

**INCORPORACIÓN DE LAS MEDIDAS DE LA RED ELÉCTRICA DE LA
SUBESTACIÓN Y EL BOMBEO DE LA PLANTA BOSCONIA DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA AL SISTEMA DE MONITOREO Y
CONTROL POR COMPUTADOR IMPLEMENTADO ACTUALMENTE EN
LABVIEW USANDO EL PROTOCOLO MODBUS**

WILFRED YESID REYES GALVIS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
BUCARAMANGA
2012**

**INCORPORACIÓN DE LAS MEDIDAS DE LA RED ELÉCTRICA DE LA
SUBESTACIÓN Y EL BOMBEO DE LA PLANTA BOSCONIA DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA AL SISTEMA DE MONITOREO Y
CONTROL POR COMPUTADOR IMPLEMENTADO ACTUALMENTE EN
LABVIEW USANDO EL PROTOCOLO MODBUS**

WILFRED YESID REYES GALVIS

**Monografía de grado para optar al título de
Especialista en Control e Instrumentación Industrial**

Director

Luis Ángel Silva

PhD. Robótica y Visión por Computador

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2012

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 13 de Enero de 2012

*A ti por motivarme a ser mejor cada día
por recordarme la importancia del éxito
por ser esa luz que me aconseja en momentos de oscuridad.
A ti Juliana, por ser mi musa y mi inspiración.*

.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios por permitirme seguir aprendiendo y preparándome a través de esta Especialización. A mis padres por su gran apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, en especial al Ingeniero Jairo Fabián Jaimes y al personal del bombeo de la planta Bosconia por darme la oportunidad de trabajar junto a ellos y llevar a cabo este proyecto. Al profesor Luis Ángel Silva por darme su valiosa opinión y guiarme en el desarrollo de esta Monografía y en general, a todos mis compañeros y profesores por hacer de esta Especialización una experiencia muy agradable y productiva.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	3
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 UBICACIÓN DEL PROYECTO	4
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO BOSCONIA	6
2.1.1 Subestación eléctrica	6
2.1.2 Circuito de distribución de media tensión	9
2.1.3 Equipos para medición de variables eléctricas	11
2.2 LECTURA DE REGISTROS CON PROTOCOLO MODBUS	14
2.2.1 Generalidades de Modbus	14
2.2.2 Lectura de registros internos	15
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED MODBUS.....	19
3.1 TOPOLOGÍA DE RED.....	20
3.2 PROGRAMACIÓN DE LAS CENTRALES DE MEDIDA.....	22
3.3 IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DE LA RED.....	22
4. PROGRAMACIÓN EN LABVIEW	25
4.1 LECTURA DE MEDIDAS DE LA RED ELÉCTRICA.....	25
4.1.1 Función Modbus 03 para lectura de registros internos.....	25
4.1.2 Consulta de los registros de una central de medida.....	29

4.2	GRÁFICOS DE TENDENCIAS.....	34
4.2.1	Almacenamiento de las medidas	35
4.2.2	Graficado de datos guardados	38
4.3	REGISTRO HISTÓRICO DE DATOS.....	41
4.3.1	Creación del archivo de registro histórico	42
4.3.2	Actualización y guardado del registro histórico.....	43
4.4	INTEGRACIÓN CON LA APLICACIÓN PRINCIPAL	44
4.5	INTERFAZ GRÁFICA	48
4.5.1	Visualización de las medidas eléctricas	48
4.5.2	Visualización de gráficas	50
5.	CONCLUSIONES.....	52
	BIBLIOGRAFÍA.....	54
	ANEXO A. Lista de registros de la central de medida PM800	55

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Características de las centrales de medida de la planta Bosconia	11
Tabla 2. Grupos de escala de la central de medida PM800	13
Tabla 3. Funciones del protocolo Modbus	16
Tabla 4. Direcciones asignadas para los esclavos de la red Modbus	21
Tabla 5. Parámetros de la red Modbus implementada	21
Tabla 6. Registros de interes de la central de medida PM800 agrupados para lectura Modbus	29
Tabla 7. Lista de variables incluidas en el cluster de salida “Medidas”	33
Tabla 8. Agrupación de las medidas de una central de medida para su gráficoado	39

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Subestación eléctrica de la planta Bosconia.....	7
Figura 2. Diagrama unifilar de la subestación eléctrica.....	8
Figura 3. Diagrama unifilar del circuito de distribución de media tensión	10
Figura 4. Formato de registros internos en la central de medida PM800.....	12
Figura 5. Formato del factor de potencia en la central de medida PM800.....	14
Figura 6. Formato de trama Modbus en modo RTU.....	15
Figura 7. Trama de petición al PM800 para lectura de tensiones de línea	17
Figura 8. Trama de respuesta del PM800 para lectura de tensiones de línea	18
Figura 9. Esquema eléctrico con centrales de medida a comunicar	20
Figura 10. Topología de la red Modbus implementada	21
Figura 11. Menú de configuración para el puerto serial de la central PM800.....	22
Figura 12. Dispositivos utilizados para disponer de un puerto RS485 en el PC	23
Figura 13. Implementación física de la red Modbus	24
Figura 14. Construcción y envío de trama de petición Modbus en LabVIEW	26
Figura 15. Lectura y decodificación de la trama recibida en LabVIEW.....	27
Figura 16. SubVI para la función Modbus 03.....	28
Figura 17. Diagrama de bloques del subVI "Leer puerto"	28
Figura 18. Diagrama de bloques para lectura de las medidas de una central de medida ..	31
Figura 19. SubVI para la lectura de las medidas de una central de medida.....	34
Figura 20. Diagrama de bloques para la inicialización del array de datos	36
Figura 21. SubVI para actualizar el array de datos	36
Figura 22. SubVI para adecuar las medidas actuales y actualizar los datos guardados	38
Figura 23. SubVI para graficar medidas	41

Figura 24. Bloque "HTML table" de LabVIEW	42
Figura 25. SubVI para creación del registro histórico de datos	43
Figura 26. SubVI para actualización del registro histórico de datos.....	44
Figura 27. Estructura de una aplicación en LabVIEW	45
Figura 28. Inicialización del puerto serie para comunicación Modbus	45
Figura 29. Diagrama de bloques para la lectura de una central de medida dentro de la aplicación principal	46
Figura 30. Diagrama de bloques para la actualización del registro de medidas dentro de la aplicación principal.....	47
Figura 31. Diagrama de bloques para la actualización de los registros históricos dentro de la aplicación principal.....	48
Figura 32. Imagen del panel frontal con botones de acceso para visualizar medidas	49
Figura 33. Visualización de las medidas eléctricas en el panel frontal.....	50
Figura 34. Panel frontal para mostrar las gráficas de tendencias	51

RESUMEN

TITULO: INCORPORACIÓN DE LAS MEDIDAS DE LA RED ELÉCTRICA DE LA SUBESTACIÓN Y EL BOMBEO DE LA PLANTA BOSCONIA DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA AL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL POR COMPUTADOR IMPLEMENTADO ACTUALMENTE EN LABVIEW USANDO EL PROTOCOLO MODBUS

AUTOR: WILFRED YESID REYES GALVIS

FACULTAD: ESP. EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

DIRECTOR: PhD. LUIS ANGEL SILVA

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (*amb*), bajo la política de mejoramiento continuo y optimización de sus procesos, ha venido modernizando el sistema de control del bombeo de agua y de la subestación eléctrica de la planta Bosconia. En esta monografía se desarrolla una nueva característica que consiste en incluir el monitoreo de las principales medidas (tensiones, corrientes, potencias activa, reactiva y aparente, frecuencia, etc.) asociadas al sistema eléctrico de la planta, dentro de la aplicación por computador que actualmente allí se tiene, utilizando la plataforma LabVIEW y el protocolo de comunicación Modbus.

Dentro de este documento se plantea una visión general del sistema eléctrico de la planta Bosconia, incluyendo la subestación eléctrica, el bombeo y el circuito de media tensión. Posteriormente se tocan aspectos generales del protocolo Modbus, para luego profundizar en la red implementada actualmente junto con las modificaciones realizadas, con el fin de usar las centrales de medida encargadas del sensado y visualización de las variables eléctricas, como esclavos del computador maestro. También se explica la programación en LabVIEW para el envío y recepción de tramas Modbus que permiten leer los registros internos de estas centrales, incluyendo el desarrollo de rutinas para el graficado de tendencias de las medidas más relevantes y la generación automática de sus registros históricos en formato *html*. Por último, se detalla el diseño de la interfaz gráfica para mostrar las variables en el panel frontal de la aplicación.

PALABRAS CLAVES:

LabVIEW, Modbus, maestro-esclavo, sistema de control, monitoreo, subestación eléctrica, medidas eléctricas, central de medida, *html*.

SUMMARY

TITLE: INCORPORATION OF THE ELECTRIC MEASUREMENTS OF THE SUBSTATION AND THE PUMPING SYSTEM OF THE BOSCONIA'S PLANT IN THE METROPOLITAN AQUEDUCT OF BUCARAMANGA INTO THE ACTUAL MONITORING AND CONTROL SYSTEM IMPLEMENTED ON COMPUTER USING LABVIEW AND THE MODBUS PROTOCOL

AUTHOR: WILFRED YESID REYES GALVIS

FACULTY: SP. CONTROL AND INDUSTRIAL INSTRUMENTATION

DIRECTOR: PhD. LUIS ANGEL SILVA

According with process optimization and continuous improvement politics, the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga has been upgrading the control system for water pumping process and the electrical substation in the plant of Bosconia. In this work, a new characteristic is developed which consists in including the main variables of the electric system (voltage, current, active, reactive and apparent power, frequency, etc.) into the computer application installed currently in that place, which is built using LabVIEW and Modbus communication protocol.

Throughout this document, a global overview of the electric system in the plant of Bosconia is presented, including aspects of the electrical substation, water pumping and the medium-voltage system. Further on, it shows general aspects of Modbus protocol, going depth into the current network set up and the changes done for using the sensing and displaying power meters as master computer's slaves. Moreover, it explains the LabVIEW programed routines for sending and receiving Modbus frames which allow reading the internal registers of those power meters, as well as graphing trends for the most outstanding measurements and the automatic generation of historical registers in *html* format. Finally, it details the design of the Human-Machine Interface (HMI) for showing the variables on the application's front panel.

KEY WORDS:

LabVIEW, Modbus, master-slave, control system, electrical station, electrical variables, *html*, power meter, HMI.

INTRODUCCIÓN

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 entre otras con la planta Bosconia; donde se debe tratar y bombear el alto volumen de agua requerido, con la suficiente potencia para superar la distancia y altura presentes, bajo requerimientos exigentes de disponibilidad y calidad del producto final.

La criticidad y el gran consumo de energía eléctrica del proceso de bombeo de la estación Bosconia (representa un 94,6 % del consumo de energía total del *amb*¹) hacen que el monitoreo continuo y preciso de las variables del sistema eléctrico sea de vital importancia para el diagnóstico del estado actual de los equipos, la detección de fallas, evaluación de calidad y estimación de la cantidad de energía consumida.

Actualmente no se lleva ninguna tendencia gráfica de las variables eléctricas y el registro histórico de estas se realiza de manera manual en planillas por parte de los operadores de bombeo cada hora, tomando las lecturas de manera visual en las centrales de medida instaladas en cada punto de medición requerido. Esta metodología se hace de cierta forma tediosa, ya que requiere el manejo de grandes cantidades de papel y al carecer de monitoreo remoto, el operador se debe desplazar hasta el sitio de cada medidor. Además, no se garantiza continuidad y exactitud en la toma de los datos.

La estación de bombeo de Bosconia cuenta con un sistema de monitoreo y control por computador que está actualmente en desarrollo y que incluye la operación de las unidades de bombeo, la subestación eléctrica y el sistema de media tensión de la estación Bosconia. Bajo esta filosofía de control, en esta monografía se busca incorporar a este sistema, el monitoreo de las variables eléctricas implicadas en dichos procesos como son tensiones y corrientes de línea, potencias activa reactiva y aparente, factor de potencia, frecuencia y distorsión armónica total, añadiendo la posibilidad de graficar y almacenar en el disco duro, archivos históricos de las variables más relevantes.

¹ *amb*. Indicadores de gestión de calidad. Bucaramanga. 2010.

En este documento se describe el diseño e implementación de la solución para incorporar estas nuevas características al sistema de monitoreo y control por computador de la estación Bosconia. Incluye la programación en LabVIEW, que es la plataforma sobre la que se encuentra desarrollado dicho sistema, de las rutinas e interfaz gráfica necesarias para la lectura, visualización, graficado y guardado de las medidas eléctricas. También se explica la manera en que las centrales de medida de cada subproceso fueron incluidas dentro de la red de comunicación Modbus actual, que inicialmente soportaba la adquisición de las señales desde Controladores Lógicos Programables (*PLC*) esclavos hacia el computador maestro.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Con el fin de hacer más eficiente y óptima la operación de sus procesos y así ofrecer un servicio enmarcado dentro de la confiabilidad y la calidad, el *amb* ha visto la necesidad de sistematizar la ejecución de estos mediante el uso de herramientas tecnológicas e informáticas. Dentro de las áreas de distribución y tratamiento de agua se ha adelantado un proceso de innovación tecnológica que consiste en monitorear y controlar el estado de los diferentes tanques, válvulas y sistema de bombeo que están bajo su jurisdicción desde un sistema SCADA.

Específicamente, en la estación Bosconia se ha venido llevando a cabo un proceso de automatización que consiste en poder monitorear y controlar el estado de los equipos de corte de la subestación eléctrica, las cuatro (4) unidades de bombeo de agua y los interruptores de media tensión del sistema eléctrico; llevando el estado de las señales, protecciones y mandos a una aplicación desarrollada sobre la plataforma LabVIEW y usando *PLCs* como elementos de control y de adquisición de datos.

Esta aplicación consiste de una interfaz gráfica y una serie de rutinas que permiten visualizar y realizar mando de los procesos mencionados anteriormente desde el computador de la sala de control del bombeo, a través de una red Modbus que tiene al computador como maestro y tres (3) *PLCs* esclavos que funcionan como elementos controladores. Este sistema ha sido desarrollado dentro de las labores del autor de la presente monografía y actualmente continúa expandiéndose y mejorándose con el fin de abarcar otras tareas e incorporar nuevas características.

Otro trabajo relacionado que se desarrolló en el *amb* es la automatización de la dosificación del Sulfato líquido usado en el proceso de tratamiento de agua de la planta Bosconia. Este sistema consta de una aplicación principal desarrollada sobre LabVIEW, soportada sobre dispositivos de adquisición de datos y actuadores electrónicos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Incorporar las medidas de la red eléctrica de la subestación y las unidades de bombeo de la planta Bosconia del *amb* al sistema de monitoreo y control por computador actualmente implementado bajo la plataforma LabVIEW, usando el protocolo Modbus.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementar en LabVIEW las funciones de comunicación Modbus que permitan leer los registros internos de las centrales de medida encargadas de la medición de las variables de la red eléctrica y consumo de energía de la subestación y las cuatro (4) unidades de bombeo.
- Implementar la red Modbus que interconecta la aplicación por computador con las centrales de medida de los procesos a monitorear.
- Modificar la aplicación en LabVIEW existente en el bombeo de Bosconia para poder visualizar, almacenar y graficar los datos obtenidos de las centrales de medida a través de la comunicación Modbus.

1.3 UBICACIÓN DEL PROYECTO

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (*amb*) es una empresa de prestación de servicios públicos domiciliarios y saneamiento básico, que satisface las necesidades de Bucaramanga y su área metropolitana. Toma las aguas de los ríos Suratá (abastece la planta de Bosconia), Tona (abastece la plantas de La Flora y Morrórico) y Frío (abastece la planta de Floridablanca), con una capacidad de tratamiento de 2000, 1400 y 600 litros por segundo respectivamente. La primera fuente suministra el agua tratada mediante bombeo y las dos últimas lo hacen por gravedad.

