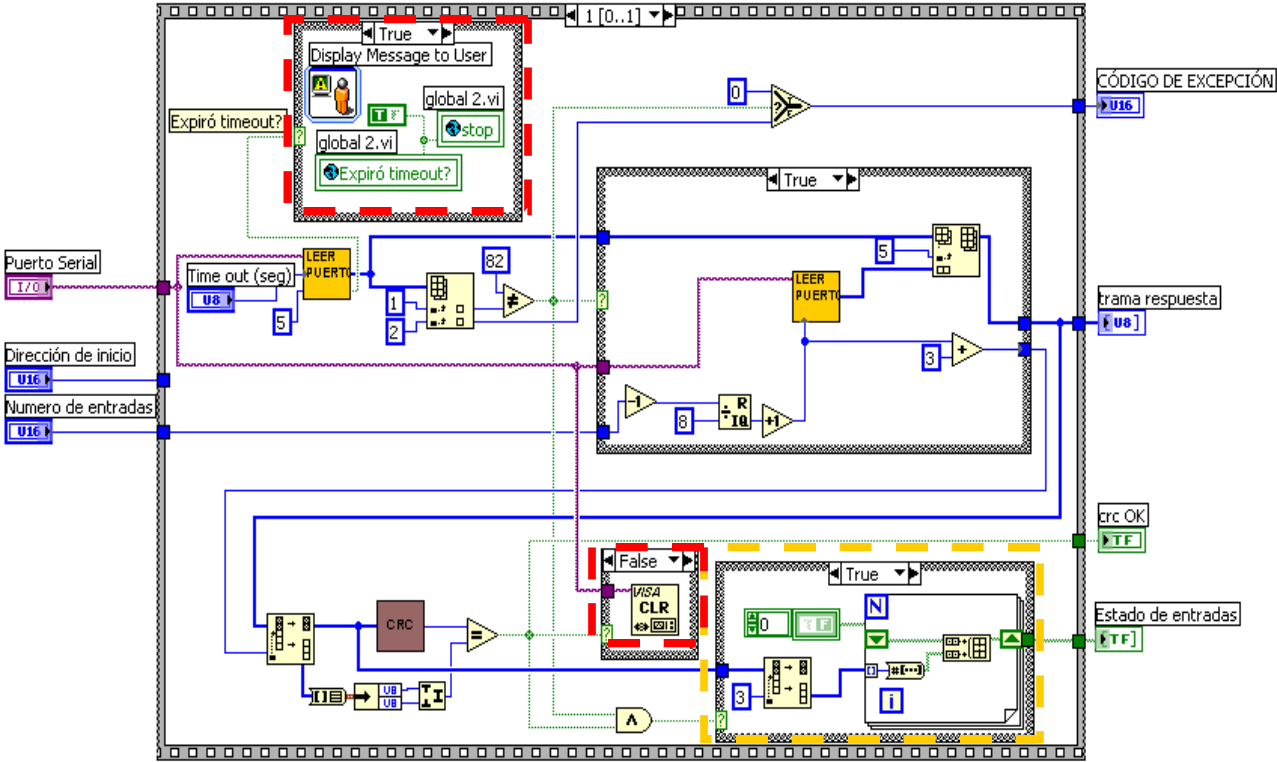


Figura 21: Recepción de la trama de respuesta proveniente del esclavo

El mensaje mostrado al usuario es el de la Figura 22. Para una fácil interpretación de lo que ocurrió, y con el fin de darle al operario una idea de la solución al problema ocurrido, en la ventana de mensaje se aparecen las posibles razones

por la que expiró el *timeout*. Generalmente las causas de tipo físico por la que un esclavo de una red MODBUS no emite respuesta es debido a que el puerto de comunicaciones se encuentra apagado o cuando el medio de conexión físico entre el PC y el esclavo esta averiado, desconectado o conectado en el puerto incorrecto. Sin embargo, las causas de tipo interno o de programación no son incluidas en el mensaje de error, ya que se supone que toda la programación y parámetros de la comunicación han sido configurados adecuadamente antes de ejecutar la aplicación y además son elementos que no deben ser alterados por el operario.



**Figura 22:** Mensaje emergente ante la terminación del timeout

Como parte de otra modificación, se limpia el contenido del buffer del puerto serie cuando ocurre un error de CRC (Código de Redundancia Cíclica). Esto se hace con el bloque *VISA CLR*, enmarcado dentro el cuadro rojo inferior en la Figura 21. Esta acción es importante debido a que cuando ocurre un error de CRC, significa que los datos recibidos son erróneos, ya sea por simple error en la comunicación o por que había una cantidad determinada de datos acumulados en el buffer, esperando a ser leídos y por tanto, no deberían ser tenidos en cuenta. Al no realizar la limpieza, los datos que llegan se van a seguir acumulando y por tanto, nunca se va a obtener una trama correcta.

La última modificación hecha a la parte de la función 02 consiste en que cuando ocurre un error de CRC o la trama de respuesta es un mensaje de error, la salida *estado de las entradas* debe estar vacía (ver la Figura 21, la salida del cuadro

amarillo), con el fin de que los datos erróneos leídos de la trama no se interpreten como entradas leídas correctamente. Esto se logra colocando en la parte *false* de la estructura *case*, señalada en amarillo en la Figura 21, un arreglo vacío de datos booleanos conectado a la salida mencionada.

### **3.2. PROCESAMIENTO DE ENTRADAS LEÍDAS Y DETERMINACIÓN DE SALIDAS**

Una vez leídas todas las entradas mediante la función 2, el programa desarrollado, toma estas entradas y las procesa, con el fin de determinar las condiciones de la subestación eléctrica y de esta manera tomar decisiones para determinar las salidas correctamente.

El desarrollo de la programación, fue basado en la lógica cableada de la subestación eléctrica, específicamente en cada uno de los planos que representan el funcionamiento de cada equipo. Se tuvo en cuenta los contactos más importantes como entradas y las bobinas de actuación como las salidas. Cuando los contactos se encuentran en cascada, es análogo a utilizar una compuerta *AND*, mientras que cuando se encuentran en paralelo, se utiliza una compuerta *OR*. El estado de los contactos está definido de la siguiente manera: contacto cerrado es un ON lógico y contacto abierto es un OFF lógico.

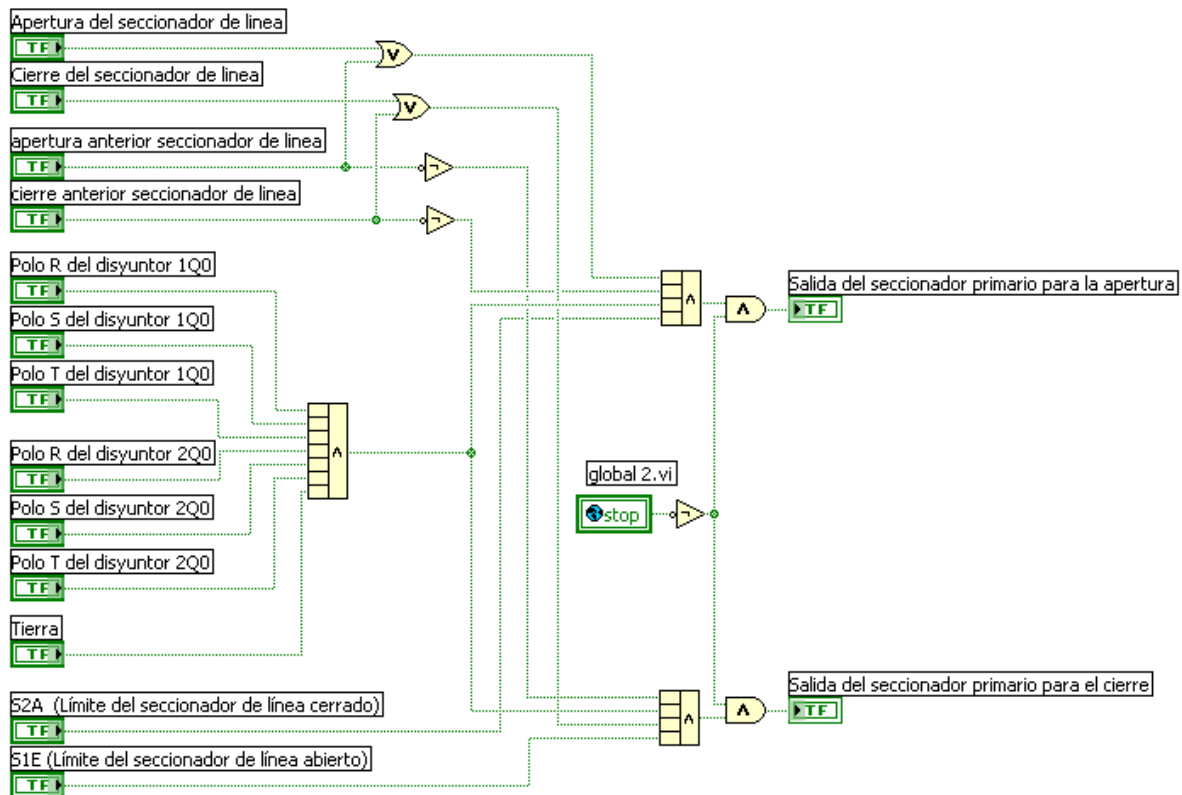
Debido a la complejidad del sistema, se tuvo en cuenta sólo los contactos más relevantes y la programación se realizó por partes, es decir, un *subvi* por cada dispositivo de corte y en algunos casos, como el del disyuntor uno para la apertura y otro para el cierre.

A continuación se explican cada uno de los *subvi*'s correspondientes a cada plano:

#### **3.2.1. Seccionador de línea**

En la Figura 23 se muestra la programación correspondiente al seccionador de línea. Las entradas corresponden a contactos presentados en el plano de la Figura

4 (sección 1.2.2.1), a excepción de las entradas de *apertura anterior* y *cierre anterior* que son variables internas, y las de *apertura del seccionador* y *cierre del seccionador*, que corresponden no a variables provenientes del PLC, sino a pulsadores ubicados en el panel frontal de la interfaz grafica de LabVIEW, con el fin de que el operario pueda ejecutar el mando desde allí.



**Figura 23:** Programación de la lógica del seccionador de línea

Un registro de desplazamiento ubicado en el programa principal guarda el estado actual de las salidas para apertura y cierre y lo envía en la siguiente iteración a través de las entradas de *apertura anterior* y *cierre anterior*; esto con el fin de saber si en el ciclo anterior, el seccionador estaba abriéndose o cerrándose, y mantener esta orden en la iteración actual, ya que las entradas: *apertura del seccionador* y *cierre del seccionador*, son pulsadores y no interruptores y por tanto no mantienen el “1” lógico hasta que su operación respectiva termine de ejecutarse. Además, esta realimentación sirve también para evitar que ambas bobinas sean energizadas al tiempo.

La variable global llamada *stop* guardada en el subvi *global 2.vi* es la que permite que cuando el programa reciba la orden de parada, ya sea desde el panel frontal, o por que expiró el *timeout* como se explica en la sección 3.1, el programa desactive todas las salidas antes de parar definitivamente.

### 3.2.2. Seccionadores de potencia

En la Figura 24 se muestra la programación del seccionador de potencia del circuito 1 de la subestación eléctrica:

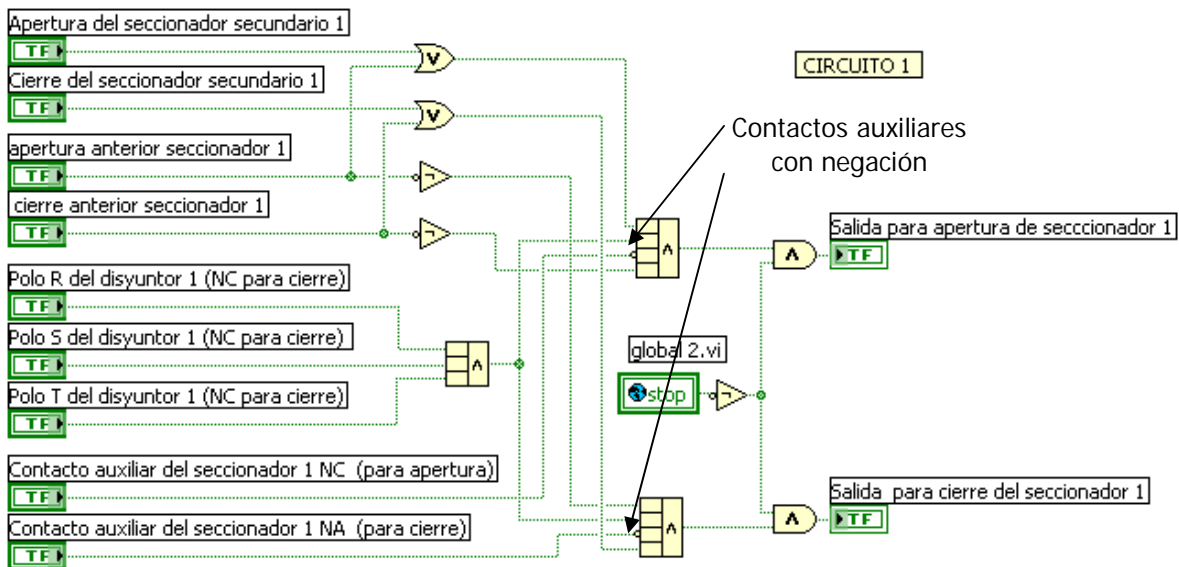


Figura 24: Programación de la lógica del seccionador de potencia del circuito 1

Puede observarse que la programación para el seccionador de potencia presenta la misma topología que el seccionador de línea. Se usan de nuevo las entradas de *apertura anterior* y *cierre anterior* con el fin de lograr los mismos efectos que se lograron para el seccionador de línea. Al igual que en éste, la variable *stop* permite desactivar las salidas antes de detener el programa. La única diferencia consiste en que a las dos entradas de contactos auxiliares (las dos entradas de la parte inferior en la Figura 24) se les aplica negación antes de ser ingresadas a sus respectivas compuertas *AND*, esto es debido a que dichos contactos tienen

funcionamiento inverso a los mismos contactos del seccionador de línea, esto es, para una posición dada del seccionador de línea, sus contactos auxiliares van a estar en estado contrario con respecto a los correspondientes contactos del seccionador de potencia. Por tanto, la lógica debe ser invertida para que funcione correctamente.

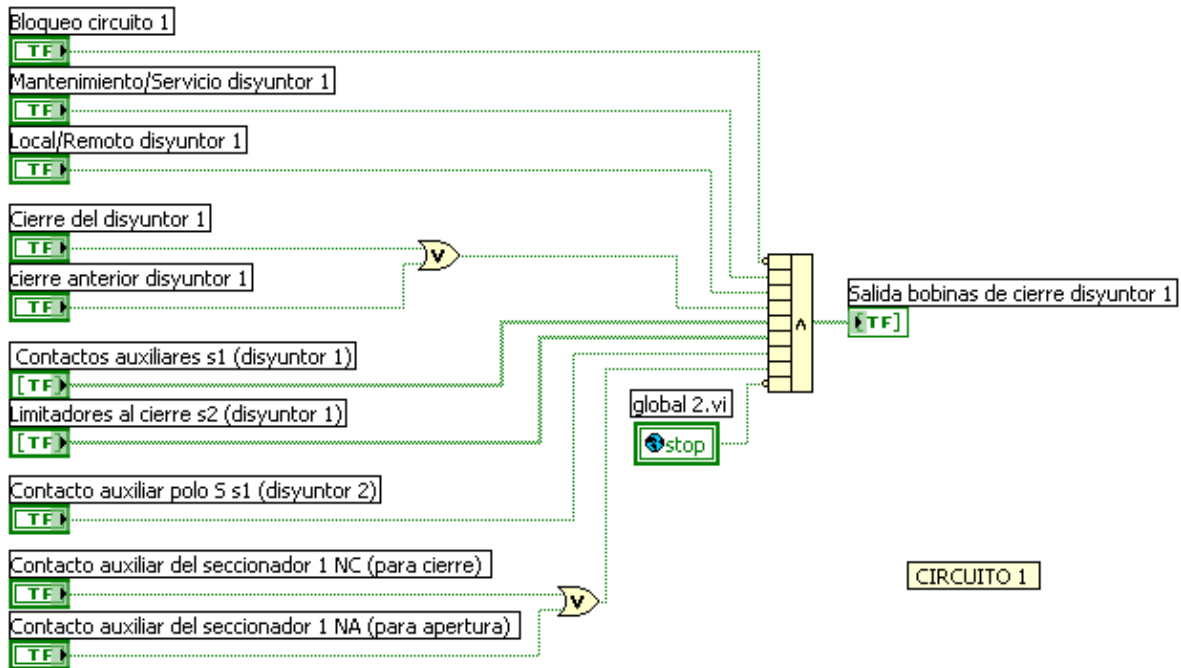
Cabe anotar que el control del seccionador de potencia 2 es análogo al presentado anteriormente, guardando la dependencia de los contactos correspondientes del circuito 2.

### **3.2.3. Disyuntor de potencia**

Debido a que la lógica cableada de la subestación presenta dos planos independientes para el control de los disyuntores de potencia, en LabVIEW se programa de la misma manera. A continuación se muestran la programación del disyuntor de potencia del circuito 1, tanto para el cierre como para la apertura:

#### **3.2.3.1. CIERRE DEL DISYUNTOR DE POTENCIA**

En la Figura 25 se observa la programación correspondiente al cierre del disyuntor de potencia, basado en la lógica del plano de dicho equipo.



**Figura 25:** Programación del cierre del disyuntor de potencia del circuito 1

En este caso, las variables de entrada que no provienen del PLC son *bloqueo circuito 1*, *cierre del disyuntor 1*, *cierre anterior disyuntor 1* y obviamente la variable global *stop*. Todas son variables internas, siendo *cierre del disyuntor 1* un pulsador ubicado en el panel frontal de la aplicación, para mando desde LabVIEW. La variable *bloqueo circuito 1* se genera en el bloque de apertura del disyuntor, el cual se explica en la siguiente sección.

### 3.2.3.2. APERTURA DEL DISYUNTOR DE POTENCIA

El disparo de los disyuntores presenta un funcionamiento diferente al de los demás equipos de patio, debido a que es la única tarea que se ejecuta de manera automática ante la ocurrencia de una alarma. En la Figura 26 se muestra la programación para la apertura del disyuntor 1.

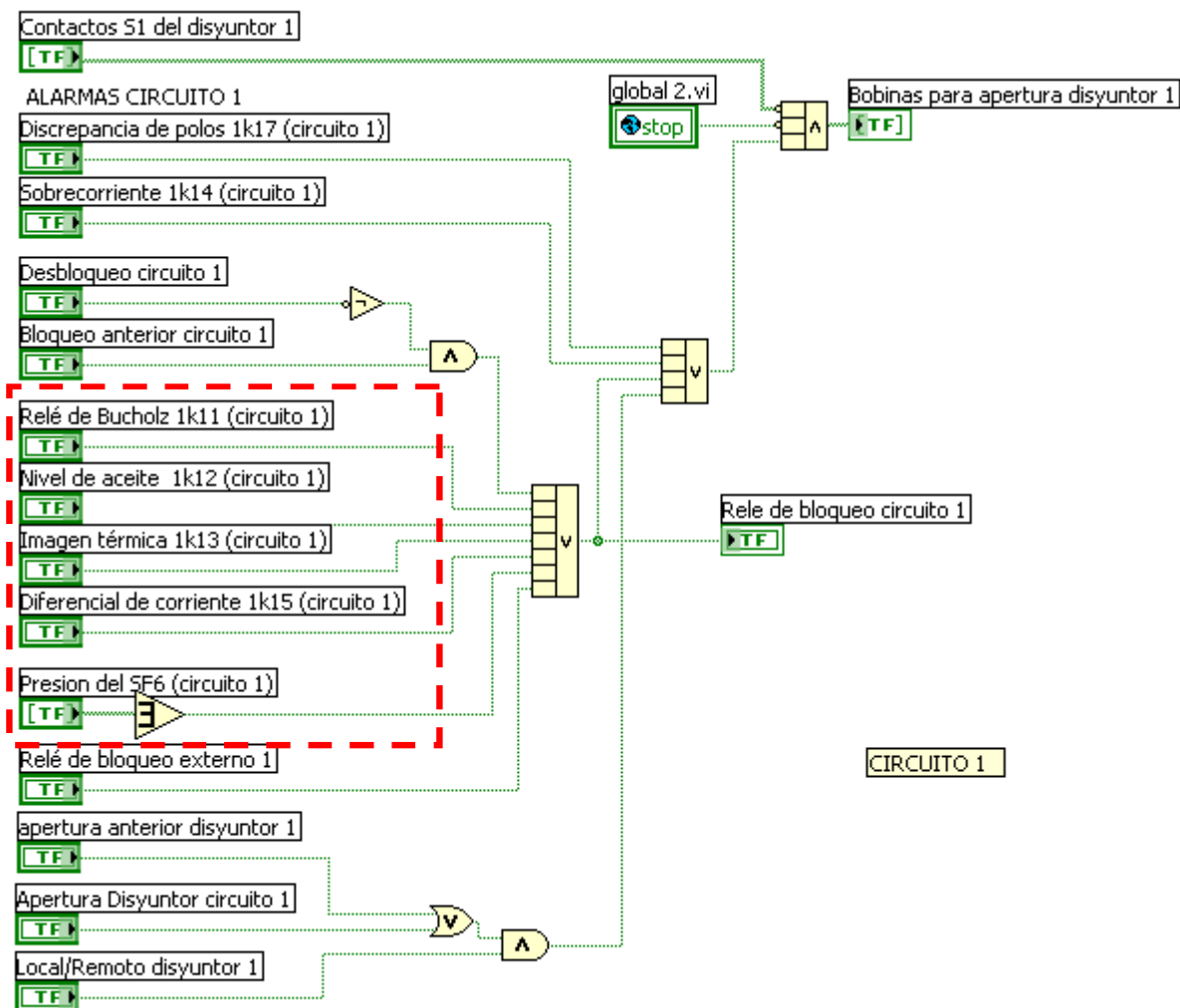


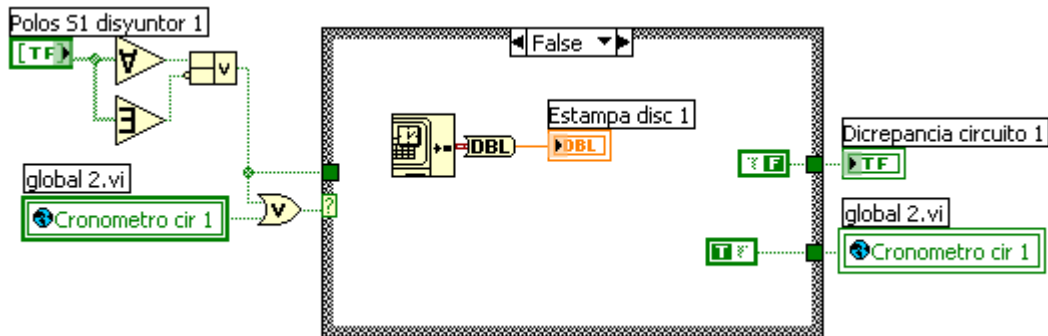
Figura 26: Programación de la apertura del disyuntor de potencia del circuito 1

En la figura anterior puede observarse que a diferencia de las demás operaciones descritas anteriormente, la apertura de disyuntores relaciona las entradas con la operación lógica *OR*, indicando que ante la ocurrencia de cualquier alarma se deben activar las bobinas de apertura. Cabe aclarar que la salida denominada *relé de bloqueo circuito 1* no se envía al PLC ya que esta no es una señal de actuación sobre la subestación eléctrica, esta es una variable de control que tiene el mismo funcionamiento que el relé de bloqueo *1k16* mostrado y explicado en la Figura 8, sección 1.2.2.3.2, donde su tarea es evitar el cierre del disyuntor cuando ha ocurrido alguna de las alarmas señaladas en rojo en la Figura 26, cuando *relé de bloqueo externo 1* proveniente de la subestación se encuentra activado o cuando

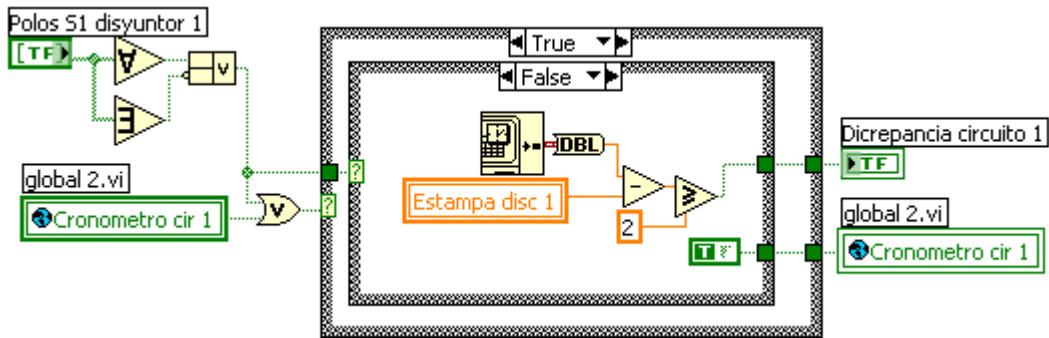


En la figura anterior se tiene como entrada el estado de los polos (S1) del disyuntor 1. La lógica dentro del recuadro rojo produce un “true” cuando todos los del disyuntor estén simultáneamente en “1” lógico con la primera compuerta lógica AND, o en “0” lógico aplicando lógica OR negada con la otra compuerta. Al estar el disyuntor en operación normal (sin ocurrencia de discrepancia), se va a ingresar obligatoriamente al caso *true* de ambas estructuras *case* (como se observa en la Figura 27), donde simplemente se mantienen desactivadas la salida de alarma *Discrepancia circuito 1* y la variable global *Cronometro cir 1*.

