

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA



Controlador de Válvula de Mariposa y Tanque Hidroneumático con

Monitorización de Variables Presentadas en un Sistema SCADA

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en

Electrónica con el grado académico de Licenciatura

José Esteban Blanco Urpí

Carné 200132663

Cartago, Enero del 2009



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

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

Miembros del Tribunal

Ing. Jose David Gómez Tames

Profesor lector

Ing. Sergio A. Morales Hernández

Profesor lector

Ing. Francisco Navarro Henríquez

Profesor asesor



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

Cartago, 23 de Enero, 2009

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, Septiembre del 2008



José Esteban Blanco Urpi

Céd: 1-1179-0074

Resumen (versión en español)

En este proyecto se desarrolla una solución para el problema que se da en el controlador de las válvulas de mariposa de la represa hidroeléctrica del ICE en Sandillal, el sistema reemplazado era obsoleto y sus repuestos son caros y difíciles de encontrar, adicionalmente el sistema no tiene capacidades de monitorización adecuadas, por lo que cuando ocurre un problema es difícil identificarlo para corregirlo. Se procede entonces a desarrollar un controlador en un PLC con un dispositivo SCADA en una computadora industrial con pantalla táctil que publique además la información de los estados actuales y anteriores del sistema en una página de Internet por medio del protocolo HTTP en un servidor Web, de manera que se solucione el problema de los repuestos y que cuando se dé un problema, éste pueda identificarse fácilmente desde cualquier computadora con acceso a la página y se agilice el proceso de solución, por último se procede a desarrollar un banco de pruebas en el que se puede realizar una serie evaluaciones para verificar que el sistema cumple con las especificaciones y requerimientos establecidos por el ICE.

PLC, SCADA, panel PC, automatización industrial, monitorización, Internet, HTTP, pantalla táctil, servidor Web, Válvula de mariposa, represa hidroeléctrica.

Abstract

In this project a solution was developed to solve the problem that affects the butterfly valves controller at hydroelectric dam of the ICE in Sandillal, the replaced system was obsolete and its spare parts are expensive and difficult to locate, additionally the system doesn't have proper monitoring capabilities, therefore it is no possible to know where is the failure. Because of this a PLC controller is developed along with a SCADA system in a industrial computer with a touch screen that will create a Internet page containing the data of the actual and prior states of the system which can be accessed from a Web server using the HTTP protocol, all this with the purpose of solving the spare parts problem and simplifying the solution process after a failure by speeding the identification of the problem using any computer with access to the Web page. Finally, a test bench was created, which allowed a battery of tests to be applied to the system in order to verify that the system was capable of performing the tasks and fulfilling the requirements specified by the ICE.

PLC, SCADA, panel PC, industrial automation, monitoring, Internet, HTTP, touch screen, Web server, butterfly valve, hydroelectric dam.

A mis padres y familia...

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios por darme la oportunidad de seguir el camino que escogí en mis estudios, a mis padres por todo el apoyo y comprensión que me brindaron y la paciencia que me mostraron, a mi familia y amigos por acompañarme en este proceso para ayudarme en momentos difíciles y celebrar en momentos felices, a mi asesor en el ITCR el Ing. Francisco Navarro Henríquez por su guía y la gran avidez con la que me ofreció su ayuda, a mi asesor en el ICE el Ing. Allen Ledezma Rojas por ofrecerme un proyecto como este para culminar mis estudios y asesorarme cuando lo necesité, al personal del MET y la UPIC en el ICE por hacer de mi paso por este lugar una experiencia memorable, y al personal docente del ITCR, en especial el de la escuela de electrónica, por brindarme la formación profesional que hizo de mí un ingeniero y una mejor persona.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución	1
1.2 Solución seleccionada.....	3
1.3 Especificaciones de funcionamiento	5
Capítulo 2: Meta y Objetivos	6
2.1 Meta.....	6
2.2 Objetivo general.....	6
2.3 Objetivos específicos	6
Capítulo 3: Marco teórico	8
3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar	8
3.2 Antecedentes Bibliográficos.....	12
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema	12
Capítulo 4: Procedimiento metodológico	14
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	14
4.1 Obtención y análisis de información	14
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	15
4.4 Implementación de la solución	15
4.5 Reevaluación y rediseño	16
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución (Explicación del diseño)	18
5.1 Análisis de soluciones y selección final.....	18
5.1.1 Control electromecánico por contactores:	18
5.1.2 Control por PLC:	19
5.1.3 Control por Computador Industrial:	19
5.1.4 Control por PLC y monitorización del proceso por medio de un sistema SCADA:	20
5.2 Descripción del hardware.....	20
5.2.1 Actuadores	21
5.2.2 Circuito de alimentación	22
5.2.3 Indicador de Niveles	24
5.2.4 Sensores.....	25
5.2.5 Comunicación con el sistema central.....	28
5.2.6 Controlador por contactores	29
5.2.7 Controlador PLC	32
5.2.8 Computadora con SCADA	34
5.2.9 Supervisión Remota.....	35
5.3 Descripción del software.....	36
5.3.1 Software en PLC	36
5.3.2 Descripción detallada del software de la PC.....	49
5.4 Descripción del banco de pruebas para la simulación	57
Capítulo 6: Análisis de Resultados	60
6.1 Características de los sensores	60
6.2 Puesta en marcha.....	62
6.3 Reacción del sistema ante problemas	80
6.4 Capacidad de control	82
6.5 Servidor WEB.....	85

7.1 Conclusiones.....	90
7.2 Recomendaciones.....	91
Bibliografía	93
Apéndices	94
A.1 Glosario, abreviaturas y simbología	94
A.2 Protocolos de medición.....	98
Anexos	102
Anexo B.1 Datos del PLC S7-300 312C	102
Anexo B.2 Datos del panel PC industrial PC217A	103
Anexo B.3 Datos del transmisor de presión 261AS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Válvula de mariposa.....	2
Figura 2. Sistema hidráulico.....	2
Figura 3. Válvula de bypass.....	4
Figura 4. Tanque hidroneumático.....	5
Figura 5. Diagrama de flujo del sistema de control.....	10
Figura 6. Diagrama hidráulico del sistema reemplazado.....	11
Figura 7. Diagrama de bloques del sistema desarrollado.....	21
Figura 8. Diagrama eléctrico de polarización de los solenoides en el módulo Actuadores.....	22
Figura 9. Diagrama eléctrico del módulo Circuito de Alimentación.....	23
Figura 10. Diagrama eléctrico del módulo Indicador de Niveles.....	25
Figura 11. Diagrama eléctrico del circuito utilizado para los sensores tipo interruptor... ..	27
Figura 12. Diagrama eléctrico del circuito utilizado para los sensores tipo transmisor... ..	27
Figura 13. Diagrama eléctrico del circuito utilizado en el módulo Comunicación con Sistema Central.....	29
Figura 14. Panel PC industrial con pantalla táctil PC217A.....	35
Figura 15. Diagrama de bloques del programa del PLC.....	37
Figura 16. Algoritmo utilizado por el bloque Analógica.....	40
Figura 17. Algoritmo utilizado por el bloque Reserva.....	41
Figura 18. Algoritmo utilizado por el bloque Mariposa.....	42
Figura 19. Algoritmo utilizado por el bloque Mariposa.....	43
Figura 20. Algoritmo utilizado por la rutina Acumulador.....	44
Figura 21. Algoritmo utilizado por la subrutina Control.....	46
Figura 22. Algoritmo utilizado por la rutina Alarmas.....	48
Figura 23. Imagen de la pantalla Reporte.....	50
Figura 24. Imagen detallada de las gráficas generadas en la pantalla Reporte.....	51
Figura 25. Imagen parcial detallada la pantalla RegistroAlarmas.....	52
Figura 26. Imagen detallada la pantalla Reconoce Alarmas.....	53
Figura 27. Imagen mostrada al reconocer las alarmas del sistema.....	53
Figura 28. Imagen de la pantalla cerrar.....	54
Figura 29. Imagen de la pantalla Actual.....	55
Figura 30. Imagen detallada de los botones de la pantalla Actual.....	56
Figura 31. Imagen de la ventana de diálogo para seleccionar un reporte.....	56
Figura 32. Registro de alarmas activas de la página Actual.....	57
Figura 33. Cuadro de advertencia por perdida de comunicación con el PLC.....	57
Figura 34. Diagrama de bloques de hardware utilizados en el banco de pruebas.....	58
Figura 35. Circuito utilizado por el módulo Sensores en el banco de pruebas.....	59
Figura 36. Información mostrada por el SCADA en el paso 2 de la puesta en marcha..	62
Figura 37. Historial de funcionamiento mostrado por el SCADA en el paso 3 de la puesta en marcha.....	63
Figura 38. Información mostrada por el SCADA en el paso 6 de la puesta en marcha..	64
Figura 39. Información mostrada por el SCADA en el paso 7 de la puesta en marcha..	65
Figura 40. Información mostrada por el SCADA en el paso 10 de la puesta en marcha.....	67
Figura 41. Información mostrada por el SCADA en el paso 11 de la puesta en marcha.....	68
Figura 42. Información mostrada por el SCADA en el paso 12 de la puesta en marcha.....	69

