

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA



***Modernización del Sistema de Control del Vertedor de Excedentes de
Caudal de Agua
Centro de Producción Angostura***

Instituto Costarricense de Electricidad

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

Juan Pablo Jiménez Fallas
200236792

Cartago, Junio del 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

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

Miembros del Tribunal



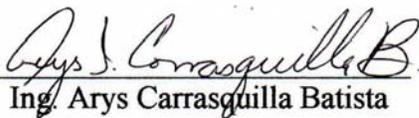
Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector



Ing. Faustino Montes de Oca

Profesor lector



Ing. Arys Carrasquilla Batista

Profesora asesora

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

Cartago, 23 de Junio de 2010

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

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

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

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

Cartago, 23 de Junio de 2010



Juan Pablo Jiménez Fallas

Céd: 1-1199-0731

RESUMEN

El Instituto Costarricense de Electricidad hoy día es el mayor productor de energía eléctrica para el país, el 95% a partir de recursos renovables principalmente el agua.

La Planta Hidroeléctrica Angostura, se ubica en Pavones de Turrialba, provincia de Cartago e inició operaciones en el año 2000. Aprovecha la cuenca del río Reventazón y se ha convertido en una de las más importantes para el país en cuanto a capacidad de generación.

La planta generadora utiliza el agua contenida en un embalse de 256 hectáreas de extensión y los excesos de caudal se regulan semanalmente con ayuda de un vertedor de excedencias equipado con 4 compuertas principales y 2 secundarias.

El movimiento de las compuertas se efectúa mediante un sistema de control basado en contactores y relés. Cuando se realizan descargas un operador escoge con base en su experiencia las compuertas a manipular, pero solo se permiten tres posibles opciones. Además, el arranque y paro de las compuertas depende del operador, ocasionando errores a la hora de detener estas al porcentaje de apertura que se desea.

Para darle solución al problema existente se diseñó y se implementó un sistema de control modernizado, el cual facilitó la operación de las compuertas proporcionando un rango de selecciones de compuerta muy amplio, todo por medio de una interfaz con el usuario que se programó en un computador, en la cual se hizo una monitorización general haciendo mediciones del nivel del embalse y de la toma de agua, además de las principales alarmas se generan durante las maniobras

Palabras Clave: Control, compuerta, monitorización, PLC, SCADA, vertedor.

ABSTRACT

The Costa Rican Electricity Institute today is the largest producer of electricity for the country, most of this based on renewable resources mainly water.

The Angostura hydroelectric plant is located in Pavones, Turrialba, Cartago and started operations in 2000. Take Reventazón River basin and has become one of the most important for the country in terms of generating capacity.

The power plant uses water from a reservoir of 256 hectares and the excess flow is regulated using a spillway equipped with four main gates and two secondary gates, which are used to remove sediment and other debris

The movement of the gates is done with a control system based on contactors and relays. When an operator chooses, based on his experience, to handle gates, but only allow three selections, which makes it very limited. Besides starting and stopping of the gates depending on the operator thereby make mistakes when it comes to stopping these to a percentage of opening required.

To give solution to the problem will implement a modernized control system, which facilitates the operation of the gates through a user interface in which there will be a general monitoring by measuring the water levels, and all major alarms that may occur during maneuvers

Keywords: Control, gate, monitoring, PLC, SCADA, spillway

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a Ti, Dios Padre Celestial por que sin tu ayuda no hubiera podido concluir esta meta por la que tanto luché. Solo Tú sabes por todas las pruebas que pasé en este tiempo pero siempre estuviste ahí para acompañarme y no dejarme caer.

A mis padres Juan Carlos Jiménez Cascante y Ana Lorena Fallas López, este logró va dedicado muy especialmente a ustedes. Gracias por todos los consejos, las muestras de apoyo y por todas las ocasiones que sacrificaron sus propias necesidades con tal de costear las mías.

A mi hermana y mi cuñado, Luz Alejandra Jiménez Fallas y Edgar Herrera Portugués, muchas gracias por toda su ayuda, sin ellos esta meta no se hubiera concretado.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Ing. Fabián Madriz González por proporcionarme la oportunidad de realizar este proyecto de graduación en el Centro de Producción Angostura del Instituto Costarricense de Electricidad. A los señores Edman Vargas Elliot y Mainor Zamora por toda la ayuda referente a mi estadía en el transcurso del proyecto.

Quiero agradecer al personal de taller eléctrico de la planta, muy especialmente al Técnico David Fernández Trejos, muchas gracias por toda su colaboración y apoyo durante la realización del proyecto.

También agradecer al personal de operación del vertedor, por toda su ayuda, colaboración y facilidades suministradas.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. <i>Problema existente e importancia de su solución.....</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Metodología para la solución del problema.....</i>	<i>2</i>
Capítulo 2. Meta y Objetivos	3
2.1. <i>Meta</i>	<i>3</i>
2.2. <i>Objetivo General.....</i>	<i>3</i>
2.3. <i>Objetivos Específicos</i>	<i>3</i>
Capítulo 3. Marco Teórico	5
3.1. <i>Descripción de las principales características del vertedor de excedentes de caudal</i>	<i>5</i>
3.2. <i>Antecedentes Bibliográficos.....</i>	<i>7</i>
3.2.1. <i>Controlador Lógico Programable (PLC)</i>	<i>7</i>
3.2.2. <i>Lenguaje LADDER</i>	<i>8</i>
3.2.3. <i>Sistemas SCADA.....</i>	<i>10</i>
3.3. <i>Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.....</i>	<i>15</i>
3.3.1. <i>Principio de funcionamiento del cilindro hidráulico [6].....</i>	<i>15</i>
Capítulo 4. Procedimiento Metodológico.....	17
4.1. <i>Problemática que presentaba el control de las compuertas del vertedor</i>	<i>17</i>
4.2. <i>Investigación sobre posibles fuentes de información</i>	<i>18</i>
4.3. <i>Selección de una solución adecuada</i>	<i>19</i>
4.4. <i>Procedimiento para realizar la implementación</i>	<i>20</i>
4.5. <i>Reevaluación y rediseño</i>	<i>21</i>
Capítulo 5. Diseño e implementación del nuevo sistema de control.....	23
5.1. <i>Procedimiento para obtener la solución más adecuada.....</i>	<i>23</i>
5.2. <i>Estudio Técnico del Sistema Actual.....</i>	<i>26</i>
5.2.1. <i>Compuertas Principales</i>	<i>26</i>
5.2.2. <i>Pistones hidráulicos</i>	<i>26</i>
5.2.3. <i>Motores eléctricos.....</i>	<i>27</i>
5.2.4. <i>Fusibles</i>	<i>27</i>
5.2.5. <i>Relés de control.....</i>	<i>31</i>
5.3. <i>Descripción del hardware</i>	<i>34</i>

5.3.1.	Interfaz entre los sensores de apertura y de nivel con la unidad de control.	34
5.3.2.	Interfaz entre las señales de monitorización del sistema con la unidad de control	38
5.3.3.	Interfaz entre la unidad de control y los actuadores	47
5.3.4.	Interfaz entre la unidad de control y el computador	49
5.4.	<i>Descripción del software</i>	49
5.4.1.	Rutina principal OB1	49
5.4.2.	Rutina de monitorización de apertura Compuertas C1.1 y C1.2	52
5.4.3.	Rutina de monitorización de apertura Compuertas C1.3 y C1.4	54
5.4.4.	Rutinas de control de las compuertas C1	56
5.4.5.	Rutina de medición de los sensores de nivel y de apertura.....	59
5.4.6.	Interfaz gráfica del sistema de control	61
Capítulo 6.	Análisis de resultados	71
Capítulo 7.	Conclusiones y recomendaciones	75
7.1.	<i>Conclusiones</i>	75
7.2.	<i>Recomendaciones</i>	76
Bibliografía	77
Apéndices	79
A.1.	<i>Glosario, abreviaturas y simbología</i>	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.	Vista general del vertedor de excedencias	5
Figura 3.2.	Símbolo contacto normalmente abierto	9
Figura 3.3.	Símbolo contacto normalmente cerrado	10
Figura 3.4.	Símbolo de la bobina de salida	10
Figura 3.5.	Diagrama de un cilindro hidráulico tipo pistón.	15
Figura 3.6.	Superficie total del pistón hidráulico.	16
Figura 5.1.	Fusibles del sistema de control.	28
Figura 5.2.	Disyuntor termomagnético Multi9 de dos polos.....	30
Figura 5.3.	Panel de control con la modernización de las protecciones.....	30
Figura 5.4.	Diagrama de bloques de primer nivel a nivel de hardware.....	34
Figura 5.5.	Diagrama de conexión de los sensores de apertura para C1 y C2.	36
Figura 5.6.	Diagrama de conexión de los sensores de nivel del embalse y de la toma de agua	37
Figura 5.7.	Diagrama de conexión de las señales de monitorización a la unidad de control.	39
Figura 5.8.	Diagrama de conexión de las señales de salida con los actuadores.....	47
Figura 5.9.	Diagrama de flujo de la rutina principal	51
Figura 5.10.	Diagrama de flujo de la rutina de monitorización de apertura de C1.1 y C1.2.....	53
Figura 5.11.	Diagrama de flujo de la rutina de monitorización de apertura de C1.3 y C1.4.....	55
Figura 5.12.	Diagrama de flujo de la rutina de control de las compuertas.....	57
Figura 5.13.	Diagrama de flujo de la rutina de paro.....	58
Figura 5.14.	Diagrama de flujo para la medición de los niveles de embalse y toma de agua.....	60
Figura 5.15.	Pantalla de bienvenida de la interfaz gráfica	62
Figura 5.16.	Pantalla principal del sistema.....	63
Figura 5.17.	Pantalla de restricción de uso.....	64
Figura 5.18.	Ubicación del Centro de Producción Angostura.....	65
Figura 5.19.	Pantalla de control C1.1	66
Figura 5.20.	Notificación cambio de apertura en las compuertas	67
Figura 5.21.	Pantalla para el control de las compuertas C1.1 y C1.2.....	68
Figura 5.22.	Notificación de compuertas en funcionamiento.	69
Figura 5.23.	Pantalla para la monitorización de las compuertas C2 y C3.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1.	Especificaciones técnicas del PLC Siemens Simatic S7 - 400	23
Tabla 5.2.	Características generales de las compuertas del vertedor	26
Tabla 5.3.	Características generales de los pistones hidráulicos.....	27
Tabla 5.4.	Características generales los motores eléctricos	27
Tabla 5.5.	Listado de fusibles de control y de potencia de las compuertas C1.....	29
Tabla 5.6.	Listado de relés de control de las compuertas C1	31
Tabla 5.7.	Tabla de alambrado de los sensores de nivel y de apertura	38
Tabla 5.8.	Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga 5CP02M01	41
Tabla 5.9.	Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga 5CP08M01	42
Tabla 5.10.	Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga 5CP18M01	43
Tabla 5.11.	Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga 5CP24M01	44
Tabla 5.12.	Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga M01	45
Tabla 5.13.	Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga M02	46
Tabla 5.14.	Tabla de alambrado de las señales de salida para el control de las compuertas	48
Tabla 5.15.	Configuración del módulo de comunicaciones CP443-1 TCP	49
Tabla 5.16.	Linealización de los valores medidos por los sensores de nivel.....	61
Tabla 5.17.	Linealización de los valores medidos por los sensores de apertura.....	61

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se hizo una breve descripción del problema que existía, la importancia de darle una solución adecuada y sobre los beneficios que el Centro de Producción Angostura obtuvo al modernizar el sistema de control del vertedor de excedentes de caudal.

1.1. Problema existente e importancia de su solución

La planta hidroeléctrica Angostura se inició como proyecto a mediados del año 1993 y concluyó su proceso de construcción a mediados de octubre del año 2000.

Se encuentra ubicada en la cuenca del río Reventazón, que está localizada en la zona noreste del país, en la vertiente Atlántica, exactamente a 6Km del centro de Turrialba, cantón de la provincia de Cartago; constituyéndose así en el tercer aprovechamiento hidroeléctrico en esta cuenca, en la que también se encuentran las plantas Río Macho y Cachí.

La planta generadora se alimentan con el agua contenida en el embalse y que viaja por un túnel de 6200 metros y posteriormente por una tubería forzada de 325 metros.

Para mantener el nivel de agua del embalse en un rango seguro se utiliza un vertedero o vertedor, el cual se encarga de controlar los excedentes de caudal. Este básicamente consta de 4 compuertas principales y 2 secundarias, las cuales se utilizan para eliminar sedimentos.

Actualmente, el movimiento de las compuertas se realiza por medio de botoneras en el sitio y el porcentaje al cual se abren o se cierran depende de la pericia de un operador. Debido a esta situación, existe la posibilidad

de que se cometan errores a la hora de aproximar la apertura o cierre de una o varias compuertas.

Es por ello que surge la necesidad de desarrollar un nuevo diseño del sistema de control de las compuertas, que proporcione un funcionamiento Local/Remoto, con lo cual se busca mejorar la operación en general.

1.2. Metodología para la solución del problema

La solución consistió en realizar un acople adecuado entre el sistema de control modernizado con el sistema de control a base de contactores y relés.

Un aspecto muy importante que no hay que perder de vista y que el sistema modernizado debió tomar en cuenta es que el operador es el responsable de realizar las descargas de excedentes. El sistema de control modernizado colocó la o las compuertas que seleccionó el usuario al porcentaje que este creyó conveniente e hizo una monitorización del sistema en general tomando mediciones del nivel del embalse y de la toma de agua, además de las principales alarmas que se pueden generar durante las maniobras, esto con ayuda de una interfaz gráfica.

Capítulo 2. Meta y Objetivos

2.1. Meta

Diseñar un sistema de control monitorizado del vertedor que se integre adecuadamente con los sistemas existentes, para facilitar las operaciones de descargas de excedentes de caudal de agua.

2.2. Objetivo General

Diseñar un sistema de control monitorizado para vertedor de excedentes del Centro de Producción Angostura.

2.3. Objetivos Específicos

- Analizar el funcionamiento del sistema actual y de los dispositivos que lo constituyen para evaluar los principales aspectos técnicos.
- Elaborar los planos de distribución y tablas de alambrado del cableado de control y potencia.
- Diseñar un algoritmo de control que permita la configuración del vertedor desde la sala de control.
- Desarrollar un sistema de medición que permita la monitorización del nivel de apertura de las compuertas.

- Desplegar en una interfaz gráfica programada con WinCC, los valores medidos por los sensores, porcentaje de apertura de las compuertas y otra información adicional que se considere de interés.

Capítulo 3. Marco Teórico

En este capítulo se hizo una descripción general sobre el funcionamiento del vertedor de excedentes de caudal, además de los antecedentes bibliográficos más relevantes para así darle una adecuada solución al problema que existía.

3.1. Descripción de las principales características del vertedor de excedentes de caudal

El vertedor de excedentes de caudal se encarga de realizar una frecuente regulación del nivel del embalse y la evacuación de crecidas de agua provenientes de los afluentes. La vista general de esta obra se muestra en la figura 3.1 y las compuertas se identifican de derecha a izquierda como C1.1, C1.2, C1.3, C1.4 (Compuertas Principales C1), descarga de fondo y de objetos flotantes (Compuertas C2 y C3 respectivamente). Cabe destacar que la C2 y la C3 no se observan en la imagen debido a que se encuentran dentro de la estructura.



Figura 3.1. Vista general del vertedor de excedencias

El sistema de control actual está basado en una lógica que utiliza contactores y relés, los cuales se accionan en una secuencia determinada para ejecutar las operaciones de apertura, cierre y monitorización de las variables del sistema, entre las principales: presiones de las bombas hidráulicas, indicaciones de compuerta cerrada o abierta, entre otras.

El funcionamiento básico del sistema es el siguiente: Cuando el nivel del embalse llega a un valor que se considera excesivo, el operador selecciona la cantidad de compuertas a manipular para realizar la descarga, pero el sistema solo permite tres opciones: cuatro compuertas, compuertas C1.1 - C1.4 o compuertas C1.2 – C1.3, lo cual hace que sea muy limitado.

Existen maniobras (por ejemplo cuando se eliminan excesos de lirio acuático) en que se requiere utilizar solamente una compuerta, opción que el sistema no posee. Debido a esta situación el operador debe desactivar el sistema hidráulico de las compuertas que no desea manipular, pero este proceso es engorroso y puede causar cuantiosos daños.

Además las compuertas no disponen de un mando de paro automático, es decir el operador es el encargado de detener estas al porcentaje de apertura que se desea, esto causa errores en las descargas porque en muchas ocasiones las compuertas no se logran colocar en la posición adecuada.

Cada treinta minutos los operadores deben registrar en una bitácora: el nivel del embalse y el nivel del túnel, pero se producen errores a la hora de digitar los datos, es por eso que surge la necesidad de que esto se haga mediante un sistema automatizado.

3.2. Antecedentes Bibliográficos

3.2.1. Controlador Lógico Programable (PLC)¹

Las siglas PLC significan Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller). Los componentes de un PLC básico son los siguientes: Rack principal, fuente de alimentación, CPU, tarjetas entradas/salidas digitales y tarjetas entradas/salidas analógicas. Una breve descripción se detalla a continuación.

- *Rack principal:* Este elemento es sobre el que se conectan el resto de los componentes del PLC. Va atornillado a la placa de montaje del armario de control. Puede alojar un número finito de elementos dependiendo del fabricante y conectarse a otros racks similares mediante un cable para tal efecto, llamándose en este caso rack de expansión.
- *Fuente de alimentación:* Es la encargada de suministrar la tensión y corriente necesarias tanto a la CPU como a las tarjetas (según fabricante). La tensión de entrada es normalmente de 110/220VAC y 24 DCV de salida que es con la que se alimenta la CPU y los diversos módulos que se pueden utilizar en una tarea específica.
- *CPU:* Es el cerebro del PLC. Consta de uno o varios microprocesadores (dependiendo del modelo y la casa fabricante) que se programan mediante un software propio. Operan según la lógica de dos estados para un mismo bit. Normalmente trabajan con bases de 16 bits, del 0 al 15 aunque algunos modernos utilizan bases de 32 bits. Según los modelos de CPU ofrecen en principio más o menos capacidad de memoria pero también va ligado esto a un aumento en las prestaciones de cálculo o funciones matemáticas especiales.

¹ Basado en [2]

- *Tarjetas entradas/salidas digitales:* Se enchufan o conectan al rack para comunicarse con la CPU. Transmiten los estados 0 o 1 del proceso (presostatos, finales de carrera, detectores, conmutadores, etc). En el caso de las salidas, la CPU determina el estado de las mismas tras la ejecución del programa y las activa o desactiva en consecuencia.
- *Tarjetas entradas/salidas analógicas:* Se enchufan o conectan al rack de igual manera que las anteriores, pero teniendo en cuenta que en algunos modelos han de estar situadas lo más cerca posible de la CPU. Estas tarjetas leen un valor analógico e internamente lo convierten en un valor digital para su procesamiento en la CPU. Esta conversión la realizan los convertidores analógico-digitales internos de las tarjetas que en algunos casos es uno para todos los canales de entrada o salida aunque actualmente se tiene uno por cada canal de entrada o salida. Estas tarjetas son normalmente de 2, 4, 8 o 16 entradas/salidas analógicas, llamándose a cada una de ellas canal y empezando por el 0. Los rangos de entrada están normalizados siendo lo más frecuente el rango de 4-20mA y 0-10 DCV. Lo más importante a la hora de elegir una tarjeta analógica es que esta disponga de separación galvánica para cada canal, es decir, que los canales sean totalmente independientes electrónicamente unos de otros dentro de la propia tarjeta para que no se afecten mutuamente por efecto de una mala tierra o derivación a la misma de uno de ellos.

3.2.2. Lenguaje LADDER²

El lenguaje de programación LADDER, también conocido como KOP permite representar gráficamente el control de un proceso dado mediante

² Con base en la información disponible en [1]

el uso simbólico de contactos normalmente abiertos (NO) y normalmente cerrados (NC), temporizadores, contadores, registros de desplazamiento, relés, entre otros. Este tipo de lenguaje debe su nombre a su similitud con los diagramas eléctricos de escalera (ladder en inglés).