La planta de tratamiento de Bosconia hace parte del proyecto Suratá, cuyos estudios fueron realizados en el año de 1980, y el cual se realizó con el objeto de ampliar el suministro al Área Metropolitana de Bucaramanga, con un horizonte de diseño al año 2000, el cual comprendió la construcción de: la captación del río Suratá, las obras de pretratamiento tanques (desarenadores y presedimentadores), la planta de tratamiento de Bosconia, estación de Bombeo de agua tratada, subestación eléctrica, línea de impulsión y el sistema de redes y tanques para la distribución del agua a la ciudad.²

El conjunto de equipos eléctricos, electrónicos y mecánicos que constituyen la estación de bombeo, impulsan el agua tratada del tanque de almacenamiento en la planta de Bosconia, a los tanques de distribución Morrorico y/o Estadio. La estación tiene una capacidad máxima de 2000 l/s y está integrada por un conjunto de cuatro (4) unidades de bombeo. Los componentes del sistema son las unidades principales de bombeo (motor-bomba), unidad de llenado, tuberías, tanques de succión y descarga, sistema de control de golpe de ariete, sistema de refrigeración, sistema de lubricación, tableros de control y subestación eléctrica para la transformación de energía.³

La ejecución e implementación de esta monografía se lleva a cabo en la estación de bombeo de la planta Bosconia, como parte del plan de automatización llevado a cabo en este sitio, en el que se busca el control y monitoreo de los procesos de bombeo de agua, subestación eléctrica y sistema de media tensión de la estación de bombeo mediante una aplicación central soportada sobre la plataforma LabVIEW.

² Disponible en internet: <http://www.amb.com.co/frmlInformacion.aspx?inf=33>

³ *amb*. Manual operativo del bombeo de Bosconia. Vol. 1. Bucaramanga. Colombia. 2006. p. 6.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describe el sistema eléctrico de la planta Bosconia desde su punto de entrada desde las líneas de distribución del comercializador de energía hasta llegar a los servicios auxiliares, con el fin de dar una idea de la ubicación de los puntos donde se realiza la medición de las variables eléctricas del sistema y la relevancia de cada uno de ellos. También se presentan las centrales de medida utilizadas actualmente para la lectura de las variables eléctricas, mostrando sus especificaciones y características principales. Por último se hace una explicación general del protocolo Modbus, enfatizando en los aspectos del montaje físico de una red de este tipo y las funciones que este protocolo posee para leer registros internos de un dispositivo determinado.

2.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO BOSCONIA

El sistema eléctrico de la planta Bosconia del *amb* está conformado por todos los elementos y equipos que permiten tomar la energía eléctrica desde las líneas de transmisión de la Electrificadora de Santander, transformar los niveles de tensión y distribuir la energía hasta las diferentes cargas que allí se tienen. Dentro de este sistema también se encuentran los elementos de protección que permiten desconectarlo total o parcialmente ante la presencia de alguna falla eléctrica y los dispositivos de medición de las variables eléctricas que permiten monitorear el estado del sistema lo largo de todo el circuito y de las diferentes cargas que allí se tienen.

A continuación se describe el sistema en sentido aguas abajo del circuito eléctrico, es decir, recorriendo sus partes en la dirección en que la energía eléctrica fluye.

2.1.1 Subestación eléctrica

Como primer elemento se encuentra la subestación eléctrica, que tiene como finalidad realizar los procesos 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 todos los procesos de la planta de Bosconia, esto es, la estación de bombeo, la planta de tratamiento y la captación del río.

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 se muestra una imagen de la subestación eléctrica de la planta Bosconia, donde a la izquierda se visualizan los dos (2) transformadores principales, seguidos por los disyuntores de potencia y los transformadores de corriente, y a la derecha se encuentran los seccionadores de potencia, con los juegos de barrajes y los transformadores de tensión en su parte inferior.

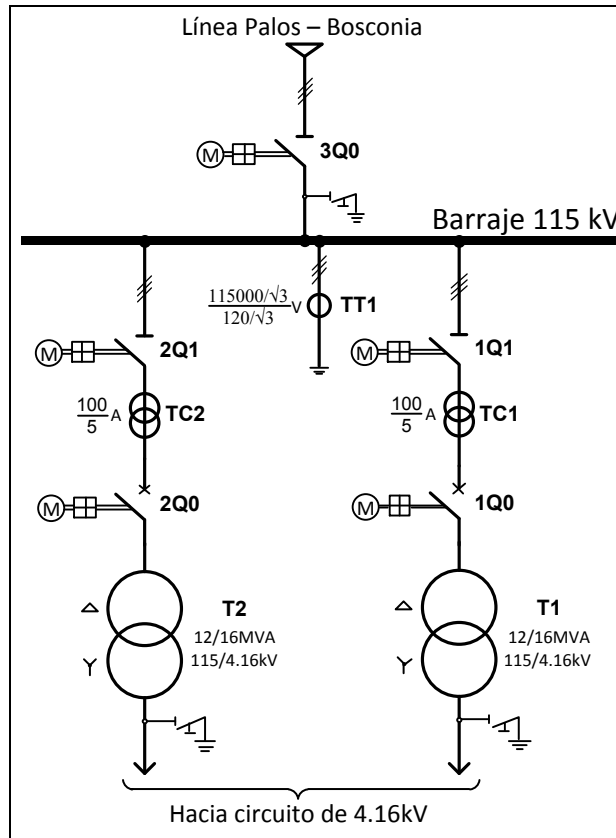
Figura 1. Subestación eléctrica de la planta Bosconia



En la Figura 2 se muestra el diagrama unifilar de la subestación eléctrica. Cuenta con un seccionador de línea o seccionador principal (3Q0) con corriente de servicio de 800A, encargado de aislar o conectar la alimentación proveniente de las líneas de distribución con el resto de la subestación. También cuenta con un barraje de 115kV, encargado de distribuir la energía eléctrica hacia dos (2) transformadores de potencia de 12/16MVA (T1 y T2) con relación de transformación ajustable y fijada actualmente a 115kV/4.16kV, con arrollamientos sumergidos en aceite y sistema de protecciones contra fugas de aceite, sobrecalentamientos, descargas atmosféricas, explosiones internas y fallas eléctricas.

Estos transformadores no operan simultáneamente y funcionan como sistema de respaldo mutuo.

Figura 2. Diagrama unifilar de la subestación eléctrica



Cada uno de los transformadores cuenta con un juego de equipos de corte que son: un seccionador secundario (1Q1 y 2Q1), encargado de aislar cada transformador del barraje de 115kV y un disyuntor de potencia (1Q0 y 2Q0) con corriente de servicio de 2500A, que permite cortar el paso de corriente hacia el transformador en presencia de carga, esto mediante el uso de cámaras de extensión de arco eléctrico llenas con gas SF6.

Adicionalmente cuenta con otros elementos como los pararrayos de las líneas de 115 kV, transformadores de tensión (TT1) para la medida de esta variable en el lado de 115kV, un (1) juego de transformadores de corriente (TC1 y TC2) para cada transformador de

potencia para protecciones y medición, un malla de tierra debajo del área de la subestación y tableros de operación local de cada seccionador y disyuntor.

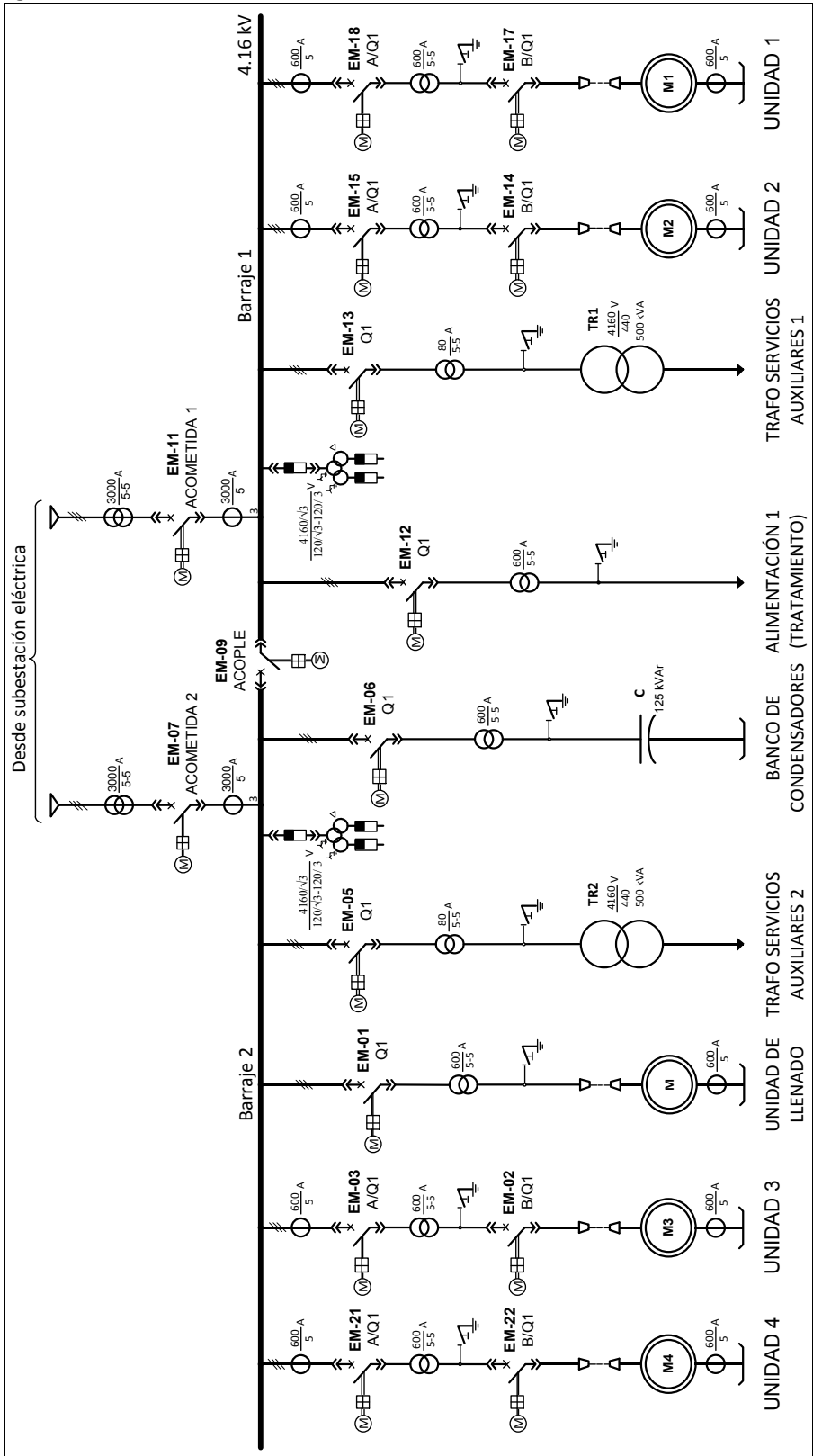
Con respecto a la medición de variables eléctricas en la subestación eléctrica, en la sala de control de la estación de bombeo Bosconia se tienen dos (2) equipos para la medición e indicación de las medidas eléctricas de cada transformador de potencia en su lado primario. Para esto, ambos medidores reciben las señales de tensión provenientes de los transformadores de tensión (TT1) para así inferir las tensiones de línea y de fase en el barraje de 115kV. Para las corrientes de línea, a cada medidor se entregan las señales de su correspondiente juego de transformadores de corriente (TC1 y TC2).

2.1.2 Circuito de distribución de media tensión

Después de que se ha llevado a cabo el proceso transformación de los niveles de energía a través de la subestación eléctrica, el sistema eléctrico de la planta Bosconia cuenta con un circuito como el que se muestra en la Figura 3, conformado por dos (2) barrajes independientes a 4.16kV que toman la alimentación de cada transformador de potencia a través de dos (2) acometidas y la distribuyen hacia las diferentes cargas del sistema a través de interruptores de media tensión. Estos dos barrajes tienen la posibilidad de ser acoplados entre sí con el fin de que un solo transformador de potencia pueda alimentar todas las cargas del sistema. Las cargas que se conectan directamente a los barrajes de media tensión son: los motores de las cuatro unidades de bombeo, el motor de la unidad de llenado, la planta de tratamiento de agua, los transformadores de servicios auxiliares y los bancos de condensadores. Al igual que la subestación eléctrica, este circuito cuenta con transformadores de tensión conectados a cada barraje y transformadores de corriente instalados en cada carga y sobre las líneas del secundario de cada transformador de potencia, que son usados para la medición de variables y las protecciones eléctricas.

Para la medición e indicación de las variables eléctricas, este circuito cuenta con equipos de medida instalados para cada una de las cargas y aguas abajo de cada uno de los interruptores de media tensión de las acometidas 1 y 2.

Figura 3. Diagrama unifilar del circuito de distribución de media tensión



2.1.3 Equipos para medición de variables eléctricas

Como se mencionó en las secciones anteriores, el sistema eléctrico de la planta Bosconia cuenta con equipos de medida instalados en diferentes partes del circuito que basándose en la detección de las corrientes y tensiones de línea, deducen y muestran las principales medidas de la red eléctrica como son: tensiones de línea y de fase, corrientes de línea, potencias activa, reactiva y aparente, energía acumulada, frecuencia de la red, factor de potencia y distorsión armónica total de la onda de corriente; cada una de ellas tanto en cada fase como las totales o promedio. Estas mediciones ayudan a los operadores de bombeo a monitorear el estado del sistema, verificando que cargas se encuentran en funcionamiento, su consumo de potencia, la calidad de las ondas, entre otros.

Las centrales de medida utilizadas en la planta Bosconia son de marca Schneider Electric y se dispone de dos (2) modelos que son PM200 y PM800. Estos modelos poseen características muy similares en cuanto a campo de aplicación, especificaciones y funciones, siendo el último un equipo más reciente y con un poco más de funcionalidades entre las que se encuentra una de gran interés para el desarrollo de esta monografía y que es la disposición de un puerto RS485 nativo con manejo de protocolo Modbus y con registros de memoria internos que almacenan los valores de las diferentes mediciones que el equipo realiza (Ver Anexo A). En la Tabla 1 se muestran las especificaciones de estos equipos.

Tabla 1. Características de las centrales de medida de la planta Bosconia

PARÁMETRO	PM500	PM800
Aspecto físico		
Tipo de red	Baja o media tensión. Trifásica de 3 o 4 hilos, bifásica o monofásica.	Baja o media tensión. Trifásica de 3 o 4 hilos, bifásica o monofásica.
Mediciones disponibles	Valor instantáneo, máximo y promedio de las corrientes de fase y neutro, tensiones simples y compuestas, frecuencia, potencias y energías activa, reactiva y aparente; factor de potencia, contador	Valor instantáneo, mínimo/máximo, promedio y de demanda de las corrientes de fase y neutro, tensiones simples y compuestas, frecuencia, potencias y energías activa, reactiva y aparente; factor

	horario y Tasa de Distorsión Armónica (THD) en corriente y tensión.	de potencia, contador horario y Tasa de Distorsión Armónica (THD) en corriente y tensión.
Comunicación	Comunicación vía RS485 de 2 hilos con protocolo Modbus.*	Comunicación vía RS485 de 2 hilos con protocolos Modbus ASCII/RTU y Jbus.
Características adicionales	Entradas digitales para contabilización por pulsos y salidas a relé para indicación de alarmas programables. Salidas analógicas de 4-20mA.*	Entrada digital, salida a relé y salida KY de estado sólido. Gestión de alarmas en la central de medida.

* Características disponibles mediante instalación de módulos adicionales sobre la central de medida.