Cuando ocurre por primera vez la discrepancia, se ingresa al caso *false* del *case* externo como se observa en la Figura 28. Allí se guarda en la variable local *Estampa disc 1*, el valor de la fecha absoluta actual en segundos y al mismo tiempo se activa la variable global *Cronometro cir 1*. En la siguiente iteración de la aplicación al estar esta variable ya activada, se ingresa nuevamente al caso *true* del *case* externo. Si la discrepancia persiste, se usa el caso *false* interno, donde se ejecuta la programación que se muestra en la Figura 29.



**Figura 28:** Operación para la ocurrencia por primera vez de la discrepancia de polos



**Figura 29:** Operación para la persistencia de la discrepancia de polos

En la figura anterior, la bandera de cronometro se mantiene activada y al mismo tiempo, se le resta al tiempo actual, el valor de la estampa de tiempo guarda la primera vez que ocurrió la discrepancia, si esta diferencia es mayor que dos (2) segundos, indica que es preciso encender la salida que representa la alarma: *Discrepancia circuito 1*.

Por último, si la discrepancia se corrige, se ingresa nuevamente al estado mostrado en la Figura 27, donde se borran la salida y la variable global.

### 3.3. ESCRITURA DE LAS SALIDAS EN EL PLC

Para la escritura en el PLC de las salidas obtenidas en los bloques de la sección anterior, se utiliza la función 15 del protocolo MODBUS, llamada *Escribir Bobinas*. Al igual que para la lectura de las entradas, la programación de esta función se basó en la desarrollada por los autores de la tesis referenciada en las observaciones.

Su estructura de funcionamiento es similar a la de la función 02, ya que primero se envía una trama de petición y luego se recibe la respuesta. En la trama de petición se incluyen los datos que se van a escribir en las salidas del esclavo, y en la de respuesta simplemente se recibe una confirmación de cuantas bobinas fueron escritas.

En la Figura 30 se observa la programación del envío de la trama de petición de la función 15. La estructura *for* de la parte superior se usa para convertir los *estados a forzar las bobinas*, los cuales son datos boléanos, en datos hexadecimales agrupándolos en octetos. En cuanto a las modificaciones, la primera importante que se hizo, es la eliminación del modo de transmisión ASCII tal y como se hizo para la función 02, dejando fija la transmisión RTU. Al igual que en la función 02 se eliminaron de la estructura *flat sequence* de la derecha los fotogramas que modifican el pin RTS del puerto serie.

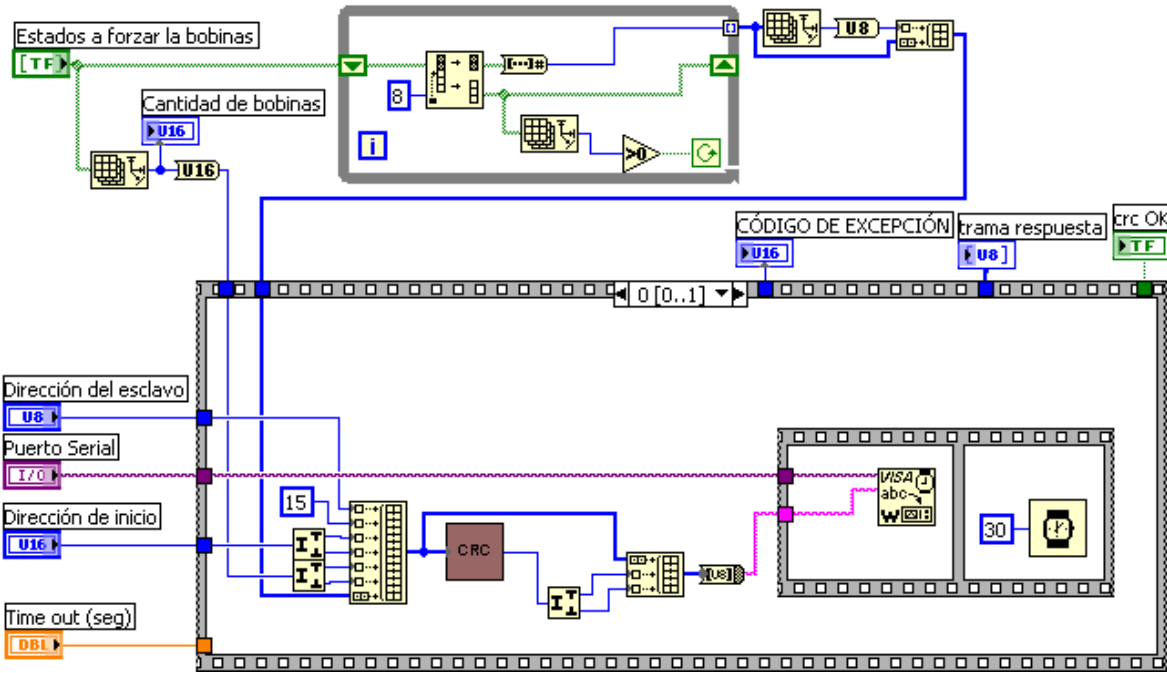


Figura 30: Diagrama de bloques de la trama de petición de la función 15

En la Figura 31 se muestra la recepción de la trama de la función 15.

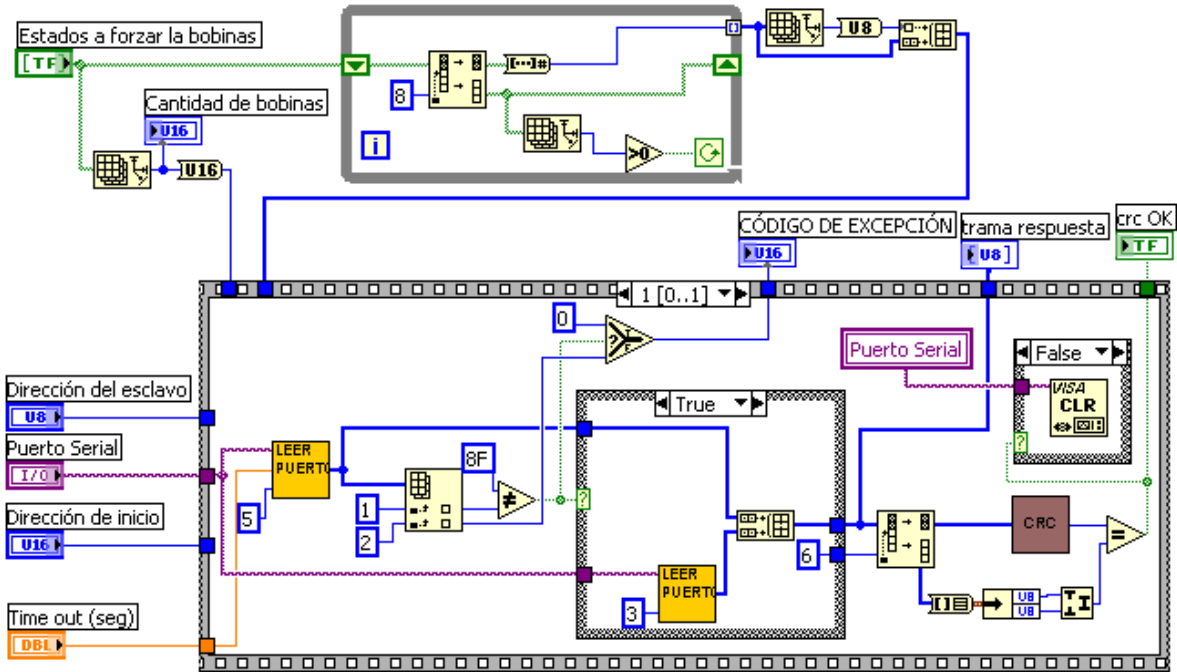


Figura 31: Diagrama de bloques de la lectura de la trama de respuesta de la función 15

En este caso se agregó otro bloque *leer puerto* con el fin de dar la posibilidad de recibir un mensaje de error, tal como está realizado en la función 02. Para la función 15, existen dos tipos de trama de respuesta: la trama de respuesta de error y la de respuesta normal. Esto se muestra en la Figura 32.

Trama de respuesta de error				
Dirección de esclavo	Código de función + 80 (8F)	Código de error	CRC (H)	CRC (L)

Trama de respuesta normal							
Dirección de esclavo	Código de función (0F)	Dirección del 1 <sup>er</sup> bit (H)	Dirección del 1 <sup>er</sup> bit (L)	No. de palabras (H)	No. de palabras (L)	CRC (H)	CRC (L)

Figura 32: Tramas de respuesta de la función 15

Para recibir cualquiera de las dos tramas, se leen inicialmente cinco (5) caracteres RTU de manera fija con el bloque *leer puerto* de la izquierda en la Figura 31, que es la cantidad de caracteres de la respuesta de error. En caso de recibir una respuesta normal (código de función diferente de 8F), es necesario leer tres (3)

caracteres más, como se observa en el caso *true* de la estructura *case*. Para la opción *false*, simplemente se envían directamente los primeros cinco (5) caracteres leídos, tal como se muestra en la Figura 33.

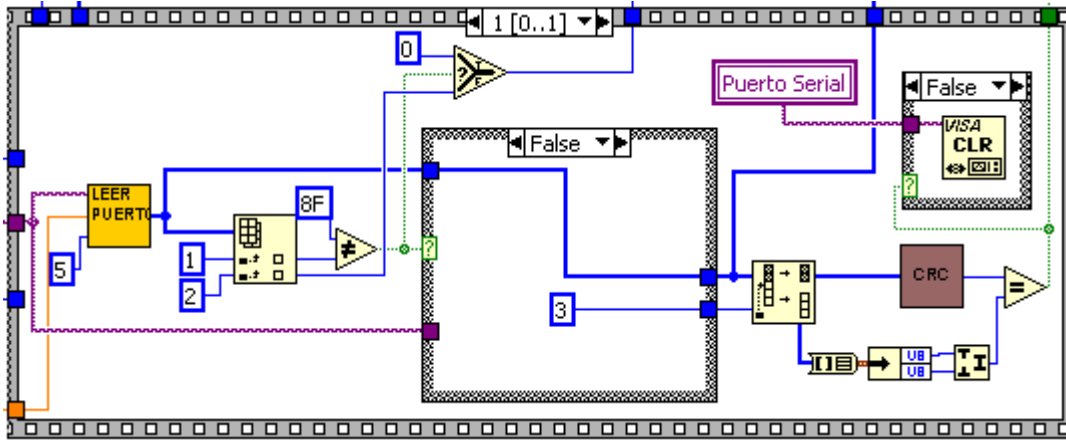


Figura 33: Lectura de una respuesta de error de la función 15

### 3.4. LECTURA DE LOS REGISTROS DE LOS ANALIZADORES DE REDES

Como ya se menciona en apartes anteriores, la comunicación con los analizadores de redes permite mediante la lectura de sus registros, obtener las diferentes medidas de interés en una red eléctrica. Es por esto que se hace necesario usar la función 04 del protocolo MODBUS, llamada *lectura de n registros de entrada*, la cual da acceso a los estos registros en el esclavo.

El PM800 maneja comunicación a través de un puerto RS485 (ver Tabla 1), por tanto para su conexión al PC es necesario usar un convertidor de RS485/RS232, sin embargo, esto no tiene consecuencia alguna sobre la programación en LabVIEW, excepto por el manejo que hay que hacer sobre el pin *RTS* del puerto serie.

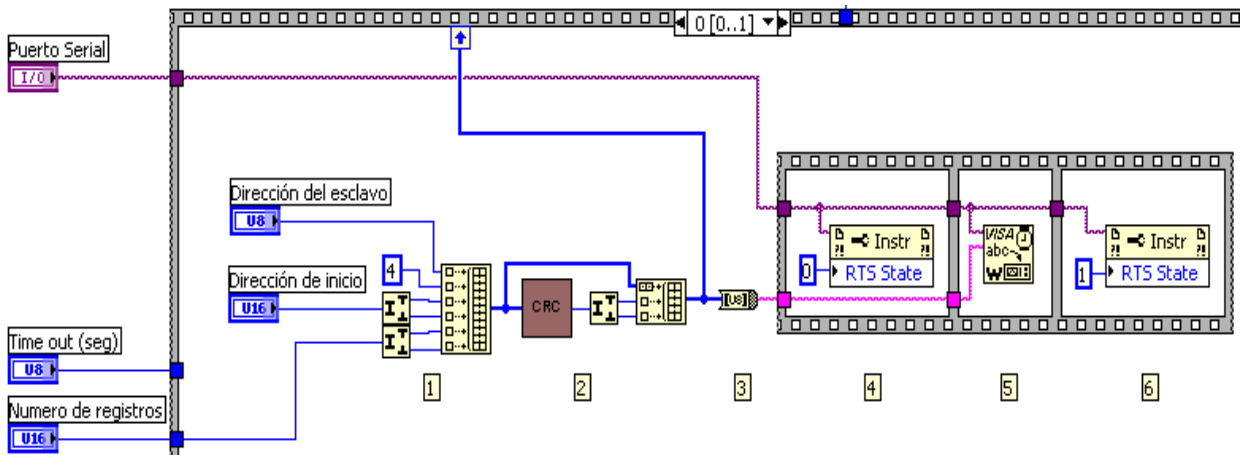
Las medidas que se desean tener en LabVIEW a través de la comunicación con cada uno de los analizadores de redes son las siguientes:

- Corrientes de línea
- Tensiones de línea
- Tensiones de fase
- Potencia activa, reactiva y aparente
- Factor de potencia
- Distorsión armónica total

En el ANEXO B, se presenta un fragmento de la tabla de registros del PM800, donde se almacenan las mediciones de la red eléctrica. Debido a que los registros que contienen las medidas requeridas no están ubicados de manera consecutiva, es necesario realizar varias lecturas independientes, agrupando los que estén consecutivos. Si se intenta leer todos los registros con una única petición, se obtienen muchos de estos que son innecesarios y que además aumentan el tiempo de transmisión de los datos. En esta sección se presenta inicialmente la programación de la función 04 del protocolo MODBUS, y posteriormente se explica el desarrollo de un bloque que usa esta función para obtener las medidas necesarias y acondicionarlas para ser entregadas a la aplicación principal.

La programación de la función 04 se soportó en las otras funciones presentadas anteriormente (además en la documentación bibliográfica pertinente) y en particular en la función 02, ya que la mayoría de las funciones MODBUS presentan el mismo esquema de funcionamiento.

Como en las demás funciones MODBUS, se tiene una estructura de secuencia como objeto principal: primero el envío de la petición en el primer fotograma y luego la recepción de la respuesta en el segundo fotograma. En la Figura 34 se muestra el fotograma cero (0), correspondiente al envío de la petición al esclavo.



**Figura 34:** Envío de la trama de petición para la función 04

Inicialmente se arma la trama que se va a enviar (ver Figura 34, marcador 1), concatenando sus diferentes componentes. Luego, se calcula el CRC a toda la trama y se adjunta al final de esta (ver Figura 34, marcador 2). Posteriormente la trama completa es enviada mediante un túnel al siguiente fotograma y al mismo tiempo se convierte a formato *char* (marcador 3), para que el bloque *VISA write* pueda admitir la trama. En la estructura *flat sequence* de la derecha se realizan los tres pasos necesarios para escribir en el puerto serie la trama (marcadores 4, 5 y 6, en la Figura 34), tal como es realizado en la tesis de soporte, con la única diferencia de que la parte del retardo no se incluye, ya que después de realizar varias pruebas comunicando el PC y el PM800 a través del conversor RS485/RS232, se observó que el PM800 respondía correctamente sin el uso de este retardo.

Una vez enviada la trama de petición se procede a recibir la respuesta del esclavo. Antes de explicar esta parte, cabe aclarar dos aspectos importantes. El primero es que la respuesta del PM800 es como se explica en la bibliografía consultada, con la variante particular de que antes de esta trama normal, el equipo envía una réplica de la trama de petición. En la Figura 35 se presenta la estructura de toda la trama de respuesta. El segundo aspecto es que los registros internos del analizador de redes son de 16 bits, donde cada uno de ellos está etiquetado con

una dirección específica. Entonces, al realizarse la petición de leer N registros, él retorna como respuesta 2N bytes. Ya que cada registro es de 16 bits.

TRAMA TOTAL									
REPLICA DE TRAMA DE PETICIÓN (8 bytes)					RESPUESTA				
dir	fun	dir inicio	N bytes	CRC	Dirección esclavo	Función (04)	Cantidad octetos leídos 2N	Octetos leídos (2N bytes)	CRC (2 bytes)

**Figura 35:** Trama de respuesta devuelta por el PM800

En la Figura 36 se muestra el fotograma uno (1) de la secuencia principal de la función 04, correspondiente a la recepción de la trama de respuesta.

Inicialmente, se leen los ocho bytes de la réplica de la trama de petición, con el bloque *leer puerto* ubicado en la parte superior (marcador 1, Figura 36) y se compara con la trama que se envió en el fotograma cero (0). En caso de no haber expirado el *timeout* y las tramas comparadas si coinciden (marcador 2), se lee el resto de la trama con el caso *true* de la estructura *case grande*. La programación allí presentada, tiene el mismo esquema de la lectura de respuestas de las funciones 02 y 15 y por tanto no se profundiza acerca de lo que allí se presenta. La estructura *case* de la parte inferior (marcador 3) se encarga de arreglar los registros leídos del PM800, ya que como se menciona líneas arriba, cada registro es de 16 bits y en la trama de respuesta estos vienen ordenados en grupos de 8 bits (1 byte). Esto se realiza en caso de haberse comunicado exitosamente (caso *true*), es decir, cuando el CRC sea correcto. Para el caso contrario (caso *false*) se ignoran los datos de la trama y se limpia el puerto serie.

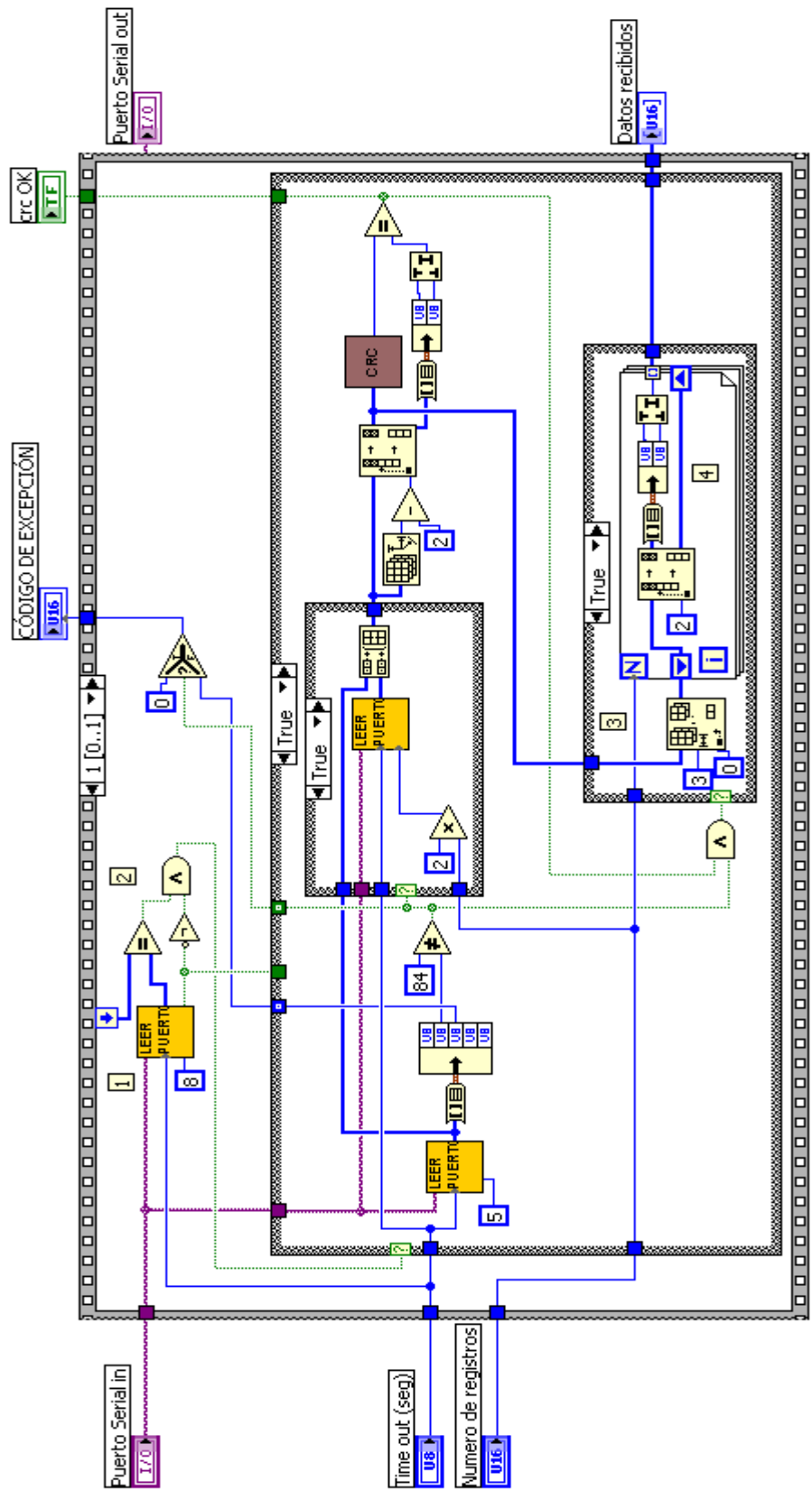


Figura 36: Recepción de la trama respuesta para la función 04

Para hacerlo, se recorren mediante una estructura *for* todos registros leídos y se van tomando de dos en dos. Cada vez que se tienen dos bytes consecutivos, se concadenan uno detrás del otro para formar registros de 16 bits (marcador 4, Figura 36), y luego se forma un nuevo arreglo cuya longitud es la mitad del arreglo que ingreso y que es el enviado como salida.

Ahora, para el caso en el que el *timeout* haya expirado o la trama réplica no coincida con la que se envió, se ingresa al caso *false* de la estructura *case* exterior de la Figura 36. Allí, como se observa en la Figura 37, se limpia el puerto serie con el bloque *VISA CLR* y si el *timeout* se había cumplido se genera un mensaje de error en pantalla y se activan las variables globales *expiro timeout?* y *stop*; tal como se hizo para el mismo caso en la función de *leer entradas* (función 02). El mensaje de error se muestra en la Figura 38.