El programa en lenguaje LADDER, es realizado y almacenado en la memoria del PLC. Este lee el programa LADDER de forma secuencial haciendo un barrido siguiendo el orden en que los renglones (escalones de la escalera) fueron escritos, comenzando por el renglón superior y terminando con el inferior.

En este tipo de programa cada símbolo representa una variable lógica cuyo estado puede ser verdadero o falso. Dispone de dos barras verticales que representan la alimentación eléctrica del diagrama; la barra vertical izquierda corresponde a un conductor con tensión y la barra vertical derecha corresponde a la tierra o masa.

A continuación se muestra la simbología más comúnmente usada en la elaboración de diagramas de escalera, según la normativa IEC-1131:

- *Contacto Normalmente Abierto o Normalmente Cerrado:* Estos componentes pueden representar a una entrada física del PLC o a una entrada lógica asociada a un relé interno (marca) del PLC. En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra el símbolo correspondiente.



Figura 3.2. Símbolo contacto normalmente abierto



Figura 3.3. Símbolo contacto normalmente cerrado

- *Bobina de salida:* Representa a un dispositivo genérico de salida que puede estar asociado a una salida física del PLC o a una salida lógica del diagrama escalera (marca interna). Se muestra en la figura 3.4

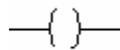


Figura 3.4. Símbolo de la bobina de salida

3.2.3. Sistemas SCADA³

SCADA es el acrónimo de Supervisory Control and Data Acquisition (Traducido al español: Supervisión, Control y Adquisición de Datos).

Atendiendo a la definición, no se trata de un sistema de control, sino de una utilidad software de monitorización o supervisión, que realiza la tarea de interfase entre los niveles de control (PLC) y los de gestión a un nivel superior.

Para que su instalación sea perfectamente aprovechada los requisitos que debe cumplir son los siguientes:

- Funcionalidad completa de manejo y visualización en sistema operativo Windows sobre la mayoría de los PC estándar.
- Arquitectura abierta que facilita combinaciones con aplicaciones estándar y de usuario, que permitan a los integradores crear soluciones de mando y supervisión optimizadas (Active X para

³ Utilizando las referencias [2] y [9]

ampliación de prestaciones, OPC para comunicaciones con terceros, OLE-DB para comunicación con bases de datos, lenguaje estándar integrado como VB o C, acceso a funciones y datos mediante API).

- Sencillez de instalación, sin exigencias de hardware elevadas, fáciles de utilizar, y con interfaces amigables con el usuario.
- Permitir la integración con las herramientas de producción.
- Fácilmente configurable y escalable, debe ser capaz de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Ser independiente del sector y la tecnología.
- Funciones de mando y supervisión integradas.

Los sistemas SCADA se conciben principalmente como una herramienta de supervisión y mando. Entre sus objetivos podemos destacar:

- Economía: es más fácil ver qué ocurre en la instalación desde la oficina que enviar a un operario a realizar la tarea. Ciertas revisiones se convertirán en innecesarias.
- Mantenimiento: la adquisición de datos materializa la posibilidad de obtener la información más sobresaliente de un proceso, facilitando el almacenamiento y presentación de una manera inteligible para un usuario no especializado.
- Ergonomía: es la ciencia que procura hacer que la relación entre el usuario y el proceso sea lo menos difícil posible. Los modernos ordenadores, con sus prestaciones gráficas, intentan sustituir a los grandes paneles, repletos de cables, pilotos. Pero hay un problema que aún persiste: ¿Cómo presentar toda esa información sin aburrir ni fatigar al usuario?
- Gestión: todos los datos recopilados pueden ser valorados de múltiples maneras mediante herramientas estadísticas, gráficas, valores tabulados, que permitan explotar el sistema con el mejor rendimiento posible.

- Flexibilidad: cualquier modificación de alguna de las características del sistema de visualización no significa un gasto en tiempo y medios, pues no hay modificaciones físicas.
- Conectividad: La documentación de los protocolos de comunicación actuales permite la interconexión de sistemas de diferentes proveedores y evita la existencia de lagunas informativas que puedan causar fallos en el funcionamiento o en la seguridad.

Todos los sistemas, de mayor o menor complejidad aparecen bajo uno de los nombres más habituales, los cuales se muestran a continuación:

- MMI: *Man Machine Interface*, Interfase Hombre-Máquina.
- HMI: *Human Machine Interface*, Interfase Humano-Máquina.

El sistema a controlar aparece ante el usuario bajo un número más o menos elevado de pantallas con mayor o menor información. Se pueden encontrar planos, fotografías, esquemas eléctricos, gráficos de tendencias, entre otros.

Un paquete SCADA, en su vertiente de herramienta de interfase hombre-máquina, comprende toda una serie de funciones y utilidades encaminadas a establecer una comunicación lo más clara posible entre el proceso y el operador. Entre las prestaciones de una herramienta de este tipo destacan:

- Monitorización: Representación de datos en tiempo real. Se leen los datos de los autómatas (temperaturas, velocidades, detectores).
- Supervisión: Mando y adquisición de datos de un proceso y herramientas de gestión para la toma de decisiones. Tienen además la capacidad de ejecutar programas que puedan supervisar y modificar el control establecido y, bajo ciertas condiciones, anular tareas asociadas a los autómatas. Evita una continua supervisión humana.

- Garantizar la seguridad de los datos: Tanto el envío como la recepción de datos deben de estar suficientemente protegidos de influencias no deseadas, intencionadas o no (fallos en la programación, intrusos, situaciones inesperadas, entre otros).
- Certificar la seguridad en los accesos: Restringiendo zonas de programa comprometidas a usuarios no autorizados, registrando todos los accesos y acciones llevadas a cabo por cualquier operador.

Cuando hablamos de un sistema SCADA no hay que olvidar que hay algo más que las pantallas que nos informan de cómo van las cosas en nuestra instalación. Tras éstas se encuentran multitud de elementos de regulación y control, sistemas de comunicaciones y múltiples utilidades de software que pretenden que el sistema funcione de forma eficiente y segura.

Las ventajas más evidentes de los sistemas de control automatizado y supervisado (SCADA) podemos enumerarlas a continuación:

- El actual nivel de desarrollo de los paquetes de visualización permite la creación de aplicaciones funcionales sin necesidad de ser un experto en la materia.
- Un sistema PLC está concebido para trabajar en condiciones adversas, proporcionando robustez y fiabilidad al sistema que controla.
- La modularidad de los autómatas permite adaptarlos a las necesidades actuales y ampliarlos posteriormente si es necesario.
- Cualquier tipo de sensores y actuadores puede integrarse en un programa de PLC mediante las múltiples tarjetas de adquisición disponibles.
- Gracias a las herramientas de diagnóstico se consigue una localización más rápida de errores. Esto permite minimizar los

periodos de paro en las instalaciones y repercute en la reducción de costos de mantenimiento.

- Los programas de control pueden documentarse convenientemente de manera que puedan ser fácilmente interpretados por los técnicos de mantenimiento.
- Los sistemas de diagnóstico implementados en los elementos de control informan continuamente de cualquier incidencia en los equipos.
- Los programas de visualización pueden presentar todo tipo de ayuda al usuario, desde la aparición de una alarma hasta la localización de la causa o la parte de esquema eléctrico implicada en la misma. Esto permite reducir los tiempos de localización de averías al proporcionarse información sobre el origen y las causas de los fallos.
- Generación y distribución automática de documentación. El sistema de visualización puede recoger los datos del autómatas y presentarlos en formatos fácilmente exportables a otras aplicaciones de uso común, tales como hojas de cálculo.
- Haciendo uso de las tecnologías celulares (GSM, GPRS, UMTS), los sistemas de control pueden mantener informados sobre cualquier incidencia a los operadores responsables de los mismos mediante mensajes de correo electrónico o de voz.
- La tecnología Web permite el acceso desde cualquier punto geográfico a nuestro sistema de control.
- Los protocolos de seguridad permiten una gestión segura y eficiente de los datos, limitando el acceso a personas no autorizadas.
- La distribución de recursos y control sobre la red permite una mejor coordinación entre las estaciones remotas en caso de fallos en una de ellas.

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

3.3.1. Principio de funcionamiento del cilindro hidráulico [6]

En los sistemas hidráulicos la energía es transmitida a través de tuberías, esta es función del caudal y de la presión del fluido (aceite) que circula en el sistema.

Un cilindro actuador es un dispositivo que convierte la potencia fluida a lineal. La presión del fluido determina la fuerza de empuje de un cilindro, el caudal de ese fluido es quien establece la velocidad de desplazamiento del mismo. La combinación de fuerza y recorrido produce trabajo y cuando este trabajo es realizado en un determinado tiempo produce potencia.

El cilindro tipo pistón es el más utilizado en sistemas de potencia fluida. Las principales partes que lo componen se muestran en la figura 3.5, las cuales son básicamente un pistón, un vástago, y guarniciones o sellos para evitar las fugas de fluido.

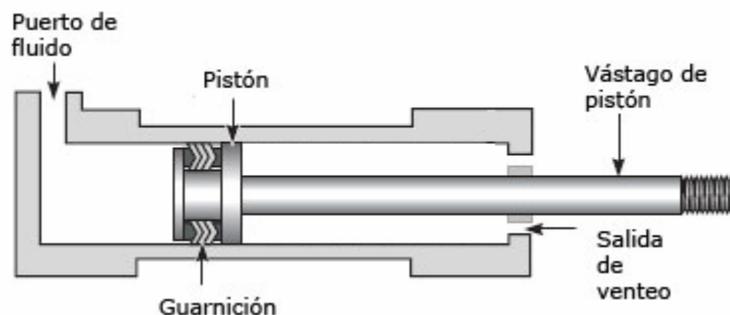


Figura 3.5. Diagrama de un cilindro hidráulico tipo pistón.

Para el cálculo de la fuerza de empuje se parte del principio físico: *“El empuje es igual a la presión manométrica multiplicada por la superficie total del pistón”*.

$$F = P[\text{Kg}/\text{cm}^2] * A[\text{cm}^2] \quad (3.1)$$

La superficie total del pistón se muestra en la figura 3.6.

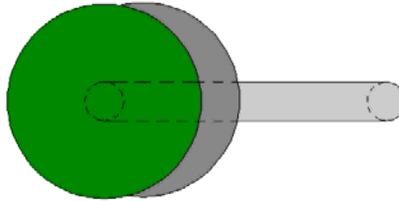


Figura 3.6. Superficie total del pistón hidráulico.

Capítulo 4. Procedimiento Metodológico

En el siguiente capítulo se describe cada una de las etapas que se plantearon para darle solución al problema existente, tomando como base el método de diseño en ingeniería.

4.1. Problemática que presentaba el control de las compuertas del vertedor

En una entrevista efectuada en el Centro de Producción Angostura, el Ing. Fabián Madriz González describió conceptos generales sobre el vertedor de excedencias y la importancia que este tiene para la planta. Además se expuso en una forma muy general la problemática que aqueja a esta obra desde hace varios años con respecto a su funcionamiento.

Actualmente, se requiere que personal del ICE esté las 24 horas del día. Para ello, existen tres turnos de 8 horas, entre las funciones que desempeñan están las de controlar el movimiento de las compuertas, es decir, un operador las manipula por medio de botoneras en el sitio. También deben registrar cada hora en una bitácora ciertos datos como: el nivel del embalse, caudal de entrada y el nivel de las compuertas. Debido a esta situación, existe la posibilidad de que se cometan errores tanto a la hora de aproximar la apertura o cierre de una o varias compuertas o cuando introducen los datos a la bitácora.

Luego, se acordó una primera visita al vertedor de excedentes para observar las obras de cerca y también para entrevistar a los operadores sobre el funcionamiento. Se buscó enfocar en los puntos en donde ellos consideraban que el sistema de control actual presentaba limitaciones o fallos.

Una semana después se realizó una reunión donde participaron varios ingenieros, técnicos eléctricos y mecánicos, en esta ya se logró definir propiamente el problema: el sistema de control actual tiene serias limitaciones a la hora de realizar las maniobras, además se requiere monitorizarlo para medir confiablemente y almacenar las distintas variables involucradas las cuales son de suma importancia en el correcto funcionamiento del centro de producción. Aquí también se enfatizó en que el nuevo sistema de control solamente iba a ser implementado en las compuertas principales C1 (C1.1, C1.2, C1.3 y C1.4) para observar su comportamiento y analizar a futuro la factibilidad de escalarlo a las compuertas C2 y C3.

4.2. Investigación sobre posibles fuentes de información

Con la problemática ya definida, se ubicaron los planos eléctricos, mecánicos y civiles en el centro de documentación de la Planta Angostura para tener una visión clara del funcionamiento del vertedor. Además se hizo una investigación sobre las principales características técnicas del PLC Siemens S7-400 y sobre el software WinCC® con ayuda de la información suministrada en las referencia bibliográfica [8], porque desde un inicio se llegó al acuerdo de que estos debían ser utilizados en la solución del problema.

También se obtuvo información importante de las hojas de datos de los dispositivos que conforman el vertedor, pero se enfocó en los que forman parte del sistema de control y del sistema de alimentación eléctrica de corriente alterna y de corriente directa.

Mediante Internet y con ayuda del personal técnico de la planta se logró investigar sobre el funcionamiento general de los pistones hidráulicos, las

electroválvulas, lógica basada en relés y además sobre algunos posibles dispositivos que pudieran formar parte de la solución del problema en cuestión.

4.3. Selección de una solución adecuada

Para la solución del problema existente se analizaron varios posibles campos de acción, la primera propuesta fue la de eliminar todo el sistema de control basado en relés y sustituirlo por un sistema de control completamente automatizado utilizando el PLC Siemens S7-400. Esta opción se descartó por varias razones, entre las más importantes fueron que no existe un PLC de respaldo en caso de que el principal sufriera un fallo y el presupuesto para hacer una modernización de tal envergadura no está disponible en este momento.

La segunda opción fue la de acoplar un nuevo sistema de control totalmente automatizado implementado en el PLC, con el sistema basado en relés. La idea consistió diseñar un sistema de control principal totalmente independiente del operador y en caso de falla se podría desactivar este para controlar el sistema con los paneles antiguos. Esta opción se descartó parcialmente porque las descargas de excedentes de caudal se realizan por razones muy diversas y es sumamente peligroso automatizar por completo el movimiento de las compuertas.

La tercera se basó en la anterior y fue la de acoplar ambos sistemas pero sin perder de vista que el operador es el que tiene la responsabilidad de realizar las descargas de excedentes, por eso el algoritmo de control programado en el PLC no va a tener una completa autonomía, este colocará las compuertas que seleccione el operador al porcentaje que el operador crea conveniente y hará una monitorización del sistema en general haciendo mediciones del nivel del embase y de la toma de agua,

además de las principales alarmas que puedan generarse durante las maniobras. Esta solución se seleccionó por ser la de más bajo presupuesto, escalable y la que mejor se acopla a los dispositivos existentes y al funcionamiento actual.

4.4. Procedimiento para realizar la implementación

Primero se hizo un análisis para determinar el estado físico de las instalaciones del vertedor, el cual constó básicamente en:

- Realizar pruebas para evaluar y observar el funcionamiento de las compuertas.
- Realizar pruebas de funcionamiento de los actuadores y sensores del sistema, tomando en cuenta las características eléctricas de estos, para verificar si los dispositivos eran adecuados para la modernización.
- Evaluar el estado y conexiones de cableado actuales con lo cual se determinó que parte de estos se debió conservar, eliminar o sustituir.

Luego se procedió a realizar un análisis de los planos eléctricos de sistema de control (referencia bibliográfica [3]) para determinar cuales variables digitales del sistema era necesario enviar al PLC para que la lógica de control las monitorizara constantemente.

También utilizando estos planos se determinó la forma mas adecuada de acoplar las señales de control provenientes del PLC a la lógica cableada existente, tomando en cuenta que lo ideal era encontrar una forma de que ambas pudieran funcionar correctamente, la primera como sistema principal y la otra como sistema secundario en caso de una falla grave. Esta medida se tomó debido al alto riesgo que puede surgir en caso de que el vertedor de excedencias se encuentre fuera de funcionamiento.

Una vez finalizado lo anterior, se procedió a realizar los diagramas de flujo que detallan la lógica del sistema de control, la adquisición de datos (variables que se pretendía medir), y señales de salida que iban a accionar los actuadores, para luego programarlos en el PLC con ayuda de la herramienta de software Step7®.

Posterior a esta etapa se diseñó la interfaz gráfica del sistema, para lo cual se utilizó el software WinCC® de Siemens AG, tomando en cuenta las recomendaciones del Ing. Fabián Madriz con respecto a los colores, el formato y el contenido.

Luego se llegó a la etapa de simulación, verificación y pruebas del sistema, en esta etapa se estudió el funcionamiento del sistema, se eliminaron al máximo errores de diseño, y también se optimizó el diseño en ciertos puntos para lograr un rendimiento óptimo.

Cuando finalizaron las pruebas, se capacitó al personal sobre el funcionamiento del sistema, además se dieron recomendaciones sobre el mantenimiento preventivo del mismo.

4.5. Reevaluación y rediseño

Desde una perspectiva de escalabilidad, este proyecto puede ser aplicado a las compuertas de descarga de fondo y objetos flotantes, ya que haciendo un análisis de la información suministrada por los planos eléctricos de estas (referencias bibliográficas [4] y [5]), el sistema de control es muy similar al de las compuertas principales (Compuertas C1). Además las principales variables involucradas (sensores de apertura, presiones de

las bombas, entre otras), ya se encuentran debidamente cableadas al PLC para facilitar esta modernización en un futuro cercano.

Capítulo 5. Diseño e implementación del nuevo sistema de control

En este capítulo se presenta en una forma clara y concisa los pasos seguidos para el diseño y la implementación del proyecto de modernización del sistema de control del vertedor de excedentes de caudal.

5.1. Procedimiento para obtener la solución más adecuada

Uno de los requerimientos primordiales fue utilizar el PLC Siemens Simatic S7 400 como la interfaz de comunicación entre los dispositivos periféricos (entradas de monitorización digitales, sensores de nivel y de apertura), además este se encargará de enviar los comandos de control a los actuadores adecuados para controlar el movimiento de las compuertas.

A partir de este punto se comenzó a analizar las características generales que este posee para verificar si cumplía con los requisitos de tensión y corriente de operación para lograr un perfecto funcionamiento, y también se identificaron los protocolos de comunicación. En la tabla 5.1 se muestran estas.

Tabla 5.1. Especificaciones técnicas del PLC Siemens Simatic S7 -
400

Parámetro	Descripción
Tensiones de salida de la fuente	24VDC, 48VDC, 5VDC
Tensión de operación entradas y salidas digitales	24VDC
Rangos de operación para lectura entradas analógicas	0 -10V 0 -20mA 4 - 20mA
Protocolos de comunicación	Profibus DP TCP/IP MPI

Con base en la información de la tabla 5.1 se concluye que este dispositivo se puede utilizar en la implementación del sistema, porque cumple con los principales requisitos de tensión, corriente y protocolos de comunicación utilizados en la industria y estos son utilizados en el sistema de control basado en relés (4 -20mA, 24VDC, 0 – 10V).

En este momento se comenzaron a formular una serie de inquietudes con respecto a la forma más adecuada de darle solución al problema en cuestión: ¿El sistema debe ser completamente autónomo, es decir que este realice las maniobras sin necesidad de que el operador las autorice?, ¿Se debe eliminar el sistema de control basado en relés?, ¿Cuál es la forma más adecuada de comunicar una PC con el PLC?, ¿Cómo obtener y utilizar las mediciones de los niveles y porcentajes de apertura?

Tomando en cuenta lo anterior se expusieron tres posibles soluciones:

1. Eliminar todo el sistema de control basado en relés y sustituirlo por un sistema de control totalmente nuevo que realice las maniobras automáticamente con ayuda del PLC Siemens S7-400. El sistema obtiene los datos de los sensores de apertura y de nivel y toma acciones de realizar o no descargas de excedentes. Se desarrollará una interfaz con el usuario programada en WinCC® para que se pueda observar en tiempo real las mediciones de los sensores y las variables de monitorización del sistema, datos que se transmitirán utilizando el protocolo TCP/IP.