La central PM800 almacena las medidas de la red eléctrica dentro de registros internos en memoria no volátil (RAM), que pueden usarse con los protocolos Modbus (en sus versiones ASCII y RTU) y Jbus. Estos registros son de dos (2) bytes, encontrando el bit y el byte menos significativos a la derecha de los registros (ver Figura 4). Las medidas eléctricas pueden almacenarse en los registros internos con cierto factor de escala dependiendo de la magnitud de estas, ya que el rango de valores obtenido con 16 bits es de 0 a 32767. En la Tabla 2 se muestran los rangos de medición soportados por el PM800 y su correspondiente factor de escala, este factor se representa como potencia de 10. Por ejemplo, un multiplicador de 100 se representa con un factor de escala de 2, ya que $10^2=100$.

Figura 4. Formato de registros internos en la central de medida PM800

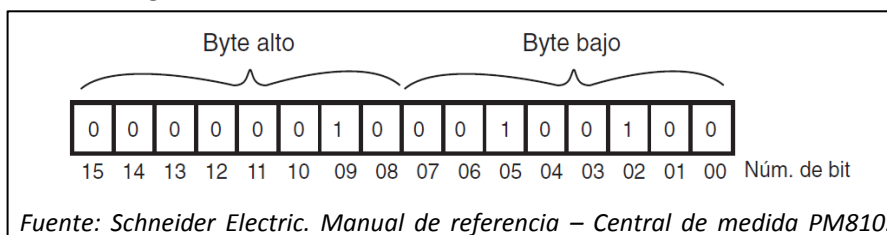


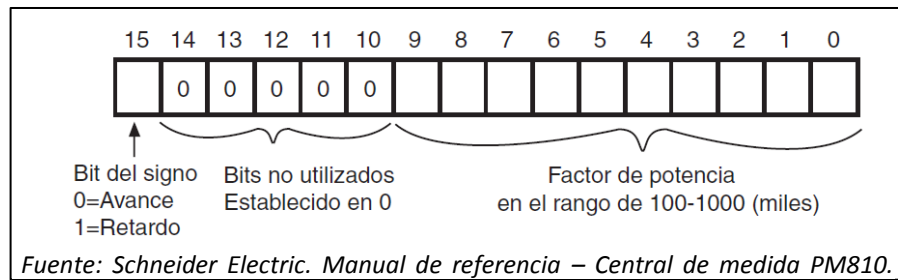
Tabla 2. Grupos de escala de la central de medida PM800

Grupo de escala	Rango de medición	Factor de escala
Grupo de escala A—Intensidad de fase	Amperios	
	0–327,67 A	–2
	0–3.276,7 A	–1
	0–32.767 A	0 (predeterminado)
	0–327,67 kA	1
Grupo de escala B—Intensidad de neutro	Amperios	
	0–327,67 A	–2
	0–3.276,7 A	–1
	0–32.767 A	0 (predeterminado)
	0–327,67 kA	1
Grupo de escala D—Tensión	Tensión	
	0–3.276,7 V	–1
	0–32.767 V	0 (predeterminado)
	0–327,67 kV	1
	0–3.276,7 kV	2
Grupo de escala F—Potencia kW, kVAR, kVA	Potencia	
	0–32,767 kW, kVAR, kVA	–3
	0–327,67 kW, kVAR, kVA	–2
	0–3.276,7 kW, kVAR, kVA	–1
	0–32.767 kW, kVAR, kVA	0 (predeterminado)
	0–327,67 MW, MVAR, MVA	1
	0–3.276,7 MW, MVAR, MVA	2
	0–32.767 MW, MVAR, MVA	3

Fuente: *Schneider Electric. Manual de referencia – Central de medida PM810.*

Para el factor de potencia, la central de medida usa notación de magnitud con signo como se muestra en la Figura 5, donde el bit 15 (bit de signo) indica avance o retardo. Un valor positivo (bit 15=0) representa factor de potencia en adelante, mientras que un valor negativo (bit 15=1) es retardo. Los bits 0–9 almacenan un valor dentro del rango comprendido entre 0,000 y 1,000 decimal. Por tanto, para obtener el valor real del factor de potencia es necesario dividir entre 1000 el dato leído desde la central de potencia.

Figura 5. Formato del factor de potencia en la central de medida PM800



2.2 LECTURA DE REGISTROS CON PROTOCOLO MODBUS

2.2.1 Generalidades de Modbus

El protocolo Modbus es un estándar de bus de campo utilizado ampliamente en diversos campos de aplicación con el fin de intercambiar información entre equipos que se encuentran generalmente en los dos primeros niveles de la pirámide de automatización (nivel de campo y nivel de control). Su designación no corresponde propiamente a un estándar de red incluyendo todos los aspectos desde el nivel físico hasta el de aplicación, sino a un protocolo de enlace (nivel OSI 2), pudiendo por tanto, implementarse con diversos tipos de conexión física y cada fabricante suele suministrar un software de aplicación propio, que permite parametrizar sus productos.

Por ser un protocolo de comunicación abierto, Modbus permite enlazar equipos de diferentes fabricantes y naturaleza. Ejemplo de esto es la aplicación implementada en la estación de bombeo Bosconia, en la que una aplicación en LabVIEW ejecutándose sobre un PC se comunica con equipos de control, como son PLCs de marca *Unitronics* y equipos de campo, como son las centrales de medida de *Schneider Electric*.

El medio físico de conexión puede ser un bus semidúplex (half duplex) (RS-485 o fibra óptica) o dúplex (full duplex) (RS-422, 0-20mA o fibra óptica). La comunicación es asíncrona y las velocidades de transmisión van desde los 75 baudios a 115200 baudios. La máxima distancia entre equipos depende del nivel físico, pudiendo alcanzar hasta 1200 m sin repetidores. La estructura lógica es del tipo maestro-esclavo, con acceso al medio controlado por el maestro. El número máximo de equipos previsto es de 63 esclavos más un maestro.

La comunicación se lleva a cabo mediante el intercambio de datos codificados dentro de tramas en modo ASCII o puramente binario según el estándar RTU. En cualquiera de los dos casos, cada trama obedece a un formato que contiene cuatro campos principales. Las diferencias radican en el campo de control de errores que en modo ASCII se conoce como LRC (Control de Redundancia Longitudinal) y para RTU es el CRC (Control de Redundancia Cíclica); además, la trama ASCII incluye caracteres adicionales de encabezamiento y final de mensaje. En la Figura 6 se muestra el formato de la trama RTU que es la de interés en esta monografía.

Figura 6. Formato de trama Modbus en modo RTU

DIRECCIÓN	FUNCIÓN	DATOS	CRC
1 byte	1 byte	N bytes	2 bytes

El protocolo Modbus presenta otras características que permiten realizar verificación de errores y control de flujo para dar más confiabilidad a la comunicación. En el envío de cada byte que compone una trama, permite definir el uso de entre cinco (5) y ocho (8) bits de datos, también la inclusión de un bit de paridad (ya sea par o impar) y otro de parada y la opción de agregar un carácter de terminación después de cada trama. Por último, se debe definir un intervalo de tiempo que el maestro deberá esperar para la respuesta de un esclavo antes de declararlo inactivo o que simplemente la petición no fue contestada. Estos parámetros, al igual que la velocidad de transmisión de datos (tasa de baudios) deben ser usados de la misma manera por todos los equipos que componen la red Modbus con el fin de que se use el mismo “idioma” y la comunicación sea exitosa.

2.2.2 Lectura de registros internos

El protocolo Modbus cuenta con un conjunto de funciones (véase la Tabla 3) que permiten leer o escribir datos sobre un esclavo determinado. Estas funciones pueden actuar sobre el estado de uno o varios bits de entrada del esclavo, así como sobre los bits internos y los de salida. También puede leer o escribir uno o varios bytes o palabras almacenadas en los registros internos del esclavo. Además de estas, existe otras funciones para diagnóstico y

configuración del equipo esclavo e incluso funciones especiales que los fabricantes han implementado para manejo específico de sus equipos.

Tabla 3. Funciones del protocolo Modbus

FUNCIÓN	CÓDIGO	TAREA
0	00 _H	Control de la estación esclava
1	01 _H	Lectura de n bits de salida o internos
2	02 _H	Lectura de n bits de entrada
3	03 _H	Lectura de n palabras de salida o internos
4	04 _H	Lectura de n palabras de entrada
5	05 _H	Escritura de un bit
6	06 _H	Escritura de una palabra
7	07 _H	Lectura rápida de bits
8	08 _H	Control de contadores de diagnóstico número 1 a 8
11	0A _H	Control de contador de diagnóstico número 9
15	0F _H	Escritura de n bits
16	10 _H	Escritura de n palabras

Para llevar a cabo cualquier función, el equipo maestro debe iniciar la comunicación con el envío de una trama de petición que se forma con el número del esclavo a quien va dirigida la trama y que va incluido en el campo de dirección, también debe especificar el código de función a ejecutar dentro del segundo carácter de la trama. El campo de datos se completa de acuerdo a la función, conteniendo la dirección y cantidad de los datos a leer o escribir. Por último, el campo de control de errores se llena con el CRC, que se calcula con base en un algoritmo aplicado a todos los datos de la trama y que puede ser consultado en referencias bibliográficas especializadas en el tema de Modbus.

En el caso específico de las centrales de medida PM800, se debe usar la función de lectura de n palabras de salida o internos (03) que permite leer múltiples registros a partir de una sola petición. De acuerdo a lo anterior y a la lista de registros del anexo A, para la lectura de las tres (3) tensiones de línea y la promedio de la red eléctrica, la trama de petición que se debe enviar a la central de medida es como se muestra en la Figura 7 (suponiendo como 02 la dirección del esclavo), donde se usa 1119_D como dirección del primer registro a pesar de que en la lista de registros aparece 1120_D, esta modificación se hace de

acuerdo a pruebas realizadas con la central de medida en las que siempre se obtenía el dato siguiente al registro que se requería y por tanto, se debe restar 1 a la dirección del dato requerido. La cantidad de registros requeridos es de cuatro (4).

Figura 7. Trama de petición al PM800 para lectura de tensiones de línea

02_H	03_H	1119_D	04_D	17684_D
# esclavo (1 byte)	Función (1 byte)	Dirección del 1er registro (2 bytes)	# de registros a leer (2 bytes)	CRC (2 bytes)

Después de que se envía la petición al esclavo, este la procesará y responderá siempre y cuando se cumplan dos (2) condiciones: que la trama vaya dirigida a él, es decir, que la dirección incluida en la petición coincida con la suya y por otra parte, que al calcular el CRC de la petición este sea igual al que se incluyó en la trama original. El mensaje de respuesta tiene el mismo formato de la Figura 6 y los dos (2) primeros campos coinciden con los de la trama de petición, esto es, la dirección es la del esclavo y la función corresponde a la misma con la que se recibió la petición; en el campo de datos se incluye información que depende de la petición recibida y puede contener la cantidad de bytes de respuesta y los datos pedidos por el maestro, o en caso de escritura, la dirección y la cantidad de datos modificados; el CRC es calculado igualmente sobre la trama completa y adjuntado al final de esta.

Para el ejemplo propuesto de la lectura de las tensiones de línea en la central de medida, la trama de respuesta es de la forma mostrada en la Figura 8. En el campo de datos aparece la cantidad de bytes retornados y la información solicitada. Cabe aclarar que aunque fueron solicitados cuatro (4) registros, el equipo responde con ocho (8) bytes ya que de acuerdo a ... sección 2.1.3... los registros internos de la central de medida son de 16 bits cada uno y también debe observarse que debido a que se trata de registros binarios, los valores de las tensiones aparecen como cantidades enteras y por tanto, es necesario quitar el factor de escala aplicado por la central de medida, dividiendo entre 100 para así obtener las medidas reales: 115,23kV, 114,87kV, 114,02kV y tensión promedio de 114,71kV.

Figura 8. Trama de respuesta del PM800 para lectura de tensiones de línea

02_H	03_H	08_D	11523_D	11487_D	11402_D	11471_D	25555_D
# esclavo (1 byte)	Función (1 byte)	# de bytes retornados (1 byte)	Línea 1-2 (2 bytes)	Línea 2-3 (2 bytes)	Línea 3-1 (2 bytes)	Promedio (2 bytes)	CRC (2 bytes)
Datos solicitados (8 bytes)							

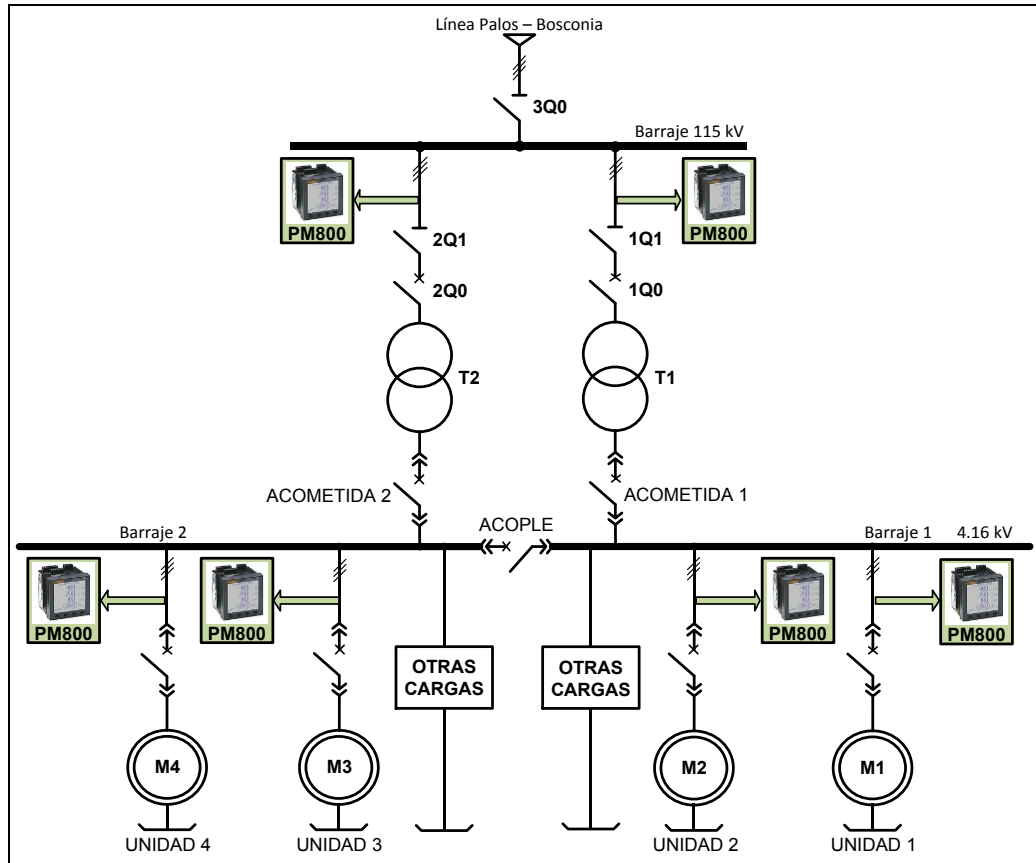
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED MODBUS

En este capítulo se presentan los criterios tenidos en cuenta para la elección de la topología de red Modbus a usar, así como los aspectos relacionados con su implementación física.

Las centrales de medida PM800 se deben ubicar en línea con las cargas o partes del sistema eléctrico de la planta Bosconia donde se requiera tomar las medidas para ser llevadas vía Modbus a la aplicación por computador. Teniendo en cuenta que el *amb* cuenta con cuatro (4) centrales PM800 instaladas en diferentes partes del circuito de distribución de media tensión y que se autorizó para la adquisición de otros dos (2) equipos, se decidió en conjunto con los ingenieros de la compañía colocar estas seis (6) centrales en las partes más relevantes y críticas del sistema eléctrico, el resto de componentes del sistema se dejarían con las centrales PM500.