Figura 43. Información mostrada por el SCADA en el paso 14 de la puesta en marcha.	70
Figura 44. Información mostrada por el SCADA en el paso 15 de la puesta en marcha.	71
Figura 45. Información mostrada por el SCADA en el paso 16 de la puesta en marcha.	72
Figura 46. Información mostrada por el SCADA en el paso 17 de la puesta en marcha.	73
Figura 47. Información mostrada por el SCADA en el paso 18 de la puesta en marcha.	74
Figura 48. Información mostrada por el SCADA en el paso 20 de la puesta en marcha.	75
Figura 49. Información mostrada por el SCADA en el paso 22 de la puesta en marcha.	76
Figura 50. Sistema compensando el bajo valor de la presión en el acumulador.	82
Figura 51. Sistema compensando el alto valor de la presión en el acumulador.	83
Figura 52. Sistema compensando el bajo nivel de aceite en el acumulador.	83
Figura 53. Sistema compensando el elevado nivel de aceite en el acumulador.	84
Figura 54. Página de Internet con la base de datos de sistema.	86
Figura 55. Página de Internet con las pantallas del SCADA.	87
Figura 56. Pantalla para inicio de sesión de los usuarios de red.	87
Figura 57. Pantalla RegistroAlarmas vista por medio de un navegador de Internet.	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presiones observadas en las visitas a la represa para las aguas arriba.	13
Tabla 2. Sensores utilizados por el sistema.....	26
Tabla 3. Variables utilizadas por el Controlador por contactores con su descripción.....	30
Tabla 4. Información de los módulos que conforman el controlador PLC en el bastidor 0.	32
Tabla 5. Requerimientos y capacidades del PLC S7-300 312C.	33
Tabla 6. Entradas del programa PLC con su descripción.....	38
Tabla 7. Salidas del programa PLC con su descripción.	39
Tabla 8. Alarmas del sistema con su descripción.	47
Tabla 9. Requerimiento de los sensores utilizados en el proyecto.	60
Tabla 10. Resumen de la información contenida en el reporte de estado generado en el paso 21 del proceso de simulación de puesta en marcha del sistema.	77
Tabla 11. Resumen de la información contenida en el reporte de estado generado en el paso 24 del proceso de simulación de puesta en marcha del sistema.	78
Tabla 12. Resumen de la información contenida en el reporte de alarmas generado en el paso 23 del proceso de simulación de puesta en marcha del sistema.	79
Tabla 13. Acciones tomadas por el sistema ante diversos problemas y fallos.	81
Tabla 14. Ciclos de bombeo de aceite requeridos para que el sistema cambie de bomba principal.	85

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se encuentra la descripción del problema que se presenta en la empresa por el que se procedió a realizar este proyecto, además se indican las expectativas y exigencias de la empresa para la solución seleccionada, la cual se describe brevemente en este capítulo.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Para cumplir su misión el ICE debe expandir su capacidad de generación eléctrica para satisfacer la creciente demanda del país. El proyecto hidroeléctrico ARCOSA es capaz de generar un total de 363 388 KW de los cuales 157 398 KW corresponden a la primera etapa (Arenal), 174 012 KW a la segunda etapa (Corobicí) y 31 978 KW a la tercera etapa (Sandillal).

El proyecto se desarrollará para la UPIC (Unidad para la Proyección, Innovación y Crecimiento) en los talleres MET del ICE para la represa hidroeléctrica en Sandillal, esta represa es la tercera etapa del proyecto ARCOSA (Complejo Hidroeléctrico Arenal, Corobicí y Sandillal) y cuenta con dos turbinas tipo Kaplan con una capacidad de generar 15 989 KW cada una. La construcción de esta represa inició en 1987 y entró en funcionamiento en 1992.

El problema que se presenta en la represa de Sandillal consiste en que el sistema que se encarga de comandar las dos válvulas de ingreso de agua hacia las turbinas generadoras, monitorización de variables y control del tanque hidroneumático está obsoleto, este problema se da tanto en el sistema de control como en el sistema hidráulico.

Esto genera varios problemas, por un lado los repuestos al ser escasos tienen un precio muy elevado y no es conveniente para el ICE cubrir estos costos, y por otra parte, quizá el problema más grave, es que se tarda mucho tiempo para conseguir los repuestos y durante este periodo el equipo tiene problemas de funcionamiento o no funciona del todo.

Tener el sistema fuera de operación durante este lapso afecta el trabajo de toda la represa, es por estas razones que el ICE busca modernizar su equipo y utilizar alguna opción más vigente.

El sistema utiliza lógica de contactores a un nivel de tensión de 125 Vcd, que no es compatible con los nuevos sistemas que el ICE usa en la mayoría de sus instalaciones, esta tecnología está desapareciendo del mercado, además este sistema no genera ningún tipo de reporte de datos y no se puede monitorizar fácilmente su correcto funcionamiento.

Para modernizar el sistema de control de las válvulas de mariposa en la represa de Sandillal, el ICE desarrolla un proyecto que a su vez se divide en dos sub-proyectos paralelos: el discutido en este documento encargado del área electrónica y un segundo proyecto encargado de la hidráulica y selección de nuevas válvulas.



Figura 1. Válvula de mariposa.

El proyecto que se encarga de la parte hidráulica se desarrollará simultáneamente con este proyecto, por lo que se llegará hasta la instalación del sistema en la represa, pero debido a que el lapso otorgado por la Escuela e Ingeniería en Electrónica del ITCR para completar el proyecto se termina mucho antes de la puesta en marcha que se realizará en la represa, se debe realizar una puesta en marcha en un banco de pruebas para la presentación del proyecto ante la Escuela de Electrónica.



Figura 2. Sistema hidráulico.

Como parte de este proyecto se debe desarrollar una página de Internet en la que se desplieguen los reportes generados por el sistema y se pueda monitorizar su funcionamiento.

1.2 Solución seleccionada

Se pretende modernizar el sistema hidráulico y de control de las válvulas de mariposa, por lo que se requiere cambiar algunos de los sensores actualmente utilizados, ya que trabajan con niveles de señal que no son compatibles con los nuevos equipos que el ICE está utilizando en todas sus instalaciones. También se desea reemplazar las válvulas, pues estas además de ser obsoletas, trabajan con un nivel de tensión de 125Vcd, y el ICE está migrando hacia sistemas que trabajan con niveles de 24Vcd, ya que estos están vigentes en el mercado y tienen mayor disponibilidad de repuestos.

La selección de las válvulas a utilizar será una tarea del proyecto que se encarga de la parte hidráulica, por otro lado los sensores a cambiar deberán ser seleccionados como parte de este proyecto.

Los nuevos sensores deben elegirse de manera que sean compatibles con los otros equipos a utilizar, además deben ser equipos robustos y seguros, capaces de soportar las severas condiciones ambientales del lugar de trabajo como la alta humedad, estos sensores deben trabajar para todo el rango de valores a medir, por lo que es necesario realizar un estudio en las instalaciones para determinar que rango de funcionamiento deben tener los sensores a elegir, la responsabilidad de decidir que sensores utilizar es una parte de este proyecto.