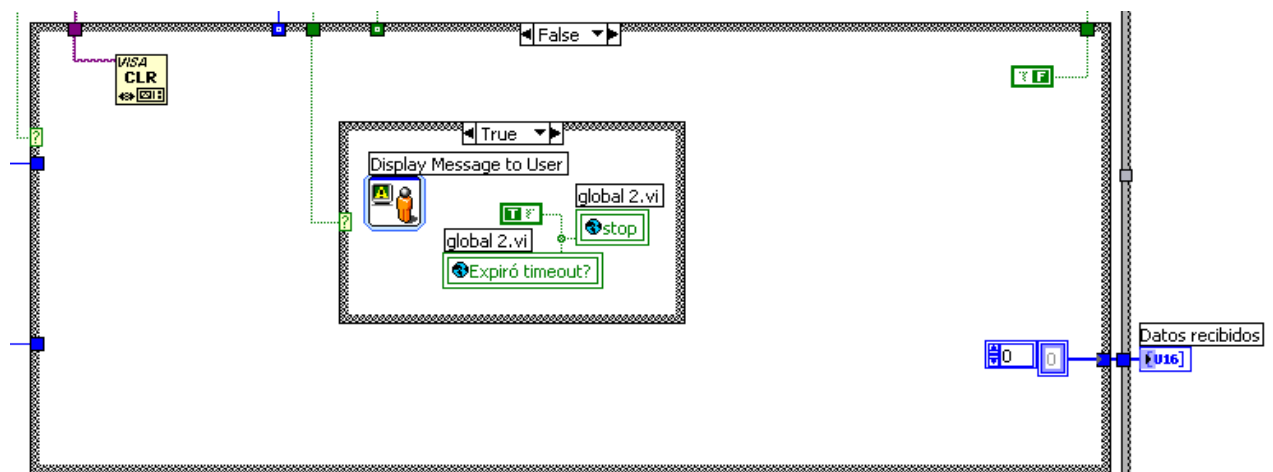


Figura 37: Programación para cuando expira el timeout o la trama enviada y la réplica no coinciden

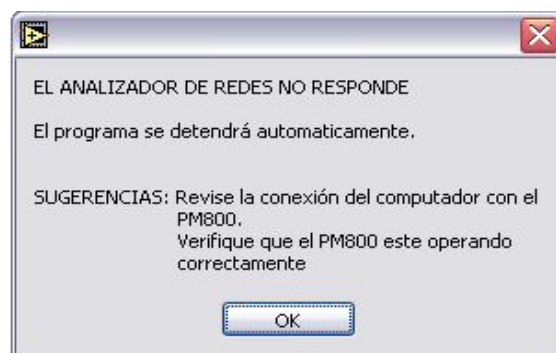


Figura 38: Mensaje mostrado en pantalla ante la expiración del timeout

De esta manera se finaliza la operación del bloque *MODBUS 04.vi*. Ahora, se explica la programación del bloque encargado de realizar las múltiples lecturas de los analizadores de redes mediante la función 04, y de acondicionar y ordenar los datos leídos. En la Figura 39 se presenta la programación del bloque *Lectura PM800.vi*. Allí se usa un bloque *MODBUS 04.vi* para leer varios registros que se encuentre consecutivos, o separados por pocos registros innecesarios. Los cinco (5) bloques leen en el siguiente orden las medidas requeridas:

- Corrientes de línea
- Tensiones de línea y de fase
- Potencias (activa, reactiva y aparente) y factores de potencia
- Frecuencia
- Distorsión armónica total (THD).

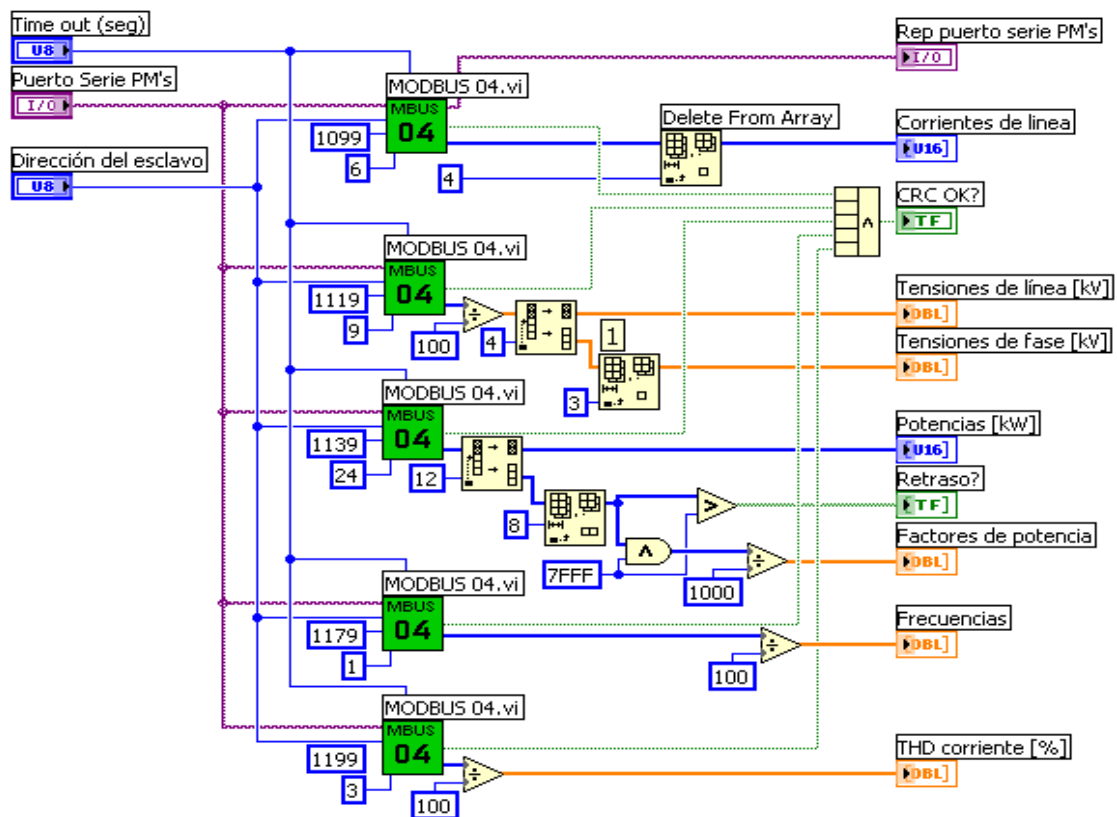


Figura 39: Programación para la lectura de todos los registros requeridos del PM800

Al bloque de la figura anterior ingresan el timeout, el puerto serie a usar y la dirección del esclavo; los cuales se envían como entradas a todos los bloques de la función 04. De acuerdo a la tabla del ANEXO B se colocan la dirección de inicio y la cantidad de registros que se leen en cada petición. Las salidas de este bloque corresponden a arreglos numéricos que contienen las mediciones. Para las corrientes de línea, se elimina el registro 1104d debido a que no contiene información. Debido a que las tensiones tanto de fase como de línea se leen con una sola petición, es necesario dividir el arreglo obtenido a partir del índice cuatro (4) (ver Figura 39, marcador 1) y posteriormente eliminar el registro 1127d ya que este no es válido para el tipo de red eléctrica usado; también es necesario aplicar un factor de división de cien (100) con el fin de que los valores sean expresados en kV. Esto debido a que en los registros del PM800 los valores de tensión se almacenan en unidades de Voltios pero diezmados<sup>7</sup>, ya que el rango de representación de un registro de 16 bits es de -32.767 hasta 32.767 y al estar 115.000 V fuera de este rango, el valor debe ponerse con un factor de diezmado de diez (10), esto es, 15.000V. Por tanto, al multiplicar por diez (10) y dividir entre mil (1000) para tener kV, se tiene el factor 10/1000, igual a 1/100.

El arreglo obtenido del tercer bloque también se divide en dos (2) partes, potencias y factores de potencia, y de este eliminan ocho (8) registros que son inutilizados. A cada elemento del arreglo del factor de potencia se le aplica una máscara *AND* con la cantidad 7FFFh, con el fin de eliminar el bit más significativo que corresponde al signo (“1” retraso y “0” adelanto) y obtener la magnitud de este<sup>7</sup>. También se pregunta si estos elementos son mayores al valor 7FFFh ya que esto indicaría que corresponden a un factor de potencia de retraso. Por último, el factor de potencia se divide entre mil (1000) ya que su rango de representación es de 0 a 1000 (10 bits del registro) con el fin de obtenerlo en el intervalo de 0 a 1.

---

<sup>7</sup> SCHNEIDER ELECTRIC. Manual de referencia, Central de medida PM810. 2005, p. 55, 73

Los elementos de la frecuencia y la distorsión armónica total también se dividen entre cien (100), tal como lo sugiere el fabricante.

Por último, se tienen la salida para el estado del CRC que se obtiene aplicando lógica *AND* entre el estado del CRC de las cinco (5) consultas hechas, y un otra que simplemente emite una réplica del puerto serie usado.

### **3.5. REGISTRO HISTÓRICO DE DATOS**

El registro histórico de datos en el computador se realiza con el fin de cumplir con una tarea que actualmente se hace de manera manual en la planta de Bosconia y que consiste en que cada hora un operario registra en una planilla los datos leídos de los analizadores de redes por parte de la subestación y los correspondientes a las variables involucradas en el bombeo. En esta sección se explica la forma en que se crea un archivo en el PC que incluye las medidas obtenidas desde los analizadores de redes a través de LabVIEW, mostrando la programación implementada para tal efecto.

Inicialmente es necesario definir la forma en que el usuario visualizará los datos almacenados. Para esto LabVIEW cuenta con diversos bloques que cumplen con tareas relacionadas con exportación o almacenamiento de varios tipos de datos, ya sean numéricos, caracteres, imágenes, etc. e incluso generación de reportes de tipo *html* y *xml*. Sin embargo, pensando en la comodidad y facilidad para el operario, se decide generar un reporte que se pueda visualizar por fuera de LabVIEW para que puedan ser estudiados y manipulados de manera cómoda. Las opciones que se presentan para este caso son la generación de documentos *html* y *xml*; ambos con posibilidad de abrirse en Excel o algún explorador de internet.

Para generar un reporte en LabVIEW se usan tres (3) tipos de bloques. El primero se usa para crear el reporte, definiendo su ubicación, nombre, tipo de archivo, y algunos parámetros de conversión; el otro bloque se encarga de incluir los datos que se requieren, y por ultimo otro de estos guarda el reporte generado en la

ubicación especificada inicialmente. En la Figura 40 se muestran las tres (3) funciones usadas para generar un reporte de *html*, con sus respectivas entradas y salidas. Igualmente existen otros tres de manera análoga para los archivos *xml*. El segundo bloque sirve específicamente para insertar una tabla en el reporte, aunque existen otros que insertan imágenes, texto, etc.

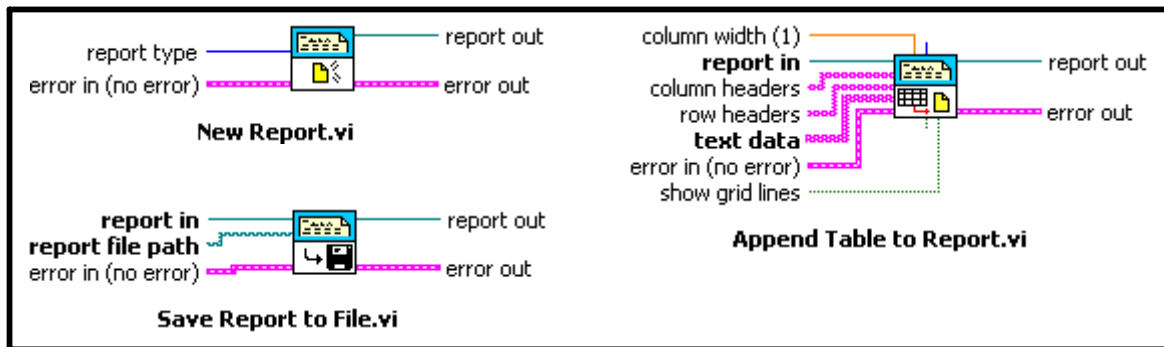


Figura 40: Bloques usados en LabVIEW para la generación de reportes en html

La filosofía de programación que se decide usar consiste en crear el archivo usando el bloque *New Report.vi* al comienzo de la ejecución de la aplicación principal. Posteriormente en cada iteración del ciclo del programa principal se insertan los nuevos datos que han llegado y se guardan en el archivo creado. Sin embargo, a partir de la segunda iteración, se hace necesario abrir el archivo creado antes de insertarle los nuevos datos, y aquí es donde se presentó la limitación: LabVIEW no tiene un bloque que abra un reporte que ha sido guardado previamente para poderlo modificar y volver a guardarlo, ni mucho menos permite modificar uno de los elementos que lleva este reporte (ejemplo: una tabla, una imagen).

Por lo anterior, se tomó la decisión de estudiar la estructura interna de los bloques que se presentan en la Figura 40, para crear otros bloques propios que al combinarlos con algunos que tiene LabVIEW para lectura de archivos se pueda lograr el resultado esperado.

Analizando los bloques anteriores de generación de reporte en formato *html*, se llega a la conclusión de que estos se encargan de ensamblar cadenas de

caracteres para construir un código de programación usando el lenguaje propio de ese formato.

Con base en lo anterior se construyen dos (2) bloques, que se explican en las siguientes subsecciones:

### **3.5.1. Creación del registro histórico**

Este bloque se construye como combinación de los subvi *New report.vi* y *Append Table to Report.vi*, ya que su función es crear el archivo de registro y configurarlo para que esté listo para ser escrito dentro del ciclo de ejecución del programa, es decir, este bloque se ejecuta al inicio de la aplicación y crea los encabezados de la tabla y le da la ubicación del archivo histórico.

Este subvi se puede dividir en dos (2) procesos. El primero que se encarga de crear el archivo, dándole la ubicación y el nombre, permitiendo al usuario decidir mediante una ventana de dialogo, si desea crear un archivo totalmente nuevo o continuar agregando datos a un archivo existente. Esta parte se muestra en la Figura 41 encerrada dentro de las líneas rojas discontinuas. El diagrama total corresponde al bloque de creación del registro histórico. Esta primera parte comienza con la operación del subvi *menú registro histórico.vi* el cual se encarga de producir un cuadro de dialogo como el de la Figura 42, en el que se le pregunta al usuario si desea crear un archivo nuevo o usar uno ya existente para continuar escribiendo al final de este. Posteriormente este bloque produce un numero (0 para la opción crear o 1 para la opción usar existente). La estructura case de la parte superior selecciona los parámetros adecuados que se deben poner en las entradas del bloque que crea el archivo (marcador 1 en la Figura 41).

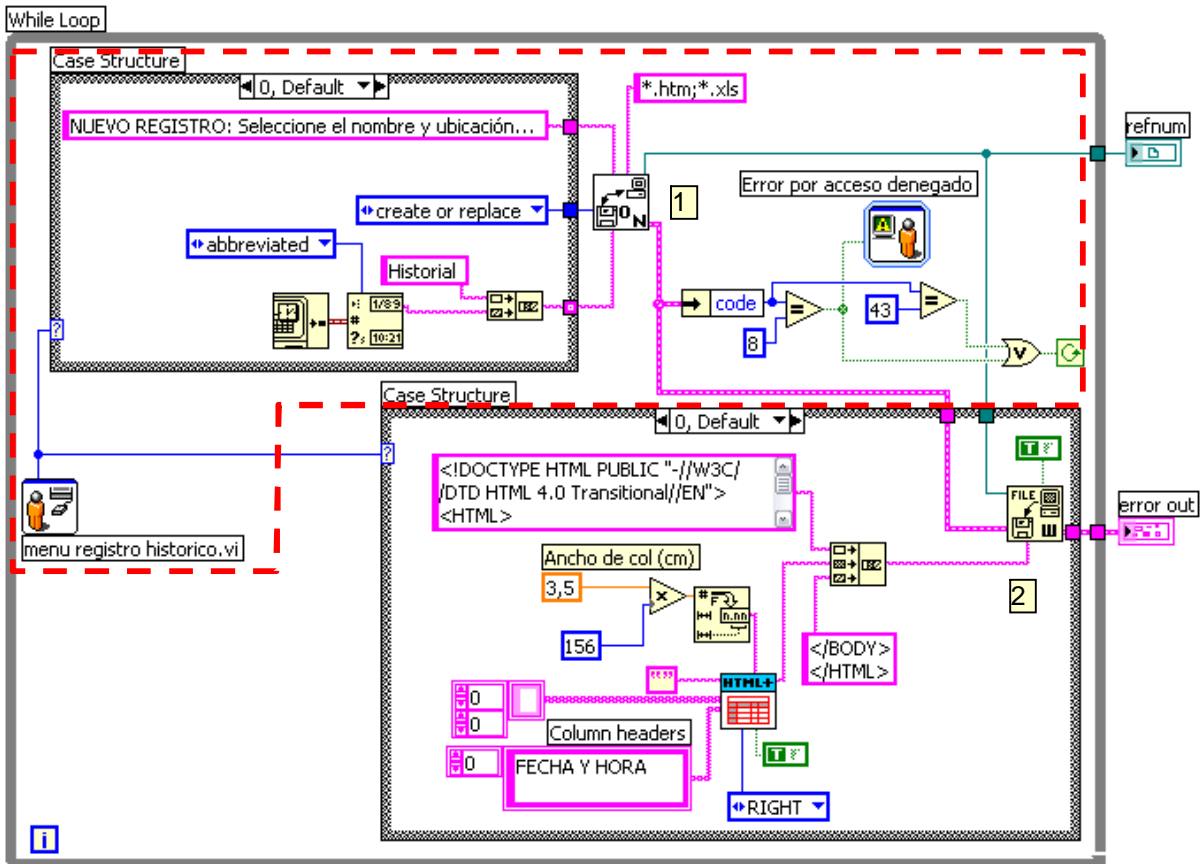


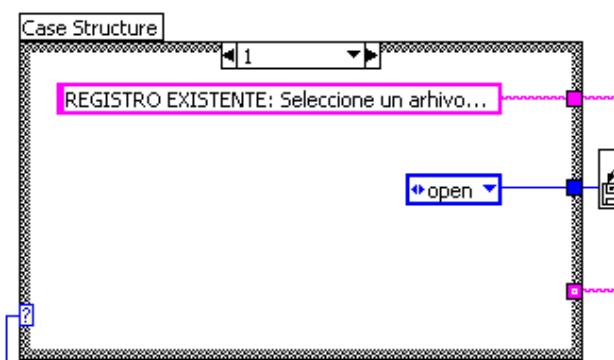
Figura 41: Diagrama de bloques de la función crear registro hist.vi



Figura 42: Cuadro de dialogo para el registro histórico de datos

Para el caso que se ve en la Figura 41 que es el de crear nuevo registro (opción 0), se configuran en orden descendente: titulo de la ventana de selección del

directorio, función que se está realizando (crear o reemplazar) y nombre del registro que se pone por defecto como sugerencia al usuario, que es la fecha actual que se lee del PC, anteponiéndole el texto “Historial”. El “caso 1” se muestra en la Figura 43, que es cuando se debe simplemente abrir un archivo existente para que pueda modificarse posteriormente en el bloque.



**Figura 43:** Parámetros para el caso de usar registro histórico existente

En este punto el archivo ha sido creado o abierto, dependiendo de lo que desee el operario, pero no tiene ningún contenido o no ha sido modificado aún. Las operaciones posteriores se encargan de detectar si se produjeron los códigos de error 08 o 43 que corresponden respectivamente a cuando el archivo seleccionado no se puede modificar, en cuyo caso se le avisa al usuario mediante un mensaje de error (“Error por acceso denegado”); o cuando el usuario oprimió cancelar en la ventana de selección del directorio. Ante la ocurrencia de ambos casos, este proceso se repetirá por medio de la estructura *while* externa, con el fin de darle al operario la posibilidad de repetir todo el proceso para que cambie el archivo o la tarea a realizar.

El segundo proceso que compone esta parte de creación del registro histórico consiste es la conformación del encabezado de la tabla de registro histórico (en caso de que la selección haya sido crear nuevo registro), poniendo los títulos de los encabezados de las columnas, definiendo a su vez su ancho, el centrado de las celdas, entre otros. Esto deja la tabla del registro histórico lista para empezar a insertarle filas de datos en los ciclos de la aplicación principal. Esta parte se lleva a

cabo en el caso “0” de la estructura case de la parte inferior de la Figura 41. Allí se usa un bloque de LabVIEW (HTML+) que se encarga de crear el código *html* para una tabla; en este caso, solo se le ingresa una fila correspondiente a los encabezados de las columnas. Puede verse que su salida se concatena con dos cadenas de caracteres que corresponden al encabezado y la terminación respectivamente, de un archivo *html*.

A manera de ejemplo, en la Figura 44 se ilustra el código *html* generado que se envía al bloque *Write file.vi* (ver marcador 2 en la Figura 41). En ese texto pueden observarse las tres cadenas de caracteres que se concatenan: el encabezado, el cuerpo de la tabla y el final, donde se cierra el documento. Allí simplemente se define una tabla con una sola fila, cuyas celdas tienen formato de encabezado. Al bloque *Write file.vi* se le dan como entradas la referencia del archivo que se está usando y que proviene del bloque que crea o abre el archivo, el contenido que se va a escribir en forma de cadena de caracteres, una entrada booleana que define si se tienen en cuenta los saltos de línea (EOF) o no, y la entrada de control de errores.

Por último, el aspecto de una porción de la tabla creada y visualizada en *Excel* se muestra en la Figura 45; recordando que esto se hace si el usuario decide crear nuevo archivo, ya que si la determinación es usar uno ya existente, dentro de la estructura case de la Figura 41 (caso “1”) no se realiza ninguna tarea y simplemente el archivo de registro se deja abierto y listo para modificarse posteriormente.

```

<!DOCTYPE HTML PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.0
Transitional//EN">
<HTML>
<!-- Constructed with LabVIEW Report Generation -->
<HEAD>
<TITLE></TITLE>
</HEAD>

<BODY>
<TABLE ALIGN=RIGHT WIDTH="546,00000" BORDER="1">
<TR>
<TH ALIGN=RIGHT>FECHA Y HORA</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>CORRIENTE
fase 1 [A]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>CORRIENTE
fase 2 [A]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>CORRIENTE
fase 3 [A]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>CORRIENTE
TRIFASICA PROM [A]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>TENSION
Línea 1-2 [kV]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>TENSION
Línea 2-3 [kV]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>TENSION
Línea 3-1 [kV]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>TENSION DE LÍNEA
PROM [kV]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>TENSION
fase 1-N [kV]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>TENSION
fase 2-N [kV]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>TENSION
fase 3-N [kV]</TH>
<TH ALIGN=RIGHT>TENSION L-N
PROM [kV]</TH>
</TR>

</TABLE>
</BODY>
</HTML>

```

Figura 44: Código html que se genera para le creación de un registro histórico.

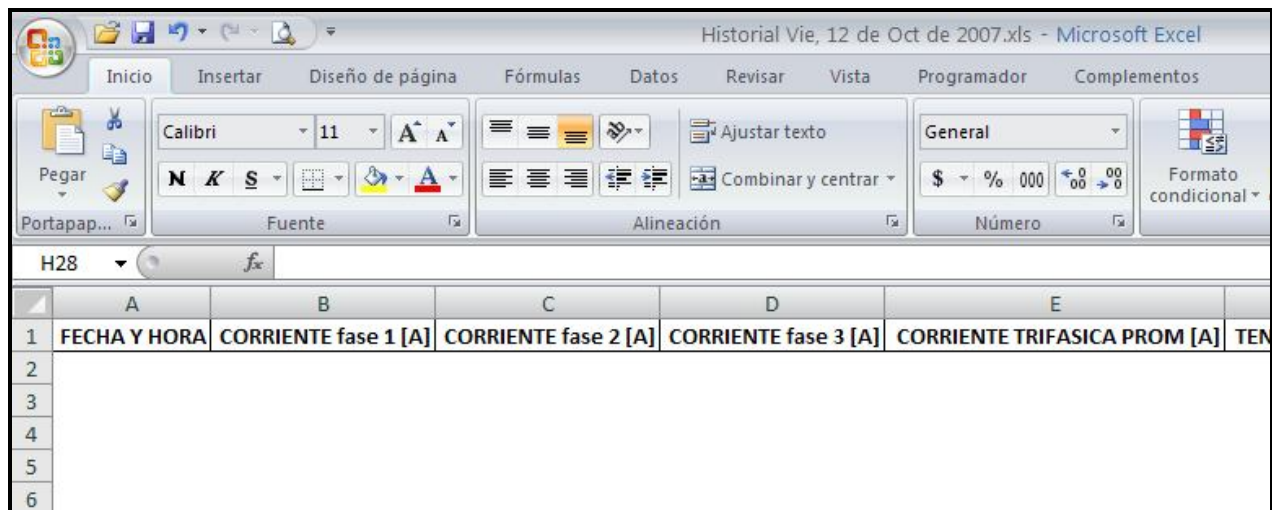


Figura 45: Visualización en Excel de la tabla creada



El resto de la fila, que contiene los datos numéricos de las medidas, se construye leyendo primero un arreglo de números que se tiene como entrada, y convirtiéndolos a un arreglo de caracteres numéricos. Posteriormente, este arreglo ingresa a la estructura *for* donde se toma cada uno de sus elementos y se les da formato de celda normal para después ponerlos nuevamente en un arreglo.