Como primera instancia, se tiene la subestación eléctrica como el componente más crítico dentro del sistema eléctrico de la planta Bosconia y por tanto se debe incluir el monitoreo de sus variables eléctricas dentro de la aplicación. Según ...sección 2.1.1..., para esta parte se tienen dos (2) centrales de medida que inicialmente eran PM500 y que deben remplazarse por las PM800. Siguiendo con las partes del sistema eléctrico en orden de importancia, están las cuatro (4) unidades principales de bombeo que como se explicó en ...sección 2.1.2..., cada una cuenta con una central de medida que también deben ser remplazadas por las PM800. De esta manera, se tienen seis (6) centrales de medida para ser monitoreadas vía comunicación Modbus, distribuidas sobre el sistema eléctrico de la planta Bosconia, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Esquema eléctrico con centrales de medida a comunicar



3.1 TOPOLOGÍA DE RED

Como se expuso en ...sección 1.1..., la estación de bombeo de Bosconia cuenta con un sistema de monitoreo y control por LabVIEW que utiliza una red Modbus para conectar el computador maestro con tres (3) PLCs esclavos que controlan la subestación eléctrica y las cuatro (4) unidades de bombeo principales. Por tanto, como se muestra en la Figura 10, la lectura de las centrales de medida se hará a través de su inclusión a la red Modbus ya existente, quedando la aplicación en LabVIEW como el maestro y tres (3) PLCs y seis (6) centrales de medida como equipos esclavos. Las direcciones de los esclavos se han reasignado como se muestra en la Tabla 4.

Figura 10. Topología de la red Modbus implementada

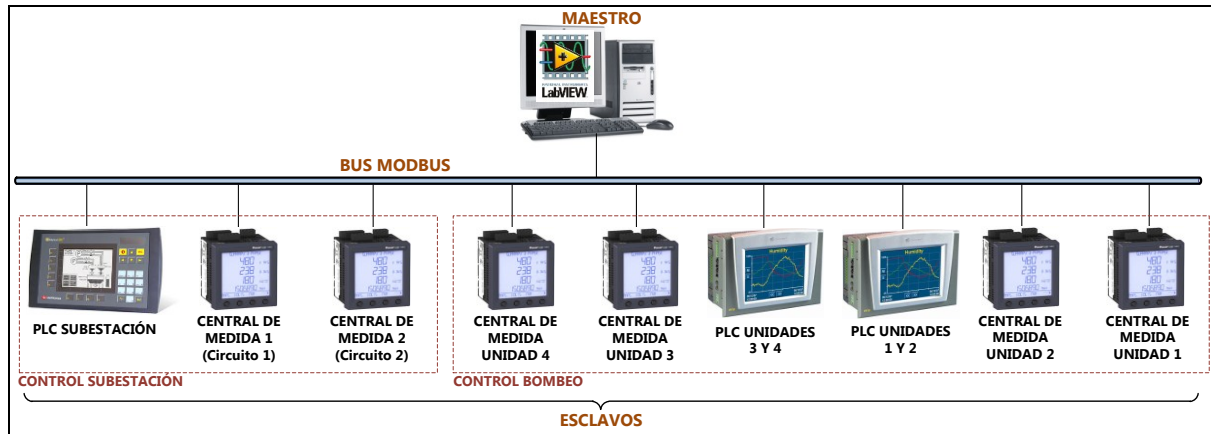


Tabla 4. Direcciones asignadas para los esclavos de la red Modbus

EQUIPO	DIRECCIÓN MODBUS
Central de medida – Circuito 1 subestación	01 _H
Central de medida – Circuito 2 subestación	02 _H
PLC subestación	03 _H
PLC Unidades 1 y 2	04 _H
PLC Unidades 3 y 4	05 _H
Central de medida – Unidad 1	06 _H
Central de medida – Unidad 2	07 _H
Central de medida – Unidad 3	08 _H
Central de medida – Unidad 4	09 _H

La configuración usada para la transmisión de datos es como se muestra en la Tabla 5.

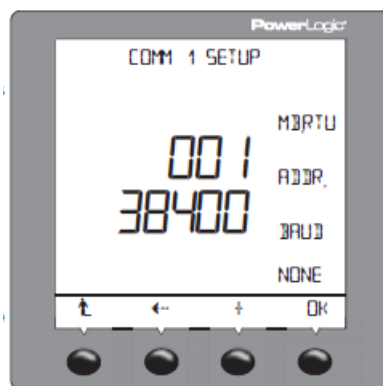
Tabla 5. Parámetros de la red Modbus implementada

PARÁMETRO	VALOR
Bits de datos (en cada byte)	8
Bits de parada	1
Paridad	Ninguna
Control de flujo	Ninguno
Timeout (tiempo de espera)	1 segundo
Caracter de terminación	Ninguno

3.2 PROGRAMACIÓN DE LAS CENTRALES DE MEDIDA

Las centrales de medida requieren que sus parámetros de comunicación serial sean configurados con los valores de la red Modbus que se ha diseñado. Para esto, las centrales PM800 cuentan con un menú como el mostrado en la **Figura 11**. En el que se deben ingresar los siguientes parámetros: protocolo a usar (Modbus RTU), entre los que se encuentran también como opciones el Jbus y Modbus ASCII de 8 bits o 7 bits; también están la dirección de esclavo Modbus, la tasa de baudios que puede ir hasta 38400 y por último, el tipo de paridad. Estos cuatro (4) parámetros se configuraron de acuerdo al diseño presentado en la sección anterior, siendo iguales para las seis (6) centrales de medida, excepto por la dirección de esclavo Modbus que se seleccionaron de acuerdo a la Tabla 4.

Figura 11. Menú de configuración para el puerto serial de la central PM800



3.3 IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DE LA RED

El medio físico que se usaba previamente y también para el nuevo bus Modbus utiliza el estándar RS485 de comunicación serial en el modo half dúplex (2 hilos). Esto debido a las ventajas que presenta este estándar en cuanto a inmunidad a ruido, mayor velocidad de

transmisión y un bus más largo. EL estándar RS485 es soportado de forma nativa por todos los equipos esclavos: los PLCs y las centrales de medida y por tanto, no se debe realizar ninguna adaptación o conversión para su conexión al bus. Sin embargo, el computador como primer inconveniente no presenta ningún puerto de comunicación serial RS232 ni mucho menos para RS485. Como consecuencia se debe usar un par dispositivos que permitan enlazar el PC con el bus Modbus. El primero convierte cualquier puerto USB del PC en un puerto serial con conector DB9⁴ (ver Figura 12a) y con la instalación de un driver permite ver transparentemente este puerto como un serial nativo; el otro dispositivo es un conversor serial de RS232 a RS422/485 (ver Figura 12b), alimentado con una fuente externa de 12Vdc, cuenta con un conector DB25 (25 pines) para la interfaz RS232 y borneras para la de RS422/485 y posee jumpers para configurar la tasa de baudios usada, el tipo de enlace (RS422 a 4 hilos o RS485 a 2 hilos) y activar la resistencia de terminación⁵. Cabe aclarar que para interconectar estos dos dispositivos debe usarse un convertidor pasivo de conector DB25 a DB9.

Figura 12. Dispositivos utilizados para disponer de un puerto RS485 en el PC

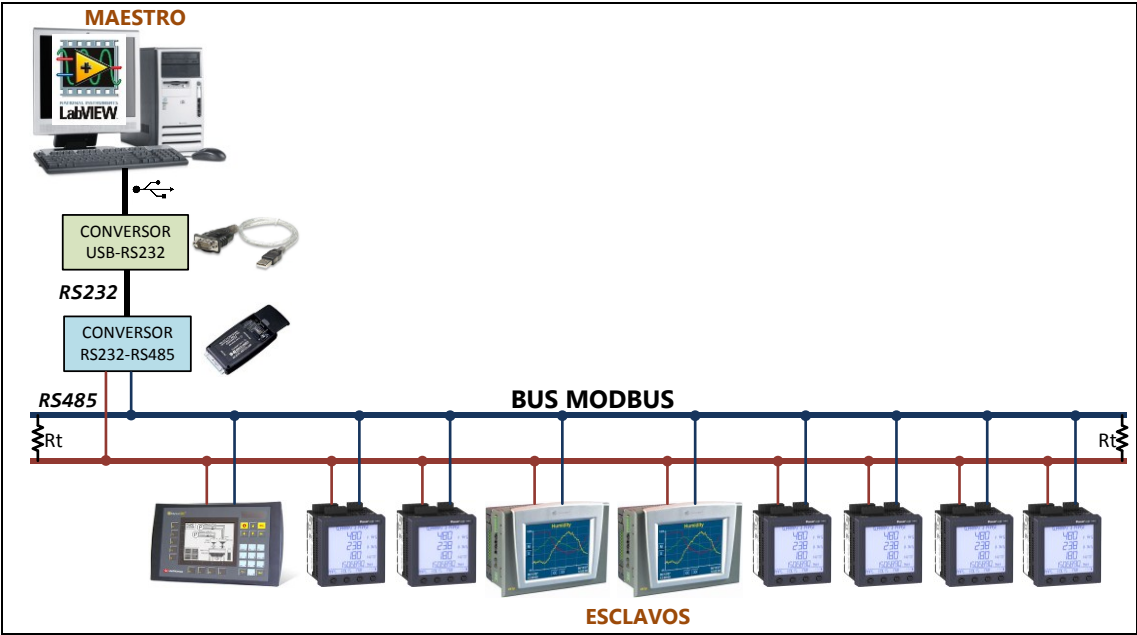


De acuerdo a lo anterior, la conexión física de la red Modbus se muestra en la Figura 13 donde además se muestran las resistencias de terminación R_t en los extremos del bus debido a la longitud considerable de este que es de aproximadamente 30 metros.

⁴ Es el tipo de conector para comunicación serial RS232 más usado en computación y presenta 9 pines de conexión.

⁵ Resistencia colocada en paralelo al bus en sus dos extremos con el fin de compensar efectos de distorsión de la señal asociados a la longitud y velocidad de transmisión.

Figura 13. Implementación física de la red Modbus



4. PROGRAMACIÓN EN LABVIEW

Después de haber definido las características de las centrales de medida, los pasos a seguir para llevar a cabo la lectura de sus registros internos y los aspectos concernientes a la implementación de la red Modbus; en este capítulo se describe el desarrollo de la programación del maestro Modbus en LabVIEW para el envío y la recepción de tramas hacia las centrales de medida, el graficado y guardado del histórico de las variables, el diseño y montaje de la interfaz gráfica y la integración con la aplicación existente en el bombeo Bosconia.

4.1 LECTURA DE MEDIDAS DE LA RED ELÉCTRICA

4.1.1 Función Modbus 03 para lectura de registros internos

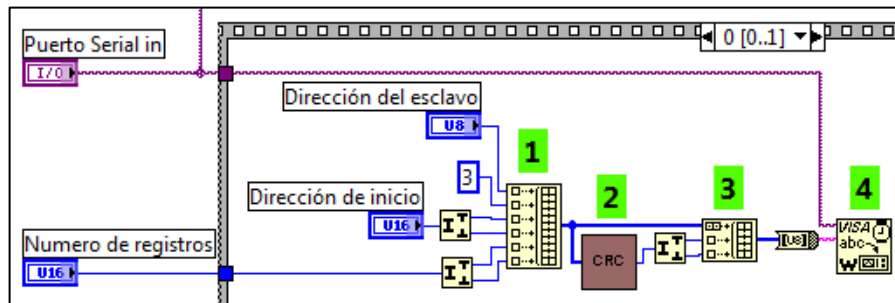
Para obtener las medidas de la red eléctrica desde las centrales de medida, se comienza por la implementación de la función de lectura de n palabras de salida o internos (03) del protocolo Modbus. Esto se lleva a cabo en la aplicación de LabVIEW en dos (2) pasos: el primero es la construcción de la trama de acuerdo a la posición y cantidad de registros que se quieran leer, para su posterior envío hacia la central de medida. En segunda instancia, se espera la trama de respuesta para la lectura, comprobación y decodificación de los datos.

Se diseñó en LabVIEW un subVI⁶ compuesto básicamente por una estructura *sequence* de dos (2) *frames* donde cada una ejecuta uno de los pasos mencionados. El primer paso, que es la construcción y envío de la trama, se programó como se muestra en la Figura 14 en el *frame* 0 del *sequence*. Inicialmente, en el bloque [1] de la figura se arma la trama de acuerdo a como se explicó en ...sección 2.2.2... sin incluir aún el CRC, que se calcula en el bloque designado con [2]; posteriormente, en [3] se adjunta el CRC a la trama inicialmente configurada en [1] y el *array* resultante se convierte en una cadena de caracteres para ser enviado al puerto serial virtual en [4], configurado previamente con los drivers del

⁶ Programa o subrutina de LabVIEW que cumple una determinada función y que puede usarse dentro otro VI, a manera de bloque.

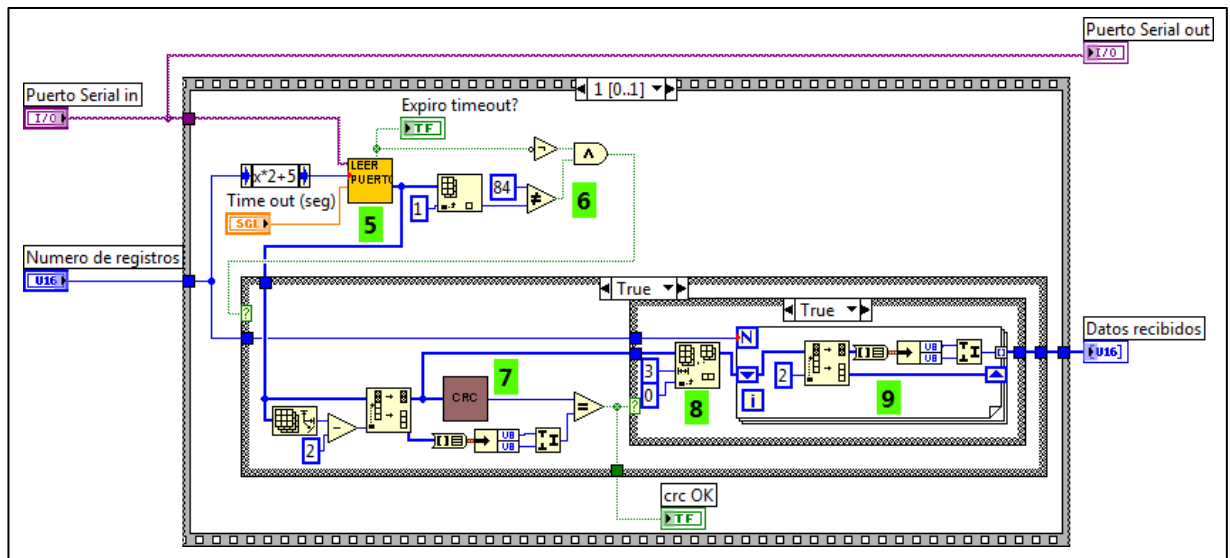
conversor USB-RS232 mencionado en el capítulo anterior. Puede observarse que la dirección del esclavo, la dirección del primer registro y la cantidad de registros son parámetros que a diferencia del código de función (03_H) que es constante, se dejan como controles para que funcionen como una entrada al subVI. También cabe aclarar que el bloque  se usa con el fin de separar un dato de dos (2) bytes de longitud (más significativo y menos significativo) en dos (2) datos de un (1) byte cada uno.

Figura 14. Construcción y envío de trama de petición Modbus en LabVIEW



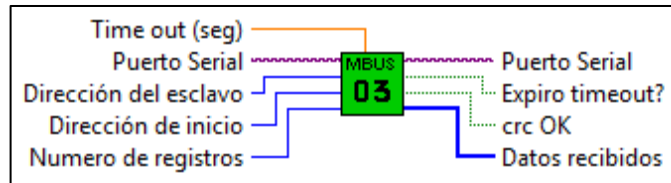
Para leer y extraer la información deseada de la trama de respuesta se programó en el *frame* 1 la rutina mostrada en la Figura 15. Se comienza leyendo el buffer del puerto serial a través del bloque [5] “Leer puerto”, que tiene como entradas: el puerto serial usado, el *timeout* o tiempo máximo de espera para que los datos lleguen al puerto y la cantidad de bytes a leer, que corresponde a la longitud de la trama respuesta y que es calculada tomando el doble de la cantidad de registros solicitados en la trama de petición, ya que como se explicó en ...sección 2.2.2..., por cada registro que se solicita a la central de medida, esta responde con dos (2) bytes; a esto se suma 5 que corresponde a los bytes que aparecerán siempre en la trama respuesta (dirección, función, cantidad de registros retornados y CRC H+L). Este bloque tiene como salidas un indicador booleano para mostrar si el tiempo de espera transcurrió sin obtener datos en el puerto y el *array* numérico para la trama leída; su funcionamiento se explica más adelante.