Como parte del proyecto se realizarán una serie de cálculos (utilizando el principio de Pascal) para determinar los rangos de operación de los sensores, se debe calcular el rango de presiones a los que serán expuestos los sensores que monitorizan la presión antes y después de la válvula de mariposa, para esto se utilizará información como la profundidad de la posición de los sensores respecto al nivel de agua del embalse, para esto se hará usos de física y mecánica de fluidos.

Actualmente las dos válvulas de mariposa que permiten el ingreso del flujo de agua hacia las turbinas, se abren con un sistema hidráulico y se cierran por peso mediante un bloque de concreto que se encuentra en el extremo del brazo de la válvula, este bloque proporciona el peso para cerrar la válvula, ver figura 1.

Se desea cambiar este comportamiento, de manera que el cierre de la válvula sea asistido por un sistema hidráulico, el diseño de esta función será un esfuerzo conjunto entre los dos proyectos, el de electrónica y el hidráulico. Para seleccionar los sensores y diseñar el nuevo sistema de control para la válvula de mariposa, es necesario aplicar conocimientos en física, hidráulica, neumática y electrónica.



Figura 3. Válvula de bypass.

Se busca además un sistema que ofrezca una gran robustez y debe tomarse muy en cuenta la seguridad, ya que manejará equipo de gran valor, es ideal que el equipo seleccionado sea ampliamente utilizado para tener una alta disposición de repuestos, el sistema debe tener una fuerte presencia en el mercado.

De igual manera debe quedar disponible una botonera que permita comandar las válvulas de manera manual, en caso de un fallo en el equipo o que sea necesario realizar reparaciones, esta botonera será desarrollada por personal del Taller Eléctrico en el MET del ICE, por lo que se debe generar una serie de requerimientos y especificaciones para que el personal del taller pueda elaborar un diseño de la botonera, como parte de este proyecto, además se debe evaluar el diseño realizado por el taller eléctrico para que sea aprobado antes de construir la botonera de control manual.

El sistema debe ser además capaz de manejar una gran cantidad de entradas (presión de agua en la entrada, presión de agua en la salida, presión de aire, nivel de aceite, posición de las válvulas de mariposa y estado de las válvulas de igualación de presión entre otras) y salidas (los pistones de las válvulas de mariposa, válvulas de igualación de presión, ingreso y salida de aire y bombeo y retiro de aceite entre otras), por lo que el proyecto utiliza matemática Booleana.

Todas estas variables deberán ser desplegadas en sistema SCADA en un panel PC industrial, el cual permitirá monitorizar el funcionamiento en computadores remotos por medio de una página de Internet, por esto el proyecto incluye uso estándares de comunicación, además la computación es uno de los factores clave en el proyecto junto con la electrónica.

1.3 Especificaciones de funcionamiento

Cuando el sistema entra en operación, debe seguir el siguiente procedimiento de operación especificado por ingenieros de la represa hidroeléctrica en Sandillal, la cual financia e impulsa el proyecto: El sistema debe verificar que las variables de funcionamiento y estado estén dentro de los valores normales, si los valores se salen del rango normal el controlador debe accionar el actuador correspondiente para normalizar la situación de haberlo, si los valores llegan a ser críticos el sistema debe generar alarmas y detener o cerrar las mariposas en caso de estar abiertas, cuando las mariposas están cerradas el sistema debe esperar la orden para abrirlas, al recibir la orden antes de abrir la mariposa se debe comprobar que las condiciones de operación son adecuadas, si es así se debe igualar la presión de aguas antes y después de la válvula, una vez compensada la diferencia de presiones se puede abrir la mariposa, cuando está completamente abierta el sistema debe indicarle al gobernador que se puede continuar con el proceso de puesta en marcha del generador, si en cualquier momento ocurre un problema grave o el controlador recibe una señal de alarma generada por el controlador central o por el usuario, el sistema debe cerrar la válvula de mariposa correspondiente y de ser necesario su válvula de bypass.



Figura 4. Tanque hidroneumático.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Disminuir en un 50% los costos de operación de las dos válvulas de mariposa que controlan la entrada de agua a los generadores de la represa hidroeléctrica del ICE en Sandillal.

2.2 Objetivo general

Montar el controlador PLC y el sistema SCADA en un banco de pruebas para realizar una simulación de una puesta en marcha del sistema de las dos válvulas de mariposa y el tanque hidroneumático que se utiliza en la represa hidroeléctrica en Sandillal para probar que es capaz de realizar todas las funciones especificadas por el ICE (ver especificaciones de funcionamiento en apartado 1.3).

2.3 Objetivos específicos

a. Objetivos de hardware

1. Determinar las características que deben tener los sensores adecuados para implementar el sistema, haciendo especial énfasis en los sensores de presión en la válvula de mariposa en los que no se debe exceder el rango de medición.
2. Seleccionar un PLC y los módulos de expansión necesarios para satisfacer los requerimientos de comunicación, entradas y salidas de la solución.
3. Seleccionar un panel táctil capaz de desplegar la interfase gráfica de usuario e intercambiar datos con el PLC y otras computadoras.
4. Crear un banco de pruebas que permita la realización de una puesta en marcha del sistema para la presentación del proyecto en el ITCR y realizar simulaciones completas para la optimización del controlador PLC.

b. Objetivos de software

1. Establecer la lógica de control necesaria para realizar las funciones especificadas por el ICE en el apartado 1.3.
2. Crear un programa para el PLC seleccionado utilizando diagramas de escalera que cumpla con las funciones especificadas en el apartado 1.3.
3. Escribir el programa para la pantalla táctil utilizando un sistema SCADA para intercambiar información con el usuario y generar los reportes de funcionamiento.
4. Programar un servidor WEB para publicar la página de Internet con los datos del SCADA en la red por medio del protocolo HTTP.

c. Objetivos de implementación

1. Programar el dispositivo PLC con el programa desarrollado para controlar las válvulas de mariposa y el sistema hidráulico.
2. Programar el panel táctil con el software diseñado como interfase con el usuario.
3. Montar el controlador PLC y el SCADA en el banco de pruebas creado para simular la puesta en marcha del sistema.
5. Comprobar que el funcionamiento del sistema cumple con lo especificado por el ICE en el apartado 1.3.

Capítulo 3: Marco teórico

Se realizó una serie de investigaciones para comprender mejor los temas relacionados con la solución del problema, entre los cuales están las magnitudes de las variables físicas a las que están expuestos los sensores, funcionamiento del sistema que se reemplazó y características del sistema en el que se insertó la solución desarrollada.

3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar

Se procedió primero a determinar las funciones que realiza el sistema que se reemplazó en la represa, para esto se utilizó el Manual de Válvula de Mariposa Turbina y entrevistas con el ingeniero especialista de la planta, lo que permitió determinar la siguiente información acerca del sistema:

El sistema utilizado anteriormente fue instalado por la empresa VOEST-ALPINE MCE, utiliza control electromecánico por contactores, además este sistema solo ejecuta las ordenes recibidas, todas las decisiones son tomadas por el sistema central, debido a esto, todas las señales de los sensores y las ordenes son transmitidas por mas de cien líneas de cable entre el sistema central y el controlador de la válvula de mariposa.

El sistema cierra las válvulas de mariposa por contrapeso mecánico y las válvulas se pueden serrar en cualquier momento, antes de abrir la válvula de mariposa se deben verificar las siguientes condiciones:

Para poder abrir una de las válvulas se deben dar las siguientes condiciones:

- Válvula de mariposa en posición cerrada.
- Nivel de aceite normal en el acumulador y deposito hidráulico.
- Presión de aire en el acumulador normal (56 bar).
- Presión de agua igual a ambos lados de la válvula de mariposa, o presión diferencial a los lados de la válvula de mariposa igual a cero.
- Mando eléctrico conectado (AC y DC).
- Válvula de bypass abierta.

Una vez abierta la válvula de mariposa se debe cerrar la válvula de bypass, si la válvula se encuentra abierta (90°) y su ángulo de apertura disminuye a 76.5°, se debe cerrar la válvula de mariposa.