Al tener definidas la celda de encabezado de fila y el resto de la fila con los datos numéricos, estas dos se concadenan (marcador 2, Figura 46) formando una sola cadena de caracteres que representa en código *html*, las celdas de la fila que se va a insertar en la tabla de registro. Lo único faltante es darles a esas celdas formato de una fila integral, por medio de la función *HTML Report Table Row.vi*, en donde además se define el tipo de centrado de las celdas. En la Figura 47 se muestra el código *html* resultante de este bloque.

```
<TR ALI GN=RI GHT>  
<TH ALI GN=RI GHT>Vi ernes, 12 de Octubre de 2007 10: 21: 25 a. m. </TH>  
<TD>18, 00</TD>  
<TD>18, 00</TD>  
<TD>17, 00</TD>  
</TR>
```

**Figura 47:** Código html de la fila a insertar en el registro histórico

Para insertar la fila generada dentro de la tabla del registro histórico abierto, se ha usado una característica que posee el bloque *Write file.vi* que permite comenzar la modificación del archivo a partir de una posición definida por su entrada *pos offset*, con respecto a una posición inicial definida en otra entrada llamada *pos mode*. Al observar la estructura del código *html* de la Figura 44, se deduce que el texto generado en esta función se debe insertar después del comando de cierre de la última fila *</TR>* y antes del comando de cierre de la tabla *</TABLE>*. Esta idea se ilustra mejor en la Figura 48.

```

<!DOCTYPE HTML PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.0
Transitional//EN">
<HTML>
<!-- Constructed with LabVIEW Report Generation -->
<HEAD>
<TITLE></TITLE>
</HEAD>

<BODY>
<TABLE ALI GN=RI GHT WI DTH=" 546, 000000" BORDER=" 1">
<TR>
<TH ALI GN=RI GHT>FECHA Y HORA</TH>
<TH ALI GN=RI GHT>CORRI ENTE
fase 1 [A]</TH>
<TH ALI GN=RI GHT>CORRI ENTE
fase 2 [A]</TH>
.
.
.
</TR>

<TR>
" Cel das de l a fi l a"
</TR>
<TABLE>
</BODY>
</HTML>

```

Inicio y cuerpo de la primera fila (encabezados)

Cuerpo de otras filas (en caso de haberlas)

Fin de la última fila

Posición para comenzar a escribir la fila generada

Fin de la tabla

Figura 48: Mapa del código html del registro histórico a modificar.

La escritura debe comenzar en la línea indicada de la Figura 48. Esta posición corresponde a 26 caracteres contados desde el final del archivo, incluyendo los saltos de línea (EOL); por tanto, la entrada de referencia *pos mode* del bloque *Write File* debe apuntar al final, tal como se ve en la Figura 46 y el valor de *pos offset* debe ser -26 ya que la posición especificada está antes que la referencia. El valor de *pos offset* es fijo ya que el tramo final del archivo siempre es el mismo:

```

</TABLE>
</BODY>
</HTML>

```

Sin embargo, debido a que la función *Write file.vi* sobrescribe el contenido en vez de insertarlo, es necesario agregar nuevamente las tres últimas líneas de código que se pierden (ver marcador 3, Figura 46).

Finalmente, la salida de código *html* de la tabla concatenado con las tres (3) últimas líneas de cierre se envía al bloque *Write file.vi*, para de esta manera

finalizar el proceso de modificación del archivo de registro histórico. En la Figura 49 se muestra el aspecto de una porción la tabla después de haber insertado la primera fila de datos.

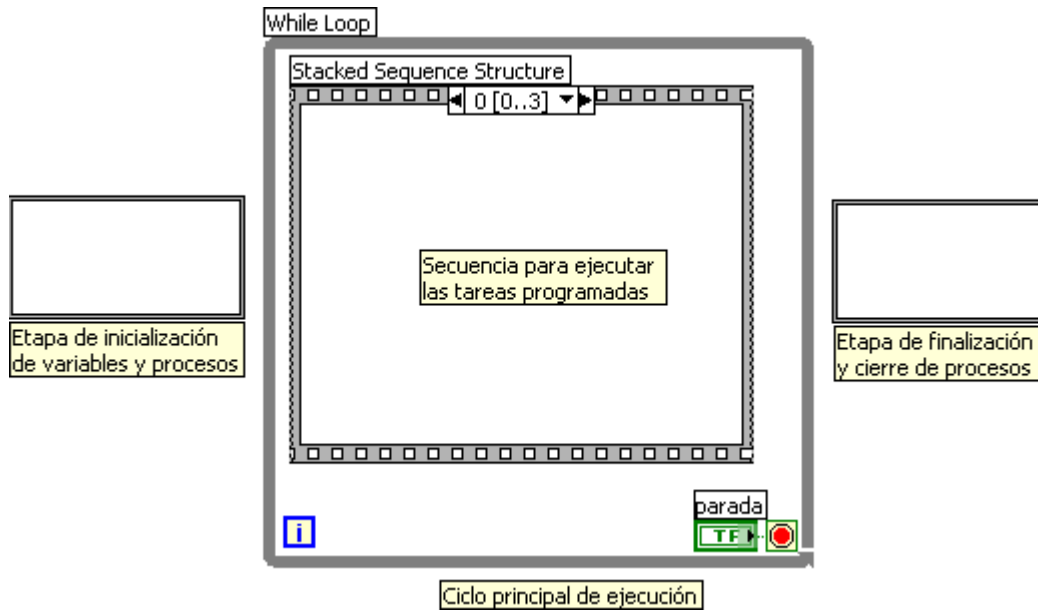
	A	B	C	D	E
1	FECHA Y HORA	CORRIENTE fase 1 [A]	CORRIENTE fase 2 [A]	CORRIENTE fase 3 [A]	CORRIENTE fase 4 [A]
2	Viernes, 12 de Octubre de 2007 10:43:43 a.m.	18	17	17	
3					
4					
5					
6					

Figura 49: Visualización en Excel de la tabla de historial, posterior a su modificación

### 3.6. APLICACIÓN PRINCIPAL

Se le llama aplicación principal al programa en LabVIEW (.vi) dentro del que está toda la programación, bloques y funciones descritas a lo largo de las secciones anteriores. Allí se encuentra el ciclo de ejecución principal, mencionado al principio de este capítulo y también se plasma el diseño de la interfaz grafica que ve el operario.

El ciclo principal ejecuta las tareas mostradas en la Figura 18 de manera secuencial y las repite indefinidamente hasta que el programa reciba la orden de parar. Lo anterior sugiere el uso de la estructura *sequence*, con sus *frames* conteniendo cada una de las tareas mencionadas, y un *while loop* encerrando esta secuencia para que haya la repetitividad deseada. Sin embargo, antes que el programa comience a ejecutar esta estructura *while* de manera indefinida, es necesario inicializar ciertas variables o procesos y de igual forma, al terminarlo se deben cerrar o finalizar estas mismas tareas. Todo lo anterior se presenta en el diagrama de la Figura 50.



**Figura 50:** Esquema de la programación usada para la aplicación principal

La configuración del puerto serie, así como la inicialización del registro de desplazamiento principal y la creación del registro histórico de datos, entre otros, son tareas que se realizan antes de entrar al *while loop* de la Figura 50. En la Figura 51a se muestran todas las inicializaciones que se hacen. En la parte inferior se observa el bloque *Crear registro hist.vi* explicado en la sección 3.5.1, la configuración del puerto serie se realiza a través del bloque *VISA Configure Serial Port.vi* de LabVIEW, cuyas entradas y salidas se muestran en la Figura 51b, a él ingresan desde el panel frontal: nombre del puerto (resource name), timeout, rata de baudios y el uso de carácter de terminación, el resto de parámetros no se incluyen ya que al dejarlos sin definir la función asume los valores por defecto que también se ven en paréntesis en la Figura 51b.

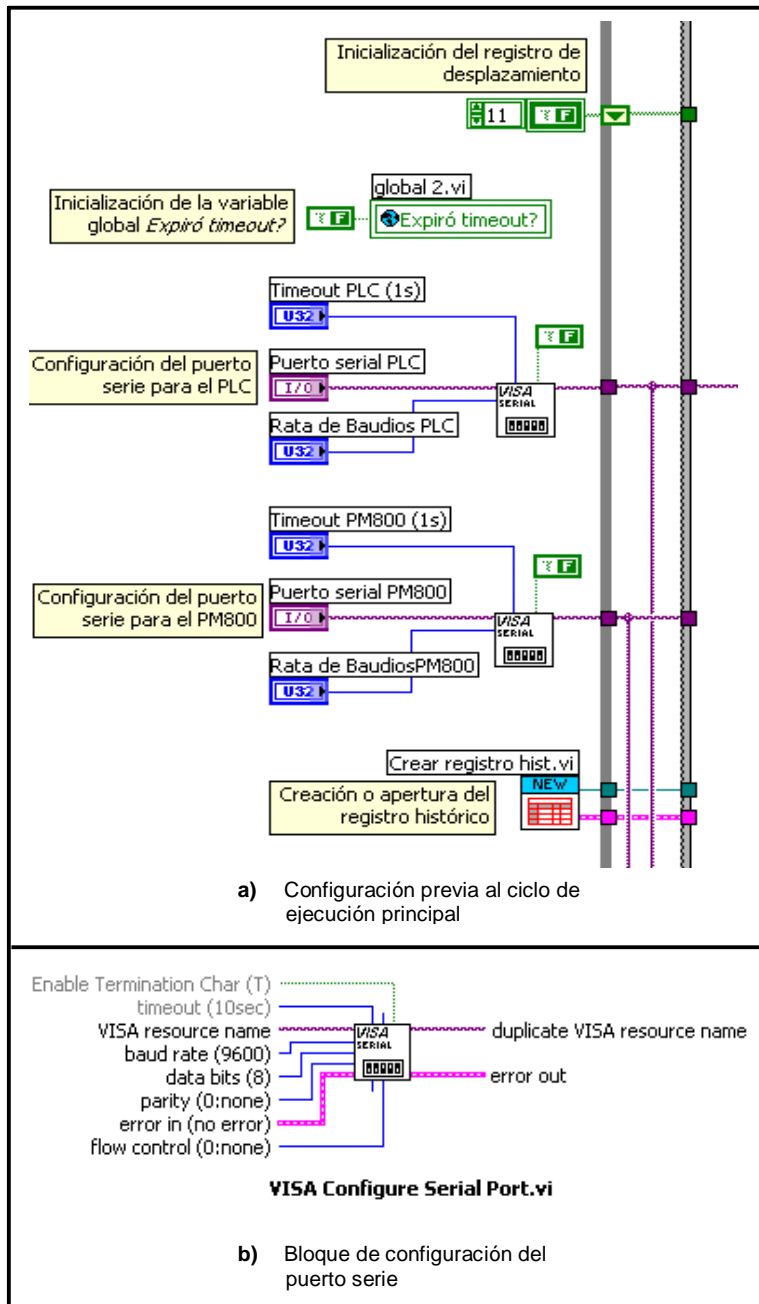


Figura 51: Etapa de inicialización de procesos dentro de la aplicación principal

Posterior a esta parte de configuración, el programa entra a la estructura *while* principal. Dentro de esta, prácticamente se encuentra sólo la estructura *sequence* de la Figura 50, exceptuando unas funciones que se encargan del panel frontal, que se explica posteriormente.

La estructura *sequence* que se ejecuta en el ciclo principal tiene cuatro (4) *frames* que se describen a continuación. Cabe aclarar que esta secuencia fue construida con base en el orden dado en la Figura 18:

- **FRAME 0: Allí se ejecuta la lectura de las entradas digitales del PLC** mediante el bloque de *MODBUS 02.vi* (leer estado de entradas), explicado en la sección 3.1. Estas entradas se asignan a indicadores booleanos para ser mostrados en el panel frontal. Debido al gran tamaño en pantalla del contenido de este *frame*, en la Figura 52 se muestra sólo la parte la lectura MODBUS. Allí se observa el bloque mencionado. Sus entradas corresponden al timeout definido en la parte de inicialización (usando una variable local para evitar “cableado”), la dirección donde comienzan a almacenarse las entradas digitales en el PLC (4000d) y la cantidad de entradas a leer que son cuarenta y un (41). Como salidas se tienen la trama de respuesta, el código de excepción y el estado de CRC, todos para ser enviados al panel frontal; y por supuesto el estado de las entradas leídas, en forma de arreglo booleano. A este último, se le borran los últimos siete (7) datos ya que la cantidad de entradas leídas no es un múltiplo de ocho (8). Posteriormente se desagrupa para poder mostrar las entradas de manera individual en el panel frontal y usarlas en otros *frames*.

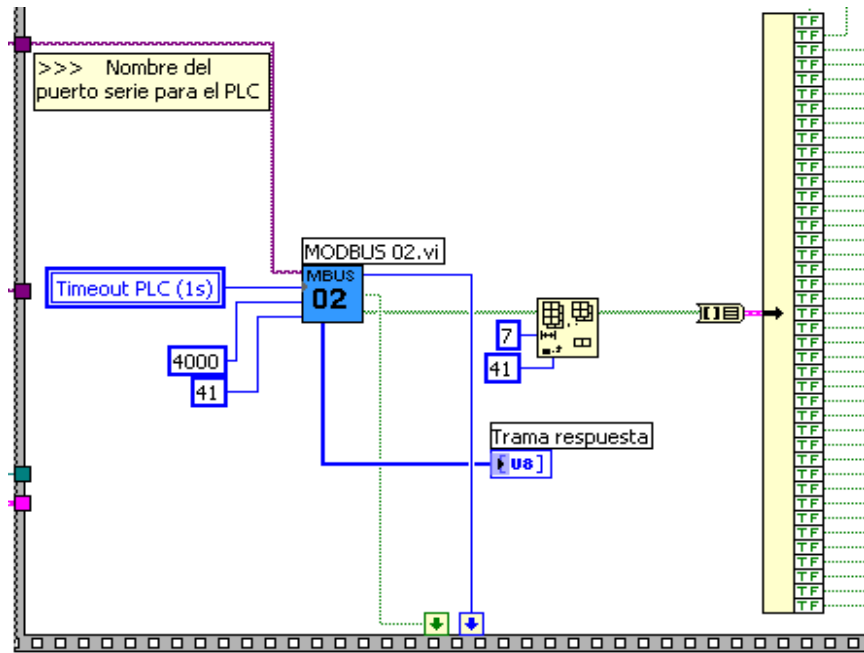


Figura 52: Lectura de las entradas del PLC usando el bloque MODBUS 02.vi

En la Figura 53 se muestra una porción del envío del estado de las entradas a indicadores para el panel frontal, realizándose de igual forma para el resto de las entradas. Esto se hace posteriormente a la programación de la Figura 52.

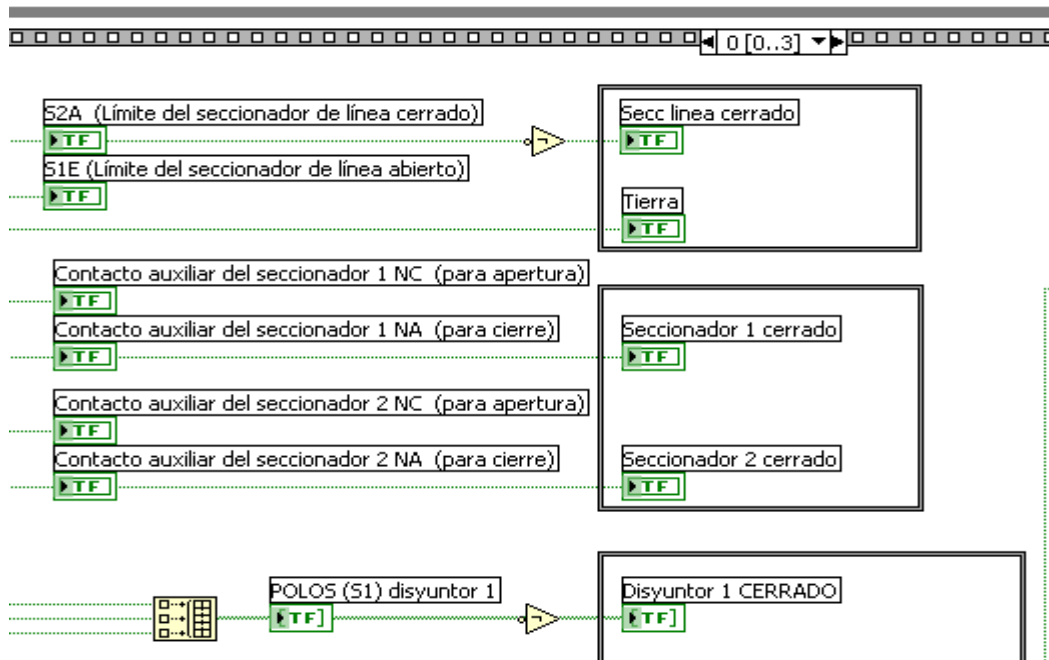
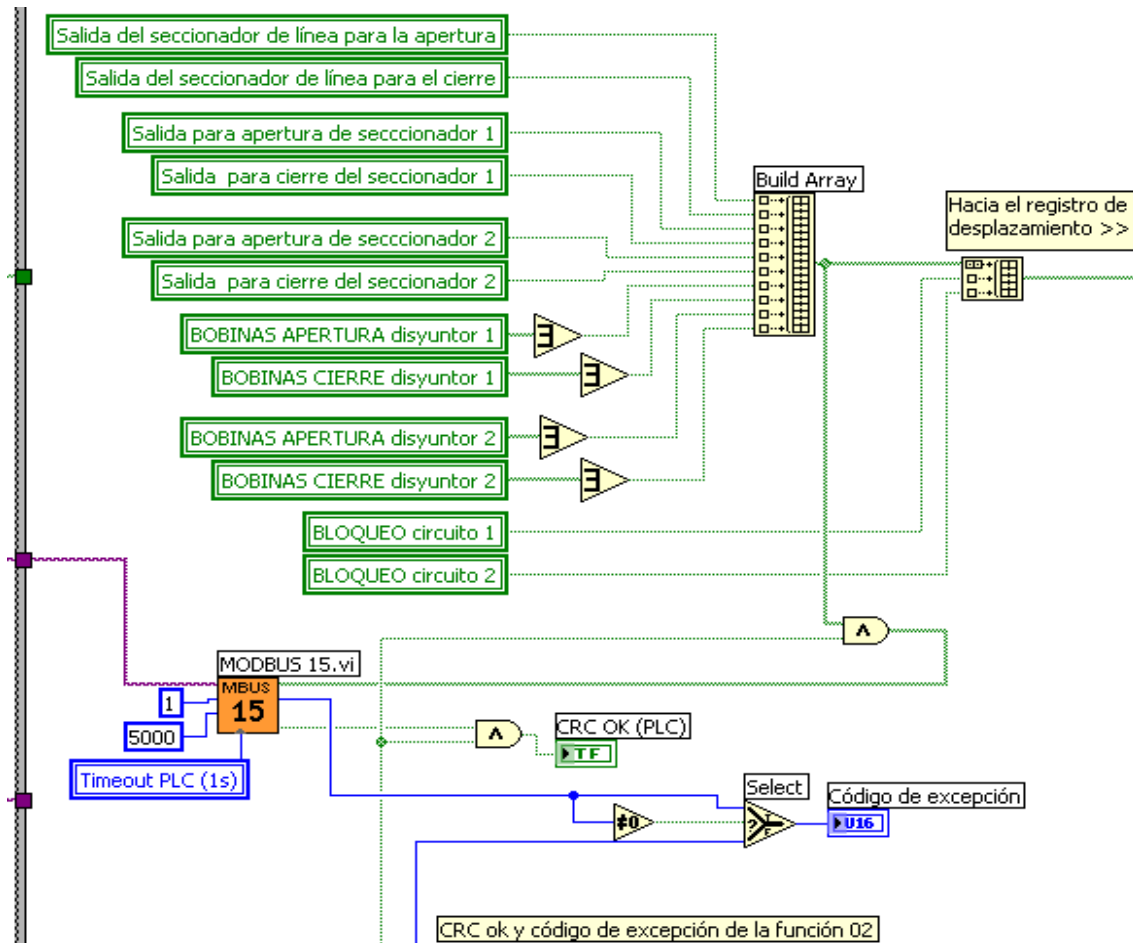


Figura 53: Envío del estado de las entradas del PLC a indicadores para el panel frontal

- **FRAME 1: Se realiza la lógica de funcionamiento de la subestación eléctrica**, usando los bloques presentados en la sección 3.2, partiendo de las entradas leídas en el *frame* anterior. Allí se le suministran las entradas que requieran todos los bloques diseñados y posteriormente se producen todas las salidas para control interno y que irán al PLC. Se usan siete (7) bloques ya que las tareas que se realizan en este frame son las siguientes: a) Mando del seccionador de línea, b) Mando del seccionador de potencia 1, c) Mando del seccionador de potencia 2, d) Apertura del disyuntor de potencia 1, e) Cierre del disyuntor de potencia 1, f) Apertura del disyuntor de potencia 2 y g) Cierre del disyuntor de potencia 2.

En la Figura 54 se muestra la conexión hecha para la apertura del disyuntor 1, presentada en la sección 3.2.3.2. Los demás bloques se conectan de una forma similar. La conexión de color rosado que se ve allí proviene del registro de desplazamiento ubicado en el *while loop* principal, usado para guardar el estado de las salidas de cada bloque y realimentarlos en la siguiente iteración. (El funcionamiento de este registro de desplazamiento se explica en la sección 3.2.1).



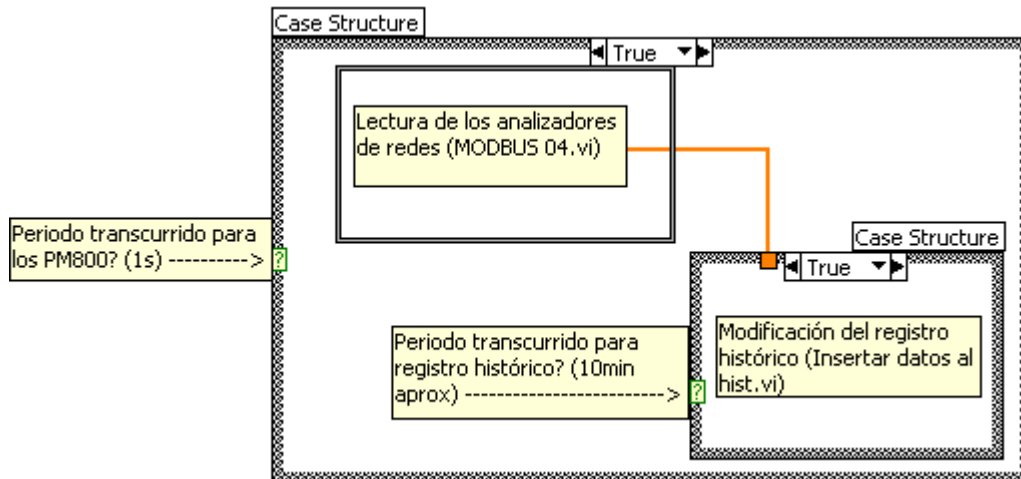


**Figura 55:** Uso del subvi MODBUS 15.vi y construcción del arreglo para el registro de desplazamiento

Al bloque *MODBUS 15.vi* de la figura anterior ingresan: la dirección del esclavo, la dirección donde comienzan las bobinas del PLC (5000d), el timeout y desde luego, el arreglo booleano que contiene el estado de las salidas a escribir. Como salidas se obtienen el estado del CRC y el código de excepción en caso de que la respuesta sea un error. El indicador *CRC OK (PLC)* se obtiene haciendo *AND* entre los estados del CRC del proceso de lectura y escritura sobre el PLC, con el fin de mostrar que la comunicación conjunta (lectura – escritura) es correcta, mientras que el código de excepción que se muestra se selecciona dependiendo de cuál de los dos es distinto de cero (0).

Por último, al arreglo que se envía al PLC se le agrega el estado de las variables de bloqueo de los circuitos 1 y 2, para posteriormente ser almacenados en el registro de desplazamiento.