Figura 15. Lectura y decodificación de la trama recibida en LabVIEW



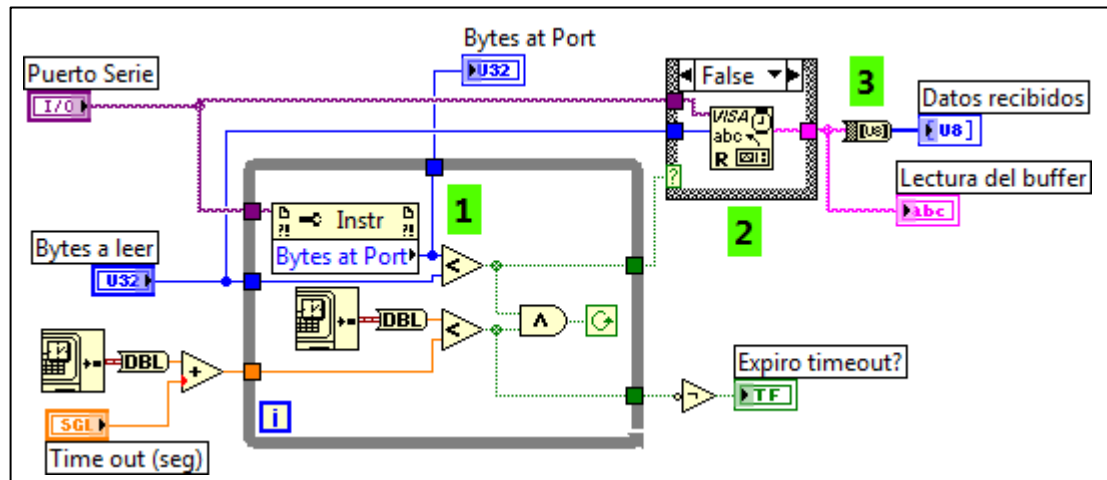
Una vez leído el puerto serial, en [6] se verifican dos (2) condiciones necesarias para continuar con el proceso de verificación y decodificación de datos: la primera es que el *timeout* no se haya agotado y por tanto ningún dato haya llegado al puerto (el esclavo no respondió) y por otra parte, que el código de función de la trama (segundo campo) no corresponda a 84_H ya que este valor es usado por un esclavo en el protocolo Modbus para avisar que no ha podido procesar la petición recibida. Si ninguno de estos eventos ocurre, se ingresa al caso *true* de la estructura *case* donde se toma la trama leída, se separa el campo de CRC del resto de los datos y se calcula el CRC sobre estos últimos a través del bloque [7] para verificar si coincide con el incluido en la trama recibida. El estado de la verificación del CRC se envía a través de un indicador booleano y si es correcto, se entra al caso *true* del *case* interno donde básicamente, con el bloque [8] se extrae el campo de datos de la trama recibida. Teniendo cuenta que la central de medida divide cada registro interno de 16 bits en dos (2) bytes que son colocados uno a continuación del otro dentro de la trama respuesta, en la estructura *for* se implementa el algoritmo [9] que construye un *array* numérico concadenando cada par de datos consecutivos del campo de datos, es decir, se toman bytes de dos en dos y se coloca uno junto al otro para obtener registros de 16 bits a partir de cada par de bytes. En conclusión, el subVI explicado anteriormente constituye la función 03 del protocolo Modbus y sus entradas y salidas se resumen en la Figura 16.

Figura 16. SubVI para la función Modbus 03



Respecto al bloque “Leer puerto”, su diagrama de bloques se muestra en la Figura 17. Su funcionamiento parte de una estructura *while*, chequeando repetidamente en [1] la cantidad de bytes que han llegado al puerto hasta que haya una cantidad igual a la especificada en “bytes a leer”. Una vez que se completan los bytes en el puerto, se finaliza el ciclo *while* y se pasa al caso *false* de la estructura *case* en [2] para leer el buffer del puerto y posteriormente en [3], convertir la cadena de caracteres obtenida en un *array* de datos numérico. La ejecución del *while* se interrumpe también cuando el *timeout* ha transcurrido y la cantidad de bytes solicitada no se ha completado en el puerto; en este caso, se usa el caso *true* del *case* en donde solo se envía una cadena de caracteres vacía al paso [3], obteniendo al final un *array* vacío en “datos recibidos”.

Figura 17. Diagrama de bloques del subVI "Leer puerto"



4.1.2 Consulta de los registros de una central de medida

En la lista de registros de la central de medida (Anexo A), se observa que las medidas de la red eléctrica de interés no están ubicadas en registros consecutivos y por tanto, no es óptimo leerlos con una petición única que abarque todos los datos requeridos ya que esto acarrearía la lectura de registros que en su mayoría son inútiles, incrementando a su vez el tiempo de transmisión. Por lo anterior, los registros internos de la central de medida deben leerse por intervalos, es decir, el bloque de función Modbus 03 debe usarse tantas veces como intervalos con medidas consecutivas se encuentren en el mapa de memoria de la central de medida. En la Tabla 6 se muestra la forma en que los registros fueron agrupados para hacer su lectura a través de múltiples peticiones Modbus. Los grupos 4 y 5 corresponden a medidas que, según se definió en común acuerdo con el personal del *amb*, son de interés solo en la subestación eléctrica; por tanto y como se explica más adelante, la rutina implementada para esta parte en LabVIEW tiene en cuenta que la lectura de estos dos (2) grupos solo se hace para las dos (2) centrales de medida de la subestación. Cabe aclarar que en los intervalos 1 y 2 aparecen las direcciones 1104_d y 1152_d a 1159_d respectivamente que deben eliminarse ya que no contienen ningún dato.

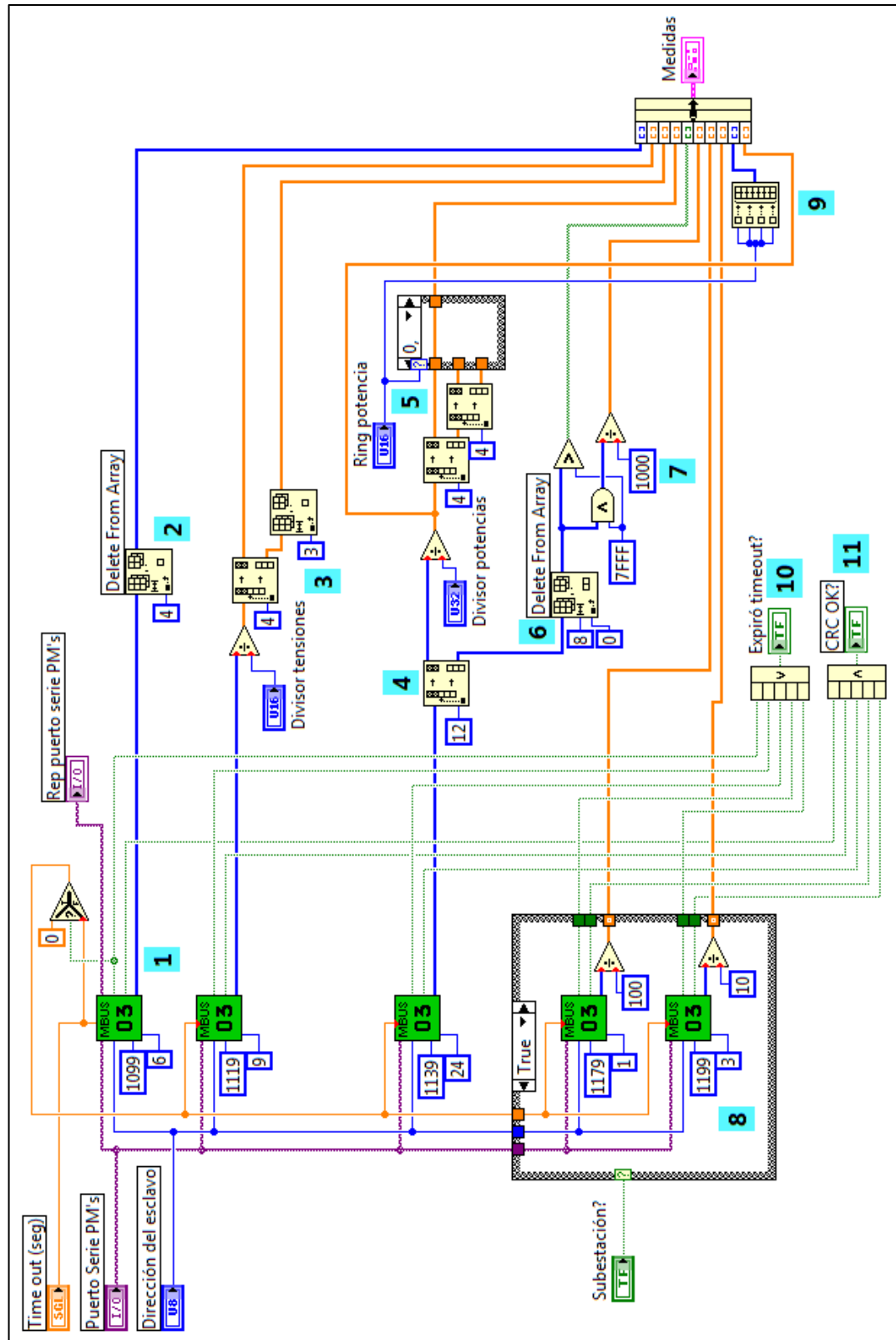
Tabla 6. Registros de interes de la central de medida PM800 agrupados para lectura Modbus

GRUPO	DIRECCIÓN	MEDIDA
1	1100 _d	Intensidad, Fase 1
	1101 _d	Intensidad, Fase 2
	1102 _d	Intensidad, Fase 3
	1103 _d	Intensidad, Neutro
	1104 _d	NA
	1105 _d	Intensidad, Media trifásica
2	1120 _d	Tensión, 1-2
	1121 _d	Tensión, 2-3
	1122 _d	Tensión, 3-1
	1123 _d	Tensión Promedio, L-L
	1124 _d	Tensión, 1-N
	1125 _d	Tensión, 2-N
	1126 _d	Tensión, 3-N
	1127 _d	Tensión, N-R
	1128 _d	Tensión L-N, Promedio
3	1140 _d	Potencia activa, Fase 1
	1141 _d	Potencia activa, Fase 2

	1142 _d	Potencia activa, Fase 3
	1143 _d	Potencia activa, Total
	1144 _d	Potencia reactiva, Fase 1
	1145 _d	Potencia reactiva, Fase 2
	1146 _d	Potencia reactiva, Fase 3
	1147 _d	Potencia aparente, Total
	1148 _d	Potencia aparente, Fase 1
	1149 _d	Potencia aparente, Fase 2
	1150 _d	Potencia aparente, Fase 3
	1151 _d	Potencia aparente, Total
	1152 _d a 1159 _d	NA
	1160 _d	Factor de potencia real, Fase 1
	1161 _d	Factor de potencia real, Fase 2
	1162 _d	Factor de potencia real, Fase 3
	1163 _d	Factor de potencia real, Total
4	1180 _d	Frecuencia
	1200 _d	Distorsión armónica total THD, Intensidad Fase 1
5	1201 _d	Distorsión armónica total THD, Intensidad Fase 2
	1202 _d	Distorsión armónica total THD, Intensidad Fase 3

Para la lectura de una central de medida determinada, el subVI diseñado envía cinco (5) peticiones si es de la subestación eléctrica y tres (3) peticiones para las unidades de bombeo. En cualquier caso, la función Modbus 03 usa la misma dirección de esclavo en todas las lecturas y en cada trama de petición se pone la dirección del primer registro de cada intervalo como dirección de inicio y la cantidad de datos contenida en cada uno respectivamente. De acuerdo a lo anterior, se diseñó un subVI cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 18, que utiliza el bloque de función Modbus 03 presentado en ...sección 4.1.1... para la lectura de cada intervalo de registros, apareciendo fijos los tres (3) primeros bloques y los dos (2) últimos dentro de un case que se ejecuta dependiendo del estado del control “Subestación?”. En este subVI también se adecuan y escalan los datos recibidos para emitir dentro del *cluster* “Medidas”, los *arrays* con cada una de las medidas requeridas.

Figura 18. Diagrama de bloques para lectura de las medidas de una central de medida



En la parte [1] del diagrama de la Figura 18, se solicita leer el primer intervalo de registros y se verifica si el *timeout* expiró para enviar un tiempo de espera de cero (0) a los demás bloques de lectura y así evitar que estos también se tomen el tiempo de espera especificado inicialmente con el control “Time out (seg)”. Aunque el diagrama de bloques por su naturaleza sugiere que los bloques de Modbus 03 se ejecutan todos al tiempo ya que no se ve ninguna dependencia secuencial entre ellos (lo que sería indeseable ya que el envío y recepción de las tramas debe ser secuencial), se sabe que LabVIEW solo corre un bloque u operación al tiempo y por tanto, hasta que no se ejecute totalmente cualquiera de ellos no se iniciará la ejecución de otra función.

Un *array* numérico de cuatro (4) elementos que representa las corrientes de línea es generado en la parte [2] del diagrama, donde simplemente se elimina el cuarto elemento que corresponde a al registro 1104_d. En [3] se toma el *array* del segundo intervalo de registros, se aplica un factor de escala ingresado a través de un control y se separa en dos *arrays* que contienen las tensiones de línea y fase respectivamente.

Con el bloque [4] se toma el *array* de la tercera lectura y se separa tomando los primeros doce (12) elementos que contienen las potencias activas, reactivas y aparentes, se aplica un factor de escala y luego se pasa a [5] donde se separan los tres (3) grupos de potencias y por medio de un selector implementado con un *case*, se envía a la salida el grupo seleccionado (activa, reactiva o aparente) pendiendo de lo solicitado en el control “Ring potencia”. De los elementos restantes de la separación hecha en [4], con el bloque [6] se elimina el intervalo de registros 1152_d a 1159_d y se obtiene el *array* con los factores de potencia codificados según ...sección 2.1.3.... En la parte [7] se verifica si estos datos sobrepasan el valor 7FFF_H para extraer el signo de los factores de potencia y se aplica una máscara *and* para obtener su magnitud. Los *arrays* booleano del signo y numérico de la magnitud del factor de potencia, son enviados al *cluster* de salida.

Si se está trabajando con una central de medida de la subestación eléctrica, se ejecuta el caso *true* del *case* en [8], donde se solicitan la frecuencia de la red y los registros de las Distorsiones Armónicas Totales (THD), se aplican los respectivos factores de escala y se adjuntan al *cluster* de salida.

En [9] se agrega un *array* de datos numéricos que representa las unidades de medida correspondientes a las cuatro (4) potencias seleccionadas en [5] siendo 0 para MW, 1 para MVar y 2 para MVA. También se añade un *array* que contiene los doce (12) datos de potencias. Por último, se calculan dos (2) banderas booleanas en [10] y [11] respectivamente: la primera con una compuerta *OR*, para representar si el *timeout* expiró en cualquiera de las consultas Modbus y la segunda con una operación *AND*, para indicar que todas las verificaciones de CRC fueron correctas.

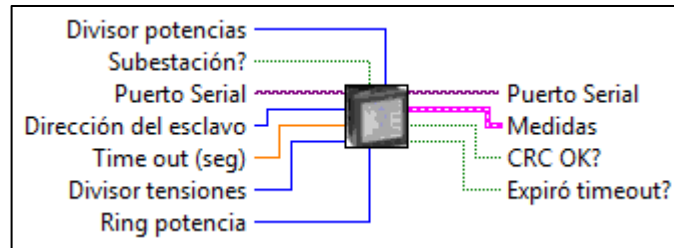
En resumen, el *cluster* de salida “Medidas” contiene las variables listadas en la Tabla 7, donde se especifica además las unidades, el tipo y cantidad de elementos de cada una de ellas.