La válvula de mariposa permanece abierta por la presión en el tanque hidroneumático, las fugas deben ser compensadas por las bombas de aceite y por el compresor de aire.

El sistema presenta la siguiente señalización:

Válvulas de bypass: Las dos válvulas tienen señales de abierta, cerrada.

Válvulas de mariposa: Las dos válvulas tienen señales de 0°, 76.5°, 81° y 90° además de un transmisor goniométrico.

Tanque hidroneumático: presión alta, presión baja, presión muy alta y muy baja.

Tanque de reserva hidráulico: Nivel de aceite bajo, demasiado bajo y adecuado, temperatura de aceite demasiado elevada a 70°C.

Filtro: Sucio.

Bombas de aceite: Las dos válvulas tienen señal de fallo si la presión cae a menos de 40 bar.

El sistema genera las siguientes alarmas:

- Válvulas de mariposa: Alarma a los 81°, cierre de emergencia a los 76.5°.
- Tanque de reserva hidráulica: Temperatura de aceite demasiado elevada a 70°C, nivel de aceite demasiado bajo.
- Tanque hidroneumático: Nivel de aceite demasiado bajo, demasiado alto, presión demasiado baja (49 bar), demasiado alta (60 bar).

El proyecto se va a insertar en la represa hidroeléctrica del ICE en Sandillal, esta consiste en dos generadores SIEMENS de 16MW, cada uno impulsado por una turbina tipo Kaplan que a diferencia de la Francis, funciona por caudal y no por presión, este tipo de turbinas utiliza un mecanismo para alcanzar alta eficiencia en un amplio rango de caudales, este consiste en rotar sus álabes para ajustarse a los cambios en el caudal.

Esto hace que estas turbinas sean utilizadas para saltos pequeños y con gran caudal, como es el caso en el embalse de Sandillal donde el salto es de 37 metros con un caudal para cada turbina de 15 metros cúbicos por segundo.

Estas turbinas pueden rotar sus álabes para ajustarse a un rango de caudales, pero si el caudal se sale del rango tolerado su eficiencia cae rápidamente, por esto si el ángulo de apertura de las válvulas de mariposa cae a 76.5° se debe cerrar la válvula antes de que el caudal siga disminuyendo llegue a un valor de baja eficiencia, ya que esta situación podría inclusive llegar a dañar el generador o el regulador automático de voltaje.

La orden de abrir la válvula para iniciar operaciones viene del sistema central que controla el resto de sistemas en la represa, como por ejemplo la rotación de los álabes.

A partir de la información obtenida de los manuales del sistema actual y las entrevistas con los ingenieros de la represa hidroeléctrica se logró resumir el funcionamiento del sistema en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 5.

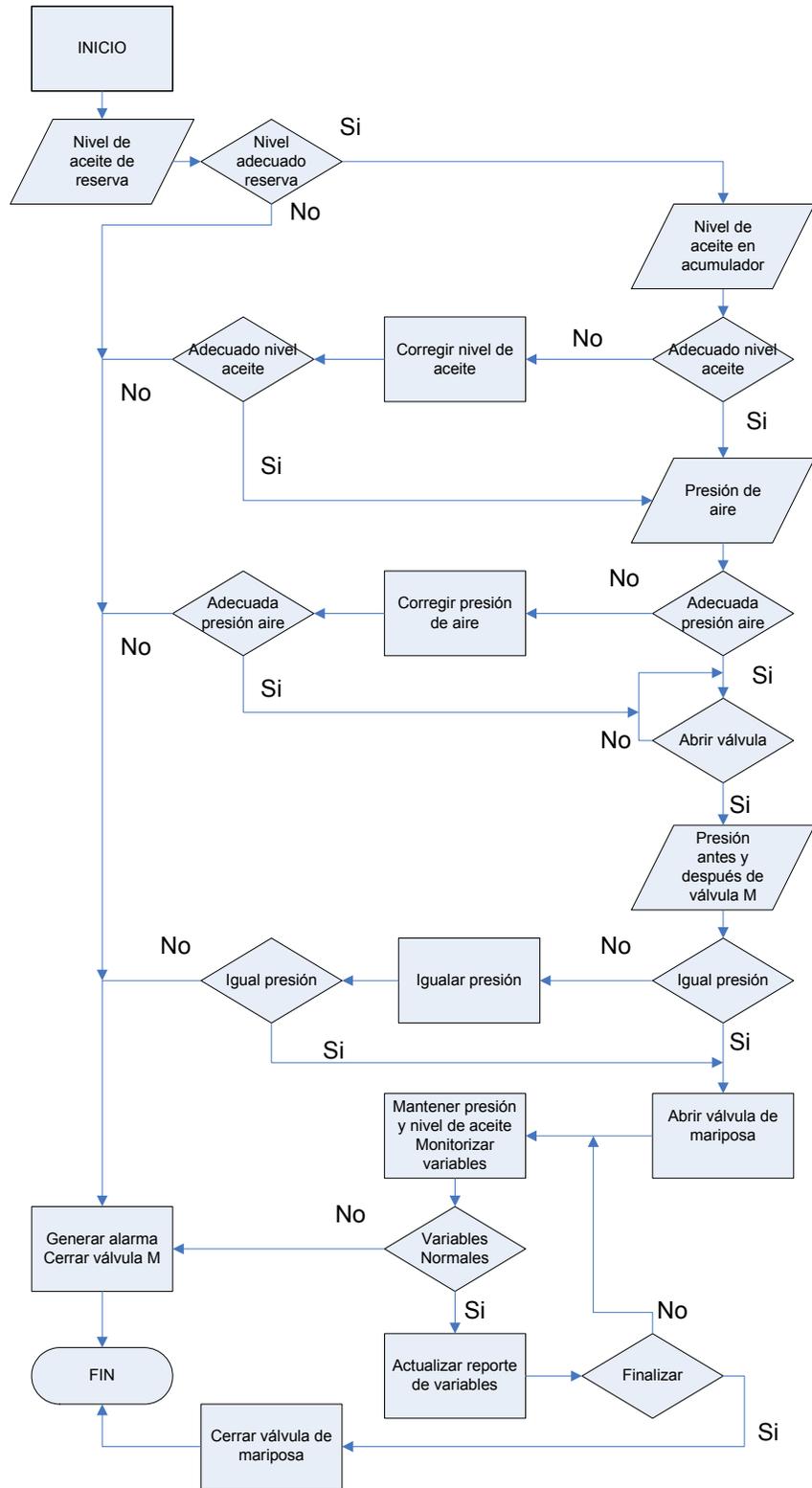


Figura 5. Diagrama de flujo del sistema de control.

Para dejar mas clara la descripción del sistema de control reemplazado se montó un diagrama hidráulico del sistema original, es conveniente hacer la aclaración que en un esfuerzo conjunto entre este proyecto, encargado de la modernización del control electrónico y el proyecto paralelo encargado de la modernización del sistema hidráulico se hicieron algunas mejoras al sistema hidráulico, pero estas no se encuentran en el diagrama hidráulico de la figura 6, estas se discuten mas adelante.