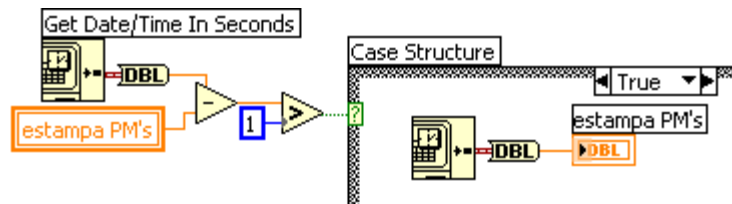
- **FRAME 3: Lectura periódica de los analizadores de redes y registro histórico de datos** usando el bloque *Lectura PM800.vi*, explicado en la sección 3.4 para la lectura de los registros de los analizadores de redes; y el bloque *Insertar datos al hist.vi* para actualizar el registro histórico creado o abierto previamente, agregando en él los datos leídos. Estas operaciones no se deben realizar cada vez que el programa principal ejecuta un ciclo, ya que los analizadores de redes solo actualizan sus medidas cada un (1) segundo y el registro histórico de datos no es oportuno hacerlo en intervalos de tiempos semejantes al periodo del ciclo principal. Por tanto, estas tareas se anidan dentro de estructuras *case*, colocando en el exterior la que requiera mayor frecuencia de uso y adentro la operación que tiene un mayor periodo de ejecución. En la Figura 56 se ilustra esta idea.



**Figura 56:** Esquema de la programación en LabVIEW para lectura de los PM800 y registro histórico

Los condicionantes para cada estructura *case* de la figura anterior se construyen basándose en bloques de lectura del tiempo y comparación de valores. En la Figura 57 se muestra la programación del condicionante que decide el momento de leer los analizadores de redes. El bloque *Get Date/Time*

*In Seconds* de LabVIEW obtiene la fecha actual en segundos. A esta se le resta el valor de la variable local *estampa PM's*, que contiene la fecha de la última consulta hecha a los PM800; obteniendo así el tiempo transcurrido desde la última lectura hecha. Por tanto, si este valor es mayor que uno (1) significa que ya es oportuno hacer una nueva lectura, ingresando al caso *true* de la estructura *case*, donde se realiza todo lo concerniente a este proceso y a su vez, el valor de *estampa PM's* se actualiza con el valor de fecha y hora actual. La programación del condicionante del *case* interno correspondiente a la modificación del registro histórico, es similar a la de la Figura 57, pero usando obviamente otra variable local y un tiempo de comparación mucho mas grande.

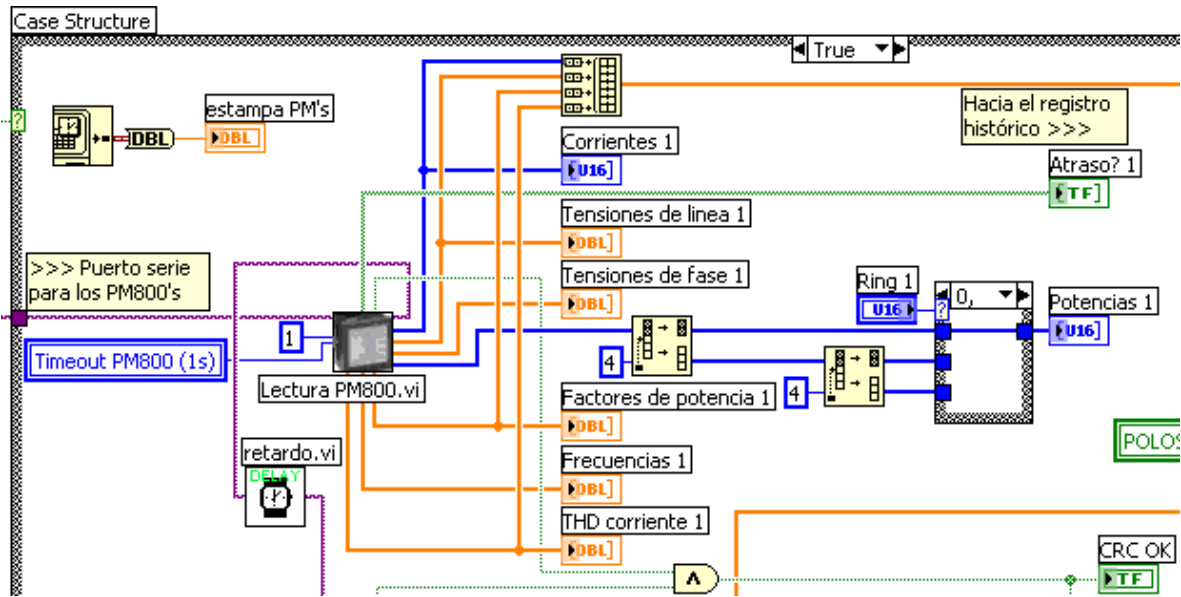


**Figura 57:** Programación del condicionante para la lectura de los analizadores de redes

Ahora, la lectura de los analizadores de redes realizada dentro del caso *true* del *case* externo, se lleva a cabo leyendo primero el analizador del circuito No. 1 de la subestación eléctrica, luego se espera un pequeño intervalo de tiempo y se procede con la lectura del PM800 del circuito No. 2. Cabe anotar que a estos dispositivos se les programa previamente con los mismos parámetros de comunicación: rata de baudios, tipo de paridad y modo de transmisión, variando únicamente la dirección de cada uno de ellos.

La Figura 58 presenta la programación para la lectura de los registros del PM800 del circuito 1 usando el bloque *Lectura PM800.vi*, de donde se sacan indicadores de cada uno de sus arreglos, correspondientes a las medidas de la red eléctrica. El bloque *retardo.vi* se encarga de esperar un tiempo de 40ms antes de iniciar la comunicación con el otro analizador de redes. Este retardo

se selecciona de acuerdo a las pruebas realizadas que se explican en el siguiente capítulo.



**Figura 58:** Programación para la comunicación con los analizadores de redes usando el subVI MODBUS 04.vi

El case pequeño del lado derecho de la figura anterior sirve para multiplexar las tres potencias leídas (activa, reactiva y aparente), las cuales son separadas previamente en arreglos de cuatro (4) elementos cada uno, con el fin de que se vean en el mismo indicador en el panel frontal. La selección de la potencia a mostrar depende de un control de anillo, el cual produce un valor numérico dependiendo de la selección que haga el operario.

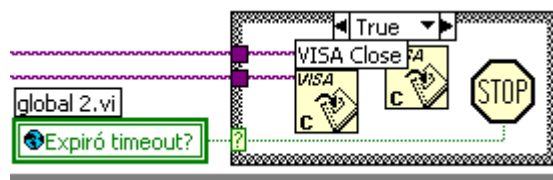
Por último, los arreglos de las corrientes, tensiones de línea, factores de potencia y THD, se vuelven a concatenar en un solo arreglo, para ser procesados por la parte de modificación del registro histórico. La compuerta *AND* se aplica al estado del CRC de ambos analizadores de redes para mostrar el estado de la comunicación en el panel frontal. Lo anterior se realiza de igual forma para la lectura del otro analizador de redes, aclarando que para su comunicación se debe usar la dirección de esclavo 02.



Ya en la estructura *case* se elimina el tercer dato del arreglo ingresado, el cual corresponde a la corriente del neutro que es cero (0), ya que por ser un sistema de potencia de conexión *delta*, no tiene neutro. El resultado se agrega registro histórico determinado al inicio mediante el bloque *Insertar datos al hist.vi* explicado en la sección 3.5.2 y por último se actualiza la variable local *estampa histórico* con el valor actual de la fecha y hora en segundos.

De esta manera se terminan de ejecutar las cuatro (4) las tareas planteadas inicialmente al principio de este capítulo.

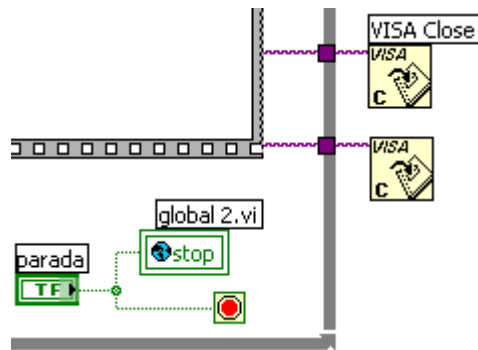
Fuera de la estructura *case* explicada anteriormente pero aún dentro del *while* principal, se realiza un proceso para manejar algunos aspectos de la interfaz grafica, los cuales se explican en la siguiente sección. Además se realiza una operación que detiene la ejecución de la aplicación automáticamente y cierra los puertos de comunicación cuando el timeout ha expirado. La programación para esto, se muestra en la Figura 60; la variable global *Expiró timeout?* que se activa en los bloques de comunicación MODBUS ante la no respuesta de los esclavos, permite el acceso al caso *True* de la estructura *case* y generar una señal de parada automática y cerrar las comunicaciones (bloque *VISA Close*) establecidas para el PLC y los PM800 usando.



**Figura 60:** Operación realizada en caso de que el timeout haya expirado

Cuando el operario necesita parar el programa, lo hace a través de un botón para este efecto ubicado en el panel frontal llamado *parada*. En la Figura 61 se muestra lo concerniente a la detención manual de la ejecución. El control *parada* activa la variable global *stop* que como se vió en la sección 3.2, está presente en la lógica de funcionamiento de todos los equipos de la subestación eléctrica, haciendo lógica *AND* con todas las salidas de actuación. Lo anterior es con el fin de que

antes parar el programa, en la última iteración se desactiven estas salidas para evitar que estas queden encendidas sin ningún tipo de control. Posteriormente la estructura *while* se finaliza y se ejecutan los bloques *VISA Close* que cierran los puertos de comunicación y dan por terminada la ejecución de la aplicación.



**Figura 61:** Programación para la detención manual de la aplicación principal

### 3.7. PANEL FRONTAL

Para el diseño del panel frontal se parte de algunas consignas para su buen desempeño. Este debe permitir al operario realizar las operaciones de manera intuitiva, guiándose por un panel gráfico que no esté saturado de textos y que le presente la información de una manera ordenada y simple, pero que a su vez tenga a la mano toda la información que requiera. También conviene darle información al operario a través de cuadros de dialogo y ventanas, acerca de los errores ocurridos y sus posibles causas; o para los requerimientos de datos.

De acuerdo a lo anterior, el panel frontal diseñado presenta un esquema de la subestación<sup>8</sup>, tal como se muestra en la Figura 62. Los botones azules de la izquierda dan acceso al monitoreo y mando del estado de cada uno de los equipos de corte y de las mediciones eléctricas; mediante la aparición de ventanas. El panel allí mostrado es el que por defecto se ve en condiciones normales de operación de la aplicación.

<sup>8</sup> amb S.A. E.S.P. Manual operativo del bombeo de Bosconia Volumen I. Bucaramanga, p. 43

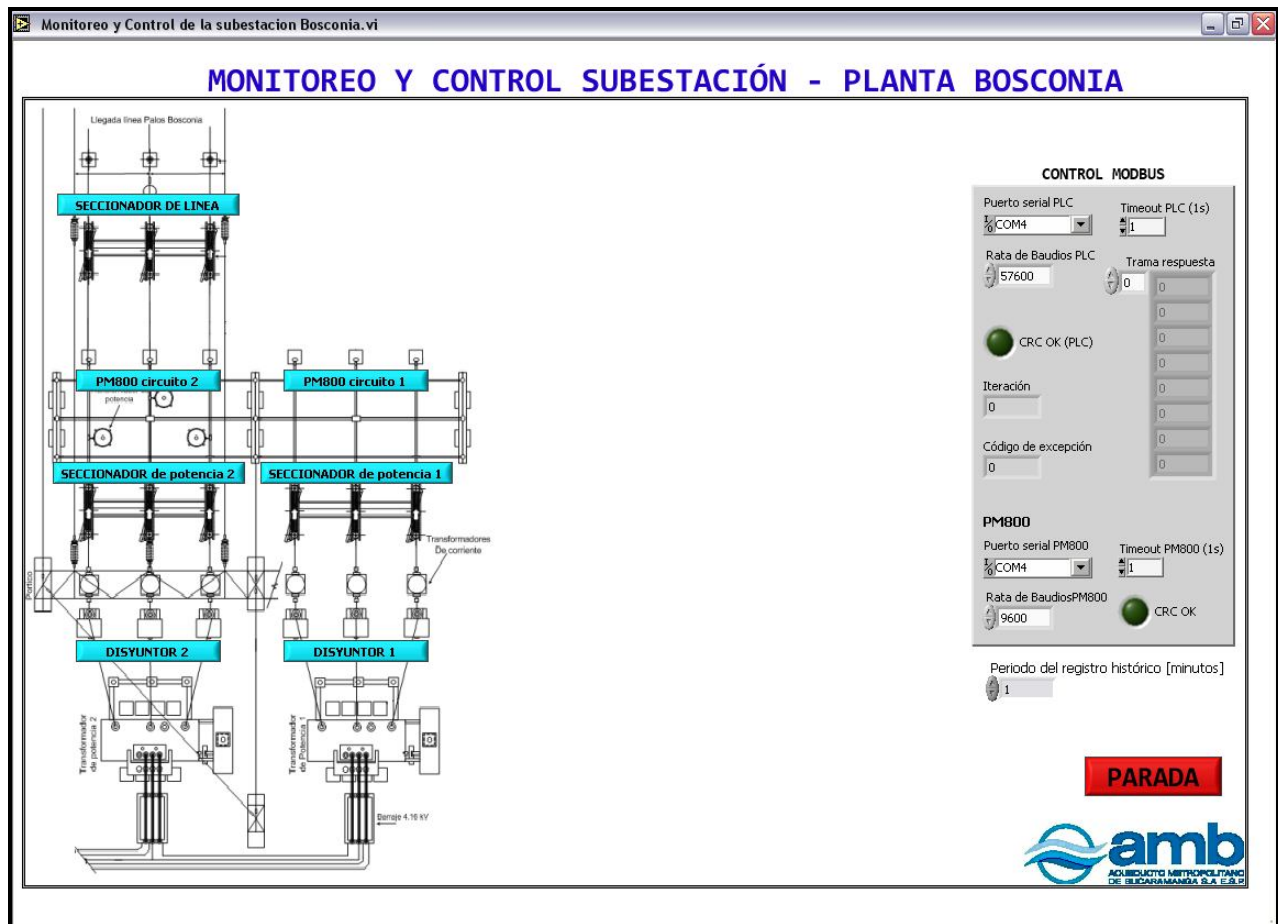


Figura 62: Panel frontal de la aplicación desarrollada

El espacio en blanco de la parte media de la pantalla está reservado para las ventanas que aparecen al dar click sobre cualquiera de los botones azules de la izquierda. Al lado derecho está la zona de comunicación MODBUS, donde el operario antes de ejecutar la aplicación debe configurar el nombre del puerto serie, la tasa de baudios y el timeout; tanto para el enlace con el PLC como para la red MODBUS de los analizadores de redes. Además, se pueden monitorear los aspectos más relevantes de la comunicación como son el estado del CRC, la trama de respuesta obtenida de la función 02 y el código de excepción. Por último, se tiene un indicador de las iteraciones acumuladas por el programa, un control para ingresar la frecuencia en minutos de la actualización del registro histórico y el botón *PARADA* que detiene la ejecución del programa.

A lo largo del desarrollo que se explica en el capítulo tres (3), se asoman ya algunos aspectos relacionados con la interfaz gráfica como es el uso de cuadros de dialogo para dar o pedir información al operario, el manejo de mensajes de error, entre otros.

Cuando el operario desea ver las medidas provenientes de los analizadores de redes, o el estado algún equipo de corte de la subestación eléctrica para operarlo, da click sobre alguno de los botones del lado izquierdo del panel. En ese momento una ventana aparece sobre el panel frontal, conteniendo toda la información relacionada con la operación del equipo como es, su posición (abierto o cerrado), estado de las salidas para actuación, controles para realizar alguna acción requerida y el estado de otras variables específicas de cada uno (alarmas, mantenimiento – servicio,etc.).

En la Figura 63 se muestra el panel frontal como ejemplo, cuando se activa el botón del disyuntor de potencia 2. Este botón automáticamente se torna color gris indicando que se encuentra activado. El área gris emergente donde aparecen agrupados todos los controles e indicadores en realidad es un elemento llamado *TabControl*, que tiene la característica de albergar en pestañas independientes, varios controles y/o indicadores sin importar su tipo (numéricos, caracteres, booleanos etc).

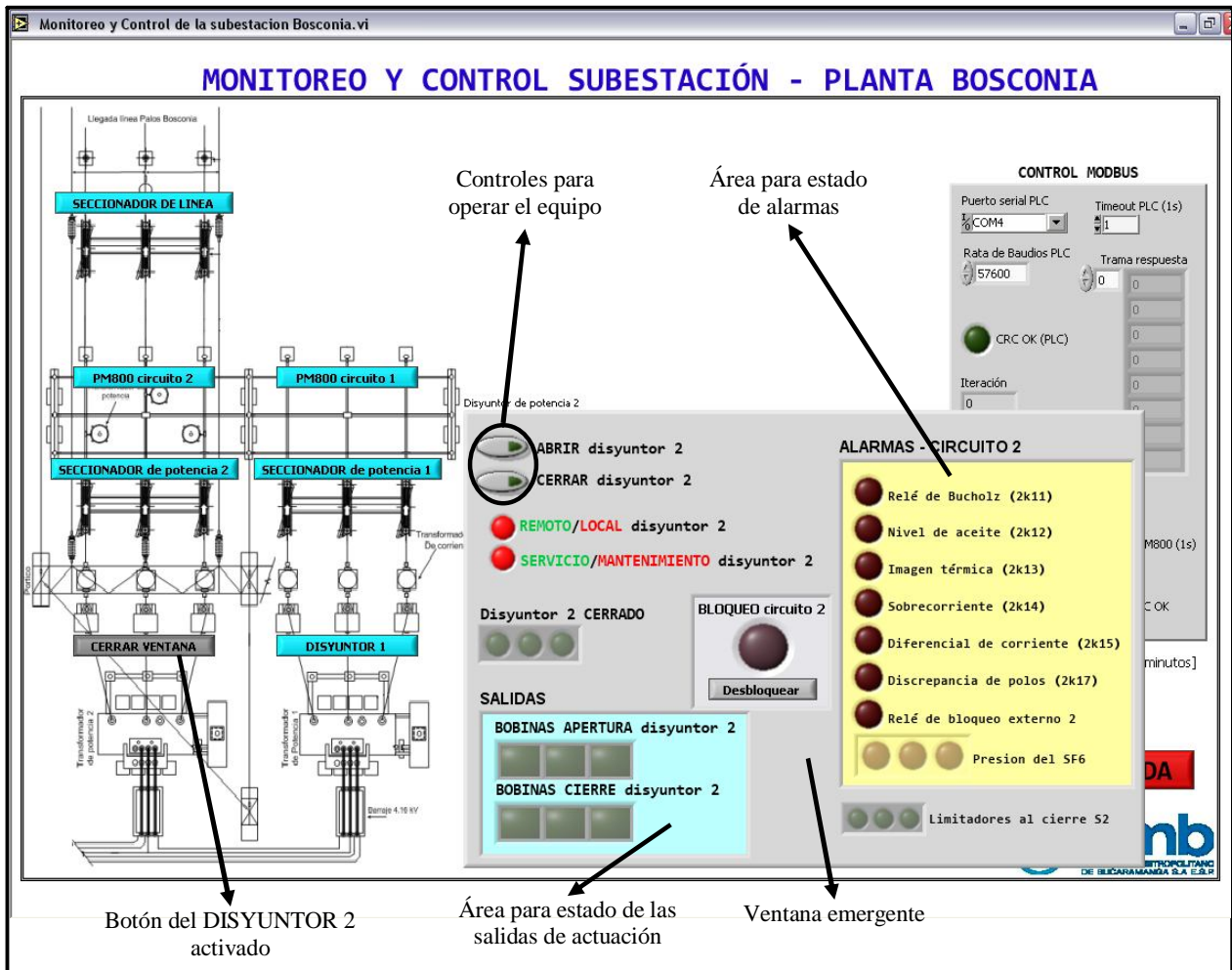






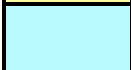
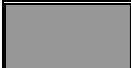



Figura 63: Aspecto del panel frontal con la visualización del disyuntor 2

Otro aspecto importante para tener en cuenta para el diseño de la interfaz gráfica es el manejo de un código de colores y formas que permitan al usuario relacionarlos con la tarea o tipo de variable que se está manejando. En la Tabla 3 está el código de colores usado, basado en las recomendaciones de la norma técnica ISA –S5<sup>9</sup>, realizando ciertos acondicionamientos.

<sup>9</sup> [ISA THE INSTRUMENTATION, SYSTEMS AND AUTOMATION SOCIETY. Graphic Symbols for process displays. 1986, p. 12 – 13]

COLOR	SIGNIFICADO	USOS
	Operación segura, encendido	Equipo de corte cerrado, en operación. Variables informativas o salida activadas
	Apagado o desconectado	Equipo de corte abierto. Variables informativas o salidas desactivadas
	Peligro, inoperatividad	Alarmas activadas. Equipo en mantenimiento o inoperable. Parada
	No peligro	Alarmas desactivadas
	Acceso	Botones de acceso a ventanas de control
	Agrupación de alarmas	Zona de ubicación de las alarmas
	Agrupación de salidas	Zona de ubicación de las salidas
	Botón presionado	Botones de acceso y control
	Ausencia de información	Fondo de la interfaz

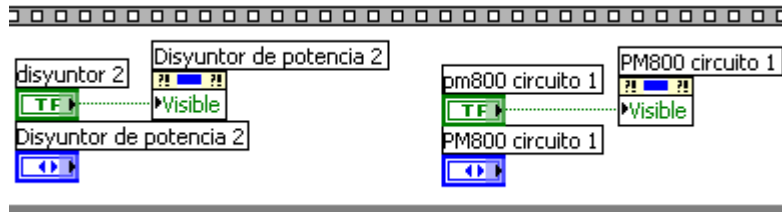
**Tabla 3:** Código de colores usado para el diseño de la interfaz gráfica

La forma y/o el tipo de controles e indicadores también se usan con un patrón específico. Por ejemplo, los elementos encerrados con un círculo en la Figura 63, para cualquier equipo, representan un control para realizar mando sobre este. Los indicadores del estado de las entradas provenientes del PLC, siempre son de forma circular, mientras que los que representan al estado de las salidas de actuación son rectangulares.

La programación necesaria para lograr el funcionamiento del panel frontal a modo de ventanas emergentes, para acceder a algún equipo de la subestación eléctrica, se explica a continuación.

Para conseguir que las variables de un equipo determinado de la subestación sean visibles por medio de un único botón de acceso, la propiedad de visibilidad del contenedor que las alberga (*Tab Control*), debe controlarse con el estado de ese botón. En la Figura 64 se muestra esta programación para la visibilidad de los contenedores del disyuntor 2 y el analizador de redes del circuito 1. El control de color azul es el *Tab Control*. El control booleano es el botón de acceso (botón azul

de lado izquierdo del panel frontal) del respectivo equipo de la subestación, el cual se conecta al nodo de propiedad de visibilidad del *Tab Control*. De esta manera cuando el pulsador de acceso se activa, hace que el contenedor sea visible junto con todo lo que se ha colocado dentro de él.



**Figura 64:** Control de la visibilidad de los contenedores de las variables de los equipos de la subestación

De esta misma forma se ocultan el resto de contenedores de los demás equipos de patio y de medición de la red.

## **4. PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS**

Para probar el funcionamiento y desempeño de la aplicación diseñada y del hardware escogido, se realizaron una serie de pruebas parciales y totales. Estas permitieron detectar falencias y errores que se corrigieron de manera satisfactoria, además al hacer un seguimiento detallado de la ejecución del programa total y de sus bloques se pudo optimizar la programación, con el fin de hacerla más eficiente. De esta manera se logra el mejor resultado, que es el que se ha plasmado en los anteriores capítulos.

En este capítulo se explican la metodología para llevar a cabo estas pruebas y los resultados obtenidos en estas. Inicialmente se documenta acerca de las pruebas individuales de cada subvi que se realizaron inicialmente y las de funcionamiento conjunto; posteriormente se presenta la prueba total realizada sobre la subestación eléctrica.

### **4.1. PRUEBAS PARCIALES SIN MANDO DE LA SUBESTACIÓN**

Inicialmente, cuando la aplicación comienza con el desarrollo de los bloques de LabVIEW por separado, estos se van probando en cada una de las tareas para las que fueron diseñados. Por ejemplo, el bloque de la función MODBUS 02 para leer el estado de las entradas se prueba individualmente haciendo comunicación con el PLC a diferentes tasas de Baudios, esperando como resultado en todas, recibir respuesta por parte del PLC con los datos esperados. Los bloques de la lógica de funcionamiento de la subestación se probaron individualmente dentro de una aplicación semejante a la principal definitiva, pero simulando las entradas y salidas, en vez de hacer algún tipo de comunicación con los equipos de interfaz; allí esperando simplemente que la lógica resultante coincida con la lógica cableada real estudiada de los planos eléctricos, y que el registro de desplazamiento principal para guardar el estado actual de las salidas funcione correctamente.