Tabla 7. Lista de variables incluidas en el cluster de salida “Medidas”

VARIABLE	UNIDADES	TIPO DE ELEMENTO	CANTIDAD DE ELEMENTOS
Corrientes de línea	A	Arreglo numérico	4
Tensiones de línea	kV Subestación/V Unidades de bombeo	Arreglo numérico	4
Tensiones de fase	kV Subestación/V Unidades de bombeo	Arreglo numérico	4
Potencias seleccionadas	MW/MVar/MVA (Dependiendo del requerimiento)	Arreglo numérico	4
Factor de potencia en atraso?		Arreglo booleano	4
Magnitud del factor de potencia		Arreglo numérico	4
Frecuencia	Hz	Número	1
THD	%	Arreglo numérico	3
Unidades		Arreglo numérico	4
Potencias (todas)	MW, MVar y MVA	Arreglo numérico	12

El diagrama de bloques de la Figura 18, resulta en un subVI que en forma de bloque queda representado por sus entradas y salidas como se muestra en la Figura 19.

Figura 19. SubVI para la lectura de las medidas de una central de medida



4.2 GRÁFICOS DE TENDENCIAS

Para mostrar gráficos de tendencias en LabVIEW es común pensar en el uso de los indicadores *waveform chart* o *waveform graph* debido principalmente a la facilidad de su uso ya que requieren únicamente conectar su indicador a la variable que se desea graficar en el diagrama de bloques y los demás aspectos quedan limitados a las características cosméticas o de apariencia de la gráfica en el panel frontal. Sin embargo, en el caso particular de esta aplicación, su uso exhibe varios inconvenientes que llevan a buscar técnicas alternativas que permitan alcanzar el mismo resultado de una manera óptima.

El primer problema surge al idear una forma eficiente y ordenada de graficar tantas medidas en el panel frontal de la aplicación, que a grandes rasgos, alcanzan la cantidad de sesenta (60) variables provenientes de las seis (6) centrales de medida, a lo que se suma el graficado de otras medidas relacionadas con otros equipos y que aunque no forman parte del objeto de esta monografía, se deben tener en cuenta para diseñar un sistema de tendencias unificado y conjunto. Por otra parte, a diferencia de la mayoría de aplicaciones en LabVIEW en las que el tiempo de ejecución de un ciclo de programa es conocido y aproximadamente constante, la aplicación del bombeo del *amb* tiene una duración de ciclo de programa significativamente variante debido a que el tiempo de respuesta de los equipos esclavos conectados al computador no es siempre el mismo y depende de factores externos a la misma aplicación. Por tanto, si el tiempo de un ciclo de programa no es aproximadamente constante (y que en promedio es de 300ms), no es posible asignar un delta de tiempo fijo al espacio que habría entre medidas consecutivas realizadas a lo largo del tiempo; lo que impide el uso de los dos tipos de *waveforms* mencionados inicialmente ya que funcionan con una frecuencia de muestreo constante para el eje del

tiempo y suponen por tanto, una duración de ciclo de programa aproximadamente invariante.

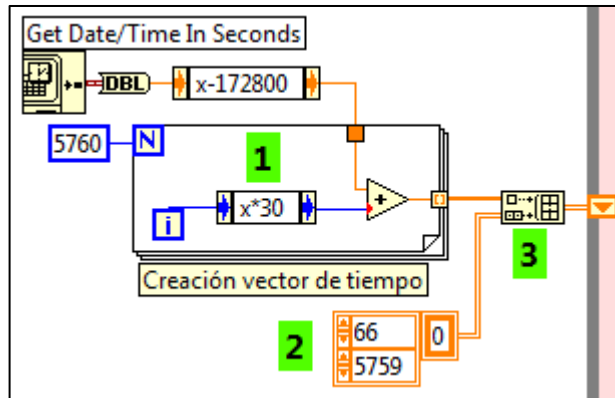
La metodología usada para programar el graficado de las medidas consiste de una parte que es el almacenamiento de las medidas cada cierto tiempo y otra que es el graficado de una o varias variables en un intervalo de tiempo determinado, a partir de los datos almacenados inicialmente. Estos componentes se explican a continuación:

4.2.1 Almacenamiento de las medidas

Se usa un *shift register* que contiene un *array* numérico de dos (2) dimensiones y capacidad fija, emulando una matriz en la que la primera fila se almacena un vector de tiempo absoluto, representando el eje del tiempo para todas las tendencias y en las demás filas se almacenan los vectores que contienen las medidas tomadas a lo largo del tiempo representado en la primera fila; su contenido es actualizado cada treinta (30) segundos con las nuevas medidas que han sido leídas. El *array* se llena inicialmente con ceros y cada medida nueva ingresa por la derecha de este, es decir, por su parte final y los demás datos se desplazan hacia la izquierda, eliminando de esta manera el dato más antiguo. Su tamaño es de 68 filas x 5760 columnas, albergando sesenta y siete (67) medidas que con la cantidad de columnas dada y teniendo en cuenta un espaciado de treinta (30) segundos entre datos consecutivos, da para un tiempo de almacenamiento de aproximadamente 48 horas.

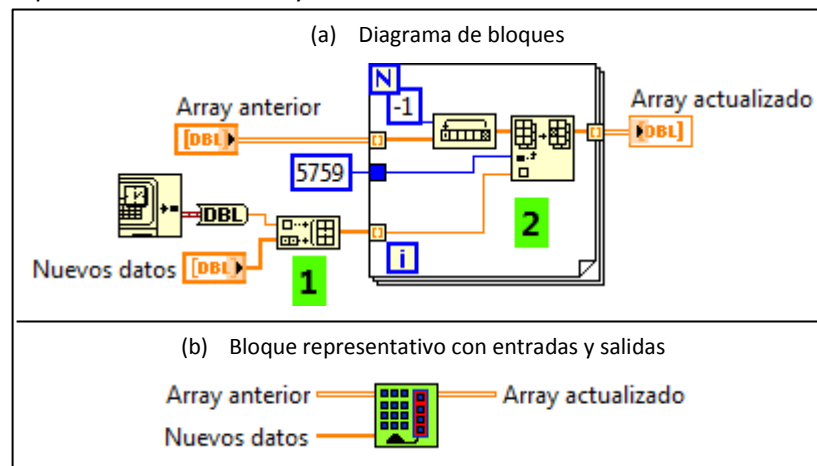
En la Figura 20 está el diagrama de bloques en LabVIEW para la construcción inicial del *array* de almacenamiento. Se compone de una estructura *for* que se ejecuta 5760 veces para la generación del vector de tiempo, cuyo dato inicial es el tiempo absoluto actual menos 172800 segundos (48 horas) y los elementos posteriores se van incrementando en 30 (en [1]) hasta obtener el tiempo actual en el último dato. Por otra parte, en [2] se usa un *array* constante de ceros para las posiciones de las medidas y finalmente, en [3] se unen en uno solo para completar la inicialización e ingresar al *shift register* del ciclo principal del programa.

Figura 20. Diagrama de bloques para la inicialización del array de datos



Para la inserción de las medidas nuevas dentro del *array* se crearon varios subVIs anidados para simplificar el diagrama de bloques principal. El diagrama de bloques del subVI más interno se muestra en la Figura 21a y su función es insertar las medidas nuevas dentro del *array* de datos que se creó inicialmente. Para esto, se comienza en [1] construyendo el *array* que se va a agregar, tomando el tiempo actual en segundos y uniéndolo con el *array* de medidas nuevas; después, dentro de la estructura *for* en [2] se toma cada fila del *array* de datos anterior, se desplaza su contenido una posición hacia la derecha y se reemplaza el último elemento (a la derecha) por el dato nuevo respectivo. Al final, a la salida del *for* se obtiene de nuevo el *array* de datos actualizado. En la Figura 21b se muestra el subVI con sus respectivas entradas y salidas.

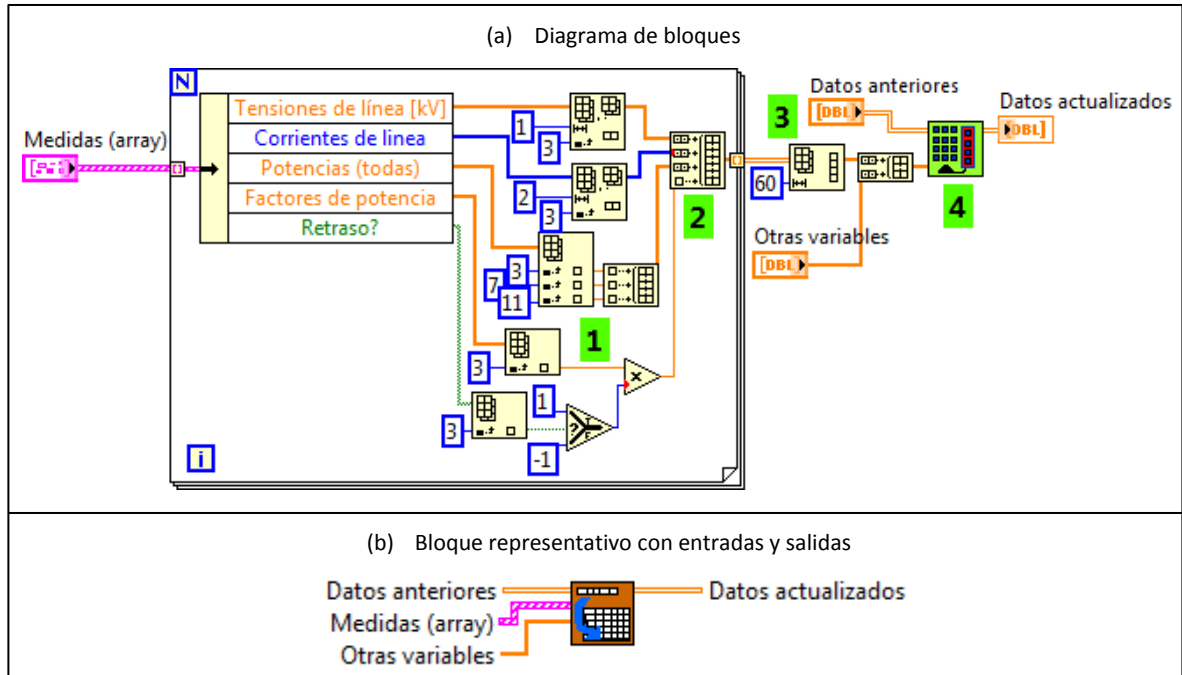
Figura 21. SubVI para actualizar el array de datos



Cabe anotar que no todas las medidas eléctricas se grafican y por tanto hay que hacer una selección y adecuación de los datos provenientes de las centrales de medida antes de ingresarlos al subVI de la Figura 21. Las medidas seleccionadas de cada central de medida para el graficado son: las corrientes de línea excluyendo la corriente promedio (3 medidas), las tensiones de línea (3 medidas) y de fase (3 medidas) excluyendo los valores promedio, las potencias totales activa, reactiva y aparente (3 medidas) y el factor de potencia total (1 medida); esto suma un total de diez (10) medidas por cada central para un total de sesenta (60) valores.

Por lo anterior, se construye otro subVI cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 22a y que comienza con una entrada de tipo *array* que debe estar formado por los seis (6) *clusters* de la salida “Medidas” de los subVIs de lectura Modbus de cada central de medida, explicados en la sección 4.1.2. Este *array* de *clusters* ingresa a un *for* donde se extraen los componentes de cada *cluster* y a través de manipulación de *arrays* en [1], se seleccionan los elementos necesarios de cada grupo de medidas para después construir en [2] un nuevo *array* numérico con los diez (10) datos seleccionados. Después, en [3] se concadenan las filas del *array* de salida del *for*, para obtener un *array* de una (1) sola dimensión que contiene las sesenta (60) medidas de todas las centrales, al que después se le une otro *array* que contiene otras variables externas cuya procedencia no es objeto de este documento para completar así los sesenta y siete (67) datos que por último, ingresan al bloque [4.], donde se usa el subVI de la Figura 21b para la actualización del *array* de datos principal. En la Figura 22b se muestra el bloque de esta función con sus entradas y salidas especificadas.

Figura 22. SubVI para adecuar las medidas actuales y actualizar los datos guardados



El subVI presentado anteriormente, puede ya ser usado dentro de la aplicación conectando el *array* de datos principal proveniente del *shift register* (mencionado al inicio de esta sección) a su entrada “Datos anteriores”, construyendo el *array* de medidas y poniéndolo en “Medidas array” y enviando el *array* de datos actualizados de vuelta al *shift register*. Este proceso será explicado detalladamente en la sección 4.4.

4.2.2 Graficado de datos guardados

Antes de especificar el funcionamiento de esta parte de la aplicación cabe aclarar que para mostrar las gráficas de las tendencias se ha planteado que en el panel frontal de la aplicación, el operario tenga acceso a botones que representan la gráfica de cada variable y que al ser clicados se despliegue una ventana nueva con la tendencia deseada. También se debe tener en cuenta que en una tendencia puede llegarse a mostrar más de una gráfica, ya que por ejemplo, si el operador solicita ver la tendencia de las corrientes de línea, se deben mostrar tres (3) graficas dentro del mismo indicador: fase 1, fase 2 y fase 3. En la Tabla 8 se especifica la forma en que se agrupan las variables dentro de una misma gráfica.

Tabla 8. Agrupación de las medidas de una central de medida para su gráficoado

UBICACIÓN DENTRO DEL SISTEMA ELÉCTRICO	GRUPO	VARIABLE	MEDIDAS INCLUIDAS
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA – CIRCUITO 1	01	Corrientes de línea	Corriente - fase 1
			Corriente - fase 2
			Corriente - fase 3
	1	Tensiones de línea	Tensión – línea 1-2
			Tensión – línea 2-3
			Tensión – línea 3-1
	2	Potencias totales	Potencia activa total
			Potencia reactiva total
			Potencia aparente total
	3	Factor de potencia	Factor de potencia total
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA – CIRCUITO 2	4	Corrientes de línea	Corriente - fase 1
			Corriente - fase 2
			Corriente - fase 3
	5	Tensiones de línea	Tensión – línea 1-2
			Tensión – línea 2-3
			Tensión – línea 3-1
	6	Potencias totales	Potencia activa total
			Potencia reactiva total
			Potencia aparente total
	7	Factor de potencia	Factor de potencia total
UNIDAD DE BOMBEO 1	8	Corrientes de línea	Corriente - fase 1
			Corriente - fase 2
			Corriente - fase 3
	9	Tensiones de línea	Tensión – línea 1-2
⋮	⋮	⋮	⋮
UNIDAD DE BOMBEO 4	59	Factor de potencia	Factor de potencia total

Se diseñó un subVI como se muestra en la Figura 23a, que básicamente toma el *array* de datos almacenados y a partir de un índice que representa la variable a graficar, selecciona la porción adecuada de este *array* y lo envía a un indicador gráfico. La entrada “grafica a ver” es el control numérico que contiene dicho índice en un rango de 0 a 59 y el *array* señalado en [1] contiene la cantidad de gráficas que deben mostrarse dependiendo del valor de este (columna “gráfica” en la Tabla 8). En [2] se extrae la cantidad de medidas a graficar, que es equivalente al número de filas a extraer del *array* de medidas; mientras que en [3] se calcula la fila a partir de la que están ubicados los datos requeridos. En [4] se

toma el *array* de medidas que ingresa por “Datos gráficas” y se extrae la primera fila donde se encuentra el vector de tiempo para el eje X, con el bloque [5] se extraen los vectores de las medidas relacionadas, con base en la posición y cantidad de filas calculadas anteriormente. El vector de tiempo y la matriz de medidas ingresan a la estructura *for* en [6] donde se construyen *clusters* con el *array* de tiempo y cada fila de datos. Al final, mediante indexado se obtiene un *array* formado por los *clusters* contruidos dentro del *for*, teniendo tantos *clusters* como cantidad de gráficas contenga la tendencia; este *array* se conecta en [7] con un indicador gráfico de tipo XY.