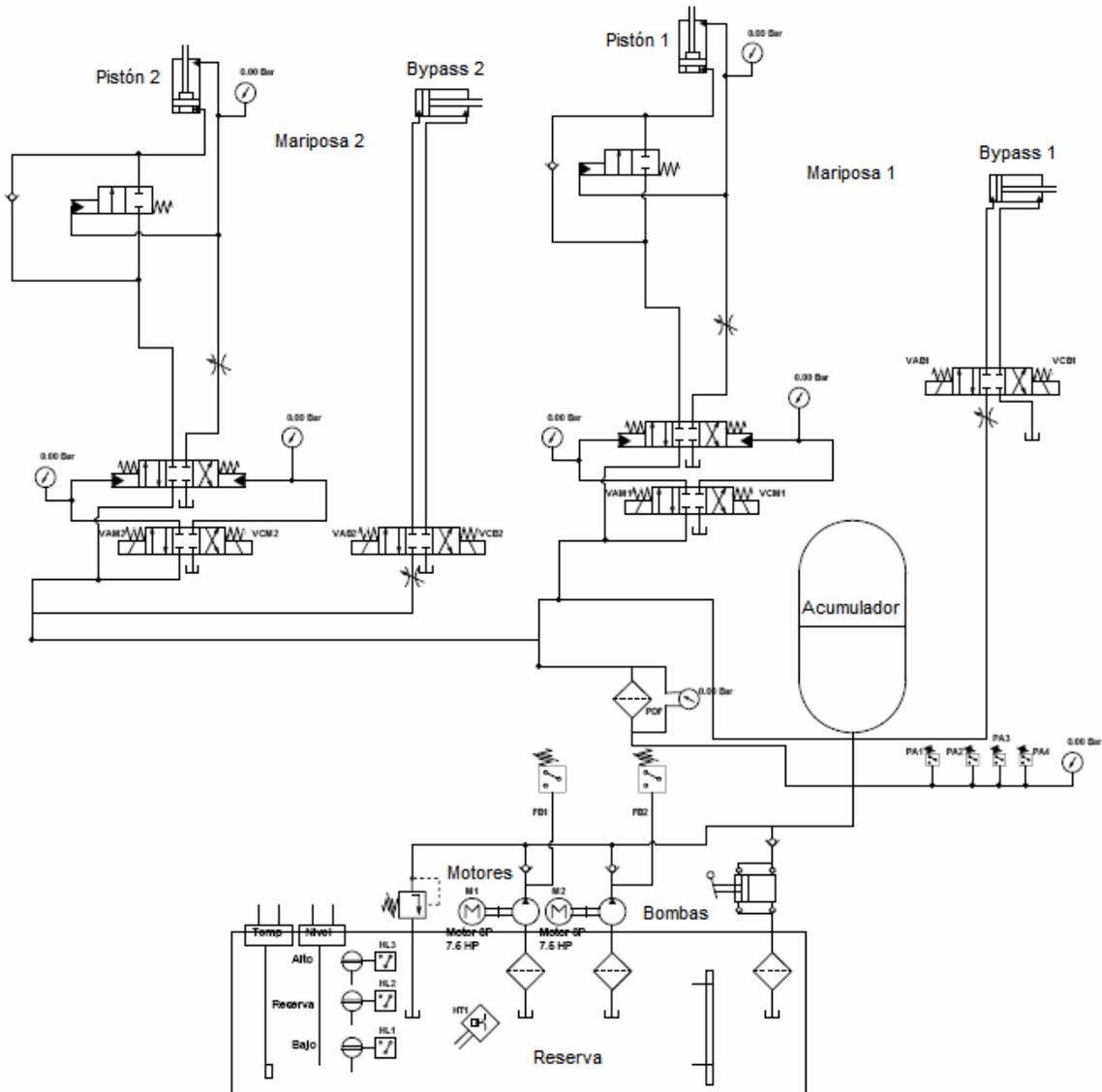


Figura 6. Diagrama hidráulico del sistema reemplazado.

En la figura 6 se aprecian los principales componentes del sistema hidráulico, las tres bombas de aceite, dos eléctricas, una manual, el tanque acumulador, también conocido como tanque hidroneumático, el pistón y la válvula de bypass, también conocida como válvula de compensación de presiones de la mariposa 1, además de sus correspondientes para la mariposa número 2.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

Actualmente los sistemas para automatización industrial de procesos evolucionan rápidamente alcanzando cada vez mayores capacidades y flexibilidad, esto es especialmente cierto para las comunicaciones entre dispositivos, los principales fabricantes de sistemas de automatización como SIEMENS, SCHNEIDER y ALLEN-BRADLEY ofrecen lo que ellos llaman soluciones totalmente integradas, estas soluciones corresponden a sistemas que tienen presencia desde el nivel de campo (sensores y actuadores), pasando por los niveles de control, operaciones (control, adquisición y monitorización de datos) hasta los niveles de administración y planeamiento de recursos empresariales.

Los sistemas modernos utilizan recursos de telecomunicación como Internet, ADSL, GSM entre otros para lograr que la mayor cantidad de información posible este a disposición del personal de la empresa para poder optimizar su funcionamiento, cada vez es más frecuente el uso de servidores con bases de datos donde se concentra la información de los procesos de todos los procesos de la empresa, para esto se utilizan controladores tipo PLC, computadoras industriales, sistemas SCADA, sistemas HMI, servidores Web, y servidores de datos, por lo que la solución desarrollada en este proyecto debió tener la capacidad de utilizar este tipo de dispositivos y servicios para brindar una solución que está a la altura de lo disponible actualmente en el mercado.

Las soluciones avanzadas tecnológicamente utilizan seguros protocolos de comunicación para hacer disponible la información de los procesos alrededor del mundo de ser requerido así, además diseños modulares que permiten reparaciones y mejoras simples y rápidas, con lo que se intenta minimizar el tiempo que pasa detenido el proceso debido a mantenimiento y reparaciones.

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

El sistema hidráulico que gobierna las válvulas utiliza aceite a presión para mover los pistones y las válvulas, la energía la proporcionan dos bombas de 7.5KW, pero se requiere que el sistema pueda funcionar si hay una falla en el servicio eléctrico, por lo que se dispone de un tanque hidroneumático, que consiste en un tanque sellado donde se almacena aceite y aire comprimido, de esta manera si los motores dejan de funcionar, la presión en el aire será suficiente para impulsar el aceite que mueve el sistema hidráulico.

Por esto es de gran importancia mantener la presión de aire en el tanque hidroneumático a la vez que se mantiene un nivel de aceite de manera que haya suficiente aceite para mover el sistema hidráulico pero no tanto que no deje suficiente espacio para el aire comprimido.

Los niveles de presión y aceite se obtendrán de las especificaciones del sistema reemplazado y de los cálculos realizados por el ingeniero mecánico encargado del proyecto paralelo de hidráulica.

Cálculos realizados para determinar el rango de presiones manométricas a las que estarán expuestos los sensores de presión de agua debido a la presión hidrostática ejercida por el agua:

La relación entre la presión hidrostática y la profundidad está descrita por la siguiente ecuación:

$$P_{HS} = \rho * g * h \quad (3.1)$$

Donde ρ corresponde a la densidad del agua que tiene un valor de 1000 Kg/m^3 , g corresponde al valor de la aceleración gravitacional del planeta con un valor de 9.81 m/s^2 y h corresponde a la profundidad a la que se quiere saber la presión hidrostática dentro del líquido, en este caso esta altura corresponde a la altura de salto, que es la altura relativa del embalse con respecto a las turbinas de los generadores.

En la represa hidroeléctrica se encuentra indicada la altura sobre el nivel del mar en diversos lugares de las instalaciones, de estos datos se obtiene que los sensores que miden las presiones de agua arriba y abajo se encuentran a una altura de 47 ± 0.5 metros sobre el nivel del mar, adicionalmente se entrevistó al ingeniero de mantenimiento de la planta el cual indicó que los niveles máximo y mínimo de la altura del embalse son respectivamente 93 m.s.n.m y 88 m.s.n.m .

Durante las visitas a la represa se tomaron datos de los manómetros que miden la presión de aguas arriba, estos manómetros tienen un rango de medición de 0 a 10 bar, los datos obtenidos se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Presiones observadas en las visitas a la represa para las aguas arriba.

Ocasión	Dato
Visita 1	4.20
Visita 2	4.35
Visita 3	4.30
Promedio	4.28

Con los datos de la altura a la que se ubican los sensores y la altura máxima y mínima del embalse se calcula la altura máxima y mínima de la columna de agua a la que serán sometidos los transmisores de presión manométrica, estos datos corresponden a 41 m para el mínimo y 46 metros para el máximo.