Otra prueba que se realiza es la del funcionamiento de la red MODBUS conformada por el computador y los dos analizadores de redes. Para esto, inicialmente se prueba la comunicación con un cada analizador por separado usando el bloque MODBUS para la lectura de los registros del esclavo, con el fin de verificar que estos respondan según lo esperado. Al comenzar esta prueba se observó que el PM800 respondía con algunos caracteres pero no de la forma expresada en la documentación examinada; por tanto, debido a la ausencia de información en la documentación suministrada por el fabricante, fué necesario descifrar el mensaje respuesta para después rediseñar el subvi de acuerdo a los resultados.

Con estas pruebas individuales, se corrigen errores propios de la programación de cada subvi, o errores de concepto con relación a la forma en que se espera que funcione LabVIEW. Todo esto sin que los bloques individuales interactúen con otros.

Posteriormente, se van reuniendo mas bloques en una misma prueba para ir aproximándose al comportamiento definitivo, pero de igual manera sin usar la subestación para monitorearla y controlarla. Esto con el fin de observar que los bloques interactúen correctamente y a la vez comenzar a construir la aplicación principal. También para darse cuenta de lo que debería hacer el programa ante la ocurrencia de errores o acontecimientos anormales como es la expiración del timeout, CRC no correcto, etc. y de esta manera agregar la programación adecuada que permita eliminar comportamientos erróneos. Por ejemplo, la inclusión en los bloques de las funciones MODBUS de la limpieza del puerto serie, o el manejo de mensajes de error a través de ventanas, son modificaciones que se incluyeron después de estas pruebas.

En la parte de la red MODBUS se configura la red con los tres equipos involucrados y se procede a probarla comunicándose primero con uno de los analizadores de redes y seguidamente con el otro. Esta prueba resulta ser útil para encontrar la necesidad de insertar un retardo o tiempo de espera entre las comunicaciones con cada uno de los dispositivos esclavos, ya que sin este retardo

se obtienen errores de recepción. El valor de este retardo se determina mediante prueba y error, encontrando el límite y agregándole 5 ms. También sirve para corroborar los factores de diezmado presente en algunos registros de medidas.

#### **4.2. PRUEBAS DEFINITIVAS EN VIVO**

Debido a la continuidad en el bombeo de agua que presenta la planta Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, es difícil parar las bombas para poder realizar pruebas de mando sobre los equipos de corte. Por tal razón, la prueba del mando solo se pudo hacer una sola vez, durante un lapso de treinta (30) minutos, con previo aviso a la Electrificadora de Santander y a la oficina principal del acueducto.

Otro aspecto a aclarar es que esta prueba se hizo para el monitoreo y mando de los elementos del circuito No. 1 de la subestación eléctrica; esto es, sobre el seccionador de potencia 1, el disyuntor 1 y monitoreando ambos analizadores de redes. Esto, debido a que aun no se tenía listo el cableado de contactos para toda la subestación y no se había adquirido aún el modulo de expansión de I/O's para el PLC, teniendo así capacidad de manejo de solo diez y seis (16) entradas.

Para esta prueba, la tasa de baudios para la comunicación con el PLC se fija en 57600, mientras que la de la red MODBUS en 9600. Para ambos casos se usa un timeout de un (1) segundo.

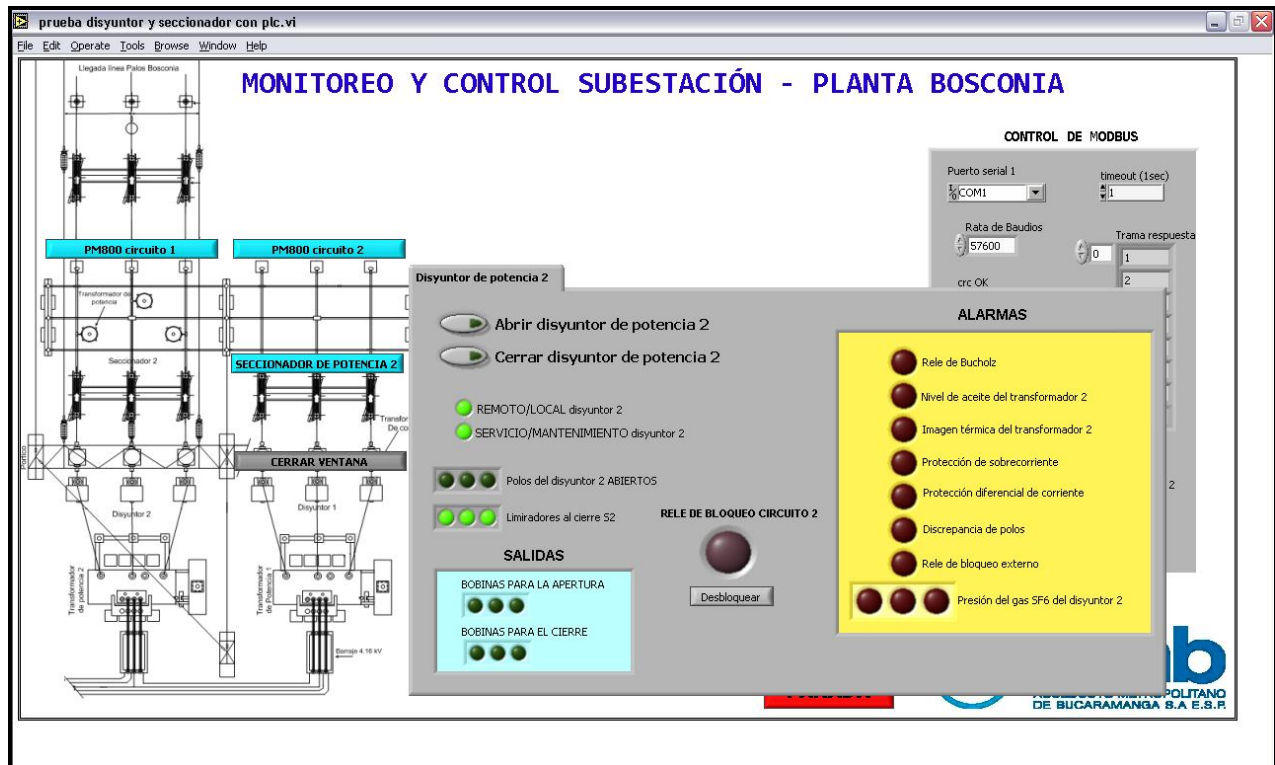
Inicialmente se prueba el funcionamiento solo del monitoreo, con el fin de chequear que la conexión de los contactos sea correcta y de que todas las variables respondan de acuerdo a la documentación y a lo esperado. Para esto, se abre el disyuntor y posteriormente el seccionador, usando el mando de la lógica cableada de la subestación eléctrica (control actual). Al comprobar que todas las variables de entrada funcionan correctamente, se procede a realizar las operaciones de apertura y cierre de ambos equipos; permitiendo de esta forma verificar que las salidas a relé se escriben satisfactoriamente y que cumplen

adecuadamente con los requerimientos de tensión y corriente. Al obtener resultados satisfactorios, se procede a dar por terminada esta prueba, en la que se evidenciaron algunas confusiones para la presentación del panel frontal, dando así nuevas ideas para la presentación de esta.

Adicionalmente se pudieron hacer otras pruebas de solo monitoreo sobre los mismos equipos de la prueba de mando para comprobar el desempeño de la aplicación durante largos periodos de tiempo, y la generación adecuada del registro histórico de datos.

A continuación se muestran algunas imágenes del panel frontal de la aplicación, capturadas durante las pruebas anteriores.

En la Figura 65 se muestra el panel frontal durante una prueba de solo monitoreo. Cabe aclarar que el panel frontal no es igual al presentado en la sección 3.7, ya que esta aplicación está adaptada para que funcione solo para el circuito No. 1, ignorando el estado del circuito 2; además su desarrollo se dió previamente al del panel frontal definitivo. Allí se observa la ventana del monitoreo del disyuntor de potencia 1, mostrando que este se encuentra en servicio con operación remota y con sus polos cerrados; también se observa la no ocurrencia de todas las alarmas.



**Figura 65:** Estado del disyuntor de potencia 1 mostrado en el panel frontal durante pruebas

En la Figura 66 se presenta el panel frontal mostrando la ventana correspondiente al PM800 del circuito 2, la cual, presenta las tensiones de fase de cada una de las fases de ese circuito. Cabe anotar que a pesar de que ese circuito se encuentre inactivo (disyuntor y seccionador 2 abiertos), se debe detectar tensión en sus líneas, ya que los transformadores de tensión se encuentran ubicados aguas arriba de los equipos de corte. También se puede ver en la parte de la derecha la última trama de respuesta que se recibió de la función MODBUS 02, así como los estados de los CRC y los parámetros de comunicación.

Por último, en la Figura 67 se está el panel frontal mostrando la ventana del PM800 del circuito 1, en la pestaña de las corrientes de línea.

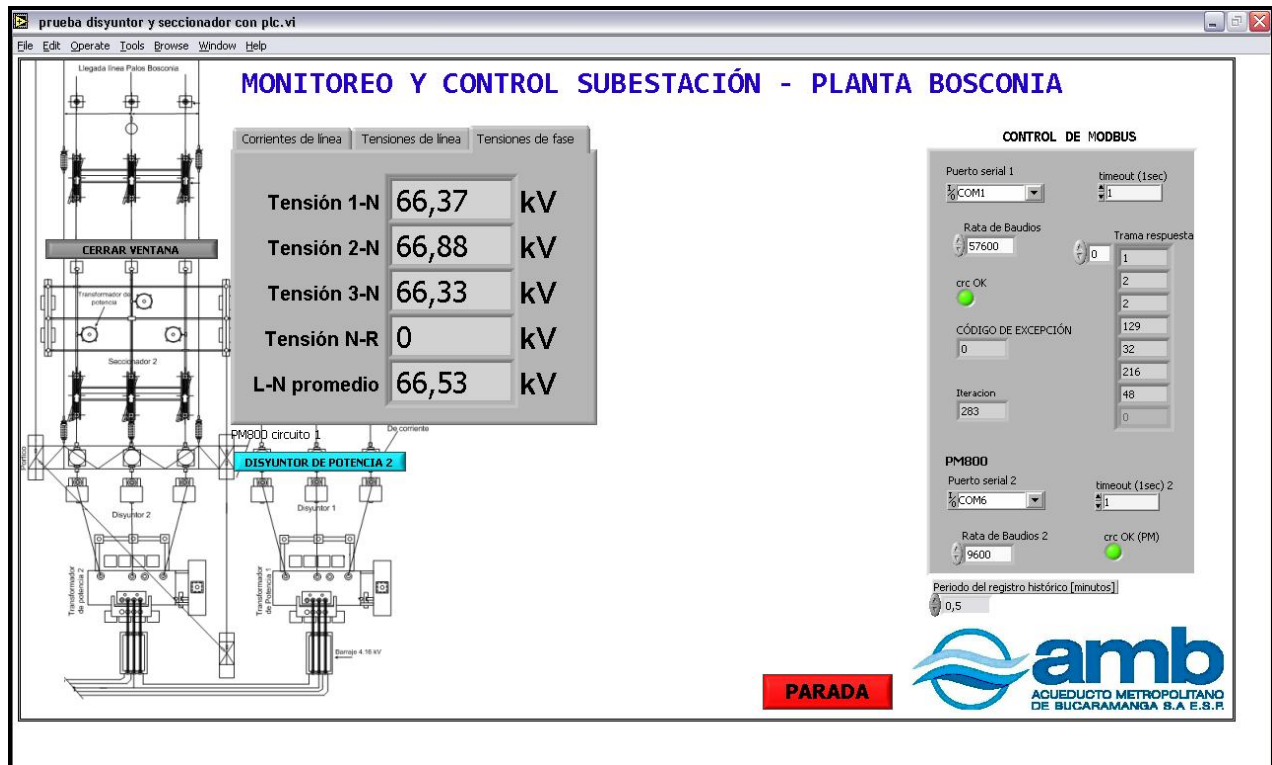


Figura 66: Medidas del analizador de redes del circuito 1 durante pruebas

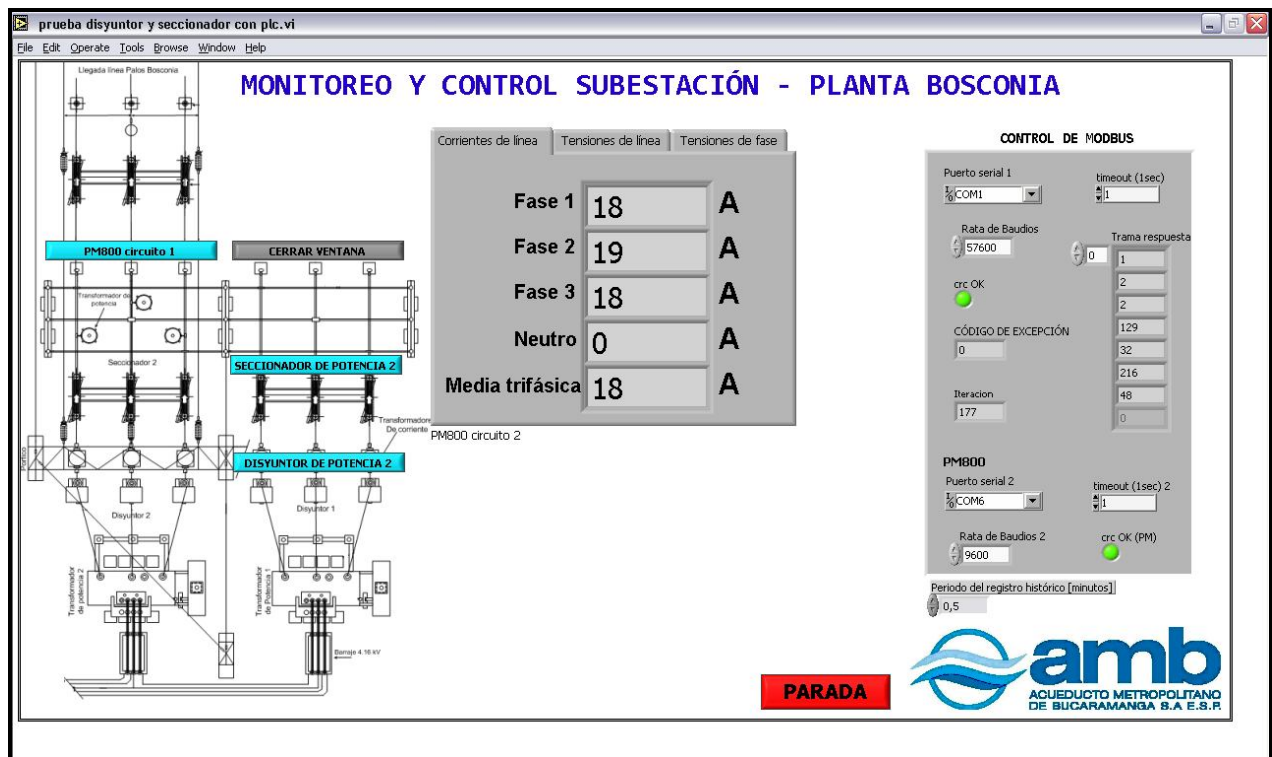


Figura 67: Medidas del analizador de redes del circuito 2 durante pruebas

## OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- El desarrollo del protocolo MODBUS en LabVIEW se basó en la tesis de grado *MODBUS. MONITOREO DE LA RED EMPLEANDO LABVIEW* de los autores, Sinle Marcela Carreño Martínez y Pedro Ardila Albarracín, año 2005. La mayoría de los archivos \*.vi que se usan para las funciones del protocolo MODBUS en esta trabajo de grado, son basados en los presentados en la tesis anteriormente mencionada. Sin embargo, estos \*.vi se estudiaron minuciosamente con el fin de ser modificados y optimizados, de manera que se ajustaran correctamente a las necesidades específicas de la aplicación presentada en esta tesis.
- Debido a que la subestación está comprendida por dos circuitos en paralelo, la programación correspondiente a uno de los circuitos corresponde de manera similar a la del circuito siguiente, por tanto en este trabajo de grado solo se presenta la programación del circuito 1.
- El PLC *Unitronics Vision 280* es un dispositivo muy avanzado y sobredimensionado para la tarea que está realizando en esta aplicación, ya que solo realiza el manejo de entradas y salidas y la comunicación MODBUS sin hacer ningún tipo de procesamiento. Por tanto, es recomendable utilizar un PLC sin pantalla táctil y con poca capacidad de memoria, ya que esto implica un menor costo en el equipo.
- Es posible utilizar el puerto Ethernet del PLC para realizar el monitoreo de la subestación eléctrica a través de una red local o internet, usando el protocolo TCP-IP o MODBUS sobre TCP. Inclusive podría ser incorporado este monitoreo al sistema SCADA que tiene el **amb** actualmente.
- Podría incluirse el PLC en la red MODBUS implementada para los analizadores de redes, permitiendo de esta manera la comunicación serial usando un (1) solo puerto en vez de dos (2), y a su vez la creación de un único

bus de datos para toda la aplicación. Esto implicaría usar un conversor de RS232/RS485 para conectar el PLC al bus, ya que este maneja solo RS232.

- La aplicación desarrollada podrían convertirse en un proyecto que abarque el monitoreo y control de los demás procesos implicados en el bombeo de agua desde la planta Bosconia. Entre estos procesos están: el funcionamiento de las bombas (mediciones eléctricas y mecánicas), central de lubricación, caudal y presión del agua, entre otras; incluyendo las protecciones y alarmas que allí se tienen en cuenta. De esta manera se podrían visualizar en el computador todos los procesos implicados en el bombeo.

Las limitantes para esto, estarían en la cantidad máxima de entradas y salidas que pueden ser adaptadas al PLC a través de los ocho (8) módulos de expansión que podrían agregársele como máximo; también, el tipo de variables que se monitorearían serían cantidades análogas que actualmente no se tienen en forma electrónica, por tanto, habría que tener en cuenta el uso de transductores y transmisores para las diferentes variables mecánicas. Otro aspecto para tener en cuenta sería el retardo o tiempo de transmisión de los datos desde los dispositivos esclavos, el cual, aumenta proporcionalmente con la cantidad de entradas conectadas a estos dispositivos.

## CONCLUSIONES

- El estudio de la subestación eléctrica de la planta Bosconia del **amb** permitió adquirir conocimientos acerca de subestaciones eléctricas, sus equipos, especificaciones y la forma en que funcionan y se operan. Se profundizó en sus sistemas de control y protección, evidenciando lo importante e indispensables que son estos para el buen funcionamiento e integridad de todos y cada uno de los equipos que la componen. También se aprendieron las normas de seguridad y precaución más relevantes que se tienen en cuenta en el mando de equipos de alta y mediana potencia, teniendo en cuenta que todos estos aspectos son propios de la ingeniería eléctrica. Lo anterior se evidencia en el ANEXO C y en el capítulo 1 de este libro.
- El trabajo realizado para conceptualizar y conocer la subestación brindó experiencias a los autores acerca de la forma en que se aborda un trabajo o proyecto de ingeniería aplicado sobre un área o proceso desconocido y ajeno a esta carrera, evidenciando lo aprendido en algunas asignaturas: lo importante para poder controlar o automatizar un proceso es estudiarlo y caracterizarlo completamente, identificando su funcionamiento y las entradas y salidas.
- El controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo que además de su uso como controlador industrial, también se puede utilizar como un elemento de adquisición de datos y manejo de salidas para controlarse por computador, brindándole a este último aislamiento y protección y al mismo tiempo alta capacidad de manejo de entradas y salidas. Además, presenta diversas opciones de comunicación y acceso remoto, permitiendo usarlos en operación conjunta con diversidad de dispositivos y equipos. En últimas, el PLC se convierte en una opción fuerte para tener en cuenta en aplicaciones de manejo de múltiples entradas y salidas, desde y hacia otro equipo, donde predomine el ambiente industrial y variables que implican altos niveles de tensión y corriente.

- El PLC *Vision280* de *Unitronics*, permitió adquirir todas las variables digitales presentes en la lógica cableada que supervisa la subestación eléctrica, provenientes de contactos auxiliares de los equipos de corte y transformación y de las protecciones y alarmas de cada uno de ellos.
- Se conceptualiza acerca del uso del analizador de redes (central de medidas), reconociéndolo como una herramienta indispensable para el monitoreo de la red eléctrica, que combinado con transformadores de corriente y tensión, permite ser usado en cualquier red de energía sin importar su nivel de potencia. Además, el avance de la tecnología y a su vez, la necesidad de monitorear y controlar procesos de potencia muy superior a la manejada en el campo de la electrónica, han permitido incorporar en los analizadores de redes y otros equipos de carácter eléctrico e industrial, módulos que permiten tener acceso y mando sobre ellos desde el área de la electrónica y la computación, de manera local o remotamente a través de redes de comunicación.
- El analizador de redes *PM800* instalado en la subestación se usó como elemento de adquisición de las medidas de la red eléctrica, comunicándose con la aplicación en LabVIEW. Sin embargo, esto permite que los datos llevados al PC se usen únicamente con fines de monitoreo, ya que para utilizarlos en una tarea que requiera tiempo real, por ejemplo la implementación en LabVIEW de alarmas de disparo por sobrecorriente, sería inadecuado ya que el *PM800* solo actualiza sus registros de medida cada un (1) segundo.
- Para la comunicación con los dispositivos de interfaz PC – subestación, que son el PLC y los analizadores de redes, se utilizó el protocolo MODBUS, implementando en LabVIEW el maestro y utilizando los otros dispositivos como esclavos. A su vez, se implementó una pequeña red con los dos (2) analizadores de redes, lo que brindó alguna experiencia en el montaje físico y aplicación de redes.

- El maestro MODBUS programado en LabVIEW se basa en un trabajo de grado relacionado<sup>10</sup>, permitiendo a los autores de este proyecto tener un punto de apoyo en lo referente a MODBUS, y a su vez, proponer modificaciones que permitan mejorar y adaptar lo hecho por otros autores, para su uso en otras aplicaciones.
- Se reconoce al protocolo MODBUS, como una herramienta universal y versátil, para la comunicación entre dispositivos de diferente clase y fabricante; especializado en el uso dentro de la industria para el monitoreo y control de múltiples equipos de medida y de actuación, por medio de uno o varios dispositivos maestro.
- Una vez comprendida la lógica implementada para el control y funcionamiento de la subestación, esta se logró llevar fielmente a la aplicación desarrollada en LabVIEW. Desde esta aplicación se ejecuta el mando sobre la subestación a través del PLC, teniendo en cuenta la misma lógica, normas y seguridad que implica el sistema actualmente implementado. Este sistema y el desarrollado en este trabajo de grado funcionan de manera paralela, permitiendo que ante la falla o mantenimiento de alguno de los dos, la subestación no quede desprotegida y pueda seguirse operando normalmente. Esto provee a la subestación doble protección y seguridad.
- Con LabVIEW se logró uno de los alcances más importantes planteados inicialmente que es la visualización completa del estado y la ejecución del mando de la subestación eléctrica, a través de una interfaz gráfica simple y sencilla pero a la vez clara y completa, que permite al operario saber cómo se encuentra la subestación en un instante dado, de una manera más fácil y ordenada desde un único sitio, como es un computador. Además brinda la posibilidad de observar y editar en MS Excel o en *html*, el reporte histórico

---

<sup>10</sup>CARREÑO MARTÍNEZ, Sinle Marcela y ARDILA ALBARRACÍN, Pedro. MODBUS. Monitoreo de la red empleando LabVIEW. Bucaramanga, 2005. 167 p. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica)

generado por la aplicación, que guarda las variables de medida de la red cada cierto tiempo determinado por el usuario.

- El desarrollo de este trabajo de grado brindó a los autores la oportunidad de adquirir cierta experiencia en el ambiente laboral de una empresa, al desarrollar una aplicación y un montaje para un proceso real, perteneciente a una compañía tan importante como es el **amb**. También les permitió tener contacto con la industria, incluyendo los aspectos técnicos y de seguridad presentes en ella.