Esta opción se descartó por dos razones, la primera por seguridad. Las descargas de excedentes de caudal se realizan por razones muy diversas y es muy riesgoso automatizar el sistema por completo dada la magnitud del embalse del Centro de Producción Angostura y la cantidad de agua que contiene (aproximadamente 256 hectáreas y 16.7 millones

de metros cúbicos respectivamente). Si por alguna razón una descarga se realiza erróneamente se puede poner en peligro la vida de miles de personas de los asentamientos más próximos.

La segunda es por costos económicos. Una modernización de tal magnitud requiere cuantiosos gastos en equipo y personal, además para respaldar el sistema en caso de falla se necesita instalar otro PLC con características similares al Simatic S7-400, el cual tiene un costo muy elevado.

2. Diseñar un nuevo sistema de control totalmente automatizado implementado en el PLC, y acoplarlo eficientemente con el sistema basado en relés. La idea consistió diseñar un sistema de control principal totalmente independiente del operador y en caso de falla se podría desactivar este para controlar el sistema con los paneles antiguos. Esta opción parecía atractiva porque se economizaba bastante dinero, principalmente en la compra del PLC de respaldo pero se descartó por las razones de seguridad expuestas anteriormente.
3. La solución que se consideró que mejor se identificaba con el problema se basó en la anterior y consistió en acoplar ambos sistemas pero sin perder de vista que el operador es el que tiene la responsabilidad de realizar las descargas de excedentes. El sistema de control modernizado colocará la o las compuertas que seleccione el operador al porcentaje que este crea conveniente y hará una monitorización del sistema en general haciendo mediciones del nivel del embalse y de la toma de agua, además de las principales alarmas que puedan generarse durante las maniobras, esto con ayuda de una interfaz con el usuario programada en WinCC®. Los datos se transmitirán a la PC utilizando el protocolo TCP/IP. Esta solución se consideró óptima por ser la de más bajo presupuesto, escalable, cumple con las

consideraciones de seguridad y es la que mejor se acopla a los dispositivos existentes y al funcionamiento actual.

5.2. Estudio Técnico del Sistema Actual

Para poder acoplar efectivamente el sistema de control modernizado con el actual se hizo un estudio de las instalaciones del vertedor con lo que se logró obtener una perspectiva clara sobre los dispositivos y las particularidades propias que poseen. En los casos que se debió hacer una sustitución o eliminación de componentes se detallan las razones y los sustitutos.

5.2.1. Compuertas Principales

Las compuertas principales del vertedor de excedentes son de tipo radial, en la tabla 5.2 se muestran las características más relevantes que estas poseen.

Tabla 5.2. Características generales de las compuertas del vertedor

Parámetro	Valor
Radio externo	15m
Velocidad de apertura	0,30 m/min
Velocidad de cierre	0,30 m/min
Carrera total de apertura	13,496m
Peso	40440kg

5.2.2. Pistones hidráulicos

Para que las compuertas puedan moverse se necesitan de dos pistones hidráulicos por unidad, en la tabla 5.3 se detallan las características de estos. Hay que tener claro que para el cierre de la compuerta es realizada por la fuerza de gravedad, el sistema hidráulico solamente controla la velocidad.

Tabla 5.3. Características generales de los pistones hidráulicos

Parámetro	Descripción
Tipo	Simple efecto en tracción
Diámetro	300mm
Diámetro del vástago	140mm
Carrera útil	5,823m
Carrera máxima	5,923m
Presión de servicio	18MPa
Velocidad de apertura	0,30 m/min
Velocidad de cierre	0,30 m/min
Peso	2950Kg

5.2.3. Motores eléctricos

Cada unidad hidráulica cuenta con dos bombas las cuales son accionadas por dos motores que cumplen con las especificaciones que se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Características generales los motores eléctricos

Parámetro	Valor
Tensión	460V \pm 10%
Corriente	25A
Frecuencia	60Hz
Fases	3
Potencia	25KW

5.2.4. Fusibles

El panel de control principal de las compuertas maneja toda la gama de tensiones que estas necesitan, desde 24VDC, 28VDC, 115VAC hasta 460VAC. Para proteger al sistema de posibles sobrecargas se cuenta con todo un sistema de fusibles dializados fabricados por Siemens AG. En la figura 5.1 se muestra una imagen de la ubicación de estos en dicho panel.



Figura 5.1. Fusibles del sistema de control.

El listado de fusibles se muestra en la tabla 5.5

Tabla 5.5. Listado de fusibles de control y de potencia de las compuertas C1.

Código	Polos	Corriente (A)	Descripción
3FU1,2	2	6	Circuito de tensión de control
3FU3	1	16	Circuito de tensión de control
3FU5,6	2	6	Circuito de tensión auxiliares
3FU7	1	16	Circuito de tensión auxiliares
3FU15.16	2	6	Circuito de tensión de control
3FU1.2.3	3	2	Supervisión Trifásico
3FU 9.10.11	3	50	Compuertas C1.1 y C1.2, Alimentación Motor 1
3FU 12,13,14	3	50	Compuertas C1.1 y C1.2, Alimentación Motor 2 (Reserva)
4FU 1.2.3	3	50	Compuertas C1.3 y C1.4, Alimentación Motor 3
4FU 4.5.6	3	50	Compuertas C1.3 y C1.4, Alimentación Motor 4 (Reserva)
FU1	1	4	Mando de las electroválvulas, Válvula direccional C1.1 y C1.2. S10
FU2	1	4	Mando de las electroválvulas, Apertura C1.1. S12
FU3	1	4	Mando de las electroválvulas, Apertura C1.2. S14
FU4	1	4	Mando de las electroválvulas, Válvula direccional C1.3 y C1.4. S21
FU5	1	4	Mando de las electroválvulas, Apertura C1.3. S22
FU6	1	4	Mando de las electroválvulas, Apertura C1.4. S24
FU7	1	4	Mando de las electroválvulas, Cierre C1.1. S13
FU8	1	4	Mando de las electroválvulas, Cierre C1.4. S25
FU9	1	4	Mando de las electroválvulas, Cierre C1.2. S15
FU10	1	4	Mando de las electroválvulas, Cierre C1.3. S23

Estos fusibles son de alta calidad pero desde hace tiempo se requiere sustituirlos porque estos ya son antiguos y sus repuestos están escaseando en el mercado nacional.

Para solucionar este inconveniente se escogió el disyuntor termomagnético Multi9, fabricado por Merlin Gerin®, debido a la calidad, costo y a la gran variedad de rangos con que cuenta. En la figura 5.2 se muestra un disyuntor de dos polos con carácter ilustrativo.



Figura 5.2. Disyuntor termomagnético Multi9 de dos polos.

En la figura 5.4 se muestra el panel con los disyuntores ya colocados en sustitución de los fusibles.

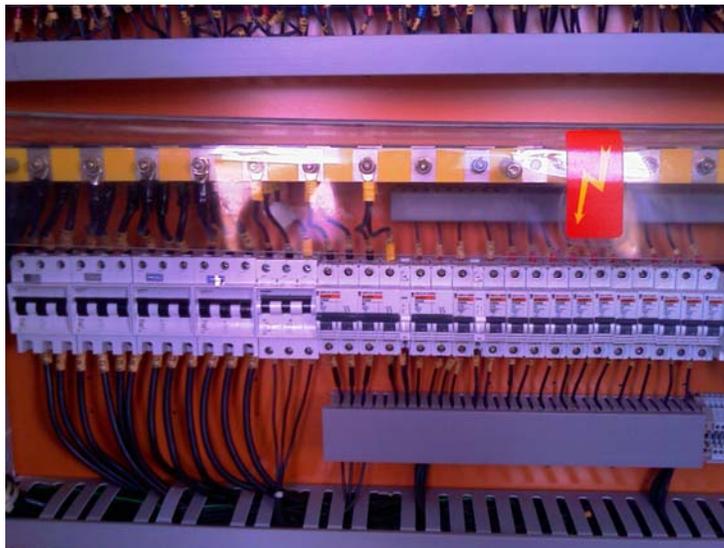


Figura 5.3. Panel de control con la modernización de las protecciones.

5.2.5. Relés de control

Toda la lógica de control que estaba funcionando en el vertedor se había implementado mediante contactores y relés. En la tabla 5.6 se muestra el listado de dichos relés con una breve descripción de su funcionamiento.

Tabla 5.6. Listado de relés de control de las compuertas C1.

Código Relé	Descripción
7KFH1	Temporización de presión baja
7KFH2	Temporización de presión baja
3KCM1	Accionamiento de motor eléctrico 1, C1.1 y C1.2
3KCM2	Accionamiento de motor eléctrico 2, C1.1 y C1.2
7KT1	Temporización de cierre de la compuerta C1.1
7KT2	Temporización de cierre de la compuerta C1.2
8KFH1	Temporización de presión baja
8KFH2	Temporización de presión baja
4KCM1	Accionamiento de motor eléctrico 3, C1.3 y C1.4
4KCM2	Accionamiento de motor eléctrico 4, C1.3 y C1.4
8KT1	Temporización de cierre de la compuerta C1.3
8KT2	Temporización de cierre de la compuerta C1.4
9KLN	Presostatos de circuito hidráulico C1.1 y C1.2. Llave de nivel, nivel bajo de aceite
9KPA1	Presostatos de circuito hidráulico, Presión alta. C1.1 y C1.2
9KPB1	Presostatos de circuito hidráulico, Presión baja. C1.1 y C1.2
9KTP1	Reset C1.1 y C1.2
10KLN	Presostatos de circuito hidráulico C1.3 y C1.4. Llave de nivel, nivel bajo de aceite
10KPA1	Presostatos de circuito hidráulico, Presión alta. C1.3 y C1.4
10KPB1	Presostatos de circuito hidráulico, Presión baja. C1.3 y C1.4
10KTP1	Reset C1.3 y C1.4
11KCRP1	Final de carrera, Reposición C1.1
11KCRP2	Final de carrera, Reposición C1.4
11KCA1	Final de carrera, abierta C1.1

Tabla 5.6. Listado de relés de control de las compuertas C1
(Continuación).

Código Relé	Descripción
11KCA2	Final de carrera, abierta C1.4
11KCAE1	Final de carrera, Apertura extrema C1.1
11KCAE2	Final de carrera, Apertura extrema C1.4
11KCF1	Final de carrera, Cerrada C1.1
11KCF2	Final de carrera, Cerrada C1.4
12KCRP1	Final de carrera, Reposición C1.2
12KCRP2	Final de carrera, Reposición C1.3
12KCA1	Final de carrera, abierta C1.2
12KCA2	Final de carrera, abierta C1.3
12KCAE1	Final de carrera, Apertura extrema C1.2
12KCAE2	Final de carrera, Apertura extrema C1.3
12KCF1	Final de carrera, Cerrada C1.2
12KCF2	Final de carrera, Cerrada C1.3
13ST1	Estado normal de la alimentación trifásica
13KAM1	Accionamiento de las bombas C1.1 y C1.2, Bomba 1
13KAMT1	Accionamiento de las bombas C1.1 y C1.2, Bomba 1
13KAM2	Accionamiento de las bombas C1.1 y C1.2, Bomba 2
13KAMT2	Accionamiento de las bombas C1.1 y C1.2, Bomba 2
14KAM1	Accionamiento de las bombas C1.3 y C1.4, Bomba 1
14KAMT1	Accionamiento de las bombas C1.3 y C1.4, Bomba 1
14KAM2	Accionamiento de las bombas C1.3 y C1.4, Bomba 2
14KAMT2	Accionamiento de las bombas C1.3 y C1.4, Bomba 2
15KAC1	Apertura extrema. Apertura y reposición C1.1 y C1.2
15KR1	Reposición C1.1
15KR2	Reposición C1.4
16KFN1	Cierre Compuerta C1.1 y C1.4
16KFN2	Cierre Compuerta C1.1 y C1.4
16KBP	Parada
17KFN1	Cierre Compuerta C1.2 y C1.3
17KFN2	Cierre Compuerta C1.2 y C1.3
17HSCT	Temporización para partida simultanea de las compuertas
18KSCT	Selección de operación de compuerta, C1.1 / C1.2 / C1.3 / C1.4

Tabla 5.6. Listado de relés de control de las compuertas C1 (Continuación).

Código Relé	Descripción
18KSC14	Selección de operación de compuerta, C1.1 / C1.4
18KSC23	Selección de operación de compuerta, C1.2 / C1.3
19KAE1	Apertura extrema C1.1 y C1.2
19KAE2	Apertura extrema C1.1 y C1.2
19KAE3	Apertura extrema C1.3 y C1.4
19KAE4	Apertura extrema C1.3 y C1.4
20KAC1	Apertura Compuerta C1.1 y C1.4
20KAC2	Apertura Compuerta C1.1 y C1.4
20KAC3	Apertura Compuerta C1.2 y C1.3
20KAC4	Apertura Compuerta C1.2 y C1.3
21KAC1	Apertura extrema. Apertura y reposición C1.2 y C1.3
21KR1	Reposición C1.2
21KR2	Reposición C1.3
22KC1.1	Desactivación de compuerta C1.1
22KLC1	Desactivación de compuerta C1.1
22KC1.2	Desactivación de compuerta C1.2
22KLC2	Desactivación de compuerta C1.2
22KC1.3	Desactivación de compuerta C1.3
22KLC3	Desactivación de compuerta C1.3
22KC1.4	Desactivación de compuerta C1.4
22KLC4	Desactivación de compuerta C1.4
23KLOC1	Selección Local 1
23KLOC1.1	Selección Local 1
23KBL1	Selección Local 1
23KLOC2	Selección Local 2
23KLOC2.1	Selección Local 2
23KBL2	Selección Local 2
23KREM	Remoto
23KERR	Error de selección
27KTA	Señalización de las compuertas, Compuerta abriendo C1.1 o C1.2
28KTA	Señalización de las compuertas, Compuerta cerrando C1.1 o C1.4
33KTA	Señalización de las compuertas, Compuerta abriendo C1.4 o C1.3
34KTA	Señalización de las compuertas, Compuerta cerrando C1.2 o C1.3
40KTA	Señalización de las compuertas, Error de selección de botonera

5.3. Descripción del hardware

Para la implementación del sistema a nivel de hardware se tomó como base el diagrama de primer nivel que se muestra en la figura 5.4 en esta se pueden observar los distintos bloques y los flujos de información.

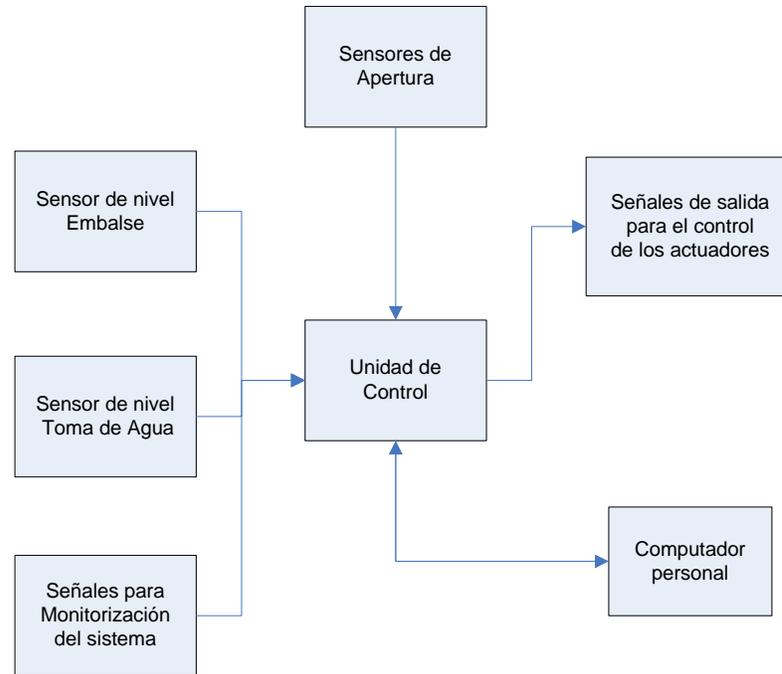


Figura 5.4. Diagrama de bloques de primer nivel a nivel de hardware

5.3.1. Interfaz entre los sensores de apertura y de nivel con la unidad de control.

Los sensores que miden el porcentaje de apertura de las compuertas utilizan el estándar industrial y funcionan con el rango de corriente de 4 a 20mA, con esto se tiene la ventaja de que las señales son menos perjudicadas por la inducción de ruido eléctrico, obteniendo así datos muy confiables.

Estas mediciones se envían a los módulos analógicos de la unidad de control y este las convierte en un valor numérico de 15 bits. Es decir para 4mA se va a obtener un valor de 0 y para 20mA se obtiene 27648. Luego estos son almacenarlos en la memoria del PLC para ser procesados por el sistema. En la figura 5.5 se muestra la conexión de los sensores a los módulos analógicos Siemens® 6ES7-431-1KF10-0AB0, este posee ocho entradas de las cuales dos están destinadas para mediciones de corriente por lo que se utilizaron 3 módulos, dos para las compuertas principales C1 y uno para las compuertas C2.⁴

Pareciera ineficiente utilizar todo un módulo de ocho entradas analógicas solo para medir dos, pero estos módulos ya se encontraban disponibles en la empresa y ello conllevó a una disminución de gastos importante.

⁴ Cabe destacar que el proyecto se centró en las compuertas principales C1, pero también se instalaron diversas señales de monitorización para las compuertas C2 y C3 en caso de que se desee modernizar su sistema de control en un futuro cercano.

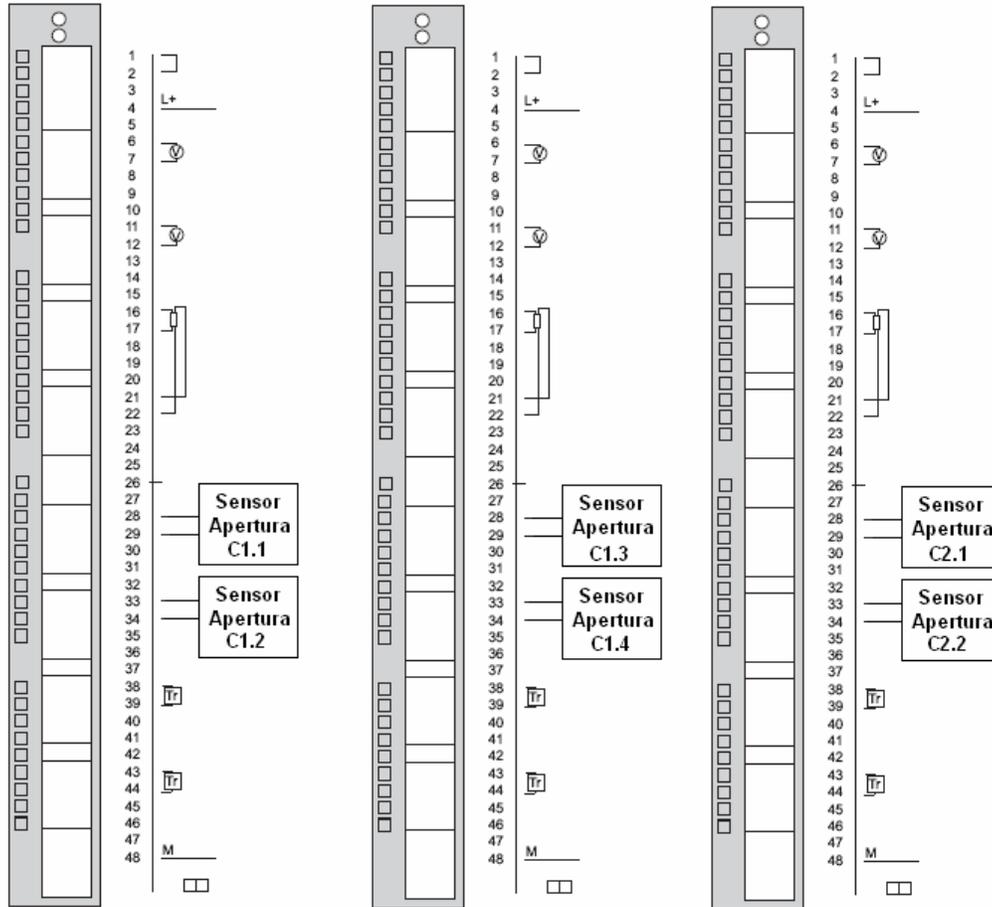


Figura 5.5. Diagrama de conexión de los sensores de apertura para C1 y C2.