Con estos datos se puede aplicar la fórmula 3.1 para calcular el rango de presiones a los que serán expuestos los transmisores de presión utilizados para medir la presión de aguas abajo y arriba:

$$P_{HSarriba} = \rho * g * h \text{ max} = 1000 \text{Kg} / \text{m}^3 * 9.81 \text{m} / \text{s}^2 * 46 \text{m} = 65.447 \text{PSI} = 4.509 \text{bar}$$

$$P_{HSabajo} = \rho * g * h \text{ max} = 1000 \text{Kg} / \text{m}^3 * 9.81 \text{m} / \text{s}^2 * 41 \text{m} = 58.334 \text{PSI} = 4.019 \text{bar}$$

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

Para seleccionar y desarrollar la solución del problema se siguió el método de diseño en ingeniería, este capítulo se refiere a las etapas de este método a las que se recurrió durante el proceso de diseño e implementación.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

La identificación del problema se realizó principalmente a partir de una serie de entrevistas con los ingenieros del centro de producción hidroeléctrica Sandillal, una serie de visitas a la planta para analizar el sistema que se utiliza actualmente en la planta y un análisis profundo al manual del sistema que fue reemplazado junto con el ingeniero mecánico encargado de la parte de hidráulica del proyecto.

De estas actividades se extrajo información acerca del problema que se estaba dando en la represa y se formaron algunas metas para el proyecto, estas metas sirvieron para analizar diferentes posibles soluciones y poder elegir la solución mas adecuada para el problema dado.

Se concluyó que el sistema debe tomar las decisiones localmente en vez de recibirlas del sistema central, además debe tener un diseño modular y alta disponibilidad de repuestos para poder realizar reparaciones de manera fácil y rápida y por último el sistema debe permitir un monitorización constante de funcionamiento desde varios lugares de la represa, no solo de manera visual en el lugar de las válvulas y una base de datos con reportes de funcionamiento donde se puedan consultar posibles causas de error en caso de un fallo.

Por último se propusieron algunas mejoras del sistema al ingeniero encargado de la parte mecánica para mejorar las capacidades del sistema, estas recibieron el visto bueno del ingeniero y fueron incluidas en el proyecto.

4.1 Obtención y análisis de información

Para reunir información preliminar relevante se realizaron varias visitas a la Represa Hidroeléctrica en Sandillal, donde se analizó el problema con un ingeniero electrónico y un ingeniero mecánico de los talleres MET del ICE, además se realizó una serie de entrevistas acerca del problema con el ingeniero jefe de mantenimiento eléctrico de la represa y se examinó detenidamente el funcionamiento del sistema a reemplazar, donde se pudieron apreciar las principales limitaciones que tiene este sistema para poder superarlas y se observó las tareas que debe realizar el sistema que se desarrollo en este proyecto.

Utilizando la recopilación de información adquirida se procedió investigar las soluciones que son estado del arte disponibles de los principales fabricantes de equipos de automatización industrial por medio de sus páginas de Internet, y entrevistas con los ingenieros expertos mencionados anteriormente.

Con esta información y con las metas obtenidas a partir de las entrevistas con expertos se pudo analizar los criterios como costos, capacidades y factibilidades de

implementación y grado de cumplimiento de las metas de varias soluciones para luego proceder a elegir la opción más conveniente.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Después de realizar las visitas y las consultas con el asesor en los talleres MET del ICE, el ingeniero mecánico encargado de desarrollar la parte hidráulica del proyecto y el jefe de mantenimiento de la represa de Sandillal, además de realizar una investigación en las páginas de Internet de los principales fabricantes de soluciones para automatización industrial, se procedió a evaluar distintas soluciones y a examinar sus ventajas y desventajas para poder elegir la solución que mejor solvente los contratiempos que se presentaban en la represa de Sandillal con el controlador de las válvulas de mariposa y el sistema hidroneumático de los sus pistones.

Al obtener varias soluciones se procedió a evaluarlas para ver si se adaptaban a los requerimientos del proyecto, los aspectos evaluados fueron facilidad de implementación, reparación y mantenimiento y expansión, disponibilidad de repuestos, capacidad de manejo de entradas, salidas y lógica, precio, capacidad de monitorización del sistema, capacidad de creación y manejo de bases de datos de estados anteriores del sistema.

Luego de realizar estas evaluaciones y de conocer las principales fortalezas y debilidades de las soluciones evaluadas se procedió a modificar las soluciones mas adecuadas para crear nuevas posibles soluciones que se adaptaran a los requerimientos del proyecto, de esta manera se obtuvo la opción que se selecciono finalmente para implementar la solución.

4.4 Implementación de la solución

Debido a que el complejo hidroeléctrico ARCOSAN (Arenal-Corobicí-Sandillal) está conformado por las únicas 3 represas hidroeléctricas que pueden funcionar constantemente durante todo el verano y que la disminución en la producción eléctrica de las represas debe ser compensada utilizando energía térmica proveniente de combustibles fósiles con precio elevado, la puesta en marcha del sistema desarrollado se planeó para el mes de Junio del 2009.

A causa de esto y por retrasos no previstos en los trámites de compra de componentes en el ICE, se procedió a diseñar un banco de pruebas que permita realizar simulaciones de puesta en marcha para disminuir el tiempo de instalación del sistema en la represa durante el cual el generador debe detenerse, además de permitir realizar simulaciones de las cuales se obtendrán resultados que permitirán realizar mejoras en el diseño y a su vez consisten en la presentación realizada ante el tribunal evaluador de la Escuela de Ingeniería en Electrónica del ITCR.

A partir de estas simulaciones se puede evaluar el desempeño obtenido contra el reempeño esperado para el sistema evaluando en que grado se cumplen las expectativas de la empresa utilizando a la vez el criterio de expertos como el ingeniero mecánico encargado de la parte hidráulica del proyecto y el encargado del área de electrónica de la UPIC de los talleres MET del ICE.

4.5 Reevaluación y rediseño

El sistema implementado en este proyecto puede ser mejorado en futuras etapas del diseño, conforme el tiempo pase y el sistema sea probado mas profundamente por el personal de la represa surgirán aspectos de la solución implementada que se podrán mejorar en etapas posteriores del proyecto.

Durante esta etapa del proyecto se realizaron diversas mejoras como la capacidad de extraer aceite del acumulador y no solo agregar, la capacidad de disminuir la presión del acumulador y no solo aumentarla y la adición de válvulas de seguridad para presurizar el sistema, pero además se observaron mejoras que se pueden realizarse al sistema que se recomienda que se tomen en cuenta en etapas posteriores del proyecto, a continuación se mencionan y se discuten los alcances que estos diseños podrían tener.

La primer mejora consiste en utilizar un sensor analógico de temperatura que permita monitorizar continuamente la temperatura del aceite en la reserva hidráulica, junto con la utilización de un radiador para poder enfriar el aceite en caso de que su temperatura sea elevada, actualmente esta temperatura se monitoriza únicamente con un interruptor que se activa si la temperatura del aceite sobrepasa los 70 °C, con esta señal se genera una alarma y si la temperatura alcanza este valor se debe realizar un paro de emergencia para detener el sistema.

Con esta mejora sería posible saber a que temperatura se encuentra exactamente el sistema y se podría hacer algo antes de que la temperatura alcance valores críticos, como por ejemplo encender una bomba de aceite que lo haga circular por un radiador para lograr enfriarlo y evitar realizar un paro por emergencia del sistema, cabe destacar que actualmente el sistema no tiene radiador y no se agregó uno en esta etapa del proyecto.

Una segunda mejora que se recomienda para una posterior etapa del proyecto consiste en utilizar un sensor de nivel analógico para monitorizar el nivel de aceite disponible en el tanque de reserva hidráulica.

Esta modificación permitiría saber de manera más exacta la cantidad de aceite que se encuentra disponible en el tanque de reserva hidráulica en comparación del sistema utilizado actualmente el cual consiste en dos interruptores de nivel, estos interruptores indican tres niveles discretos de aceite por lo que solo se conoce de manera aproximada la cantidad de aceite en el tanque, la mejora planteada permitiría además observar pequeñas disminuciones en el nivel de aceite en la reserva lo que podría indicar la presencia de fugas de aceite en el sistema.

Por último se sugiere una tercer mejora, utilizar una sola fuente de alimentación, el sistema implementado en este proyecto se alimenta de dos fuentes de energía, la primera una línea de 125 V_{CD} la cual tiene el respaldo de un banco de baterías que alimenta los sistemas principales de la represa en caso de fallo de la alimentación externa, y una segunda línea de 110 V_{AC} que tiene como respaldo una UPS de 1 KVA dentro del panel donde está instalado el sistema.