En la parte inferior del diagrama de bloques se observa una estructura *case*, que mediante el control “Ver gráfica?”, se ejecuta solamente una vez cuando el operador solicita ver cualquier tendencia. Su tarea es hacer todos los ajustes cosméticos y de apariencia del indicador “XY Graph” con el fin de que la etiqueta y escala de sus ejes, y la cantidad de graficas a mostrar sea configurada de acuerdo a la variable seleccionada por el operario y a la hora actual. Así, por ejemplo, si el usuario decide ver la gráfica de las potencias de la Unidad de bombeo 4, en [8] se generan los valores mínimo y máximo del eje Y (1000 y 4000), y las etiquetas para mostrar sobre el eje Y y sobre cada una de las gráficas. En [9] se escriben estos valores sobre los nodos de propiedad del indicador “XY Graph” y por último, en [10] se ajusta el eje X a un intervalo cuyo tiempo final es la hora actual y el tiempo inicial es este mismo menos 7200 segundos (2 horas). Cabe anotar que este subVI fue configurado para que su panel frontal se muestre o abra cuando se haga una llamada de él desde la aplicación principal. En la Figura 23b se muestra este subVI convertido a bloque con sus entradas, no posee salidas por que la única información producida se muestra directamente en su panel frontal.

(a) Diagrama de bloques

(b) Bloque representativo con entradas y salidas

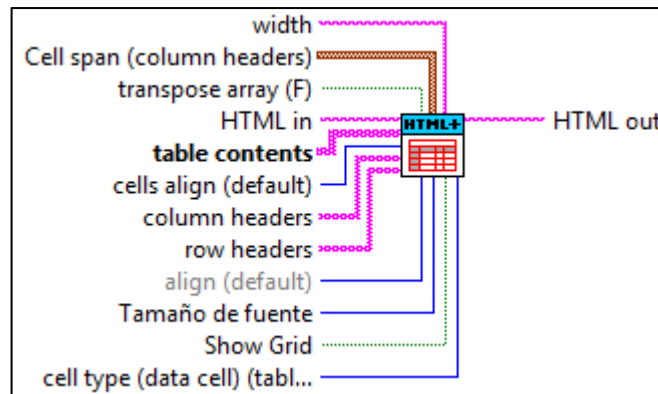
El registro histórico de datos es una característica que permite a la aplicación generar archivos que reflejan el comportamiento de las medidas eléctricas a lo largo del tiempo. A diferencia del graficado de las tendencias en que los datos guardados se pierden al detener la ejecución del programa, el registro histórico debe mantenerse guardado en un ente externo a la aplicación, particularmente este almacenamiento ocurre en un archivo en formato *html* que contiene una tabla de datos con la fecha y las diferentes medidas tomadas. Estos archivos se deben actualizar y guardar cada cierto tiempo y son accesibles desde cualquier explorador web o Microsoft Excel. Debido a la gran cantidad de medidas, se decidió crear dos (2) archivos históricos: uno para las medidas de la subestación eléctrica y otro para las de las bombas.

El proceso para llevar el registro histórico de los datos se divide en dos (2) pasos: el primero que es la creación o apertura del archivo que guardará los datos y que se lleva a cabo solo una vez al inicio de la aplicación; mientras que el segundo consiste en la inserción de nuevos datos y guardado del archivo periódicamente dentro de la aplicación. Estos procesos se explican a continuación:

4.3.1 Creación del archivo de registro histórico

Para describir este proceso es necesario explicar un subVI (ver Figura 24) que posee LabVIEW para describir y dar formato a una tabla en formato HTML. El bloque llamado "HTML table", toma como entrada parámetros como ancho de tabla, textos para encabezados de filas y columnas, alineación de las celdas, tamaño de texto, contenido de la tabla y el *span* de cada encabezado, entre otros, y produce una cadena de caracteres compuesto por una lista de instrucciones HTML que definen la tabla especificada. Este texto puede ser usado por ejemplo, en un archivo block de notas que al ser abierto en Internet Explorer muestra la tabla creada con los parámetros respectivos.

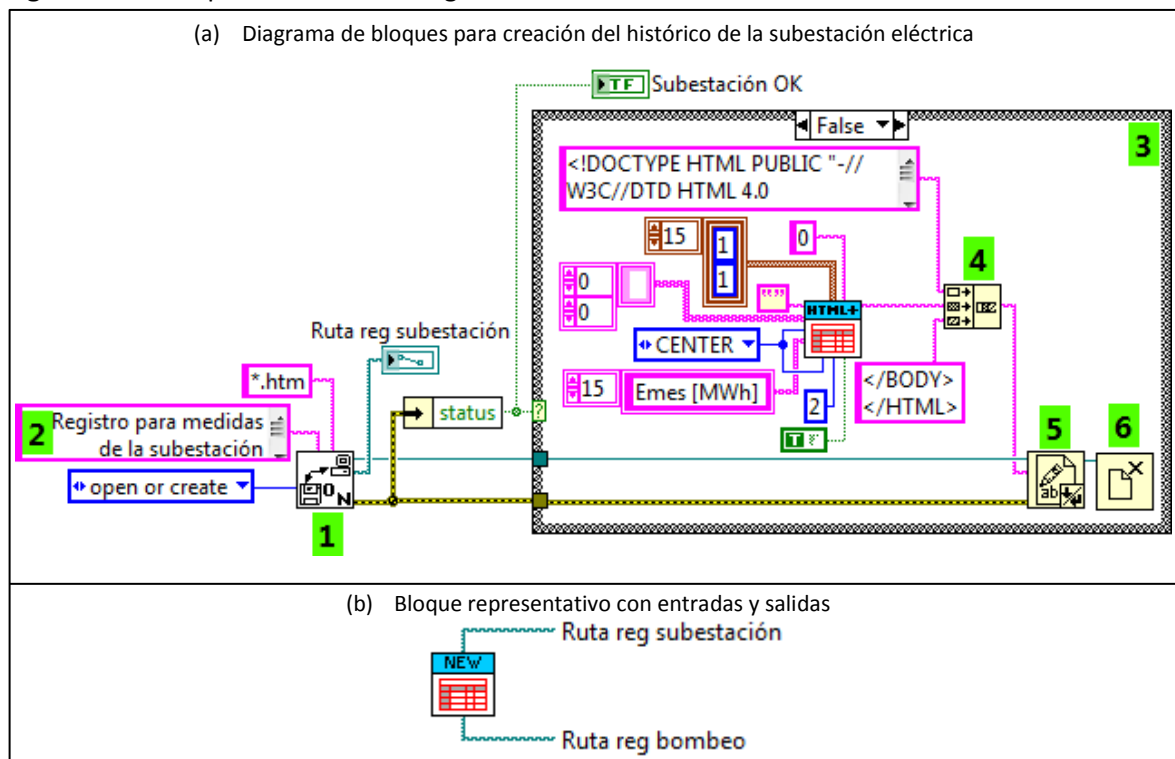
Figura 24. Bloque "HTML table" de LabVIEW



Ahora, este bloque se usa dentro de otro subVI para crear y dar formato a la tabla de datos que se guarda como registro. La Figura 25a muestra el diagrama de bloques para la creación e inicialización del histórico de la subestación eléctrica, que comienza en [1] con una función que al ejecutarse emite automáticamente una ventana de dialogo con el título especificado en [2], permitiendo al usuario seleccionar la ruta y el nombre del archivo que se creará con extensión *htm*; como salida produce la ruta del archivo creado y

el estado de la operación (si fue llevada a cabo o si ocurrió algún inconveniente). La estructura *case* en [3] se ejecuta si el archivo fue creado satisfactoriamente (*status = false*) y usa el bloque “HTML table” para crear una tabla vacía con los nombres de las medidas como encabezados de columnas. La cadena de caracteres de salida se concatena en [4] con el encabezado y terminación usados en archivos HTML y que fueron tomados de archivos de ejemplos. La cadena resultante ingresa al bloque [5] para ser escrita dentro del archivo creado inicialmente. Por último, en [6] se cierra el archivo para completar el proceso de creación. Un diagrama muy similar se usa dentro del mismo subVI para la inicialización del registro histórico de las medidas del bombeo. El sub VI resultante no tiene entradas y tiene como salidas las rutas de los registros creados (ver Figura 25b)

Figura 25. SubVI para creación del registro histórico de datos

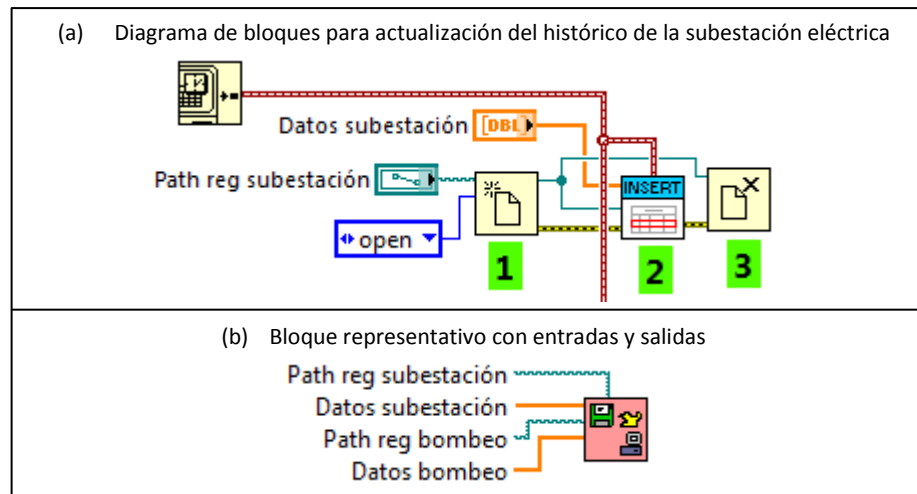


4.3.2 Actualización y guardado del registro histórico

Dentro del ciclo principal de ejecución de la aplicación, cada cierto tiempo se debe insertar un set de medidas nuevo a los registros históricos. En la Figura 26a es mostrado el

diagrama de bloques que cumple estas funciones para el caso del registro de la subestación eléctrica. Un diagrama muy similar se usa dentro del mismo subVI para actualizar el registro del bombeo. Comienza en [1] con la apertura del archivo, tomando la ruta de acceso generada al inicio de la aplicación. Posteriormente, en [2] se usa un subVI de LabVIEW que toma el *array* de medidas de la subestación y la hora actual, para insertarlos automáticamente en la tabla del archivo abierto previamente. Por último, en [3] el archivo es cerrado para que el proceso de guardado se complete satisfactoriamente. En la Figura 26b se muestra el bloque del subVI generado con sus entradas correspondientes.

Figura 26. SubVI para actualización del registro histórico de datos

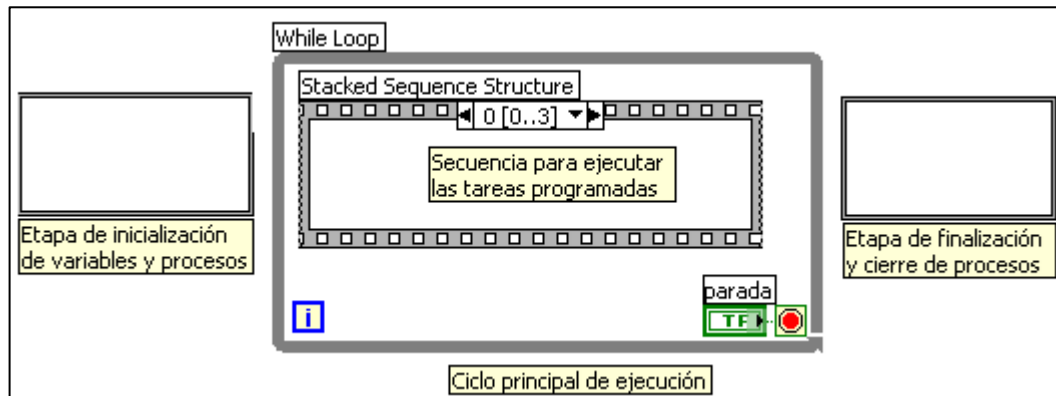


4.4 INTEGRACIÓN CON LA APLICACIÓN PRINCIPAL

Con los subVIs explicados en las secciones anteriores ya construidos, el siguiente paso es incluirlos dentro de la aplicación principal de monitoreo y control del bombeo de Bosconia. Esta aplicación, al igual que la mayoría de programas que se diseñan con LabVIEW, posee una estructura como la que se observa en la Figura 27, en la que se tiene una estructura *while* que se ejecuta cíclicamente hasta que el programa sea detenido y dentro del cual se ponen todas las rutinas que se ejecutan normalmente; adicionalmente, se tienen otras etapas que solo se ejecutan una vez y que sirven para inicializar, abrir y/o

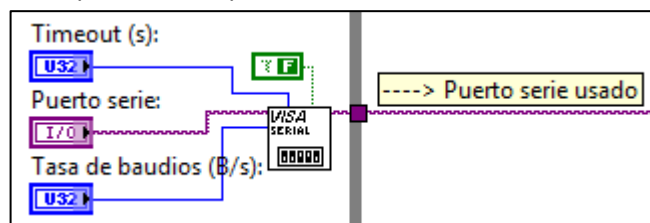
crear ciertos componentes que se usan dentro del ciclo principal y por otra parte, para finalizar o cerrar procesos al terminar la ejecución de este.

Figura 27. Estructura de una aplicación en LabVIEW



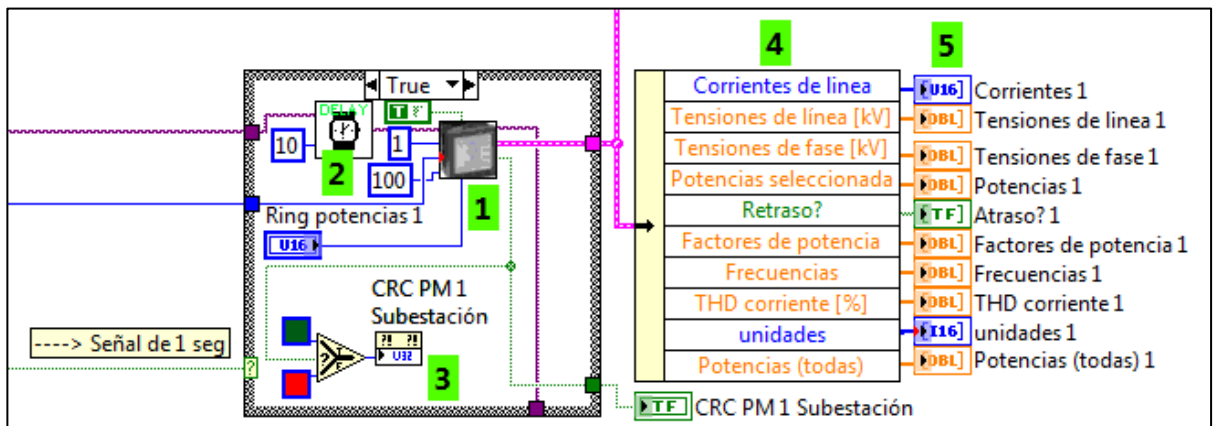
En la etapa de inicialización se incluyeron dos (2) componentes: el primero es la inicialización y creación del *array* de datos para el graficado de las variables eléctricas y cuyo diagrama de bloques ya fue expuesto en la Figura 20. El segundo es la creación del registro histórico de datos usando el subVI de la Figura 25, donde simplemente se conectan sus salidas a la parte interior del *while* principal. Cabe agregar que aunque no es algo nuevo que se agregó, la inicialización del puerto serie para la comunicación Modbus es un componente importante que también se tiene en esta etapa y que está programado como se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Inicialización del puerto serie para comunicación Modbus



Ya dentro del ciclo principal de ejecución, se pusieron los demás componentes que se desarrollaron. Para la lectura de todas las centrales de medida, se usan seis (6) rutinas que usan el subVI explicado en la sección 4.1.2. En la Figura 29 se muestra el diagrama de bloques de una de estas rutinas, para el caso de la lectura de la central de medida 1 de la subestación eléctrica. Allí se tiene una estructura *case* con una señal de control de pulso de un (1) segundo que permite hacer las consultas cada segundo y no cada ciclo de programa. Dentro del *case true* se hace la lectura de la central de medida con el bloque [1] especificando la dirección del esclavo, el *timeout*, el puerto serie y el divisor de tensiones. Previamente se hace una espera de 10ms (bloque [2]) para asegurar los intervalos de silencio necesarios entre la comunicación con cada dispositivo. En [3] se cambian los colores del indicador de CRC correcto dependiendo de su estado y finalmente en [4], se toma el *cluster* de medidas generado en la lectura y se extraen cada uno de sus componentes para ser enviados al panel frontal a través de los indicadores en [5].