Los sensores de nivel de embalse y nivel de túnel (toma de agua), son ultrasónicos y utilizan el mismo rango de medición de 4 a 20mA, y su tratamiento es similar al de los sensores de apertura.

En la figura 5.6 se muestra el diagrama de conexión de los sensores de los niveles de embalse y toma de agua.

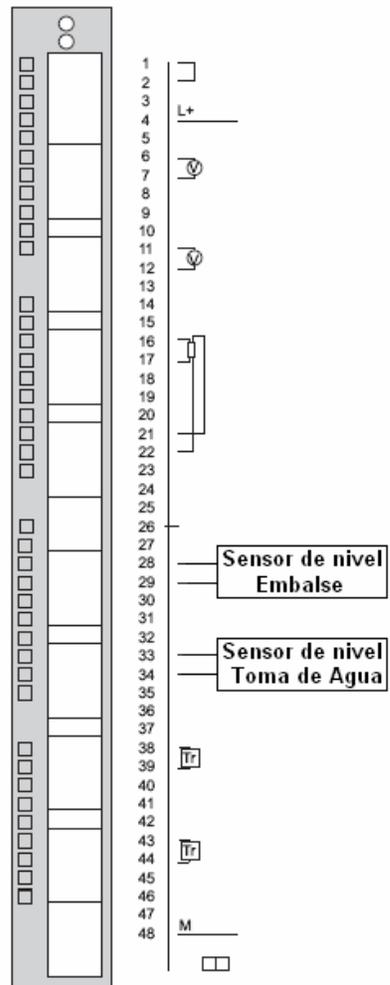


Figura 5.6. Diagrama de conexión de los sensores de nivel del embalse y de la toma de agua

Para realizar el cableado del sistema resultó mucho más fácil elaborar una tabla, que mostró en una forma sintética las conexiones que se realizaron para instalar los sensores. Esta información se muestra en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Tabla de alambrado de los sensores de nivel y de apertura

 INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD									
CENTRO DE PRODUCCIÓN ANGOSTURA									
PROYECTO MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL VERTEDOR DE EXCEDENTES DE CAUDAL									
TABLA DE ALAMBRADO SENSORES DE POSICION									
Tipo de cable: PVC Shiel, Calibre 16 AWG									
Origen					Destino				
Comentario	Borne		Regleta		Borne		Regleta	Destino	Comentario
	+	-			+	-			
Sensor de apertura C1.1	70	69	X2		17	20	X3	EA 1.0	Compuerta C1.1, Indicador Posición
Sensor de apertura C1.2	74	73	X2		21	24	X3	EA 2.0	Compuerta C1.2, Indicador Posición
Sensor de apertura C1.3	76	75	X2		49	52	X3	EA 3.0	Compuerta C1.3, Indicador Posición
Sensor de apertura C1.4	72	71	X2		53	56	X3	EA 4.0	Compuerta C1.4, Indicador Posición
Sensor de apertura C2.1	182	183	X1		81	84	X3	EA 5.0	Compuerta C2.1, Indicador Posición
Sensor de apertura C2.2	184	185	X1		85	88	X3	EA 6.0	Compuerta C2.2, Indicador Posición
Sensor Nivel de embalse	1	2	X5		113	116	X3	EA 7.0	Indicador Nivel Embalse
Sensor Nivel de toma	3	4	X5		117	120	X3	EA 8.0	Indicador Nivel Toma de agua

5.3.2. Interfaz entre las señales de monitorización del sistema con la unidad de control

Como se describió anteriormente, el PLC debe monitorizar constantemente las principales variables que intervienen con el sistema, sobretodo cuando se debe realizar una descarga de excedentes de caudal. Estas señales se seleccionaron cuidadosamente de la tabla 5.6 tomando en cuenta varios aspectos, principalmente la importancia de monitorizar la señal y la facilidad de obtener esta para enviarla a la unidad de control.

En la figura 5.7 se muestra la forma correcta de conectar estas señales a los módulos de entradas digitales 6ES7 421-1BL01-0AA0 desde los relés correspondientes, utilizando contactos libres normalmente cerrados (NC) o normalmente abiertos (NO). Cuando se acciona un relé en el sistema, este cierra o abre varios contactos, uno de estos fue conectado al PLC para que este pueda monitorizar el estado del sistema. Cabe destacar que la figura es con carácter ilustrativo debido a la gran cantidad de señales involucradas.

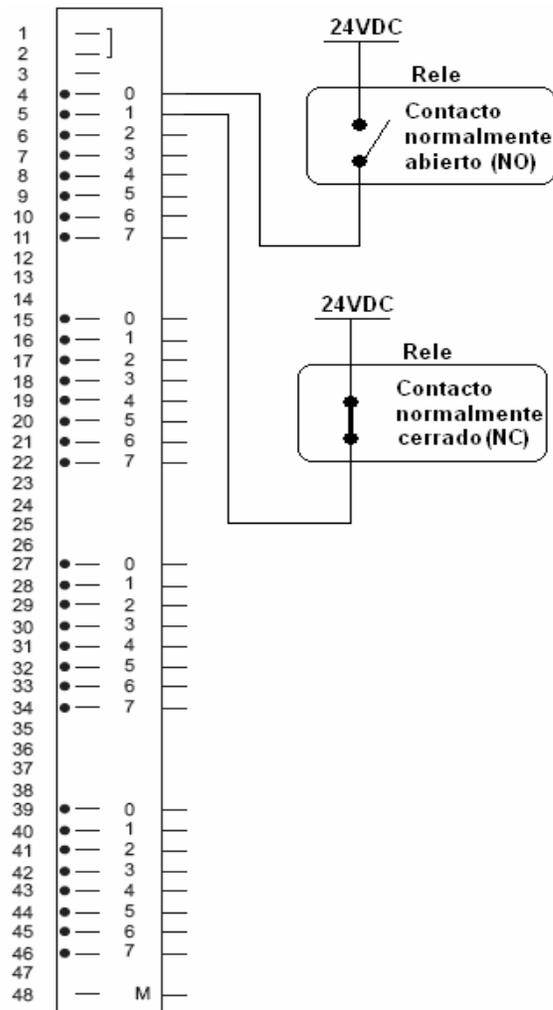


Figura 5.7. Diagrama de conexión de las señales de monitorización a la unidad de control.

El cableado se realizó a través de distintas mongas (conjunto de cables) para hacerlo lo más ordenado posible. Las tablas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 muestran en forma detallada las conexiones realizadas para comunicar las señales desde los paneles hasta la unidad de control, tomando como base la conexión de la figura 5.7.

Tabla 5.8. Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga 5CP02M01

 INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD CENTRO DE PRODUCCION ANGOSTURA PROYECTO MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL VERTEDOR DE EXCEDENTES DE CAUDAL TABLAS DE ALAMBRAO SEÑALES DE MONITORIZACION							
NOMBRE DEL CABLE: 5CP02M01			TIPO DE CABLE: PVC Shiel, Calibre 16 AWG				
Origen				Destino			
Comentario	Relé	Contacto	Numero de Cable	Borne REGLETA X2	Borne REGLETA X2	Destino	Comentario
Contacto 24VCD NO	GAB1+23KLOC1.1	13-14	2 ROJO	42	1	ED 1.0	Comp. C1, Control en mando local 1
Contacto 24VCD NO	GAB1+23KLOC2.1	13-14	3 AZUL	43	2	ED 1.1	Comp. C1, Control en mando local 2
Contacto 24VCD NO	GAB1+23KREM	53-54	4 NARANJA	41	3	ED 1.2	Comp. C1, Control en mando remoto
Contacto 24VCD NO	GAB1+3RT2	97-98	5 AMARILLO	7	4	ED 1.3	Comp. C1, Termomagnetico alimentacion respaldo
Contacto 24VCD NO	GAB1+4RT2	97-98	6 MARRON	9	5	ED 1.4	Comp. C1, Termomagnetico alimentacion respaldo
Contacto 24VCD NO	GAB1+18KSC1	63-64	7 ROJO - NEGRO	2	6	ED 1.5	Comp. C1, Selecccion operacion cuatro Comp.
Contacto 24VCD NO	GAB1+13ST1	43-44	8 AZUL - NEGRO	39	7	ED 1.6	Comp. C1, Desbalance trifasico
Contacto 24VCD NO	GAB1+15KR1	53-54	9 NARANJA - NEGRO	14	8	ED 1.7	Comp. C1.1, En posicion
Contacto 24VCD NO	GAB1+11KCA2	53-54	10 AMARILLO - NEGRO	11	9	ED 1.8	Comp. C1.4, Posicion abierta
Contacto 24VCD NO	GAB1+11KCF1	83-84	11 MARRON - NEGRO	17	10	ED 1.9	Comp. C1.1, Posicion cerrada
Contacto 24VCD NO	GAB1+3RT1	97-98	12 NEGRO - ROJO	6	11	ED 1.10	Comp. C1.1 - C1.2, Disparo termomagnetico Motor 1
Contacto 24VCD NO	GAB1+18KSC14	03-04	13 AZUL - ROJO	3	12	ED 1.11	Comp. C1.1 - C1.4, Selecccion operacion 2 Comp.s
Contacto 24VCD NO	GAB1+9KPB1	83-84	14 NARANJA - ROJO	22	13	ED 1.12	Comp. C1.1 - C1.2, Presion aceite baja Bomba 1
Contacto 24VCD NO	GAB1+9KTP1	83-84	15 AMARILLO - ROJO	23	14	ED 1.13	Comp. C1.1 - C1.2, Presion aceite baja Bomba 2
Contacto 24VCD NO	GAB1+9KLN	53-54	16 MARRON - ROJO	20	15	ED 1.14	Comp. C1.1 - C1.2, Nivel bajo de aceite
Contacto 24VCD NO	GAB1+9KPA1	53-54	17 NEGRO - AZUL	21	16	ED 1.15	Comp. C1.1 - C1.2, Presion de aceite alta
Contacto 24VCD NO	GAB1+21KR1	73-74	18 ROJO - AZUL	28	17	ED 1.16	Comp. C1.2, En reposicion
Contacto 24VCD NO	GAB1+12KCA2	83-84	19 NARANJA - AZUL	25	18	ED 1.17	Comp. C1.3, Posicion abierta
Contacto 24VCD NO	GAB1+12KCF1	13-14	20 AMARILLO AZUL	31	19	ED 1.18	Comp. C1.2, Posicion cerrada
Contacto 24VCD NO	GAB1+4RT1	97-98	21 MARRON - AZUL	8	20	ED 1.19	Comp. C1.3 - C1.4, Termomagnetico disparo Motor 3
Contacto 24VCD NO	GAB1+18KSC23	03-04	N/D	4	21	ED 1.20	Comp. C1.2 - C1.3, Selecccion operacion Dos Comp.
Contacto 24VCD NO	GAB1+10KPB1	83-84	23 ROJO - NARANJA	36	22	ED 1.21	Comp. C1.3 - C1.4, Presion baja de aceite Bomba 1
Contacto 24VCD NO	GAB1+10KTP1	83-84	24 AZUL - NARANJA	37	23	ED 1.22	Comp. C1.3 - C1.4, Presion baja de aceite Bomba 2

Tabla 5.9. Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga 5CP08M01

 INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD									
CENTRO DE PRODUCCION ANGOSTURA									
PROYECTO MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL VERTEDOR DE EXCEDENTES DE CAUDAL									
TABLAS DE ALAMBRADO SEÑALES DE MONITORIZACION									
NOMBRE DEL CABLE: 5CP08M01			TIPO DE CABLE: PVC Shiel, Calibre 16 AWG						
	Origen					Destino			
Comentario	Relé	Contacto	Numero de Cable	Regleta	Borne	Borne REGLETA X2	Destino	Comentario	
Contacto 24VCD NO	GAB1+10KLN	53-54	1	X2	1		24	ED 1.23	Comp. C1.3 - C1.4, Nivel bajo de aceite
Contacto 24VCD NO	GAB1+10KPA1	53-54	2	X2	2		25	ED 1.24	Comp. C1.3 - C1.4, Presion alta de aceite
Contacto 24VCD NO	GAB1+21KR2	73-74	3	X2	3		26	ED 1.25	Comp. C1.3, En reposicion
Contacto 24VCD NO	GAB1+12KCA1	83-84	4	X2	4		27	ED 1.26	Comp. C1.2, Posicion abierta
Contacto 24VCD NO	GAB1+12KCF2	53-54	5	X2	5		28	ED 1.27	Comp. C1.3, Posicion cerrada
Contacto 24VCD NO	GAB1+15KR2	73-74	6	X2	6		29	ED 1.28	Comp. C1.4, En reposicion
Contacto 24VCD NO	GAB1+11KCA1	53-54	7	X2	7		30	ED 1.29	Comp. C1.1, Posicion abierta
Contacto 24VCD NO	GAB1+11KCF2	04-03	8	X2	8		31	ED 1.30	Comp. C1.4, Posicion cerrada
Contacto 24VCD NO	GAB1+Seleccion	01-02	9	R1	25		37	ED 2.4	Seleccion Modo Scada

Tabla 5.10. Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga 5CP18M01

 INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD CENTRO DE PRODUCCION ANGOSTURA PROYECTO MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL VERTEDOR DE EXCEDENTES DE CAUDAL TABLAS DE ALAMBRADO SEÑALES DE MONITORIZACION								
NOMBRE DEL CABLE: 5CP18M01			TIPO DE CABLE: PVC Shiel, Calibre 16 AWG					
		Origen			Destino			
Comentario	Relé	Contacto	Numero de Cable	Borne REGLETA X2	Borne REGLETA X2	Destino	Comentario	
Contacto 24VCD NO	GAB2+3RT1	97-98	2 ROJO	5	49	ED 2.16	Comp. C2.1 - C2.2 , Disparo termomagnetico motor 1	
Contacto 24VCD NO	GAB2+3RT2	97-98	3 AZUL	6	50	ED 2.17	Comp. C2.1 - C2.2 , Respaldo	
Contacto 24VCD NO	GAB2+15KRA1	63-64	4 NARANJA	13	51	ED 2.18	Comp. C2.1, En reposicion	
Contacto 24VCD NO	GAB2+11KCA1	43-44	5 AMARILLO	11	52	ED 2.19	Comp. C2.1, Posicion abierta	
Contacto 24VCD NO	GAB2+11KCF	23-24	6 MARRON	17	53	ED 2.20	Comp. C2.1, Posicion cerrada	
Contacto 24VCD NO	GAB2+9KPB1	23-24	7 ROJO - NEGRO	30	54	ED 2.21	Comp. C2.1 - C2.2, Presion aceite baja Bomba 1	
Contacto 24VCD NO	GAB2+9KTP1	43-44	8 AZUL - NEGRO	31	55	ED 2.22	Comp. C2.1 - C2.2, Presion aceite baja Bomba 2	
Contacto 24VCD NO	GAB2+9KPA1	33-34	9 NARANJA - NEGRO	29	56	ED 2.23	Comp. C2.1 - C2.2, Presion alta de aceite	
Contacto 24VCD NO	GAB2+15KRA4	13-14	10 AMARILLO - NEGRO	14	57	ED 2.24	Comp. C2.2, En reposicion	
Contacto 24VCD NO	GAB2+11KCA2	43-44	11 MARRON - NEGRO	10	58	ED 2.25	Comp. C2.2, Posicion abierta	
Contacto 24VCD NO	GAB2+11KCF1	23-24	12 NEGRO - ROJO	16	59	ED 2.26	Comp. C2.2, Posicion cerrada	
Contacto 24VCD NO	GAB2+19KL1	03-04	13 AZUL - ROJO	2	60	ED 2.27	Comp. C2 - C3, Control en mando local	
Contacto 24VCD NO	GAB2+19KR1	73-74	14 NARANJA - ROJO	3	61	ED 2.28	Comp. C2 - C3, Control en mando remoto	
Contacto 24VCD NO	GAB2+13ST1	44-43	15 AMARILLO - ROJO	36	62	ED 2.29	Comp. C2 - C3, Desbalance trifasico	
Contacto 24VCD NO	GAB2+9KLN	33-34	16 MARRON - ROJO	28	63	ED 2.30	Comp. C2 - C3, Nivel bajo de aceite	
Contacto 24VCD NO	GAB2+16KRA1	83-84	17 NEGRO - AZUL	22	64	ED 2.31	Comp. C3.1, En reposicion	
Contacto 24VCD NO	GAB2+12KCA2	13-14	18 ROJO - AZUL	19	65	ED 3.0	Comp. C3.1, Posicion abierta	
Contacto 24VCD NO	GAB2+12KCF1	23-24	19 NARANJA - AZUL	25	66	ED 3.1	Comp. C3.1, Posicion cerrada	
Contacto 24VCD NO	GAB2+4RT1	97-98	20 AMARILLO - AZUL	7	67	ED 3.2	Comp. C3.1 - C3.2, Disparo termomagnetico motor 3	
Contacto 24VCD NO	GAB2+4RT2	97-98	21 MARRON - AZUL	8	68	ED 3.3	Comp. C3.1 - C3.2 , Respaldo	
Contacto 24VCD NO	GAB2+10KPB1	23-24	N/D	34	69	ED 3.4	Comp. C3.1 - C3.2, Presion aceite baja Bomba 3	
Contacto 24VCD NO	GAB2+10KTP1	43-44	23 ROJO - NARANJA	35	70	ED 3.5	Comp. C3.1 - C3.2, Presion aceite baja Bomba 4	
Contacto 24VCD NO	GAB2+10KPA1	33-34	24 AZUL - NARANJA	33	71	ED 3.6	Comp. C3.1 - C3.2, Presion alta de aceite	

Tabla 5.11. Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga 5CP24M01

 INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD							
CENTRO DE PRODUCCION ANGOSTURA							
PROYECTO MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL VERTEDOR DE EXCEDENTES DE CAUDAL							
TABLAS DE ALAMBRADO SEÑALES DE MONITORIZACION							
NOMBRE DEL CABLE: 5CP24M01				TIPO DE CABLE: PVC Shiel, Calibre 16 AWG			
Origen				Destino			
Comentario	Relé	Contacto	Numero de Cable	Borne REGLETA X2	Borne REGLETA X2	Destino	Comentario
Contacto 24VCD NO	GAB2+16KRA2	83-84	1	23	72	ED 3.7	Compuerta C3.2, En reposicion
Contacto 24VCD NO	GAB2+12KCA1	43-44	2	20	73	ED 3.8	Compuerta C3.2, Posicion abierta
Contacto 24VCD NO	GAB2+12KCF	23-24	3	26	74	ED 3.9	Compuerta C3.2, Posicion cerrada

Tabla 5.12. Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga M01

 INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD CENTRO DE PRODUCCION ANGOSTURA PROYECTO MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL VERTEDOR DE EXCEDENTES DE CAUDAL TABLAS DE ALAMBRADO SEÑALES DE MONITORIZACION							
NOMBRE DEL CABLE: M01			TIPO DE CABLE: PVC Shiel, Calibre 16 AWG				
	Origen				Destino		
Comentario	Relé	Contacto	Color de Cable	Borne REGLETA R1	Borne REGLETA X2	Destino	Comentario
Contacto 24VCD NO	GAB1+3FU15,16	N/A	ROSADO	1	75	ED 3.10	Disparo Breaker 3FU15,16
Contacto 24VCD NO	GAB1+3FU7	N/A	NARANJA	2	76	ED 3.11	Disparo Breaker 3FU7
Contacto 24VCD NO	GAB1+16KBP	43-44	TRANSPARENTE	3	77	ED 3.12	Paro de emergencia
Contacto 24VCD NO	GAB1+17KFN1	71-72	BLANCO	4	78	ED 3.13	Indicador Compuerta C1.2 Cerrando
Contacto 24VCD NO	GAB1+17KFN2	71-72	MARRON	5	79	ED 3.14	Indicador Compuerta C1.3 Cerrando
Contacto 24VCD NO	GAB1+20KAC1	73-74	VIOLETA	6	80	ED 3.15	Indicador Compuerta C1.1 Abriendo
Contacto 24VCD NO	GAB1+20KAC2	73-74	AMARILLO - VERDE	7	81	ED 3.16	Indicador Compuerta C1.4 Abriendo
Contacto 24VCD NO	GAB1+20KAC4	73-74	ROJO	8	82	ED 3.17	Indicador Compuerta C1.3 Abriendo
Contacto 24VCD NO	GAB1+20KAC3	73-74	NEGRO	9	83	ED 3.18	Indicador Compuerta C1.2 Abriendo
Contacto 24VCD NO	GAB1+23KERR	43-44	GRIS	10	84	ED 3.19	Error de Seleccion Local1, Local 2
Contacto 24VCD NO	GAB1+3KCM1	43-44	AZUL	11	85	ED 3.20	Motor 1 Encendido
Contacto 24VCD NO	GAB1+3KCM2	43-44	BEIGE	12	86	ED 3.21	Motor 2 Encendido