## BIBLIOGRAFÍA

- MARTÍN, José R. Diseño de subestaciones eléctricas. Primera Edición. México D.F: McGraw-Hill, Mayo 1992.
- amb S.A. ESP. Manual operativo del bombeo de Bosconia Volumen I. Bucaramanga, 2007.
- ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. Subestación Bosconia 115/4.16 kV. Diagramas de control. Bucaramanga, Diciembre 1982.
- NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW<sup>TM</sup> User Manual. PDF. Austin, Abril 2003.
- NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW help. [Formato digital]. Abril 2003.
- MODICON INC, INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS. MODICON MODBUS protocol reference guide. PDF. North Andover, Junio 1996.
- JIMÉNEZ BUENDÍA, Manuel. Comunicaciones Industriales. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena, Cap 7.
- CARREÑO MARTÍNEZ, Sinle Marcela y ARDILA ALBARRACÍN, Pedro. MODBUS. Monitoreo de la red empleando LabVIEW. Bucaramanga, 2005. 167 p. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas.
- DUQUE PARDO, Jorge Eliecer. Procesador de comunicación MODBUS. Implementación con microcontrolador. Bucaramanga, 2005. 167 p. Trabajo de Investigación (Maestría en Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas.
- UNITRONICS. Software Manual. Getting started with VisiLogic. PDF. 2004.
- UNITRONICS. Software Manual. Function blocks. PDF. 2004.

- UNITRONICS INDUSTRIAL AUTOMATION. V200-18-E2B Snap-in I/O Module. PDF. 2004.
- SCHNEIDER ELECTRIC. Manual de instalación, Central de medida de la serie 800. PDF. 2006.
- SCHNEIDER ELECTRIC. Manual de referencia, Central de medida PM810. 2005.
- UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN. Pautas para la presentación de informes. Medellín, Febrero 2005. Coordinación editorial.

**ANEXO A: TABLA DE VARIABLES DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA,  
AGRUPADA POR EQUIPOS DE PATIO**

ELEMENTO	VARIABLE	E/S	DESCRIPCIÓN DE LA VARIABLE
<b>Seccionador de línea</b>	Tierra	E	Estado de la cuchilla de tierra
	S1R (1Q0)	E	Estado del polo R del disyuntor 1
	S1S (1Q0)	E	Estado del polo S del disyuntor 1
	S1T (1Q0)	E	Estado del polo T del disyuntor 1
	S1R (2Q0)	E	Estado del polo R del disyuntor 2
	S1S (2Q0)	E	Estado del polo S del disyuntor 2
	S1T (2Q0)	E	Estado del polo T del disyuntor 2
	S1E	E	Limite del seccionador de línea Abierto
	S2A	E	Limite del seccionador de línea Cerrado
	K2A	S	Bobina para cerrar seccionador
K1E	S	Bobina para abrir seccionador	
<b>No. de entradas</b>		<b>9</b>	
<b>No. de salidas</b>		<b>2</b>	

<b>Seccionador circuito 1 (1Q1)</b>	S1R (1Q0)*	E	Estado del polo R del disyuntor 1
	S1S (1Q0)*	E	Estado del polo S del disyuntor 1
	S1T (1Q0)*	E	Estado del polo T del disyuntor 1
	b5E	E	Limite del seccionador 1 Abierto
	b5A	E	Limite del seccionador 1 Cerrado
	C1	S	Bobina para cerrar seccionador 1
	C2	S	Bobina para abrir seccionador 1
<b>No. de entradas</b>		<b>2</b>	
<b>No. de salidas</b>		<b>2</b>	

<b>Seccionador circuito 2 (2Q1)</b>	S1R (2Q0)*	E	Estado del polo R del disyuntor 2
	S1S (2Q0)*	E	Estado del polo S del disyuntor 2
	S1T (2Q0)*	E	Estado del polo T del disyuntor 2
	b5E	E	Limite del seccionador 2 Abierto
	b5A	E	Limite del seccionador 2 Cerrado
	C1	S	Bobina para cerrar seccionador 2
	C2	S	Bobina para abrir seccionador 2
<b>No. de entradas</b>		<b>2</b>	
<b>No. de salidas</b>		<b>2</b>	

<b>Disyuntor de potencia 1 (1Q0)</b>	1k11	E	Relé de Bucholz (trafo 1)
	1k12	E	Termómetro aceite (trafo 1)
	1k13	E	Imagen térmica (trafo 1)
	1k14	E	Sobrecorriente circuito 1
	1k15	E	Diferencial de corriente circuito 1
	1k16	E	Relé de bloqueo circuito 1
	kR1 (1Q0)	E	Presión gas SF6 - disyuntor 1 (fase R)
	kS1 (1Q0)	E	Presión gas SF6 - disyuntor 1 (fase S)
	kT1 (1Q0)	E	Presión gas SF6 - disyuntor 1 (fase T)
	S1R (1Q0)*	E	Estado del polo R del disyuntor 1
	S1S (1Q0)*	E	Estado del polo S del disyuntor 1
	S1T (1Q0)*	E	Estado del polo T del disyuntor 1
	S5 (1Q0)	E	Servicio Local/Remoto - disyuntor 1
	S6 (1Q0)	E	Mantenimiento/Servicio - disyuntor 1
S1S (2Q0)*	E	Estado del polo S del disyuntor 2	
S2R (1Q0)	E	Limite del motor y condición para cerrado	
S2S (1Q0)	E	Limite del motor y condición para cerrado	
S2T (1Q0)	E	Limite del motor y condición para cerrado	
Y1 (1Q0)	S	Bobina para cerrar disyuntor 1	
Y2 (1Q0)	S	Bobina para abrir disyuntor 1	
<b>No. de entradas</b>		<b>14</b>	
<b>No. de salidas</b>		<b>2</b>	

<b>Disyuntor de potencia 2 (2Q0)</b>	2k11	E	Relé de Bucholz (trafo 2)
	2k12	E	Termómetro aceite (trafo 2)
	2k13	E	Imagen térmica (trafo 2)
	2k14	E	Sobrecorriente circuito 2
	2k15	E	Diferencial de corriente circuito 2
	2k16	E	Relé de bloqueo circuito 2
	kR2 (2Q0)	E	Presión gas SF6 - disyuntor 2 (fase R)
	kS2 (2Q0)	E	Presión gas SF6 - disyuntor 2 (fase S)
	kT2 (2Q0)	E	Presión gas SF6 - disyuntor 2 (fase T)
	S1R (2Q0)*	E	Estado del polo R del disyuntor 2
	S1S (2Q0)*	E	Estado del polo S del disyuntor 2
	S1T (2Q0)*	E	Estado del polo T del disyuntor 2
	S5 (2Q0)	E	Servicio Local/Remoto - disyuntor 2
	S6 (2Q0)	E	Mantenimiento/Servicio - disyuntor 2
	S1S (1Q0)*	E	Estado del polo S del disyuntor 1
	S2R (2Q0)	E	Limite del motor y condición para cerrado
S2S (2Q0)	E	Limite del motor y condición para cerrado	
S2T (2Q0)	E	Limite del motor y condición para cerrado	
Y1 (2Q0)	S	Bobina para cerrar disyuntor 2	
Y2 (2Q0)	S	Bobina para abrir disyuntor 2	

<b>No. de entradas</b>	<b>14</b>
<b>No. de salidas</b>	<b>2</b>

<b>Total de entradas</b>	<b>41</b>
<b>Total de salidas</b>	<b>10</b>

\* Variables mencionadas en otros equipos anteriormente

## **ANEXO B: TABLA DE REGISTROS DEL PM800<sup>11</sup>**

En las páginas posteriores se presenta la porción de esta tabla que fue utilizada para el desarrollo de la lectura del registro de medidas, del analizador de redes.

---

<sup>11</sup> SCHNEIDER ELECTRIC. Manual de referencia, Central de medida PM810. 2005, ap. A

## Lista de registros

Tabla A-3: Lista abreviada de registros

Reg	Nombre	Escala	Unidades	Rango	Notas
<b>Medición de 1 s</b>					
<b>Medición de 1 s — Intensidad</b>					
1100	Intensidad, Fase 1	A	Amperios/Escala	0 – 32.767	RMS
1101	Intensidad, Fase 2	A	Amperios/Escala	0 – 32.767	RMS
1102	Intensidad, Fase 3	A	Amperios/Escala	0 – 32.767	RMS
1103	Intensidad, Neutro	B	Amperios/Escala	0 – 32.767 (–32.768 si N/D)	RMS Solamente sistemas de 4 hilos
1105	Intensidad, Media trifásica	A	Amperios/Escala	0 – 32.767	Media calculada de las fases 1, 2 y 3
1107	Intensidad, Desequilibrio, Fase 1	—	0,10%	0 – 1.000	
1108	Intensidad, Desequilibrio, Fase 2	—	0,10%	0 – 1.000	
1109	Intensidad, Desequilibrio, Fase 3	—	0,10%	0 – 1.000	
1110	Intensidad, Desequilibrio, Máx	—	0,10%	0 – 1.000	Porcentaje de desequilibrio, Peor
<b>Medición de 1 s — Tensión</b>					
1120	Tensión, 1–2	D	Voltios/Escala	0 – 32.767	Tensión RMS medida entre 1 y 2
1121	Tensión, 2–3	D	Voltios/Escala	0 – 32.767	Tensión RMS medida entre 2 y 3
1122	Tensión, 3–1	D	Voltios/Escala	0 – 32.767	Tensión RMS medida entre 3 y 1
1123	Tensión, Promedia L–L	D	Voltios/Escala	0 – 32.767	Tensión RMS L–L media de las tres fases
1124	Tensión, 1–N	D	Voltios/Escala	0 – 32.767 (–32.768 si N/D)	Tensión RMS medida entre 1 y N sistema de 4 hilos, sistema 10 y sistema 12
1125	Tensión, 2–N	D	Voltios/Escala	0 – 32.767 (–32.768 si N/D)	Tensión RMS medida entre 2 y N sistema de 4 hilos y sistema 12
1126	Tensión, 3–N	D	Voltios/Escala	0 – 32.767 (–32.768 si N/D)	Tensión RMS medida entre 3 y N Solamente sistemas de 4 hilos
1127	Tensión, N–R	E	Voltios/Escala	0 – 32,767 (–32.768 si N/D)	Tensión RMS medida entre N y la referencia de la central de medida Solamente sistemas de 4 hilos con medición de 4 elementos
1128	Tensión L–N, Promedia	D	Voltios/Escala	0 – 32.767	Tensión RMS L–N media de las 3 fases (media de 2 fases para el sistema 12)
1129	Tensión, Desequilibrio, 1–2	—	0,10%	0 – 1.000	Porcentaje de desequilibrio de tensión, Fase 1–2
1130	Tensión, Desequilibrio, 2–3	—	0,10%	0 – 1.000	Porcentaje de desequilibrio de tensión, Fase 2–3
1131	Tensión, Desequilibrio, 3–1	—	0,10%	0 – 1.000	Porcentaje de desequilibrio de tensión, Fase 3–1

Tabla A-3: Lista abreviada de registros

Reg	Nombre	Escala	Unidades	Rango	Notas
1132	Tensión, Desequilibrio, Máx L-L	—	0,10%	0 – 1.000	Porcentaje de desequilibrio de tensión, Peor L-L
1133	Tensión, Desequilibrio, 1-N	—	0,10%	0 – 1.000 (-32.768 si N/D)	Porcentaje de desequilibrio de tensión, Fase 1-N Solamente sistemas de 4 hilos
1134	Tensión, Desequilibrio, 2-N	—	0,10%	0 – 1.000 (-32.768 si N/D)	Porcentaje de desequilibrio de tensión, Fase 2-N Solamente sistemas de 4 hilos
1135	Tensión, Desequilibrio, 3-N	—	0,10%	0 – 1.000 (-32.768 si N/D)	Porcentaje de desequilibrio de tensión, Fase 3-N Solamente sistemas de 4 hilos
1136	Tensión, Desequilibrio, Máx L-N	—	0,10%	0 – 1.000 (-32.768 si N/D)	Porcentaje de desequilibrio de tensión, Peor L-N Solamente sistemas de 4 hilos
<b>Medición de 1 s — Potencia</b>					
1140	Potencia activa, Fase 1	F	kW/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia activa (P1) Solamente sistemas de 4 hilos
1141	Potencia activa, Fase 2	F	kW/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia activa (P2) Solamente sistemas de 4 hilos
1142	Potencia activa, Fase 3	F	kW/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia activa (P3) Solamente sistemas de 4 hilos
1143	Potencia activa, Total	F	kW/Escala	-32.767 – 32.767	Sistema de 4 hilos = P1+P2+P3 Sistema de 3 hilos = potencia activa de las 3 fases
1144	Potencia reactiva, Fase 1	F	kVAr/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia reactiva (Q1) Solamente sistemas de 4 hilos
1145	Potencia reactiva, Fase 2	F	kVAr/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia reactiva (Q2) Solamente sistemas de 4 hilos
1146	Potencia reactiva, Fase 3	F	kVAr/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia reactiva (Q3) Solamente sistemas de 4 hilos
1147	Potencia reactiva, Total	F	kVAr/Escala	-32.767 – 32.767	Sistema de 4 hilos = Q1+Q2+Q3 Sistema de 3 hilos = potencia reactiva de las 3 fases
1148	Potencia aparente, Fase 1	F	kVA/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia aparente (S1) Solamente sistemas de 4 hilos
1149	Potencia aparente, Fase 2	F	kVA/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia aparente (S2) Solamente sistemas de 4 hilos
1150	Potencia aparente, Fase 3	F	kVA/Escala	-32.767 – 32.767 (-32.768 si N/D)	Potencia aparente (S3) Solamente sistemas de 4 hilos
1151	Potencia aparente, Total	F	kVA/Escala	-32.767 – 32.767	Sistema de 4 hilos = S1+S2+S3 Sistema de 3 hilos = potencia aparente de las 3 fases
<b>Medición de 1 s — Factor de potencia</b>					
1160	Factor de potencia real, Fase 1	—	0,001	De -0,002 a 1,000 a +0,002 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando el contenido completo de armónicos de las potencias activa y aparente. Solamente sistemas de 4 hilos
1161	Factor de potencia real, Fase 2	—	0,001	De -0,002 a 1,000 a +0,002 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando el contenido completo de armónicos de las potencias activa y aparente. Solamente sistemas de 4 hilos

**Tabla A-3: Lista abreviada de registros**

Reg	Nombre	Escala	Unidades	Rango	Notas
1162	Factor de potencia real, Fase 3	—	0,001	De -0,002 a 1,000 a +0,002 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando el contenido completo de armónicos de las potencias activa y aparente. Solamente sistemas de 4 hilos
1163	Factor de potencia real, Total	—	0,001	De -0,002 a 1,000 a +0,002 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando el contenido completo de armónicos de las potencias activa y aparente.
1164	Factor de potencia real alterno, Fase 1	—	0,001	0 - 2.000 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando el contenido completo de armónicos de las potencias activa y aparente (solamente en sistemas de cuatro hilos). El valor registrado se ajusta a una escala entre 0 y 2.000, en donde 1.000 representa la unidad, los valores inferiores a 1.000 representan retardo y los valores superiores a 1.000 representan avance.
1165	Factor de potencia real alterno, Fase 2	—	0,001	0 - 2.000 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando el contenido completo de armónicos de las potencias activa y aparente (solamente en sistemas de cuatro hilos). El valor registrado se ajusta a una escala entre 0 y 2.000, en donde 1.000 representa la unidad, los valores inferiores a 1.000 representan retardo y los valores superiores a 1.000 representan avance.
1166	Factor de potencia real alterno, Fase 3	—	0,001	0 - 2.000 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando el contenido completo de armónicos de las potencias activa y aparente (solamente en sistemas de cuatro hilos). El valor registrado se ajusta a una escala entre 0 y 2.000, en donde 1.000 representa la unidad, los valores inferiores a 1.000 representan retardo y los valores superiores a 1.000 representan avance.
1167	Factor de potencia real alterno, Total	—	0,001	0 - 2.000	Obtenido usando el contenido completo de armónicos de las potencias activa y aparente. El valor registrado se ajusta a una escala entre 0 y 2.000, en donde 1.000 representa la unidad, los valores inferiores a 1.000 representan retardo y los valores superiores a 1.000 representan avance.
1168	Factor de potencia de desplazamiento, Fase 1	—	0,001	De -0,002 a 1,000 a +0,002 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando solamente la frecuencia fundamental de las potencias activa y aparente. Solamente sistemas de 4 hilos
1169	Factor de potencia de desplazamiento, Fase 2	—	0,001	De -0,002 a 1,000 a +0,002 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando solamente la frecuencia fundamental de las potencias activa y aparente. Solamente sistemas de 4 hilos
1170	Factor de potencia de desplazamiento, Fase 3	—	0,001	De -0,002 a 1,000 a +0,002 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando solamente la frecuencia fundamental de las potencias activa y aparente. Solamente sistemas de 4 hilos
1171	Factor de potencia de desplazamiento, Total	—	0,001	De -0,002 a 1,000 a +0,002 (-32.768 si N/D)	Obtenido usando solamente la frecuencia fundamental de las potencias activa y aparente.

Tabla A-3: Lista abreviada de registros

Reg	Nombre	Escala	Unidades	Rango	Notas
1172	Factor de potencia de desplazamiento alterno, Fase 1	—	0,001	0 – 2.000 (–32.768 si N/D)	Obtenido usando solamente la frecuencia fundamental de las potencias activa y aparente (solamente en sistemas de cuatro hilos). El valor registrado se ajusta a una escala entre 0 y 2.000, en donde 1.000 representa la unidad, los valores inferiores a 1.000 representan retardo y los valores superiores a 1.000 representan avance.
1173	Factor de potencia de desplazamiento alterno, Fase 2	—	0,001	0 – 2.000 (–32.768 si N/D)	Obtenido usando solamente la frecuencia fundamental de las potencias activa y aparente (solamente en sistemas de cuatro hilos). El valor registrado se ajusta a una escala entre 0 y 2.000, en donde 1.000 representa la unidad, los valores inferiores a 1.000 representan retardo y los valores superiores a 1.000 representan avance.
1174	Factor de potencia de desplazamiento alterno, Fase 3	—	0,001	0 – 2.000 (–32.768 si N/D)	Obtenido usando solamente la frecuencia fundamental de las potencias activa y aparente (solamente en sistemas de cuatro hilos). El valor registrado se ajusta a una escala entre 0 y 2.000, en donde 1.000 representa la unidad, los valores inferiores a 1.000 representan retardo y los valores superiores a 1.000 representan avance.
1175	Factor de potencia de desplazamiento alterno, Total	—	0,001	0 – 2.000	Obtenido usando solamente la frecuencia fundamental de las potencias activa y aparente. El valor registrado se ajusta a una escala entre 0 y 2.000, en donde 1.000 representa la unidad, los valores inferiores a 1.000 representan retardo y los valores superiores a 1.000 representan avance.
<b>Medición de 1 s — Frecuencia</b>					
1180	Frecuencia	—	0,01 Hz  0,10 Hz	(50/60 Hz) 2.300 – 6.700 (400 Hz) 3.500 – 4.500 (–32.768 si N/D)	Frecuencia de los circuitos que se están supervisando. Si la frecuencia está fuera de rango, el registro será –32.768.
<b>Calidad de la energía</b>					
<b>THD</b>					
1200	Intensidad de THD/thd, Fase 1	—	0,10%	0 – 32.767	Distorsión armónica total, Intensidad de Fase 1 Ver en el registro 3227 la definición THD/thd
1201	Intensidad de THD/thd, Fase 2	—	0,10%	0 – 32.767	Distorsión armónica total, Intensidad de Fase 2 Ver en el registro 3227 la definición THD/thd
1202	Intensidad de THD/thd, Fase 3	—	0,10%	0 – 32.767	Distorsión armónica total, Intensidad de Fase 3 Ver en el registro 3227 la definición THD/thd

## **ANEXO C<sup>12</sup>: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS Y SISTEMAS AUXILIARES DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE BOSCONIA**

### **1. EQUIPOS DE PATIO**

A continuación se presentan todos los equipos de patio que componen la subestación eléctrica de Bosconia. De cada uno de ellos se da una breve definición, funciones que cumple y las características eléctricas.

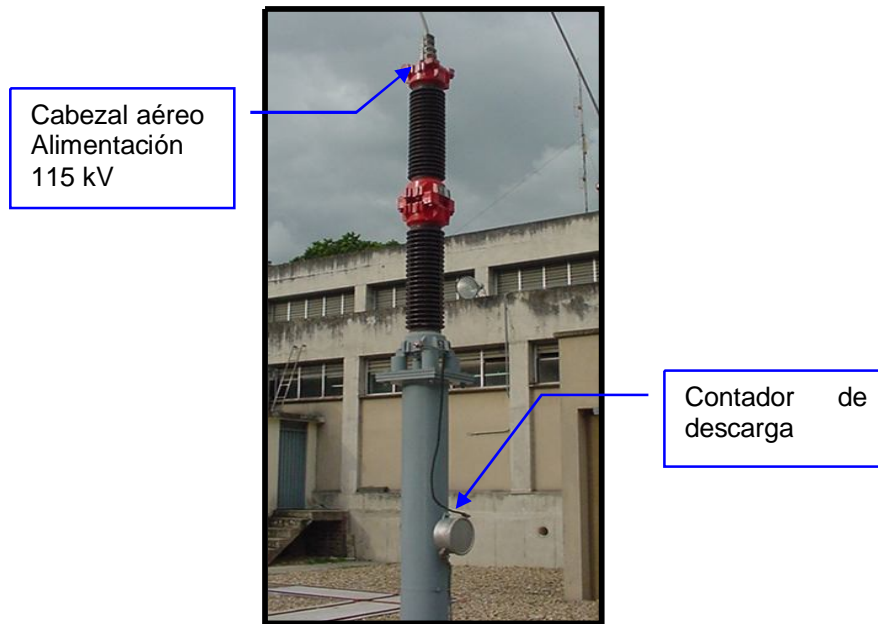
La subestación consta de los siguientes equipos de patio: pararrayos de línea a 115 kV, dos (2) transformadores de potencia, dos (2) transformadores de corriente, un transformador de potencial, dos (2) disyuntores de potencia, dos (2) seccionadores para alimentación de cada transformador de potencia, un (1) seccionador de línea con polo de puesta a tierra a 115 kV, cuatro (4) autotransformadores, un (1) sistema de malla de puesta a tierra y un (1) sistema de servicios auxiliares.

#### **1.1. Pararrayos de línea a 115 kV**

El objetivo del pararrayos (ver Figura 68) es evitar el impacto directo proveniente de una descarga atmosférica en la zona de protección y evitar accidentes en las instalaciones. Se encuentra ubicado a la llegada de la línea de alimentación de 115kV. Su principio de funcionamiento se basa esencialmente en canalizar por la toma de tierra las descargas de corriente producidas por la diferencia de potencial que pudieran presentarse entre las nubes y el cabezal del pararrayos. En la estación de bombeo no se realiza monitoreo remoto sobre este equipo.

---

<sup>12</sup> Figuras y tablas tomadas de: amb S.A. ESP. Manual operativo del bombeo de Bosconia Volumen I. Bucaramanga, 2007.