La alimentación se distribuye de la siguiente manera, la UPS de 110 V_{AC} alimenta la computadora en la que se encuentran el sistema SCADA, el servidor Web y el servidor de datos con las bases de datos. La línea de 125 V_{CD} alimenta al resto de los

componentes como lo son la botonera manual, el PLC, los sensores y las electroválvulas.

A causa de esto, si la alimentación eléctrica falla, el sistema seguirá funcionando normalmente gracias al banco de baterías que respalda la línea de 125 V_{CD} y la UPS, luego de un tiempo cercano a media hora la UPS habrá perdido su carga, por lo que la computadora con el SCADA y los servidores Web y de datos se apagará, no ocurre lo mismo con el PLC, botonera manual, sensores, electroválvulas, contactores, etc., pues estos están alimentados por el banco de baterías, por lo que el control del sistema no se ve afectado.

La mejora consiste entonces en utilizar un inversor de corriente para alimentar la computadora con la línea de 125 V_{CD} y no perder así la capacidad de monitorizar el sistema con el SCADA y actualizar la base de datos cuando la alimentación eléctrica externa falla por largos períodos de tiempo.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución (Explicación del diseño)

En este capítulo se encuentra la explicación del diseño realizado durante el proyecto, se analizan las opciones que se consideraron como posibles soluciones con respecto a los criterios establecidos en el capítulo 4, sus principales fortalezas, sus defectos, a partir de este análisis se crean más opciones y se procede a realizar la elección final y justificación de la solución que se implementó en el proyecto.

Luego de seleccionar la solución definitiva se procede a realizar una explicación detallada de esta separada en términos de Hardware y de Software, donde se muestra como funcionan los módulos del equipo utilizado y las rutinas del programa diseñado, dado que el sistema será montado en un banco de pruebas, se procederá también a realizar la descripción del hardware utilizado para realizar esta simulación.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Luego de conocer y analizar el problema, se procedió a proponer varias opciones para implementar la solución en el proyecto, cada una de estas con diferentes ventajas y desventajas, para lograr elegir la opción más adecuada se siguió un proceso y se establecieron varios criterios para evaluar que tan convenientes eran estas posibles soluciones, este proceso y criterios fueron explicados en el capítulo 4, las soluciones propuestas junto con su análisis y la elección de la solución final se muestran a continuación:

5.1.1 Control electromecánico por contactores:

Consiste en realizar un sistema que utilice control por contactores para implementar la lógica de control, este tipo de lógica es muy limitada para sistemas con gran número de entradas y salidas, pero a su vez suele ser un método de control muy económico, el sistema que fue reemplazado funciona de esta manera con contactores a 125 V_{CD}, este tipo de contactores es escaso por lo que conseguir repuestos requiere de tiempo y implica grandes costos económicos.

La ventaja que tendría el nuevo sistema sería que el control se trabajaría a una tensión de 24 V_{CD} por lo que el problema de la escasez de repuestos se solucionaría, como el sistema a desarrollar tiene una gran cantidad de entradas y salidas, este tipo de solución se complica pues el tamaño del circuito de control dificultaría enormemente la localización de las fallas en caso de una reparación, hacer expansiones al sistema es posible pero para esto habría que aumentar aun más el tamaño del circuito.

El sistema tiene la gran desventaja de que no utiliza señales analógicas, por lo que la monitorización posible se limita a una serie de luces que se apagan o se encienden si se dan ciertas condiciones y a niveles discretos de variables como el ángulo de apertura de las válvulas o el nivel de aceite en el tanque hidroneumático.

A causa de todo esto se determina que esta solución no es apropiada para el sistema, pues aunque satisface la necesidad de amplia gama de repuestos, se queda corta en la facilidad de mantenimiento y reparación, factibilidad de implementación, capacidad de monitorizar constantemente desde lugares remotos al sistema y bases de datos con historial del funcionamiento del sistema.

5.1.2 Control por PLC:

Consiste en utilizar un Controlador con Lógica Programable el cual permite utilizar lenguajes de programación como por ejemplo diagramas de escalera para establecer la lógica de control, son muy utilizados en la industria por su gran robustez, estos dispositivos tienen un tamaño muy compacto, con una gran capacidad de manejar entradas y salidas por medio de módulos de expansión, además estos dispositivos tienen la capacidad de manejar entradas analógicas y protocolos de comunicación como el Ethernet, por lo que permiten una monitorización más adecuada que la opción de control por contactores.

Este tipo de soluciones tiene un precio moderado, pero no permiten por sí mismos una monitorización remota del proceso y la creación de una base de datos del estado del proceso. Los PLC son dispositivos modulares por lo que la detección y reparación de fallas así como el mantenimiento y expansión del sistema son relativamente simples y las opciones más vigentes del mercado tienen una amplia gama de repuestos.

La solución de control por PLC es una excelente opción para implementar el control por su disponibilidad de repuestos, fácil reemplazo de los módulos dañados, sistema compacto, fácil implementación, pero por sí mismo no ofrece buena capacidad de monitorización del proceso simultánea desde lugares remotos ni facilita la creación de una base de datos que permita conocer el estado del sistema en el pasado, esto hace que sea necesario evaluar otras soluciones y considerar una modificación a esta solución para que se adapte mejor a las necesidades del proyecto.

5.1.3 Control por Computador Industrial:

Consiste en hacer uso de una computadora industrial para realizar el control, tiene las ventajas de una gran capacidad, fácil implementación, además de facilitar la monitorización del proceso en la computadora y a la vez es fácil publicar esta información en Internet por medio de una página Web en la computadora industrial para lograr la monitorización desde distintos lugares simultáneamente.

Tiene las desventajas de un precio elevado y un diseño no modular, un fallo en la computadora no solo afecta la monitorización, si no también el control, sacando al sistema de operación hasta que sea detectada y reparada la avería.

Esta es una muy buena opción para implementar la monitorización debido a la posibilidad de utilizar medios de telecomunicación como Internet para publicar la información y poder acceder a esta desde cualquier parte del mundo de ser necesario, los principales problemas de esta implementación corresponden a su diseño poco modular y su elevado precio.

Esta solución es una buena candidata para una modificación que permita utilizar las ventajas que ofrece la utilización de una computadora para la monitorización y manejo de bases de datos, y que a su vez atenúe las desventajas de esta solución.

5.1.4 Control por PLC y monitorización del proceso por medio de un sistema SCADA:

En esta opción se utiliza un PLC para implementar el control del proceso, pero además se hace uso de un sistema SCADA en una computadora para la monitorización del proceso y la creación de la base de datos del funcionamiento del sistema, por lo que tiene las ventajas de las dos opciones anteriores, diseño altamente modular, amplia gama de repuestos, fácil implementación, reparación y mantenimiento, gran capacidad de entradas y salidas, precio moderado, gran capacidad de monitorización y facilidad para crear una base de datos con el historial de funcionamiento y posibilidad para publicarla en Internet.

Al comparar esta opción con las anteriores se puede notar que esta es muy adecuada para la implementación de la solución, por un lado presenta la mayor cantidad de ventajas entre todas las posibles soluciones evaluadas y a la vez presenta la menor cantidad de desventajas, solamente el precio es su inconveniente pues es necesario adquirir la computadora, la licencia del SCADA y el PLC, pero los componentes utilizados se adaptan sin problema al presupuesto disponible para el proyecto.

5.2 Descripción del hardware

En este apartado se procede a explicar lo referente al hardware de la solución implementada para el problema analizado, se describe la estructura funcionamiento de los bloques utilizados para construir el sistema, para iniciar el análisis se muestra un diagrama de bloques general del proyecto en la figura 7.