Tabla 5.13. Tabla de alambrado de las señales de monitorización Monga M02

 INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD CENTRO DE PRODUCCION ANGOSTURA PROYECTO MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL VERTEDOR DE EXCEDENTES DE CAUDAL TABLAS DE ALAMBRADO SEÑALES DE MONITORIZACION								
NOMBRE DEL CABLE: M02				TIPO DE CABLE: PVC Shiel, Calibre 16 AWG				
	Origen				Destino			
Comentario	Relé	Contacto	Color de Cable	Borne REGLETA R1		Borne REGLETA X2	Destino	Comentario
Contacto 24VCD NO	GAB1+4KCM1	43-44	ROSADO	13		87	ED 3.22	Motor 3 Encendido
Contacto 24VCD NO	GAB1+4KCM2	43-44	NARANJA	14		88	ED 3.23	Motor 4 Encendido
Contacto 24VCD NO	GAB1+22KLC1	31-32	TRANSPARENTE	15		89	ED 3.24	Compuerta C1.1 Mantenimiento
Contacto 24VCD NO	GAB1+22KLC2	31-32	BLANCO	16		90	ED 3.25	Compuerta C1.2 Mantenimiento
Contacto 24VCD NO	GAB1+22KLC3	31-32	MARRON	17		91	ED 3.26	Compuerta C1.3 Mantenimiento
Contacto 24VCD NO	GAB1+22KLC4	31-32	VIOLETA	18		92	ED 3.27	Compuerta C1.4 Mantenimiento
Contacto 24VCD NO	GAB1+22KC1.2	43-44	AMARILLO - VERDE	19		93	ED 3.28	Seleccion Compuerta C1.2
Contacto 24VCD NO	GAB1+22KC1.3	21-22	ROJO	20		94	ED 3.29	Seleccion Compuerta C1.3
Contacto 24VCD NO	GAB1+22KC1.1	43-44	NEGRO	21		95	ED 3.30	Seleccion Compuerta C1.1
Contacto 24VCD NO	GAB1+22KC1.4	03-04	GRIS	22		96	ED 3.31	Seleccion Compuerta C1.4
Contacto 24VCD NO	GAB1+16KFN1	43-44	AZUL	23		97	ED 4.0	Indicador Compuerta C1.1 Cerrando
Contacto 24VCD NO	GAB1+16KFN2	43-44	BEIGE	24		98	ED 4.1	Indicador Compuerta C1.4 Cerrando

5.3.3. Interfaz entre la unidad de control y los actuadores

Para que el nuevo sistema tuviera control sobre las compuertas fue necesario crear varias señales para poder accionar su movimiento de apertura, paro, cierre o reset (cuando las bombas tienen baja presión) desde el PLC. También se idearon mandos para seleccionar una o varias compuertas según el criterio del operador. En la figura 5.8 se muestra la forma en que se utilizó el módulo de salidas digitales 6ES7 422-1BL00-0AA0. En esta se puede observar que la salida digital de 24VDC se conecta a un relé de acople que acciona el mando deseado.

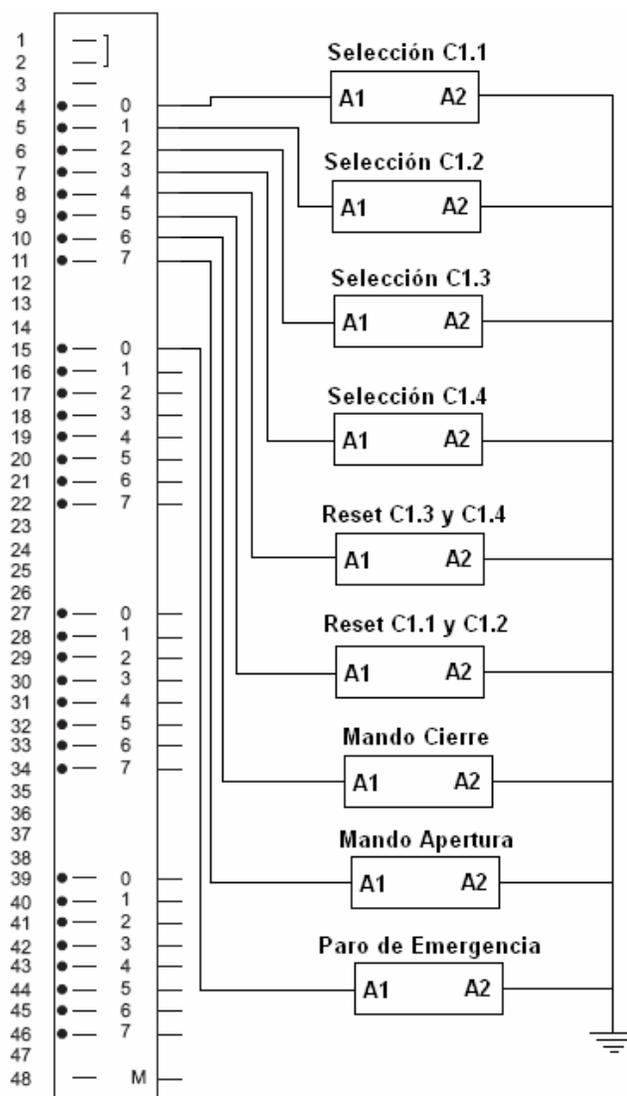


Figura 5.8. Diagrama de conexión de las señales de salida con los actuadores.

En la tabla 5.14 se muestra la forma en que se realizaron las conexiones para la figura 5.8. Para esta parte se utilizaron dos mongas, la M03 y la 5CP08M01, esta última ya había sido utilizada pero disponía de algunos cables libres.

Tabla 5.14. Tabla de alambrado de las señales de salida para el control de las compuertas

 INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD CENTRO DE PRODUCCION ANGOSTURA PROYECTO MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL VERTEDOR DE EXCEDENTES DE CAUDAL TABLAS DE ALAMBRADO SEÑALES DE CONTROL TIPO DE CABLE: PVC Shiel, Calibre 16 AWG									
Origen						Destino			
Comentario	Relé	Contacto	Monga	Color / Numero de Cable	Borne REGLETA R2	Borne REGLETA R3	Destino	Comentario	
SD 1.0	GAB5+K1	13-14	M03	ROSADO	1	1			Contacto de salida 24VCD NO
				NARANJA	2	2			
SD 1.1	GAB5+K2	13-14	M03	TRANSPARENTE	3	3			Contacto de salida 24VCD NO
				BLANCO	4	4			
SD 1.2	GAB5+K3	13-14	M03	MARRON	5	5			Contacto de salida 24VCD NO
				VIOLETA	6	6			
SD 1.3	GAB5+K4	13-14	M03	AMARILLO - VERDE	7	7			Contacto de salida 24VCD NO
				ROJO	8	8			
SD 1.4	GAB5+K5	13-14	M03	NEGRO	9	9			Contacto de salida 24VCD NO
				GRIS	10	10			
SD 1.5	GAB5+K6	13-14	M03	AZUL	11	11			Contacto de salida 24VCD NO
				BEIGE	12	12			
SD 1.6	GAB5+K7	13-14	5CP08M01	10	13	13			Contacto de salida 24VCD NO
SD 1.7	GAB5+K8	13-14	5CP08M01	11	14	14			Contacto de salida 24VCD NO
SD 1.8	GAB5+K9	13-14	5CP08M01	13	15	15			Contacto de salida 24VCD NO

5.3.4. Interfaz entre la unidad de control y el computador

Para que la unidad de control, conformada por el PLC, tuviera la capacidad de enviar y recibir información con un computador, se seleccionó un módulo de comunicaciones Siemens, CP443-1 TCP. Este posee la particular de enviar y recibir datos por medio del protocolo TCP-IP. La configuración del dispositivo es sumamente simple, consiste solo en asignarle una dirección IP válida, con su respectiva máscara de subred y puerta de enlace. Estos parámetros se muestran en la tabla 5.15 y fueron escogidos con base en las características de la red institucional de la planta.

Tabla 5.15. Configuración del módulo de comunicaciones CP443-1 TCP

Parámetro	Valor
Dirección IP	10.10.28.30
Máscara de subred	255.255.252.0
Puerta de enlace	10.10.28.1

5.4. Descripción del software

En esta sección se describirán todas las rutinas de software que se diseñaron para el sistema de control de las compuertas del vertedor. Primeramente se describirán las rutinas de control que se programaron en el PLC Siemens Simatic S7-400 y luego se estudiará el diseño de la interfaz con el usuario programada con ayuda del software WinCC®.

5.4.1. Rutina principal OB1

En un PLC Siemens, la rutina OB1 se ejecuta cíclicamente, es decir cuando termina de ejecutarse, inmediatamente vuelve al inicio. Esta particularidad hizo que esta se seleccionara para programar la rutina principal y su diagrama de flujo se muestra en la figura 5.9.

Inicialmente el sistema de control obtiene las mediciones de los sensores de nivel y de apertura, les realiza un proceso de linealización y almacena los datos

en memoria, luego el sistema verifica si el sistema se encuentra activo y si el operador hizo una selección de compuerta, si es verdadero se ingresa a las rutinas de control y monitorización de las compuertas.

Para cada compuerta existe una rutina de control independiente, porque así se facilita este en caso de que se seleccione solamente una o cuando son dos las seleccionadas. Si el usuario no desea realizar maniobras, el sistema continúa monitorizando los sensores de nivel, o verifica si se realizó un paro de emergencia.

Es importante aclarar que las señales de monitorización del sistema de la sección 5.3.2 se almacenan automáticamente en memoria porque corresponde a señales digitales que son llamadas directamente desde la programación o desde la interfaz de usuario para su evaluación.

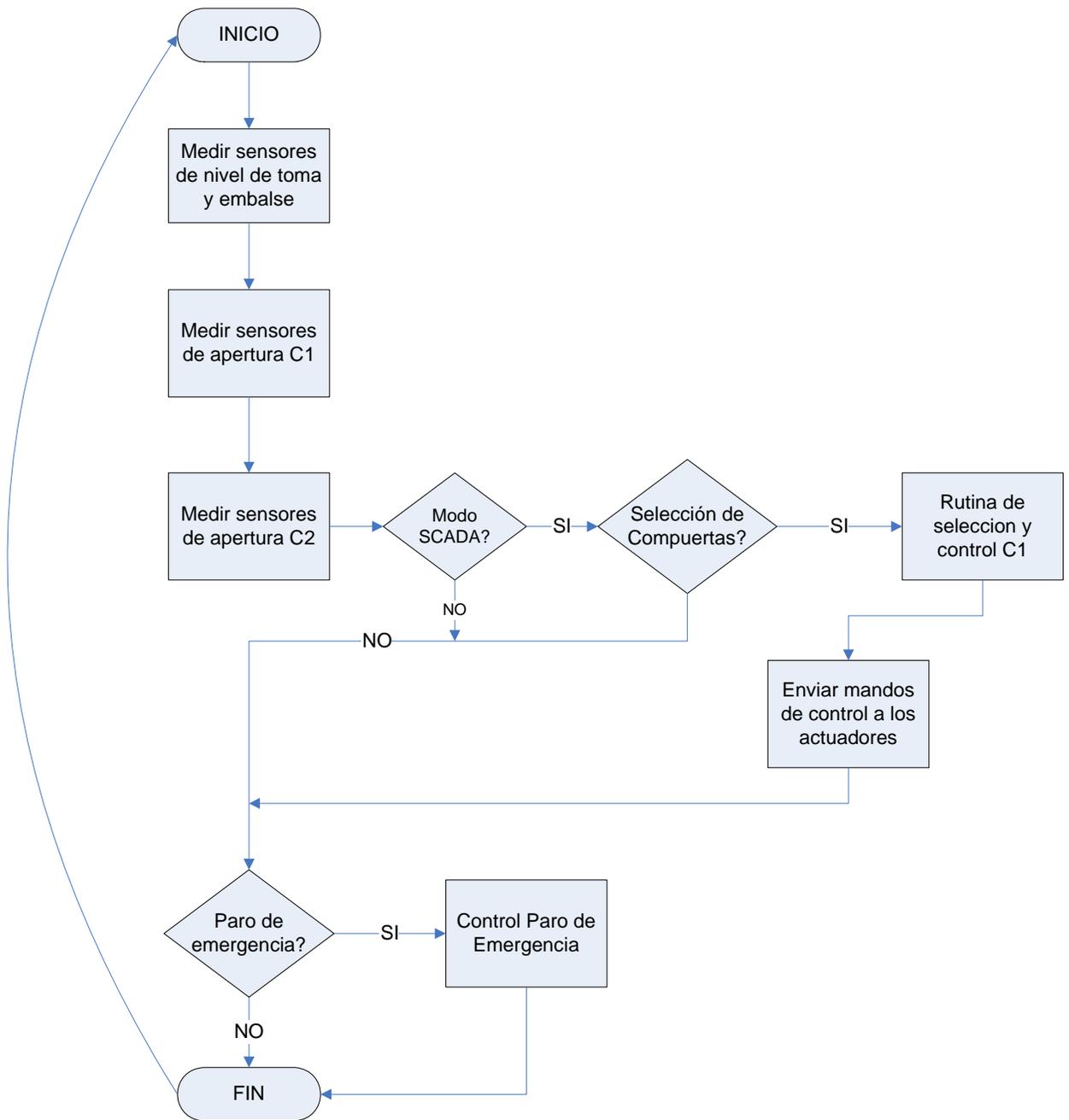


Figura 5.9. Diagrama de flujo de la rutina principal

5.4.2. Rutina de monitorización de apertura Compuertas C1.1 y C1.2

Un aspecto muy importante de un sistema de control eficiente es la capacidad que este posea para ser monitorizado. En la figura 5.10 se muestra el diagrama de flujo que describe la rutina de monitorización de apertura de las compuertas C1.1 y C1.2.

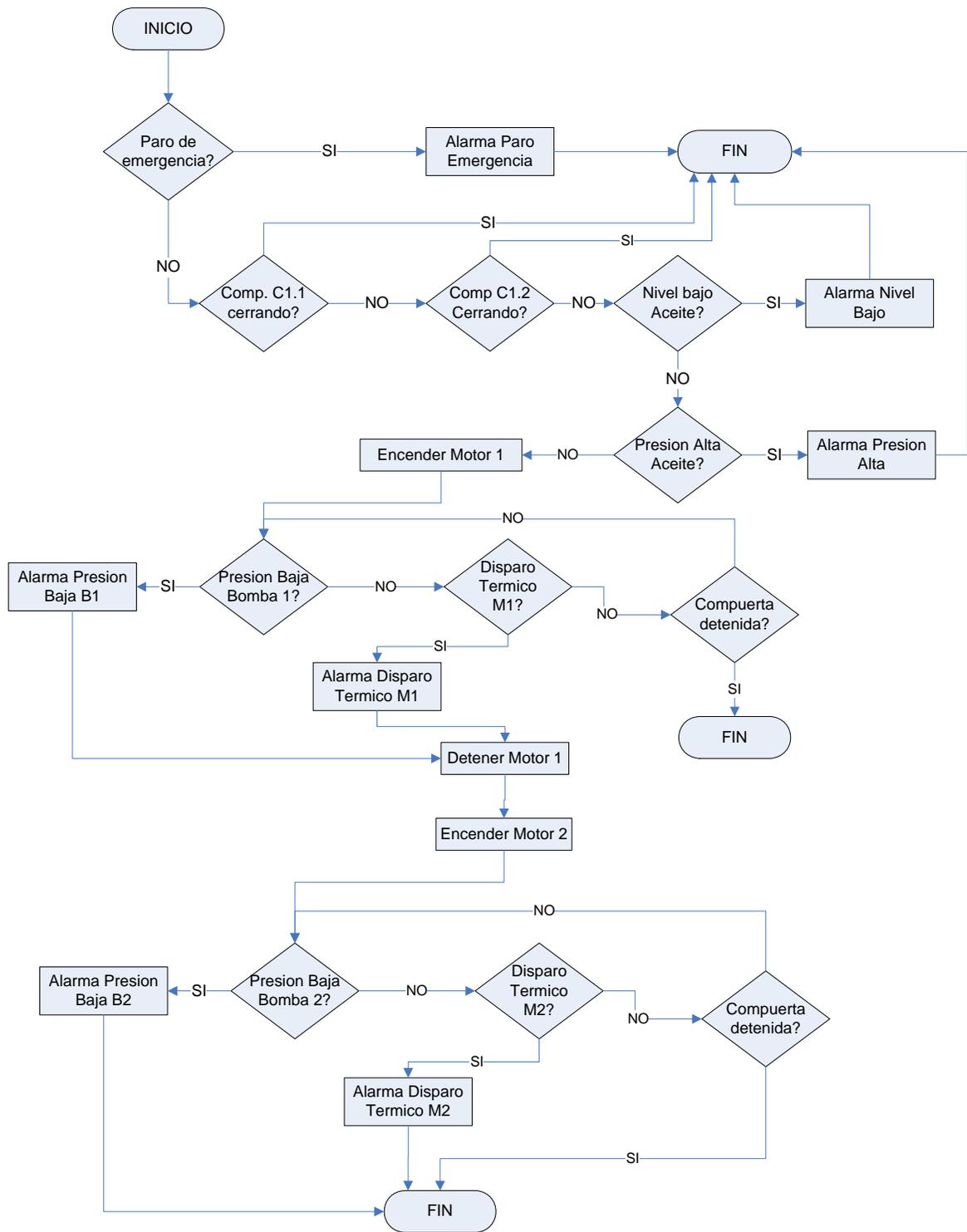


Figura 5.10. Diagrama de flujo de la rutina de monitorización de apertura de C1.1 y C1.2

Es de especial atención aclarar que la monitorización de las compuertas C1.1 y C1.2 se hizo compartida porque estas utilizan la misma central hidráulica y por lo tanto las mismas variables.

Con base en la figura 5.10, cuando el sistema va a realizar una apertura de la compuertas C1.1.y/ó C1.2 primero se deben verificar varios aspectos importantes, el paro de emergencia, y que las compuertas no estén cerrando ya que si esto se cumple el sistema no puede realizar una apertura.

Si no se detectan presiones altas o niveles bajos de aceite se enciende el motor 1, este alimenta a la bomba hidráulica 1 y funcionará hasta la finalización de la apertura de la compuerta o hasta que se activen las alarmas de presión baja o disparo termomagnético, si esta situación sucede, se detiene el motor y se enciende el motor 2 que alimenta a la bomba hidráulica de respaldo. Al igual que en el caso anterior si se evidencia una presión baja o un disparo térmico el motor 2 se detiene y se activa la alarma de reset, esto para alertar al operador que debe accionar el mando “Reset” para reiniciar la maniobra nuevamente.

5.4.3. Rutina de monitorización de apertura Compuertas C1.3 y C1.4

Las compuertas C1.3 y C1.4 comparten también una central hidráulica. Por esta razón también se diseñó una rutina de monitorización para su apertura. En la figura 5.11 se muestra el diagrama de flujo que describe su funcionamiento.