**Figura 68:** Pararrayos de línea

Las características de los pararrayos son las siguientes (Tabla 4):

<b>PARARRAYOS DE LÍNEA A 115kV</b>	
Marca	SPRECHER + SCHUH
Tipo	BHF 8E 36-216kV
Tensión nominal de servicio	36 – 216kV
Frecuencia Nominal	48 – 62Hz
Descarga nominal de corriente 8/20 $\mu$ S	10kA
Impulso de corriente 4/10Ms	100kA
Temperatura de trabajo	-50 °C y +50 °C

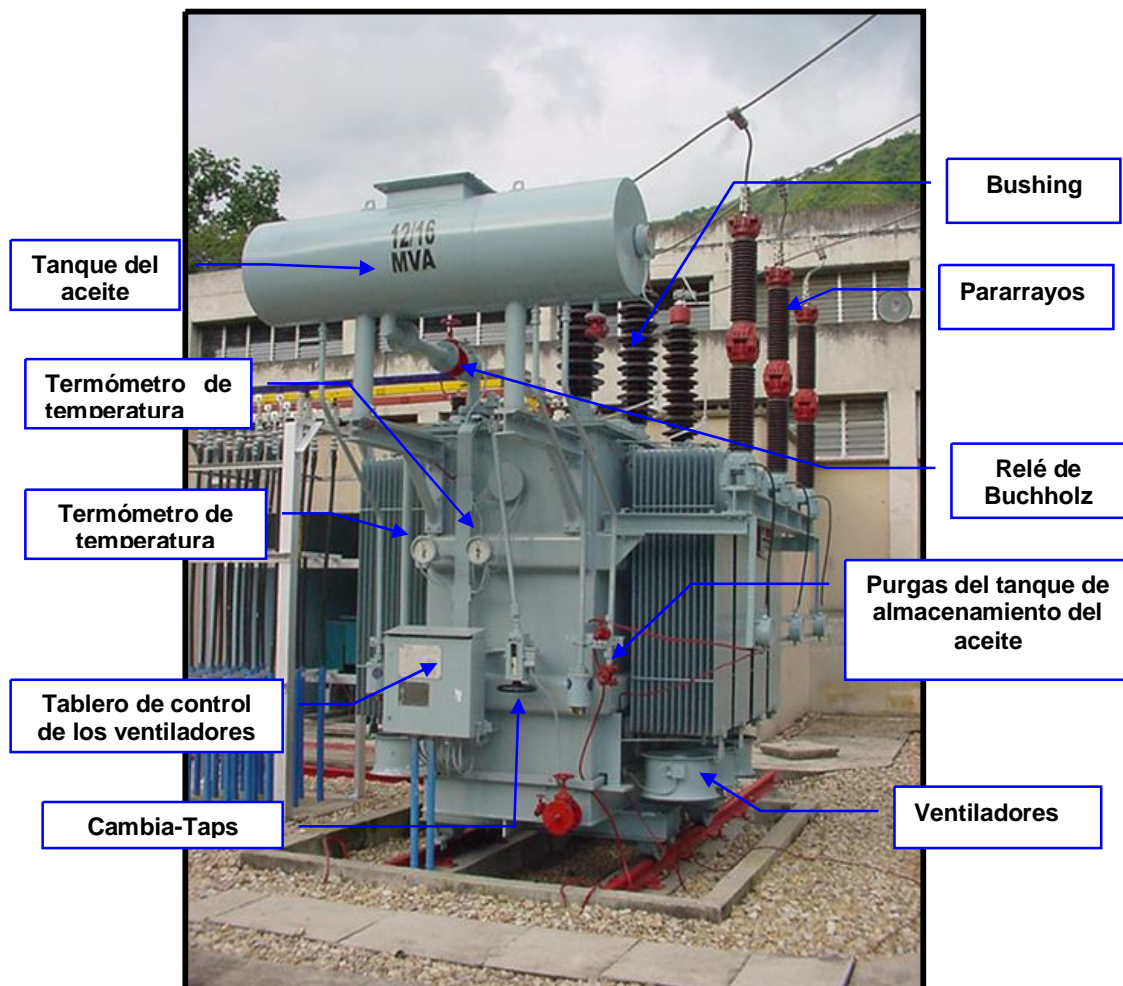
**Tabla 4:** Características técnicas de los pararrayos de línea 115kV

## 1.2. Transformadores de potencia

Son los principales equipos de la subestación eléctrica Bosconia ya que se encargan de realizar el proceso de transformación de tensión desde 115kV a 4.16kV, permitiendo alimentar directamente una o varias unidades de bombeo de

agua de las cuatro (4) disponibles en la planta. En la Figura 69 se aprecia uno de estos transformadores con sus principales componentes y protecciones.

La relación de transformación de este equipo es  $n = 115\text{kV}/4.16\text{kV}$ , la cual se puede corregir mediante un cambia-taps manual. Su potencia nominal es de 12/16 MVA y su conexión es Dy5. Cuenta con un sistema de refrigeración ONAN/ONAF con devanados sumergidos en aceite y posee un tablero de control local para la ventilación forzada.



**Figura 69:** Transformador de potencia subestación Bosconia

### 1.2.1. PROTECCIONES EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Debido a su gran relevancia los transformadores cuentan con protecciones eléctricas y mecánicas con el fin de evitar malos funcionamientos debidos a fallas de los siguientes tipos: de aislamiento entre los bobinados y el núcleo o en los terminales de conexión, los cuales ocasionan puntos calientes; térmicas y/o eléctricas debidas a sobrecorrientes, sobretensiones, descargas atmosféricas, cortos circuitos en el interior o fugas de corriente; y mecánicas debido a golpes o terremotos las cuales pueden producir fuga de aceite.

#### 1.2.1.1. PROTECCIONES MECÁNICAS:

- **Nivel de Aceite:** Este indicador muestra el nivel de aceite en el tanque de almacenamiento del mismo; tiene dos (2) contactos auxiliares que provocan alarma cuando el nivel esta en mínimo o máximo.
- **Válvula de Sobrepresión:** Actúa cuando se produce una presión súbita en el interior del transformador generando un disparo.
- **Termómetro de Temperatura de Aceite:** Cuando la temperatura del aceite llega al tope de los ajustes calibrados, se produce una alarma y disparo.
- **Termómetro de Temperatura de los Devanados:** Actúa bajo el sistema de “imagen térmica”. Consta de tres (3) contactos los cuales envían señal para el arranque de los ventiladores, alarma y disparo.
- **Relé Buchholz:** Es un relé de protección para instrumentos aislados o enfriados con líquido, con tanque de expansión. Está ubicado en la tubería que está conectada entre el tanque del transformador y el conservador del aceite. El objeto es indicar fallas tales como:

- Arqueo entre partes que llevan corriente y núcleo o estructura de acero.
- Incendio o explosión dentro del transformador.
- Falla entre embobinados.
- Fuga de aceite en la estructura o en las líneas de entrada de aire al sistema.

Opera cuando existe flujo excesivo de gases o sobrepresión dentro de la cuba del transformador, provocando una señal de alarma o disparo.

Los dispositivos de protección mecánica tienen la característica de que solo es posible “resetearlos” en sitio y no desde los tableros de control.

#### 1.2.1.2. PROTECCIONES ELÉCTRICAS:

- **Relé diferencial de corriente:** El relé diferencial es un interruptor electromecánico especial, que tiene la capacidad de detectar la diferencia entre la corriente absorbida por un aparato consumidor y la de retorno, cuando ésta diferencia supera un valor (por lo general 30 [mA]) el dispositivo interrumpe el circuito y genera una alarma en un contacto, cortando el suministro de corriente a la instalación. Hay uno de ellos conectado entre la entrada y la salida de cada transformador de potencia.

En conclusión es un dispositivo de protección contra fugas de corriente a tierra provocadas por equipos defectuosos, instalaciones dañadas o contactos directos.

- **Relé de sobrecorriente:** Como su nombre lo indica, la operación de este equipo busca la protección contra el aumento de corriente durante un periodo de tiempo, el cual puede ser provocado por los cortocircuitos en las instalaciones protegidas. Estos relés pueden ser instantáneos (electromagnéticos) de tiempo inverso (inducción) y de tiempo definido.

En la subestación Bosconia se utilizan para proteger contra sobrecalentamiento a los transformadores.

- **Pararrayos:** Las sobretensiones a que puede estar sometido un transformador son ocasionadas por descargas atmosféricas y se presentan en forma de un impulso caracterizado por una inmediata elevación a su valor máximo de cresta y un rápido descenso a cero. El efecto es mayor sobre el aislamiento del transformador a medida que la elevación de tensión es más rápida y su descenso más lento. Para su protección, los transformadores de potencia cuentan con pararrayos por el lado de alta y baja tensión.

Cada una de las protecciones mencionadas anteriormente, tanto eléctricas como mecánicas, produce una alarma de tipo ON-OFF que es monitoreada en los tableros de control de la subestación y son tenidas en cuenta para realizar el mando de la misma.

### 1.2.2. CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES

Cada transformador de potencia tiene implementada la conexión Dy5 (Figura 70), es decir, conexión delta a la entrada, y conexión Y en su salida. Por tanto, desde las líneas de suministro no es necesario proveer el neutro.

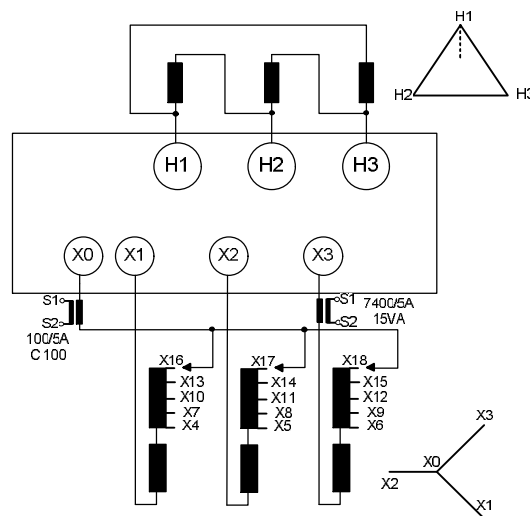


Figura 70: Conexión Dy5 de los transformadores de potencia

### 1.3. Transformadores de corriente

Los transformadores de corriente (CT) se encargan de reducir la corriente primaria de alta tensión hasta un valor secundario de 5A. Esta corriente se envía hasta los tableros del cuarto de control en donde se realiza su lectura a través de los analizadores de redes. Se usa un transformador de corriente en el lado de alta de cada transformador de potencia.

Estos transformadores de corriente cuentan con tres (3) devanados secundarios independientes cada uno. En la Figura 71 se muestra el elemento de una de las fases de estos transformadores. Sus características se encuentran en la Tabla 5.



Figura 71: Transformador de corriente

<b>TRANSFORMADOR DE CORRIENTE</b>	
Marca	ABB Switchgear
Tipo	QDR-123
Clase de aislamiento	123/230/550 KV
Frecuencia	60 Hz
Corriente térmica	20 kA
Corriente dinámica	50 kA
Corriente primaria	300 A
Corriente secundaria	5 A
Clase precisión	0.5
Carga	60 VA
Clase de protección	10 P 30
Máxima corriente al primario	120 A

**Tabla 5:** Características de los transformadores de corriente

#### **1.4. Transformador de potencial (o de tensión)**

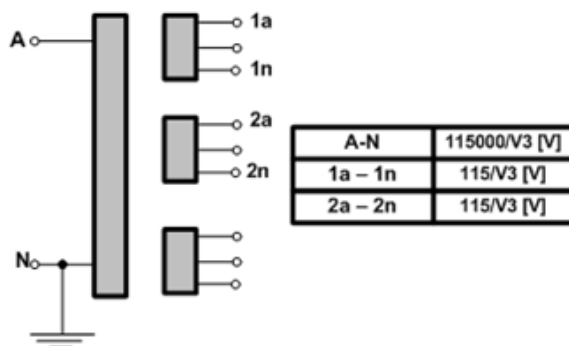
La función del transformador de potencial (PT), es la de disminuir la tensión para efecto de monitoreo del nivel de voltaje entrante en la subestación. Es un transformador en cuyo secundario, en condiciones normales de uso se tiene una tensión que tiene un módulo proporcional a la tensión primaria y que difiere en fase en un ángulo próximo a cero. En Bosconia su función es la de transformar el nivel de tensión de 115 kV a 115 V. En la Figura 72 se muestra el elemento en una de las fases del transformador de tensión.



**Figura 72:** Transformador de Potencial

Los transformadores de potencial funcionan a tensión prácticamente constante (a inducción constante) y no presentan efectos de saturación tan notables como los transformadores de corriente.

El transformador de tensión posee un devanado en el primario y tres (3) devanados independientes en el secundario, de los cuales se utilizan solo dos (2). En la Figura 73 se ilustra esta configuración y los niveles de tensión en cada devanado.



**Figura 73:** Diagrama de conexión del transformador de potencial para la fase A

El transformador de potencial utilizado en Bosconia, se conecta entre fase y tierra ya que entrega tensiones que permiten reconstruir tanto las tensiones simples como las compuestas, mientras que las tensiones obtenidas de las conexiones fase – fase no permiten reconstruir las tensiones fase – tierra y bajo circunstancias especiales (por ejemplo, si se desea conocer el contenido del tercer armónico) es importante conocer las tensiones simples.

En la Tabla 6 se puede observar la ficha técnica del transformador de potencial.

<b>TRANSFORMADOR DE POTENCIAL</b>		
Marca	ABB Switchgear	
Tipo	EMFC 145	
Nivel de aislamiento	230-550 [kV]	
Frecuencia	60 [Hz]	
Masa total	590 [kg]	
Altitud de operación máxima	50 [kA]	
Tensión corto circuito	9.51%	
Corriente alta tensión	60.2/80.3 [A]	
Corriente baja tensión	1665/2220 [A]	
Factor de tensión	1.5/30 [seg]	
Potencia	200 VA	200 VA
Clase	0.2	3P

**Tabla 6:** Características de los transformadores de corriente

### 1.5. Seccionador de línea

El seccionador es un equipo electromecánico de conexión que asegura en posición abierta, una distancia de seccionamiento que satisface condiciones especificadas. Es capaz de abrir y de cerrar un circuito cuando se establece o interrumpe una corriente de valor despreciable. Para el caso de la subestación de

Bosconia esto se cumple cuando los transformadores de potencia están sin carga. Para el caso de que se encuentre la carga plena conectada a la subestación este dispositivo no podrá abrirse o cerrarse ya que esto ocasionaría daños en el equipo debido al arco eléctrico o explosiones.

El seccionador de línea 115 kV instalado en la subestación Bosconia tiene la función de cortar la alimentación de la línea PALOS – BOSCONIA del resto de la subestación y está dotado con un sistema manual que conecta el circuito a tierra cuando el seccionador se encuentra abierto. En la Figura 74 se muestra este equipo, donde se aprecian dos (2) de los tres (3) polos que lo componen y sus principales componentes.

Su operación puede realizarse local o remotamente desde los tableros de mando.

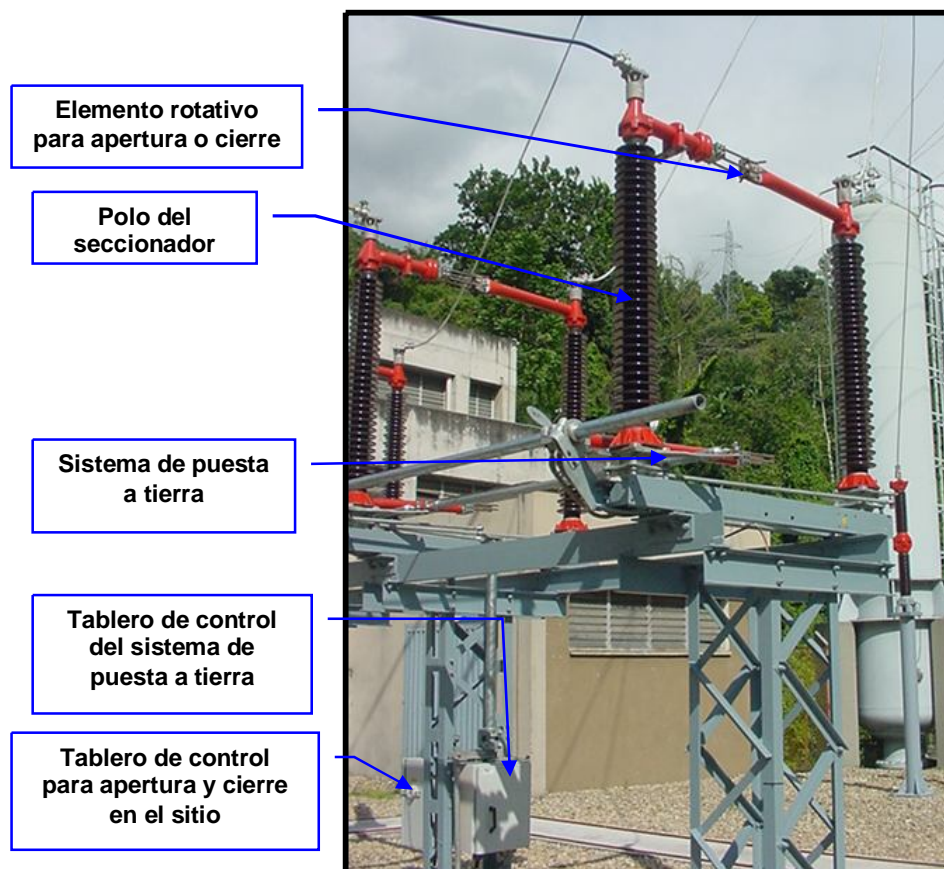


Figura 74: Seccionador de línea

En la Tabla 7 se observa las características del seccionador de línea.

<b>SECCIONADOR DEL LÍNEA</b>	
Marca	SPRECHER + SCHUH
Tipo	TSF 311
Tensión nominal	123 kV
Corriente de servicio	800 A
Corriente de cortocircuito	25 kV
Pico de corriente máximo permisible	63 kA
Frecuencia	60 Hz

**Tabla 7:** Características técnicas del seccionador de línea

### **1.6. Seccionadores de potencia**

Como ya se explicó en el numeral anterior, el seccionador es básicamente un equipo de corte de energía, sin presencia de carga. La función de estos es realizar apertura visible en la alimentación de cada transformador de potencia, permitiendo seleccionar cuál de estos se va a usar. Están ubicados aguas abajo, después del seccionador de línea y antes de los disyuntores de potencia (ver Figura 1). Su manejo solo debe realizarse una vez el disyuntor se encuentra abierto, por las razones ya mencionadas en la anterior sección.

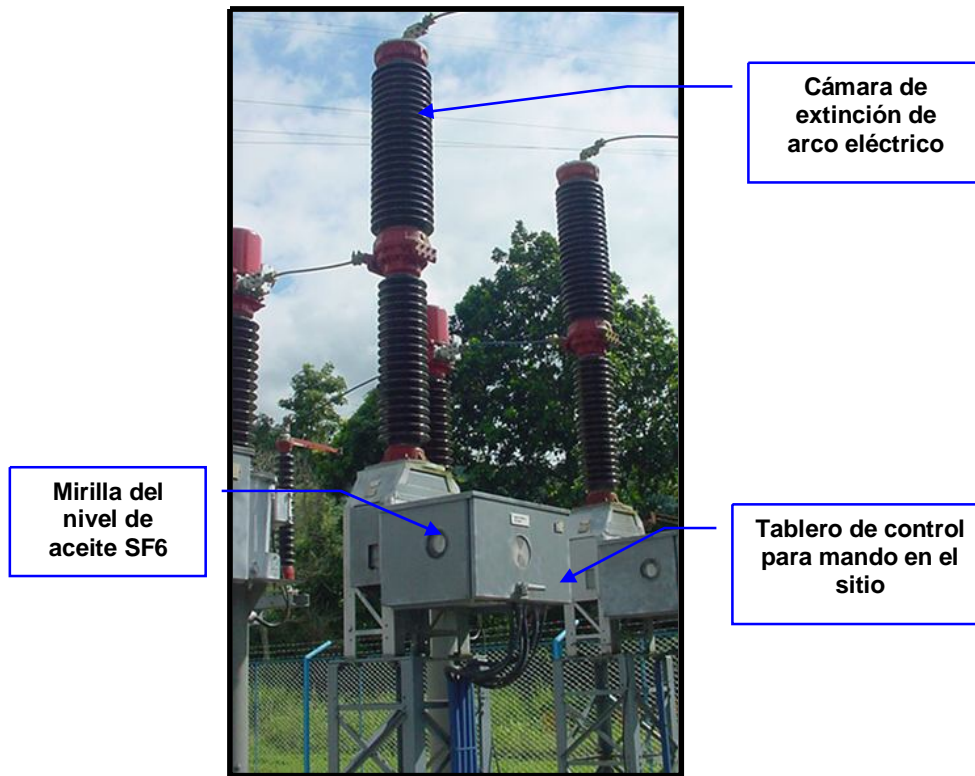
Al igual que el seccionador de línea, estos también se pueden operar en el sitio o de manera remota desde el tablero de control. En la Figura 75 se aprecia uno de estos equipos.



**Figura 75:** Seccionador de potencia

### **1.7. Disyuntores de potencia**

Existe un disyuntor conectado antes de cada transformador de potencia. Posee por cada fase una cámara de extensión de arco eléctrico en aceite SF6 y su control se puede realizar de manera remota desde el tablero de control o localmente en la caja de controles del equipo. Su función, al igual que los seccionadores, consiste en realizar el corte del suministro de energía al transformador de potencia conectado a él; sin embargo, la diferencia está en que estos equipos tienen la capacidad de abrir el circuito en presencia de carga o corriente en las líneas. En la Figura 76 se aprecian dos (2) fases del disyuntor de potencia con sus principales partes y en la Tabla 8 se muestra su ficha técnica.



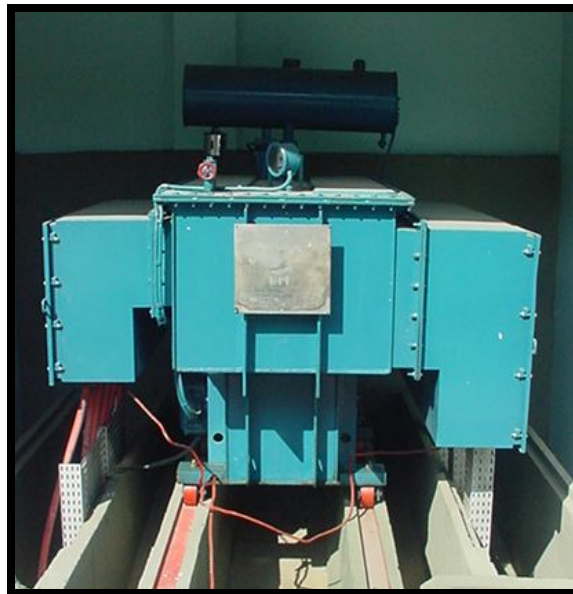
**Figura 76:** Disyuntor de potencia

DISYUNTOR DE POTENCIA				
Marca		SPRECHER + SCHUH		
Tipo		GF 101-1		
Tensión nominal		123 kV		
Corriente de servicio		2500 A		
Corriente de cortocircuito		25kV		
Número de elementos de cierre por polo		1		
Frecuencia		60 Hz		
Mecanismo de operación		FKF 1-2		
		Polo a	Polo b	Polo c
Tiempo de cierre	[ms]	142	142	141
Tiempo de apertura	[ms]	27	27	27

**Tabla 8:** Características técnicas de los disyuntor de potencia

## 1.8. Autotransformadores

Son frecuentemente utilizados como una alternativa económica en transformadores de propósitos generales para ajuste de voltajes específicos, siempre y cuando el aislamiento en la línea de alimentación no sea requerido, ya que las tensiones de entrada y salida están eléctricamente conectadas (un solo devanado). Pueden ser usados tanto para subir o bajar voltajes. En la Figura 77 se muestra un autotransformador.



**Figura 77:** Autotransformador

En Bosconia, estos transformadores son usados para realizar el arranque a tensión reducida de las motores de las unidades de bombeo y están acoplados al barraje de 4.16 kV. Existe uno por cada unidad, siendo en total cuatro (4) autotransformadores.

En la Tabla 9 se muestra la ficha técnica del autotransformador.

<b>AUTOTRANSFORMADOR</b>	
Marca	TAMINI
Clase Nominal de Aislamiento	7.2 /22 / 60 KV
Potencia	10638 kVA
Tensión/corriente lado alta	4.16 kV /2890 A
Tensión/corriente lado baja	3036 / 2896 / 2745 V 2026 / 2126 / 2232 A
Tensión de corto circuito	4.16 kV 2890 A
Frecuencia	60 Hz

**Tabla 9:** Características técnicas del autotransformador

## **2. SISTEMA DE SERVICIOS AUXILIARES**

La estación de bombeo de Bosconia del **amb** cuenta con un sistema de servicios auxiliares, el cual sirve para proveer alimentación de corriente alterna y corriente continua a los distintos equipos de la estación de bombeo, incluyendo la subestación eléctrica; y a los tableros de control de la misma. A continuación se describe brevemente los dos (2) servicios auxiliares:

### **2.1. Corriente alterna**

Teniendo en cuenta que los transformadores de potencia realizan transformación de tensión de 115 kV a 4.16 kV, existe el sistema de servicios auxiliares de corriente alterna en donde se efectúa la transformación a Baja Tensión (440 V). Para esto, desde la subestación se alimentan dos (2) transformadores de servicios auxiliares con capacidad de 500 [kVA], tipo seco. Este nivel de tensión y el de 120 V sirve para alimentar los motores que abren y cierran a los seccionadores, motores de bombas de refrigeración o de agua pequeñas, entre otros.

Ante una posible contingencia, se cuenta con respaldo para los servicios auxiliares a través de una planta eléctrica, con el fin de poder operar y monitorear la subestación aún en ausencia de energía en las líneas de transmisión.

## **2.2. Corriente continua**

La totalidad del tablero de control, incluyendo el sistema de alarmas, señalización y mando, se alimenta a 120 V de corriente continua, por lo cual el sistema de bombeo de Bosconia cuenta con 10 baterías estacionarias, cada una de 120 V.

Para mantener la carga de las baterías estacionarias, se tienen dos cargadores de baterías de continua.