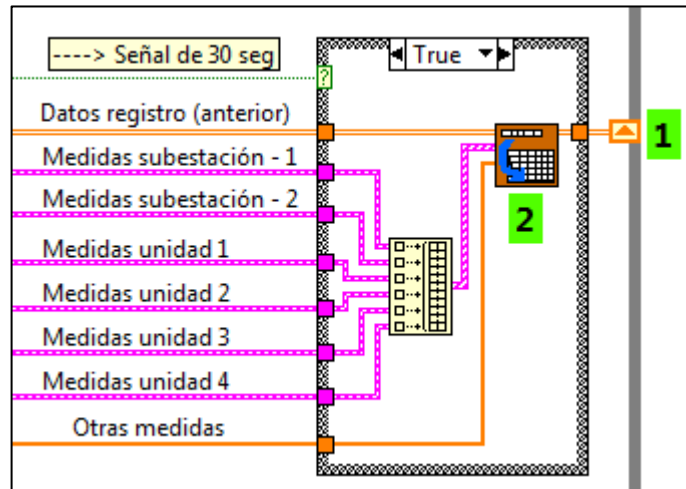
Figura 29. Diagrama de bloques para la lectura de una central de medida dentro de la aplicación principal



El subVI para la actualización del *array* de datos de las gráficas (ver Figura 22) es usado como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 30 donde al igual que en el caso anterior, se tiene un *case* controlado por una señal de pulsos con el fin de hacer la actualización cada treinta (30) segundos. Al subVI ingresan: los *clusters* de medidas provenientes de la lectura de las seis (6) centrales de medida, el *array* de datos anterior proveniente del *shift register* [1] y un *array* que contiene otras variables que también se

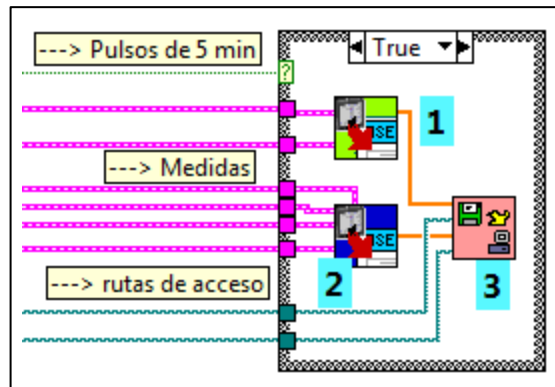
almacenan dentro de este. Al pasar por el subVI de actualización en [2], el *array* de salida modificado con las nuevas medidas es ingresado nuevamente al *shift register*.

Figura 30. Diagrama de bloques para la actualización del registro de medidas dentro de la aplicación principal



Finalmente, para la actualización y guardado del registro histórico de datos, se implementó el diagrama de bloques de la Figura 31 donde se tiene una estructura *case* para hacer esta tarea cada cinco (5) minutos. En su interior tenemos dos (2) bloques ([1] y [2]) que simplemente toman las medidas de las centrales de medida, extraen las medidas requeridas para ser guardadas y las convierten en *arrays* numéricos. El bloque de guardado de registros históricos (ver Figura 26) toma estos *arrays* y las rutas de acceso a los archivos creados en la etapa de inicialización y hace la actualización de estos archivos.

Figura 31. Diagrama de bloques para la actualización de los registros históricos dentro de la aplicación principal



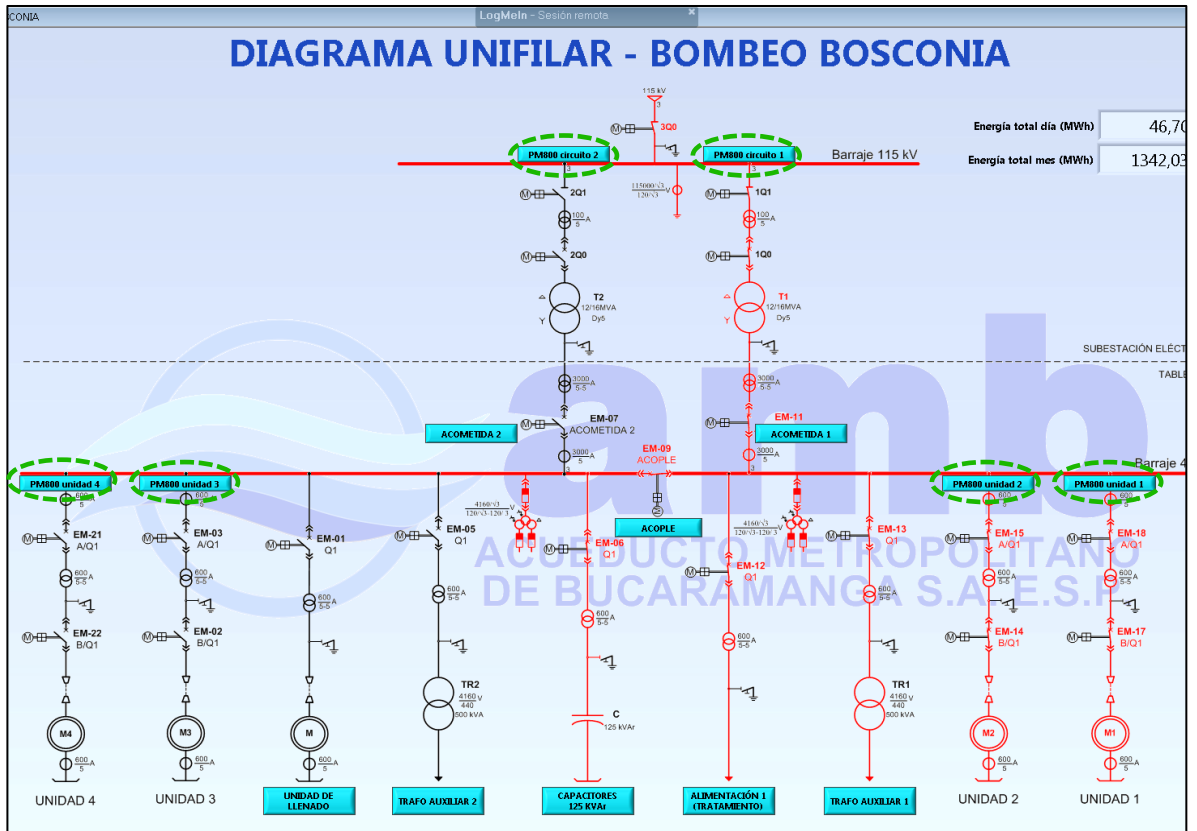
4.5 INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica es la parte de la aplicación que permite al operador visualizar las variables y/o información importante a través del panel frontal en LabVIEW. Su rediseño consistió de dos (2) aspectos: el primero la forma en que se muestran las medidas de las centrales de medida y el segundo, su graficado en una ventana emergente usando el subVI de la Figura 23.

4.5.1 Visualización de las medidas eléctricas

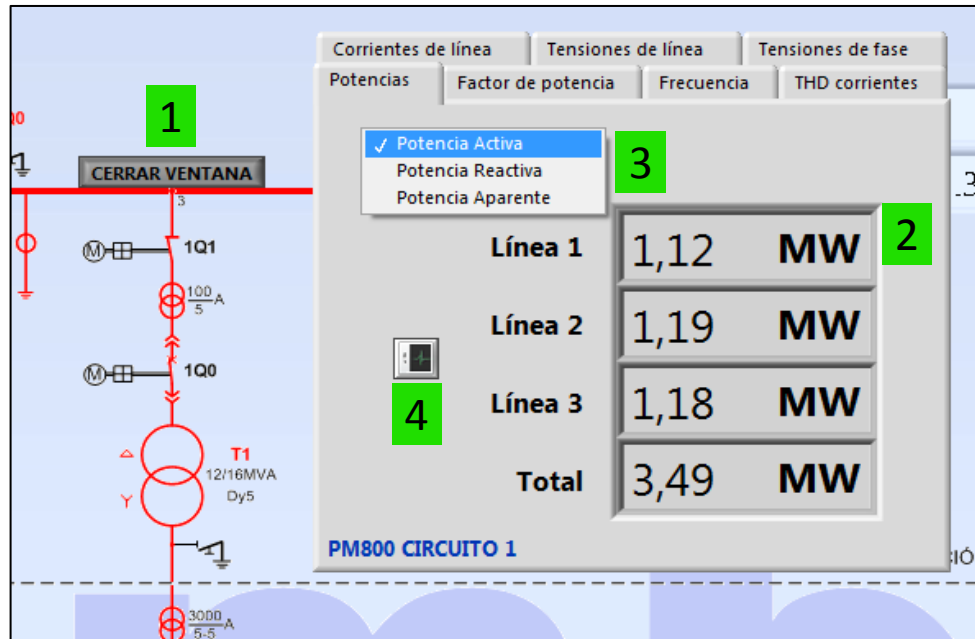
Debido a la gran cantidad de variables que se tienen, es importante diseñar una manera ordenada e intuitiva de acceso a los datos para el usuario. Para esto, se tomó una sección del panel frontal en la que se tenía el diagrama unifilar del sistema eléctrico visualizado y sobre él se montaron botones de acceso a las medidas eléctricas de las centrales de medida, señalados en círculos en la Figura 32 y que al ser clicados, despliegan un contenedor con las medidas respectivas.

Figura 32. Imagen del panel frontal con botones de acceso para visualizar medidas



Los indicadores numéricos obtenidos en la parte [5] del diagrama de bloques de la Figura 29 fueron insertados en un indicador *Tab control*, ya que este posee pestañas que permiten clasificar las variables eléctricas de acuerdo al tipo de medida. Mediante nodos de propiedad, el botón de acceso de cada central de medida controla la visibilidad su respectivo *Tab control*. En la **Figura 33** se muestra como ejemplo, las medidas desplegadas al presionar el botón [1] del PM800 del circuito 1 de la subestación eléctrica. Dentro del *Tab control* se tienen siete (7) categorías de medidas que anidan sus respectivos indicadores: Corrientes de línea, tensiones de línea y de fase, potencias, factor de potencia, frecuencia y THD de corrientes. A manera de ejemplo, las potencias son mostradas en [2], que corresponde al indicador “Potencias 1” de la Figura 29, cuyos valores y unidades cambian de acuerdo al tipo de potencia seleccionado en [3]. Para ocultar el *Tab control* simplemente se presiona nuevamente el botón de acceso [1].

Figura 33. Visualización de las medidas electricas en el panel frontal



4.5.2 Visualización de gráficas

Como se mencionó en la ...sección 4.2.2..., las gráficas de tendencias son mostradas en una ventana que emerge al dar clic sobre algún botón de acceso puesto en el panel frontal, como el que se señala en la parte [4] de la **Figura 33**. La gráfica es visualizada en el panel frontal del subVI de la Figura 23, y su apariencia es mostrada en la **Figura 34**. Allí se pueden observar algunas características ya mencionadas en la ...sección 4.2.2... como son el nombre de la variable sobre el eje y ([1]), las etiquetas para cada curva que se muestre en [2] y el eje del tiempo que se acomoda automáticamente a la hora actual y en un rango de 2 horas. Todo esto, variando automáticamente de acuerdo a la gráfica de la variable que se haya seleccionado para ver.

Figura 34. Panel frontal para mostrar las gráficas de tendencias



5. CONCLUSIONES

- Modbus es un protocolo de comunicación que por ser abierto, permite enlazar equipos y dispositivos de diferentes marcas, y ubicados en diferentes niveles de la pirámide de automatización como son campo, control y/o administración. Para el caso particular de la aplicación del bombo de Bosconia, permitió comunicar equipos de control y campo como son los PLCs y las centrales de medida respectivamente, con la aplicación por computador en LabVIEW para el control y administración de la planta.
- El manejo del protocolo Modbus a nivel de enlace de datos es transparente e independiente del medio físico que se emplee para la transmisión de los datos, ya que como se observó en esta monografía, la programación del maestro en LabVIEW no dependió de las características del medio físico y se hubiera podido usar por ejemplo, fibra óptica o comunicación serial RS422 sin que la programación hubiese cambiado.
- La medición de variables con LabVIEW no es posible únicamente con tarjetas de adquisición de datos, sino que también se disponen de soluciones como la aplicada en esta monografía, en la que se pueden usar equipos electrónicos dedicados a la medición de la(s) variable(s) requerida(s) y que soporten algún protocolo de comunicación, para acceder a sus datos vía remota y a través de un único puerto de comunicación.
- LabVIEW cuenta con bloques de programación que permiten manejar un puerto de comunicación del computador para enviar y recibir cualquier tipo de información. Esto lleva a que con las mismas funciones, se puedan implementar no solo enlaces de comunicación Modbus, sino cualquier otro protocolo cuyas especificaciones y funcionamiento sean conocidos y caracterizados.
- Los nodos de propiedad en LabVIEW dan la opción de modificar la apariencia de cualquier indicador en el panel frontal dependiendo de condiciones determinadas. Esto permitió diseñar un subVI con un único indicador de gráfico para visualizar

cualquier tendencia deseada, adecuando características como los rangos de la gráfica en X y Y y los textos mostrados para su etiquetado.

- Es importante conocer el manejo de *Control tabs* y ventanas de subVIs emergentes en LabVIEW, para el diseño y construcción de interfaces graficas que muestren grandes cantidades de datos de manera ordenada y eficiente. También se debe tener en cuenta el uso de subVIs ya que estos permiten agregar, quitar o modificar características a un programa de manera fácil y modular, dando también la posibilidad de reproducir ciertas funciones en varios puntos del programa.
- LabVIEW cuenta con funciones para generar y modificar archivos bajo formato *HTML*, permitiendo manejar tablas, textos e imágenes para ser visualizados a través de un navegador web. Estos pueden ser útiles para la generación de informes, reportes o como en el caso de esta monografía, construir registros históricos que se actualizan periódicamente.

BIBLIOGRAFÍA

ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P. Manual operativo del bombeo de Bosconia. Vol. 1. Bucaramanga. Colombia. 2006. 77p.

ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P. Recursos Naturales [Sitio web]. Bucaramanga. Colombia. Disponible en internet: <http://www.amb.com.co/frmInformacion.aspx?inf=33>:

JIMÉNEZ BUENDÍA, Manuel. Comunicaciones Industriales. Cartagena - Colombia. Universidad Politécnica de Cartagena.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. LabVIEW Help [Formato digital]. Estados Unidos. 2009.

SCHNEIDER ELECTRIC. Manual de referencia – Central de medida PM810. Estados Unidos. Square D Company PMO. 2005. 150p.

ANEXO A. Lista de registros de la central de medida PM800

Reg	Nombre	Escala	Unidades	Rango	Notas
Medición de 1 s					
Medición de 1 s — Intensidad					
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
Medición de 1 s — Tensión					
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

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
Medición de 1 s — Potencia					
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
Medición de 1 s — Factor de potencia					
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

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.

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.
Medición de 1 s — Frecuencia					
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.
Calidad de la energía					
THD					
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