El principio que se utilizó prácticamente fue el mismo que para la monitorización de las compuertas C1.1 y C1.2, por esta razón resultaría redundante dar una explicación detallada de esta rutina.

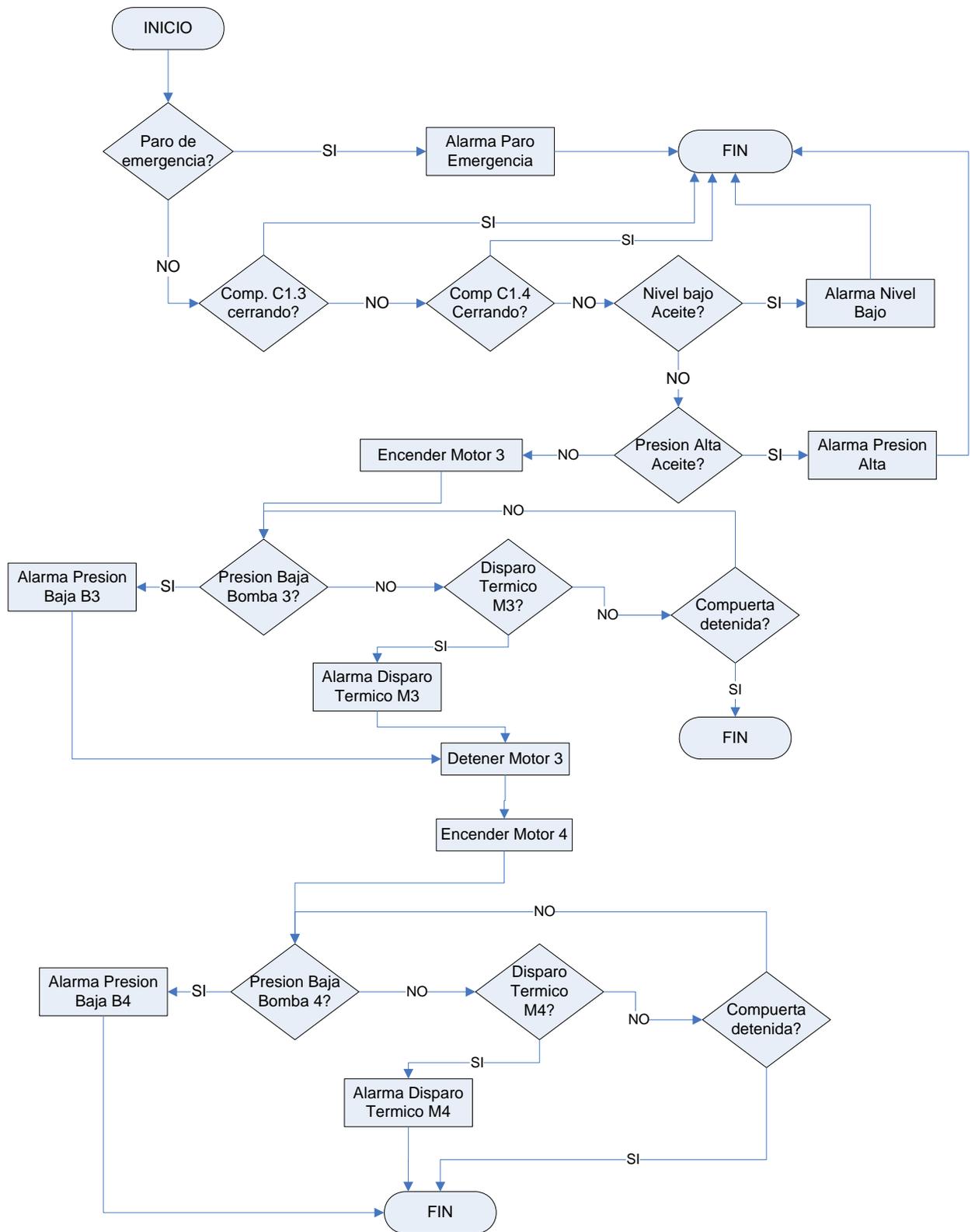


Figura 5.11. Diagrama de flujo de la rutina de monitorización de apertura de C1.3 y C1.4

5.4.4. Rutinas de control de las compuertas C1

La forma más sencilla en que se diseñó el control de las compuertas es si cada una disponía de una lógica independiente.

Aunque las compuertas poseen la particularidad de poder moverse en parejas, debido a limitaciones físicas propias de estas, no siempre se mueven a la misma velocidad, es por ello que resultó mucho más eficiente individualizar el sistema, pero sin perder el funcionamiento en parejas cuando se requiera, porque las descargas en muchas ocasiones se deben realizar con parejas de compuertas para mantener la simetría del flujo de agua.

En esta sección se explicarán detalladamente los diagramas de flujo de dicha lógica pero no se debe perder de vista que cada compuerta va a ser controlada por un bloque que se acciona solo cuando se desee mover esa compuerta ya sea de forma individual o en parejas.

En la figura 5.12 se muestra el diagrama de flujo que describe el funcionamiento de la rutina de control, en esta se observan claramente tres fases que dependen del porcentaje de apertura que ingresó al sistema el usuario.

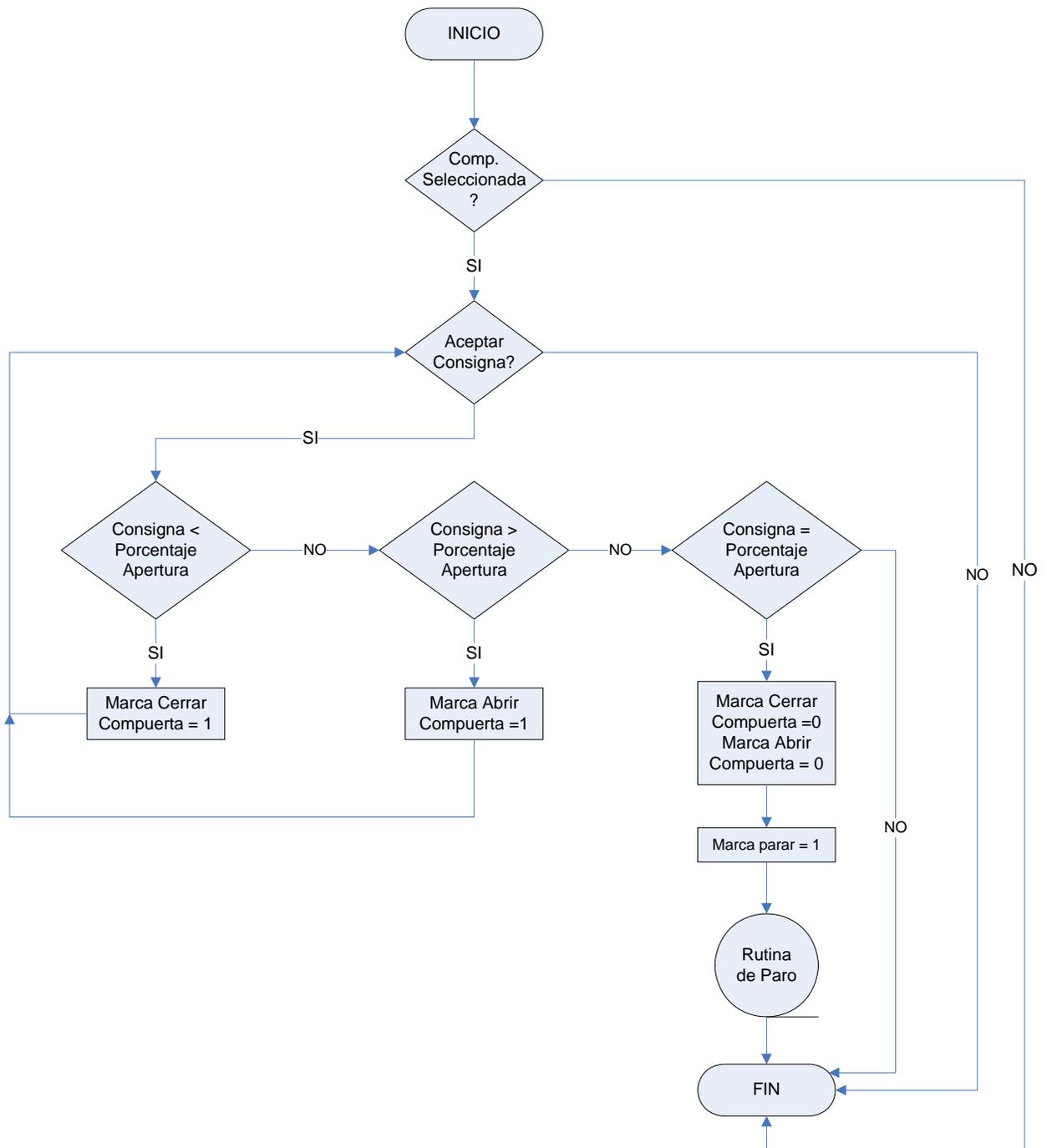


Figura 5.12. Diagrama de flujo de la rutina de control de las compuertas

Según lo expuesto en la figura 5.12, lo primero que se verificó fue si la compuerta estaba seleccionada, en caso afirmativo se evaluó si la consigna ya fue digitada correctamente por el usuario, si esto ocurre el sistema compara esta

con el porcentaje de apertura actual y realiza la apertura o cierre según sea el caso.

Cuando la compuerta alcanza el valor de la consigna, establece a las marcas de apertura y cierre un valor de cero e inmediatamente detiene la compuerta mediante la rutina de paro, cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 5.13.

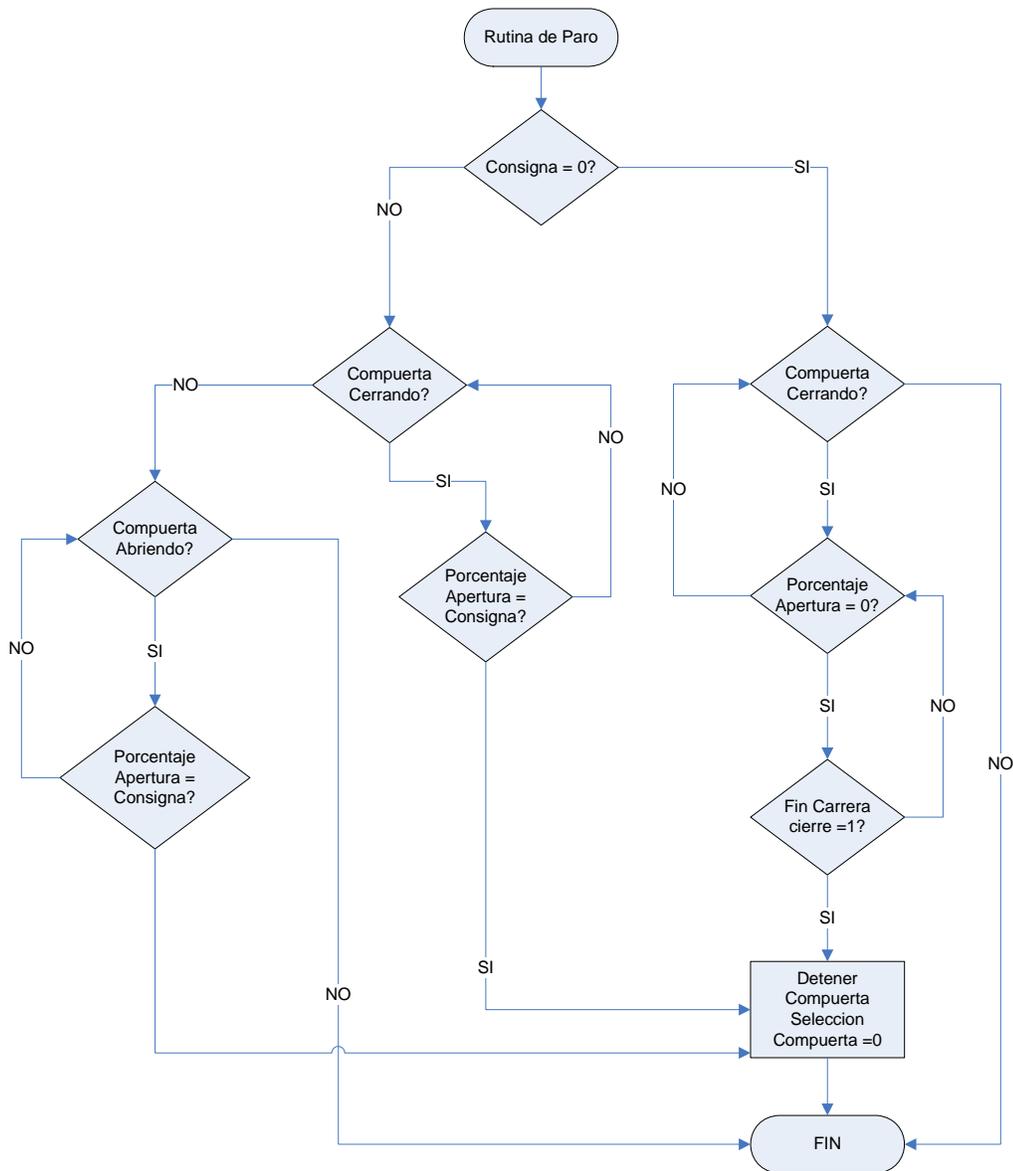


Figura 5.13. Diagrama de flujo de la rutina de paro

Si el valor asignado a la consigna es cero, quiere decir que se desea cerrar completamente la compuerta, pero primero se evalúa que esta se encuentre en movimiento mediante la señal “compuerta cerrando”. Luego se verifica que el porcentaje de apertura sea cero, para finalmente comprobar si el fin de carrera se encuentra activo. Con esto se asegura que la compuerta efectivamente cerró.

Si la compuerta se encuentra abriendo o se encuentra cerrando y se requiere detener a una consigna distinta de cero, solo se verifica que el porcentaje de apertura sea igual que la consigna deseada, para luego activar el mando de parada.

5.4.5. Rutina de medición de los sensores de nivel y de apertura

Para que los operadores puedan realizar correctamente las maniobras es muy importante que visualicen en tiempo real los niveles de embalse y de la toma de agua. Para solucionar esto se diseñó una rutina que contemplara esta situación. El diagrama de flujo de esta se muestra en la figura 5.14.



Figura 5.14. Diagrama de flujo para la medición de los niveles de embalse y toma de agua

Los sensores de nivel que se utilizaron son ultrasónicos y envían un valor analógico entre 4 y 20mA. Este es medido por la entrada analógica del PLC y convertido a un número entero entre 0 y 27648 respectivamente.

Luego se debe realizar un escalado para convertir ese valor entero a un número real de nivel en metros sobre el nivel del mar, para que pueda ser entendido fácilmente por el usuario del sistema. La manera más fácil y eficaz de realizar este proceso es mediante una linealización, porque con la información disponible se puede obtener una ecuación de la recta. En la tabla 5.16 se muestran los valores que se obtuvo para este proceso, tomando en cuenta los límites de nivel que el sensor es capaz de medir. Estos datos fueron suministrados por el personal técnico de la Planta Angostura.

Tabla 5.16. Linealización de los valores medidos por los sensores de nivel

Sensor Nivel	Par ordenado 1	Par ordenado 2	Ecuación de la recta
Toma de agua	(27648, 565.6msnm)	(0, 578.0 msnm)	$y = -4.48 \cdot 10^{-4}x + 578$
Embalse	(27648, 559.94msnm)	(0, 579.94msnm)	$y = -7.23 \cdot 10^{-4}x + 579.94$

Para los sensores de apertura de las compuertas C1, se aplicó la misma metodología que se expuso anteriormente para los sensores de nivel ya que estos también utilizan el rango de medición de 4 a 20mA. La única diferencia, es que en vez de metros sobre el nivel del mar, estos sensores miden porcentaje de apertura. En la tabla 5.17 se muestra la linealización correspondiente.

Tabla 5.17. Linealización de los valores medidos por los sensores de apertura

Sensor	Par ordenado 1	Par ordenado 2	Ecuación de la recta
Apertura	(0, 0%)	(27648, 100%)	$y = 3.61 \cdot 10^{-3}x$

5.4.6. Interfaz gráfica del sistema de control

Proporciona la comunicación entre el usuario y el sistema de control. Además permite visualizar fácilmente el estado actual de las compuertas, principalmente el porcentaje de apertura, nivel de embalse y toma de agua, alarmas, entre otras.

En la figura 5.15 se muestra la pantalla de bienvenida, en la cual se solicita un nombre de usuario y su respectiva contraseña, para que el sistema no sea manipulado por personal ajeno al vertedor.

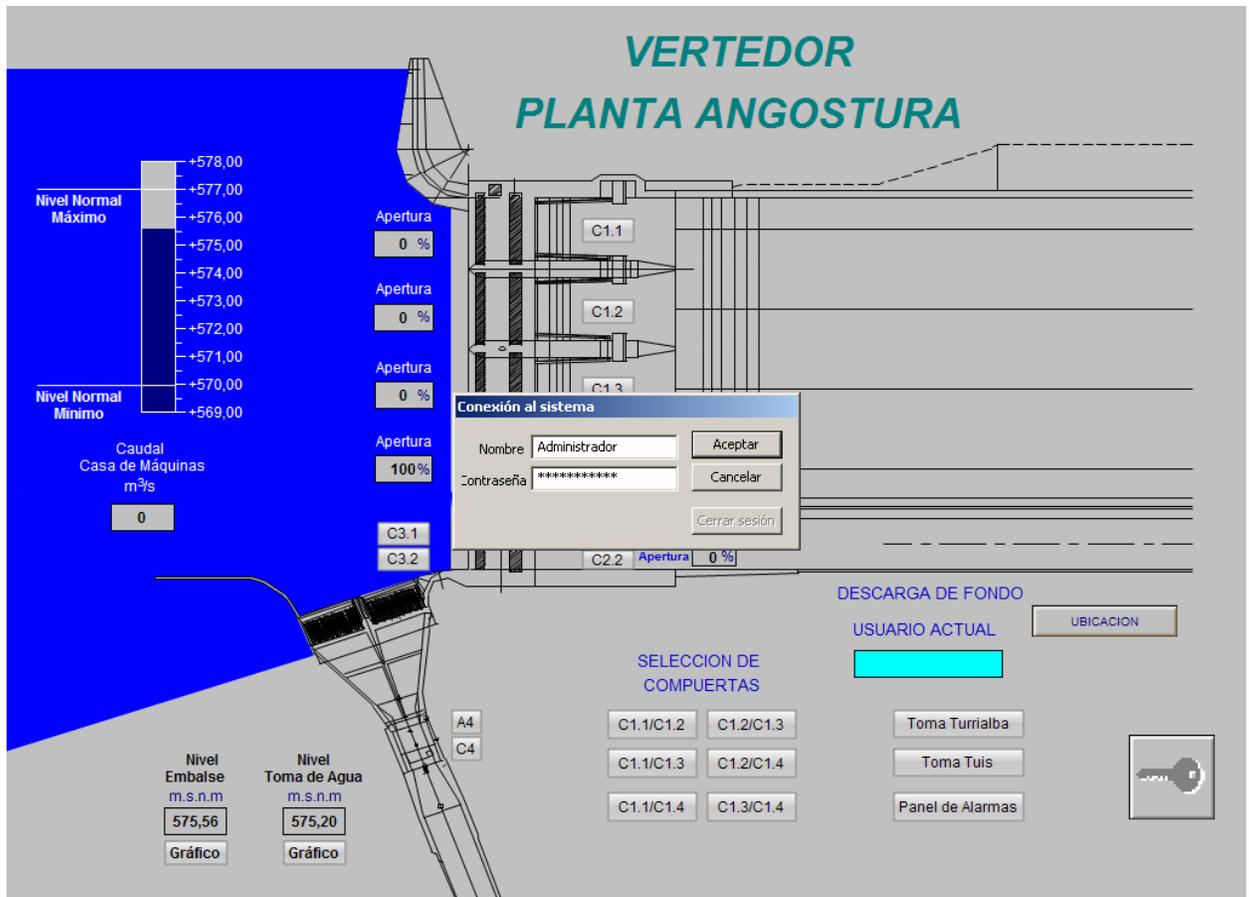


Figura 5.15. Pantalla de bienvenida de la interfaz gráfica

Si el usuario ya se encuentra debidamente registrado, luego de introducir al sistema sus datos, se despliega su nombre y ya puede tener acceso al control y/o monitorización del sistema. En la pantalla principal del sistema se muestra información de gran relevancia como el porcentaje de apertura de cada compuerta y los niveles reales de embalse y toma de agua. En la figura 5.16 se puede observar esta información con detalle.

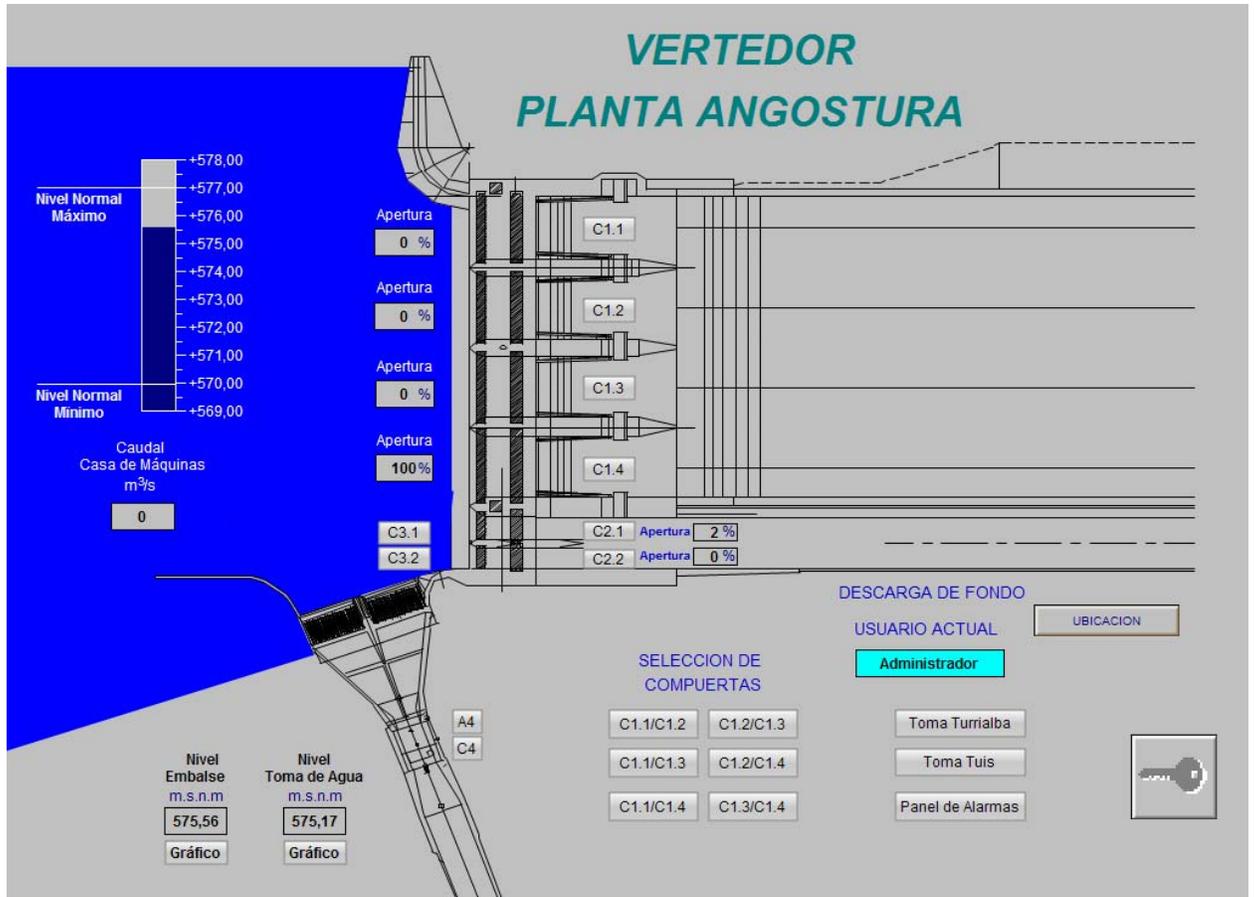


Figura 5.16. Pantalla principal del sistema

Si el usuario no está registrado en el sistema e intenta manipularlo, el sistema inmediatamente le muestra un mensaje de restricción de uso. Esto se muestra en la figura 5.17.

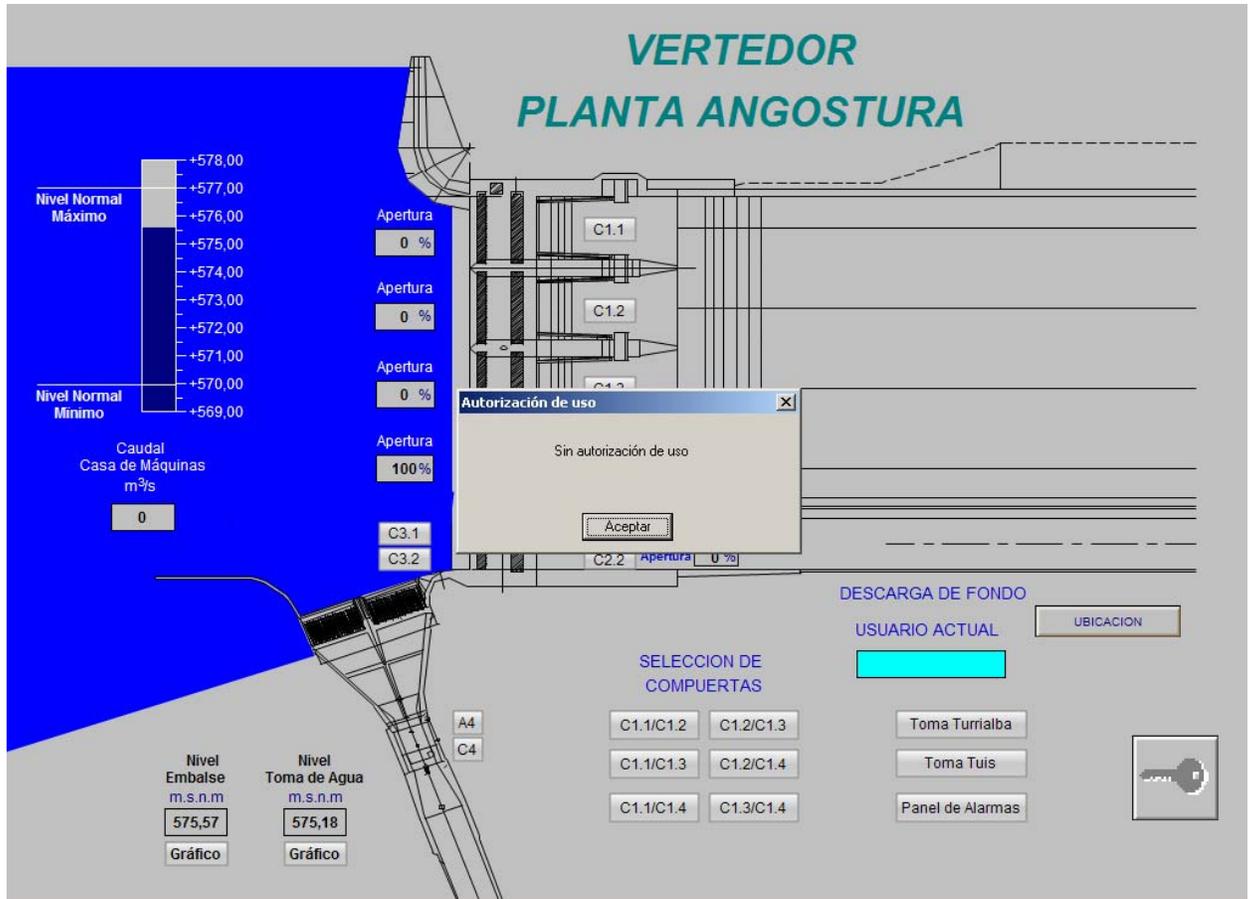


Figura 5.17. Pantalla de restricción de uso

Si se desea observar la ubicación geográfica del Centro de Producción Angostura, solo se debe presionar en el botón “Ubicación”, luego se despliega la pantalla de la figura 5.18. Esta pantalla fue diseñada anteriormente y fue facilitada por el Ing. Fabián Madriz.



Figura 5.18. Ubicación del Centro de Producción Angostura

Como se explicó anteriormente, el sistema de control puede ser utilizado para mover una sola compuerta, en la figura 5.19 se puede observar la pantalla para controlar la compuerta C1.1. Para las otras tres compuertas el control individual es muy similar por lo que esta se tomará como de carácter ilustrativo para evitar redundancias.

Si las compuertas se controlan con el sistema programado en el PLC, se activan todos los botones, si se encuentra funcionando con los paneles, solo se podrá realizar una monitorización, y por seguridad los botones se desactivan.

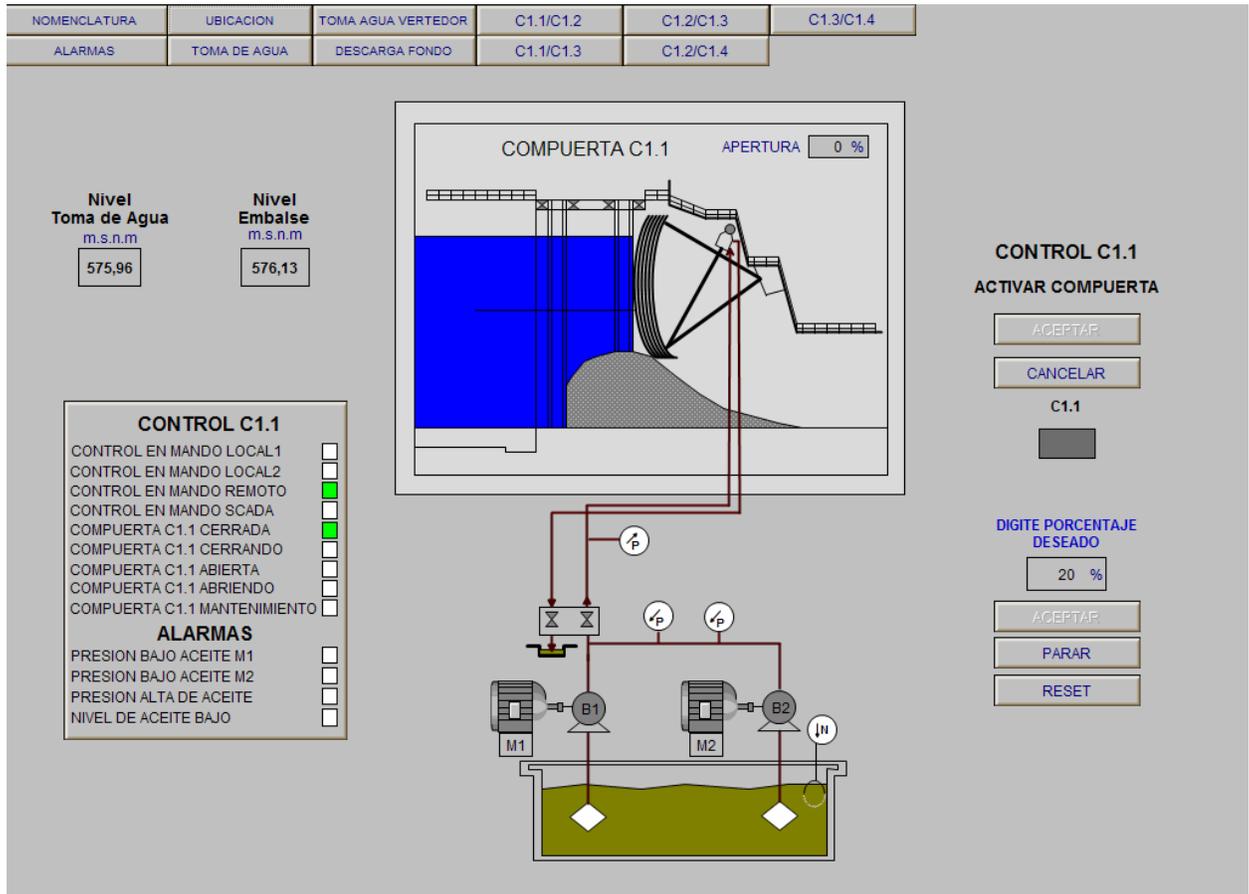


Figura 5.19. Pantalla de control C1.1

En la figura se observa una maqueta del sistema hidráulico que alimenta a la compuerta, también las principales variables de monitorización, y los mandos para el control.

Cuando se intenta realizar una maniobra, el sistema envía una notificación final, para evitar errores por parte del usuario. Esta se muestra en la figura 5.20.

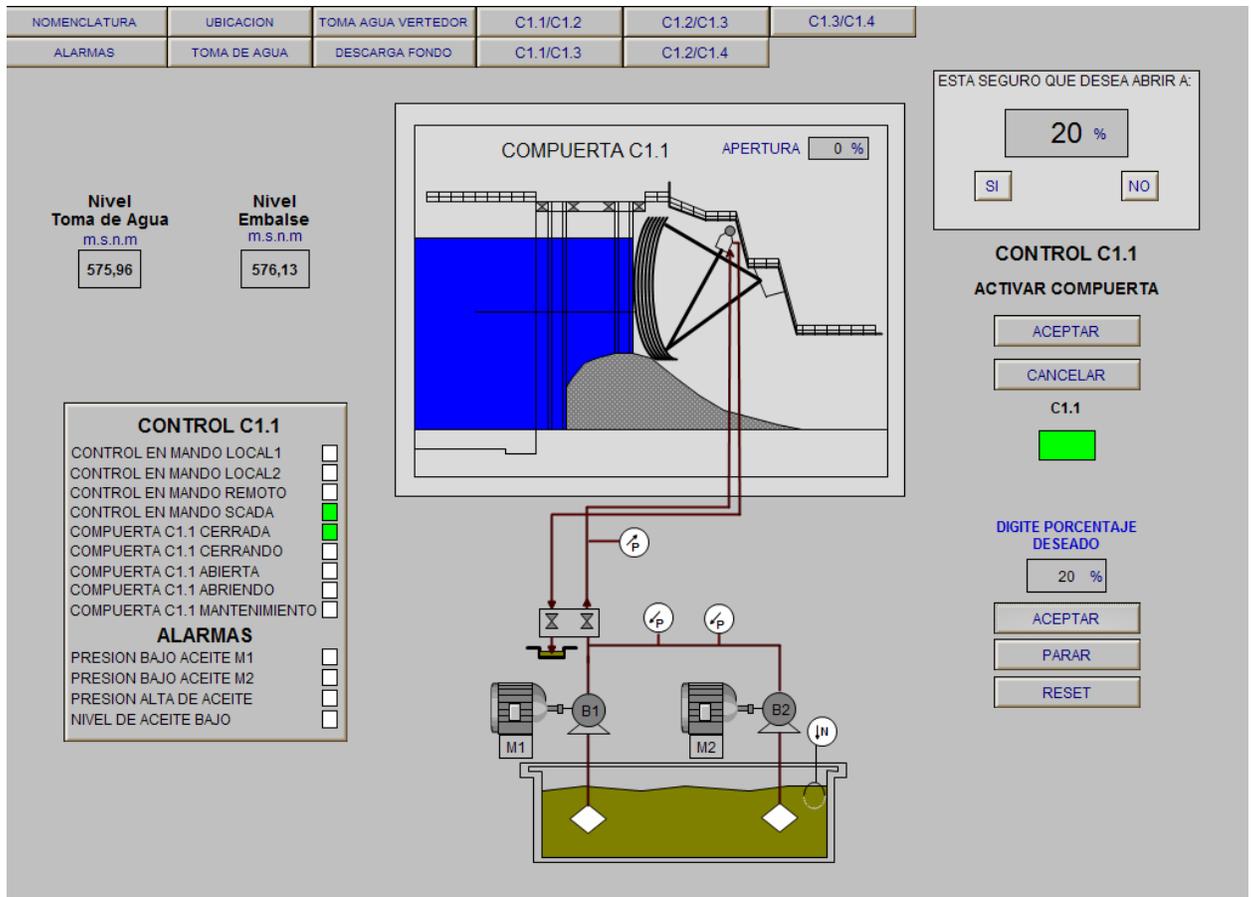


Figura 5.20. Notificación cambio de apertura en las compuertas

En la figura 5.21 se muestra la pantalla para controlar las compuertas C1.1 y C1.2 simultáneamente. Al igual que para el control individual, la interfaz para el control de dos compuertas son muy similares y se tomará esta con carácter ilustrativo.

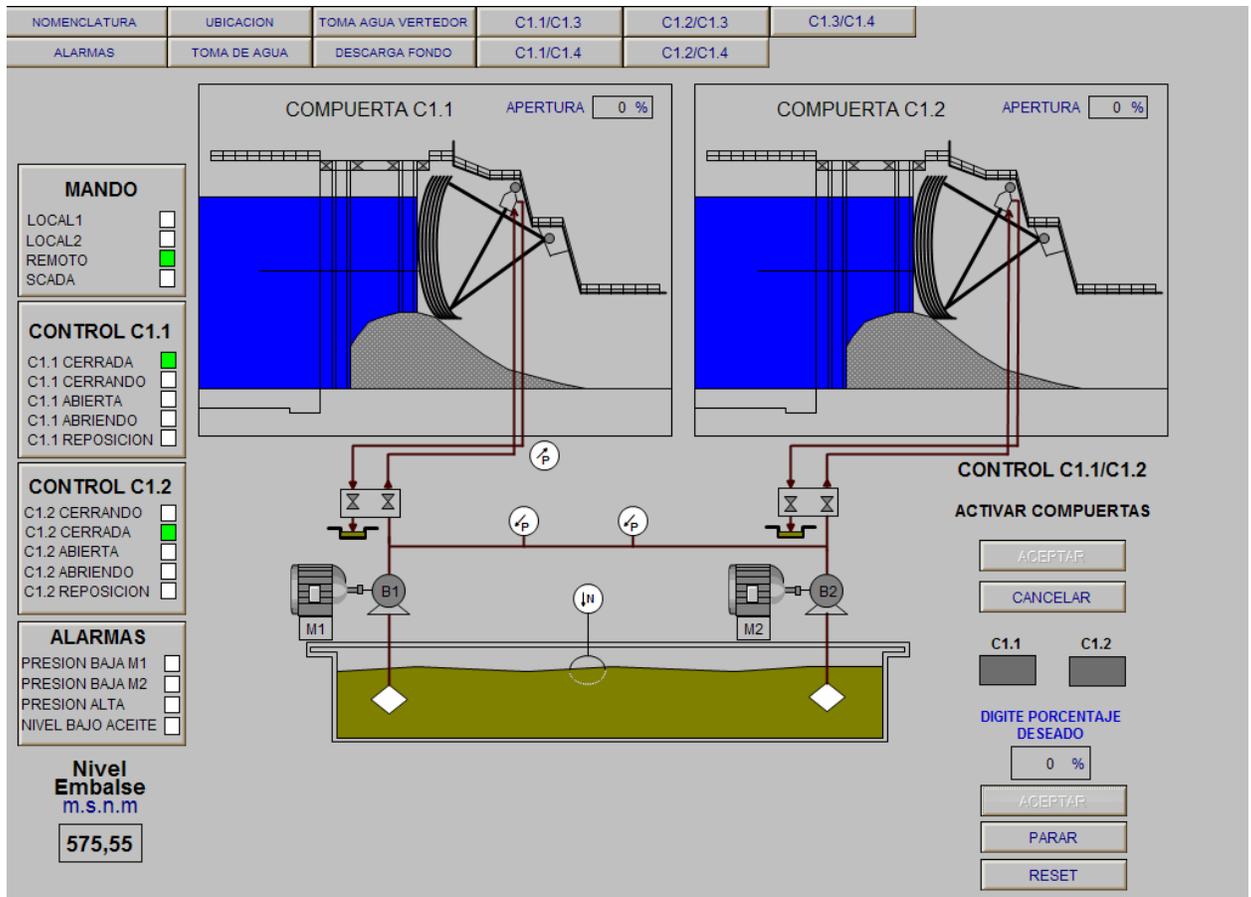


Figura 5.21. Pantalla para el control de las compuertas C1.1 y C1.2

Si el usuario por equivocación desea cerrar sesión mientras alguna compuerta se encuentra en operación, el sistema envía una notificación de la o las compuertas que están activas e impide que el cierre de sesión se haga efectivo. Esto se muestra en la figura 5.22, en este caso aplicaba para las compuertas C1.1 y C1.2.

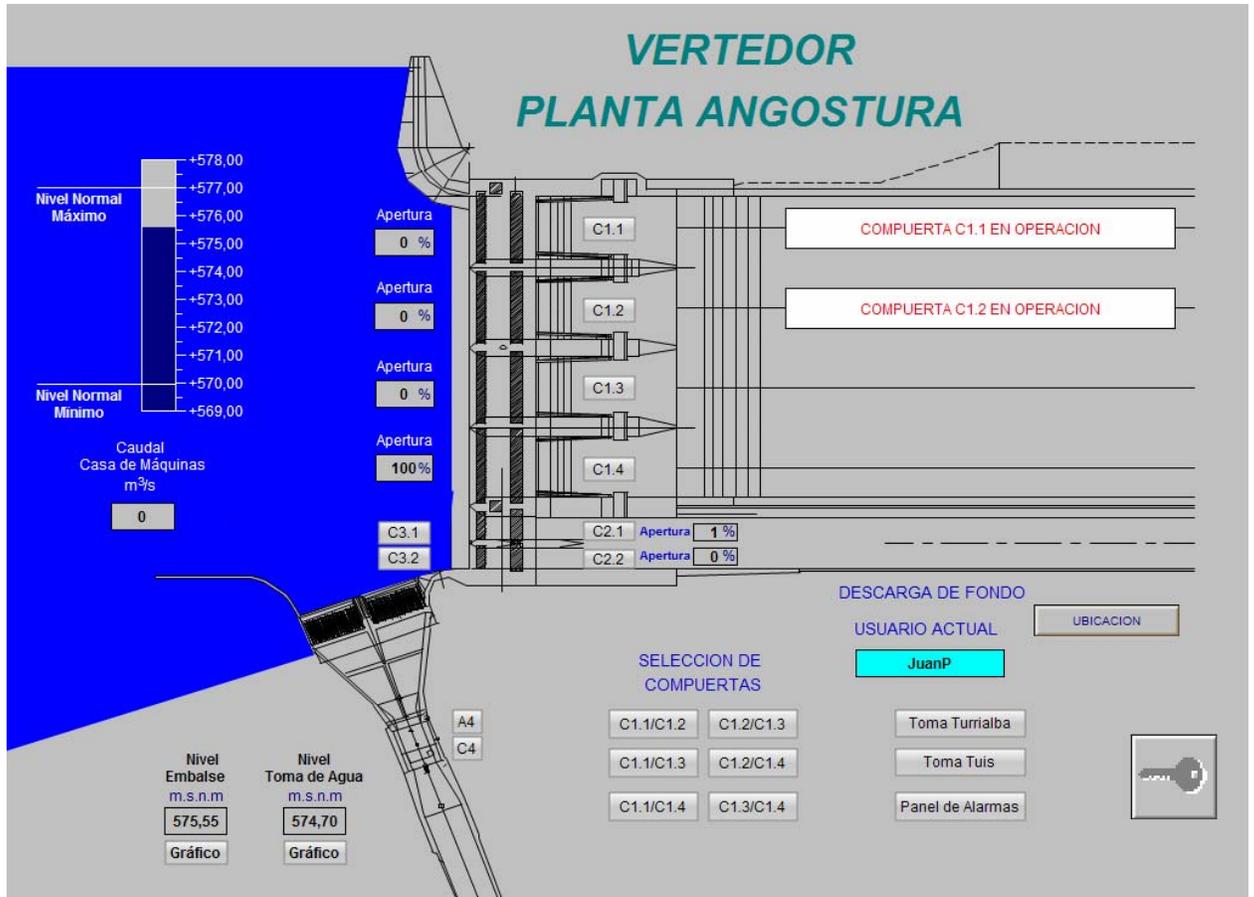


Figura 5.22. Notificación de compuertas en funcionamiento.

Para las compuertas de descarga de fondo y objetos flotantes, C2 y C3 respectivamente, se diseñó una pantalla para su monitorización, esta se muestra en la figura 5.23.

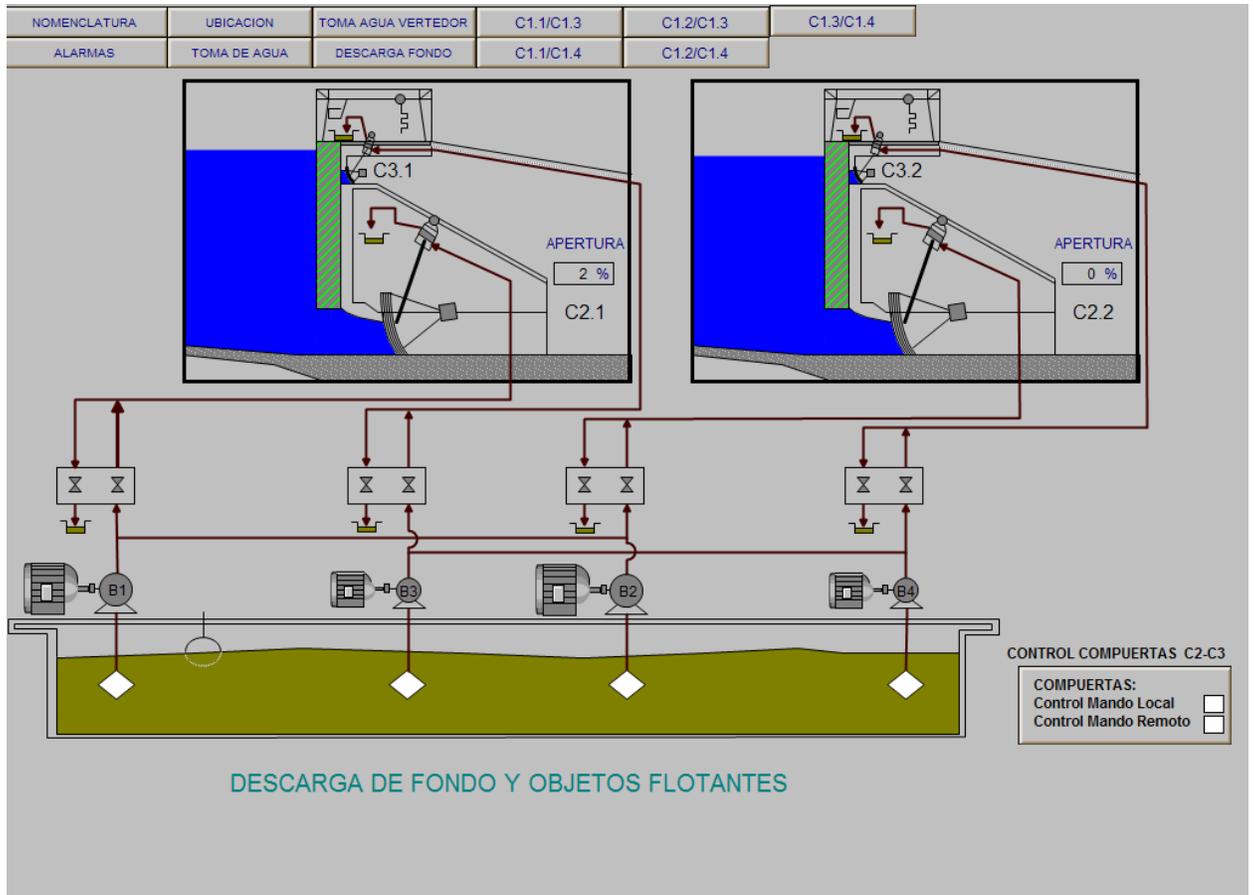


Figura 5.23. Pantalla para la monitorización de las compuertas C2 y C3.

Capítulo 6. Análisis de resultados

Lo primero que se realizó en el proyecto fue un estudio técnico de las instalaciones para tener una perspectiva clara del funcionamiento que caracterizaba al vertedor de excedentes, inicialmente se enfatizó en los componentes principales del sistema hidráulico, por ejemplo las compuertas, los pistones y las bombas hidráulicas. Con base en el estado actual se llegó a la conclusión de que estos no necesitaban ser sustituidos, únicamente se hizo la recomendación de eliminar las fugas de agua presentes en las compuertas C1.1, C1.2 y C1.4.

Además se realizaron pruebas a las electroválvulas que controlan los flujos de aceite a los pistones hidráulicos, estas presentaban un comportamiento de dos estados, cuando se enviaba un pulso positivo al solenoide, la válvula se accionaba, y cuando se eliminaba, la válvula se cerraba.

Luego se enfocó en los componentes principales del sistema de eléctrico y de control, un aspecto relevante fue el uso de fusibles para proteger al sistema de daños por sobrecargas. Al consultar con el personal técnico y con los operadores de vertedor se tomó la decisión de sustituirlos por disyuntores termomagnéticos para facilitar la búsqueda y eliminación de fallas. Otra razón radica en la escasez de fusibles de repuesto en el mercado nacional.

En la tabla 5.6 se hizo un listado de todos los relés del sistema de control, con una breve descripción de su función. Luego se realizaron pruebas en las cuales no se presentaron problemas mayores, solo algunos finales de carrera requirieron sustitución.

Con base en la tabla 5.6, se seleccionaron las señales que el sistema de control modernizado necesitó para realizar una monitorización adecuada. Entre las principales

se encuentran presiones altas o bajas, indicadores de compuerta abierta o cerrada, disparos termomagnéticos, indicadores de compuerta abriendo o cerrando, entre otras.

También se enviaron a la unidad de control las señales de los sensores de nivel y de apertura, y luego de realizar la linealización correspondiente (Tablas 5.15 y 5.16), se obtuvo que la variación entre los valores medidos directamente en los sensores y los medidos por la unidad de control fueron mucho menores al 5%, aproximadamente fue un 1%.

Las señales anteriores, además de las salidas para el control de las compuertas fueron implementadas mediante las tablas de alambrado y los diagramas de la sección 5.3. En los diagramas se mostró la forma básica y adecuada de acoplar las señales al PLC desde los relés y, mediante las tablas se detallan las conexiones correspondientes. La sencillez de este método hace posible que cualquier miembro del personal técnico de la planta esté en capacidad de identificar y solucionar cualquier tipo de falla en el futuro.

El algoritmo principal del sistema de control, se mostró en la figura 5.9, en este se especifica la secuencia diseñada para el control y monitorización, el orden en que se realizan los procesos se escogió de tal forma que aprovechara eficientemente los recursos del PLC, principalmente la memoria, por eso se monitorizan constantemente los niveles y solo se ingresa a las rutinas de control cuando se van a realizar maniobras, y es en esta sección que se toman los datos provenientes de las señales de monitorización.

La rutina de monitorización principal se mostró en las figuras 5.10 y 5.11, en esta se hizo un análisis de las principales variables presentes en la apertura de una o varias compuertas. Durante esta etapa funcionan las bombas hidráulicas, los motores y otros dispositivos de gran tamaño, de ahí la importancia de observar toda la secuencia y observar alguna falla en el sistema en caso de que ocurra.

No hay que olvidar que el cierre de las compuertas se realiza por gravedad, es decir que las bombas hidráulicas no funcionan en este tipo de maniobras, solo se acciona una electroválvula para permitir el retorno del aceite desde los pistones hacia la central hidráulica.

Cuando se realizaron pruebas en las compuertas con el sistema de control antiguo, se evidenció un problema grave, si se operaban las compuertas en parejas (C1.1 y C1.4 ó C1.2 y C1.3), las compuertas no hacían las aperturas o cierres a la misma velocidad, siempre una comenzaba su movimiento primero, pero el operador las detenía simultáneamente, esto causaba diferencias en el porcentaje de apertura de hasta 2% de una con respecto a la otra, ocasionando desperdicio de agua cuando se hacían las descargas.

Haciendo una investigación con los técnicos mecánicos de la planta se llegó a la conclusión de que este problema era ocasionado por defectos físicos del sistema hidráulico y de las compuertas en sí, como son cuatro compuertas y solo son dos las centrales hidráulicas, el flujo de aceite va a alimentar a los pistones o va a retornar a la central a diferente velocidad según sea el caso, de ahí la diferencia en el movimiento.

Realizar una modernización del sistema hidráulico resultaba sumamente costoso por lo que se optó por diseñar un sistema de control independiente para cada compuerta, este se muestra en la figura 5.12. Con este se logró solucionar el problema en cuestión porque cada compuerta se detiene automáticamente cuando llega al porcentaje de apertura deseado, aunque operen en parejas, además resultó sumamente eficiente porque ahora las compuertas se pueden utilizar también de forma individual, a diferencia del control antiguo que carecía de esta función.

El sistema de control modernizado funcionaba eficazmente pero luego de algunas pruebas se evidenció un pequeño problema de diseño, si se quería realizar un cierre total de una o varias compuertas, estas se detenían correctamente cuando el sensor enviaba un valor de 0% pero las compuertas C1.1 y C1.3 quedaban abiertas

aproximadamente 10cm. El problema se solucionó con la rutina de paro de la figura 5.13 en la cual si se desean cerrar las compuertas completamente, se verifica que el sensor envíe 0% pero la compuerta se detiene hasta que la señal de fin de carrera se active.

El movimiento de las compuertas también se puede detener mediante el botón “parada” ubicado en los paneles locales y remotos, o en la interfaz gráfica del computador, para así facilitar el paro de las compuertas en caso de emergencia.

El control y/o monitorización de las compuertas se visualizó en su totalidad desde una interfaz gráfica diseñada en WinCC®, este software está especialmente diseñado para realizar interfaces entre el computador y un PLC. En la sección 5.4.6 se dio una descripción detallada de las distintas pantallas. Las alarmas, niveles, porcentajes de apertura y demás información que se muestran en éstas son totalmente confiables porque son capturados directamente de la memoria de la unidad de control por lo que la variación presente en estos fue menor al 1% con respecto a los valores que se midieron directamente en los sensores.

En esta aplicación se tomó en cuenta la importancia y la responsabilidad de que solo personal autorizado tenga acceso al control de las compuertas, por esta razón se exige al operador que ingrese su nombre de usuario y contraseña. Pero por seguridad, para todos los usuarios, se permite visualizar los porcentajes de apertura y los niveles de embalse y toma de agua.

Con base en lo anterior, se pudo concluir que se cumplió con el objetivo general del proyecto y con cada uno de los objetivos específicos mostrados en el Capítulo 2.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

1. Se pudo establecer la comunicación a través del protocolo TCP-IP entre el PLC y el computador para realizar el control y la monitorización de las compuertas del vertedor.
2. Los datos mostrados en la interfaz gráfica tuvieron una tolerancia menor al 1% con respecto a los valores medidos en los sensores.
3. El sistema de control modernizado facilitó la operación del vertedor mediante un rango de selección de compuerta o compuertas mucho más amplio.
4. Las pruebas de apertura y cierre de las compuertas con el nuevo sistema de control, presentaron un 100% de efectividad.
5. El sistema de control antiguo basado en contactores y relés no perdió funcionalidad al realizar la modernización, y este podrá funcionar como sistema de respaldo en caso de falla.
6. La linealización de los valores analógicos medidos por el PLC, facilita la interpretación por parte del usuario debido a que se genera un valor real de nivel o de porcentaje de apertura.
7. El paro de emergencia pudo ser accionado desde el computador y desde los paneles para aumentar la seguridad del sistema.

8. Mediante las tablas de alambrado se desarrolló una forma fácil y eficiente para realizar las conexiones requeridas en el proceso de implementación del sistema de control modernizado.

7.2. Recomendaciones

1. Se deben eliminar las fugas de agua en las compuertas del vertedor, para aprovechar más eficientemente el uso de este recurso en la generación de energía eléctrica.
2. La modernización del sistema de control del vertedor puede servir como base para modernizar el sistema de control de las compuertas de las tomas de agua de los ríos Turrialba y Tuis.
3. Antes de realizar cualquier modernización es conveniente hacer un análisis técnico de las instalaciones.

Bibliografía

- [1]. Facultad de ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. [En línea]: *Página 3*. Disponible en:
<[http://www.ing.uc.edu.ve/~emescobar/automat I/contenido_menu/Unidad IV/Contenido/pagina3/pagina3.htm](http://www.ing.uc.edu.ve/~emescobar/automat_I/contenido_menu/Unidad_IV/Contenido/pagina3/pagina3.htm)> [Consulta: 10 de Marzo de 2010, 2:00 p.m.].
- [2]. InfoPLC [En línea]: *Qué es un PLC y un SCADA?* Disponible en:
<[http://www.infoplcn.net/Documentacion/Docu PLC/infoPLC net Que es un PLC y SCADA.html](http://www.infoplcn.net/Documentacion/Docu_PLC/infoPLC_net_Que_es_un_PLC_y_SCADA.html)> [Consulta: 03 de Marzo de 2010, 07:15 a.m.].
- [3]. Mecânica Pesada S.A. GEC ALSTHOM Power Generation. *Manual de Operación y Mantenimiento Comp. Radial C1*. Proyecto Hidroeléctrico Angostura, Vertedero de Excedencias, 1999.
- [4]. Mecânica Pesada S.A. GEC ALSTHOM Power Generation. *Manual de Operación y Mantenimiento Comp. Radial C2*. Proyecto Hidroeléctrico Angostura, Vertedero de Excedencias, 1999.
- [5]. Mecânica Pesada S.A. GEC ALSTHOM Power Generation. *Manual de Operación y Mantenimiento Comp. Radial C3*. Proyecto Hidroeléctrico Angostura, Vertedero de Excedencias, 1999.
- [6]. Neumática e hidráulica. Conceptos básicos. [En línea]: *Cilindros hidráulicos y neumáticos. Actuadores, pistones, émbolos*. Disponible en:
<http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm> [Consulta: 20 de Marzo de 2010, 12:00 p.m.]
- [7]. Rodríguez P, Aquilino. *Sistemas SCADA. Sistemas de Visualización*. Editorial Marcombo, 2006.

[8]. Siemens AG. [En línea]: *Industrial Automation Systems SIMATIC*. Disponible en: <<http://www.automation.siemens.com/>> [Consulta: 5 de Marzo de 2010, 10:00 a.m.].

[9]. Wikipedia. [En línea]: *SCADA*. Disponible en: <<http://es.wikipedia.org/wiki/SCADA>> [Consulta: 04 de Marzo de 2010, 10:00 a.m.].

Apéndices

A.1. Glosario, abreviaturas y simbología⁵

Atagüía: Macizo de tierra arcillosa u otro material impermeable, para atajar el paso del agua durante la construcción de una obra hidráulica.

Caudal: Cantidad de agua que mana o corre.

Compuerta: Plancha fuerte de madera o de hierro, que se desliza por carriles o correderas, y se coloca en los canales, diques, etc., para graduar o cortar el paso del agua.

Embalse: Gran depósito que se forma artificialmente, por lo común cerrando la boca de un valle mediante un dique o presa, y en el que se almacenan las aguas de un río o arroyo, a fin de utilizarlas en el riego de terrenos, en el abastecimiento de poblaciones, en la producción de energía eléctrica, entre otras.

Fusible: Hilo o chapa metálica, fácil de fundirse, que se coloca en algunas partes de las instalaciones eléctricas, para que, cuando la corriente sea excesiva, la interrumpa fundiéndose.

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad.

KOP: también denominado lenguaje de contactos o en escalera, es un lenguaje de programación gráfico basado en los esquemas eléctricos de control clásicos.

⁵ Con ayuda del diccionario de la Real Academia Española disponible en: <http://www.rae.es/rae.html>

Relé: Aparato destinado a producir en un circuito una modificación dada, cuando se cumplen determinadas condiciones en el mismo circuito o en otro distinto.

SCADA: Acrónimo de Supervisory Control and Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Es una aplicación de software especialmente diseñada para funcionar sobre computadores en el control de procesos, proporcionando comunicación bidireccional con los dispositivos de campo.

Sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente.

Vertedor: Canal o conducto que sirve para dar salida al agua.