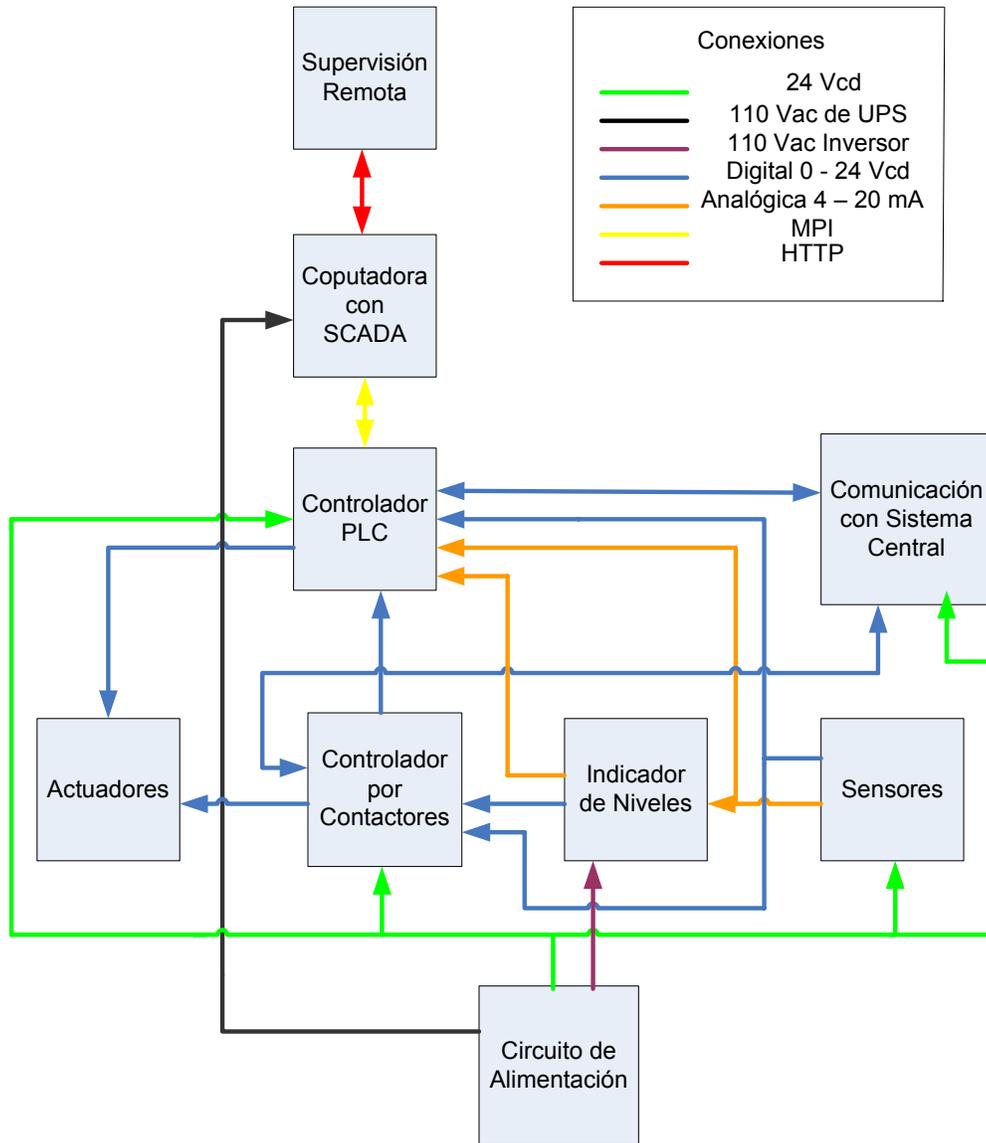


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema desarrollado.

En la figura 7 se muestra un diagrama de bloques del sistema desarrollado para el proyecto, se procede ahora a hacer una descripción de la función y la implementación final de cada uno de los módulos que conforman el sistema.

5.2.1 Actuadores

Este módulo consiste de 20 solenoides encargados de activar válvulas y contactores que controlan los movimientos de abrir y cerrar los pistones (2 pistones para las mariposas y 2 pistones para los bypass), ingreso y retiro de aire, las dos bombas de aceite, la válvula para sacar aceite del acumulador y presurizar los sistemas de las dos válvulas.

Estas acciones se realizan cuando lo indique el controlador activo, ya sea el implementado en el PLC o el controlador por contactores, todos los 20 solenoides tienen el mismo circuito por lo que se muestra uno para entender como funciona el módulo, este circuito se muestra en la figura 8.

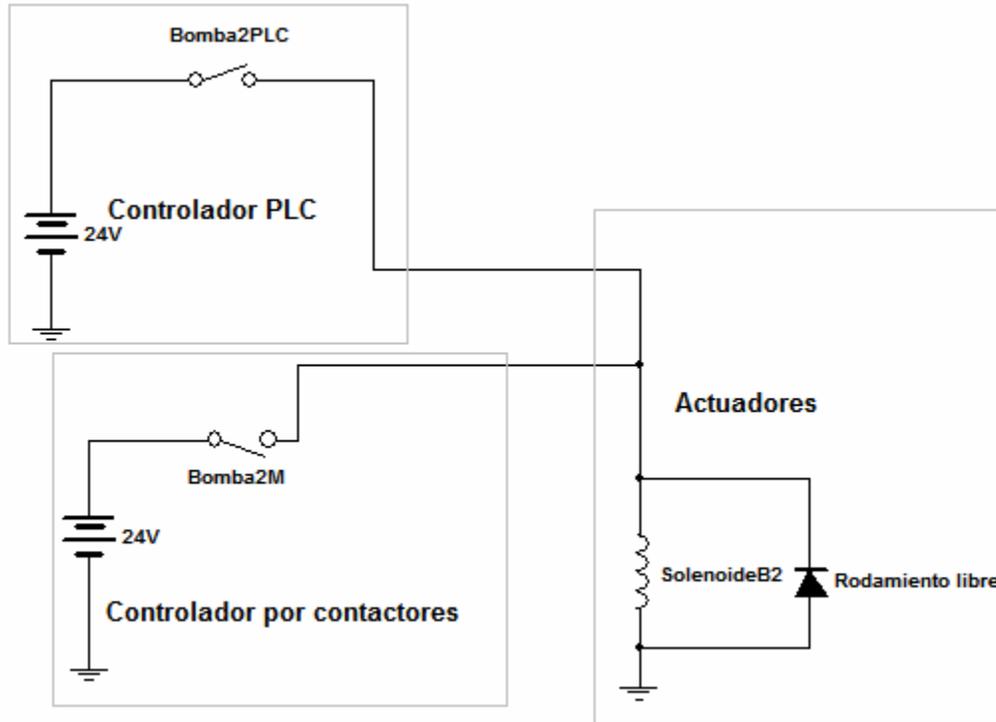


Figura 8. Diagrama eléctrico de polarización de los solenoides en el módulo Actuadores.

En la figura 8 se aprecia como está conformado el módulo Actuadores, consiste de 20 solenoides como el mostrado en la figura, en este caso para explicar el funcionamiento se examina el solenoide del contactor encargado de encender la bomba 2, cuando cualquiera de los controladores cierre el contacto para encender la bomba 2 (Bomba2PLC para el controlador PLC o Bomba2M para el controlador por contactores) se polariza el solenoide SolenoidesB2, este es el encargado de encender el motor de la bomba 2, la bomba permanecerá encendida mientras cualquiera de los controladores siga polarizando el solenoide.

En la figura 8 también se aprecia que se utilizó un diodo de rodamiento libre en cada solenoide, esto para proteger los contactores de los controladores cuando se despolariza el solenoide de la bomba o válvula que se esté utilizando, ya que las inductancias de los solenoides podrían crear picos de voltaje cuando los contactores abren el circuito, estos picos de voltaje son causados por la resistencia que ofrecen las inductancias a los grandes cambios en la corriente que las atraviesa.

5.2.2 Circuito de alimentación

El sistema toma energía de dos fuentes distintas por medio del Circuito de Alimentación, la primera es la red de distribución eléctrica externa a 110 V_{AC} y la segunda es un banco

de baterías interno de la represa hidroeléctrica en Sandillal, este tiene una capacidad de 750 Ah y entrega 125 V_{CD}.

El módulo Circuito de Alimentación provee de tres tipos de salida de energía al resto de los módulos, la primera es un nivel de 24V_{CD} con respaldo del banco de baterías, la segunda es una alimentación de 110 V_{AC} que también cuenta con el respaldo del banco de baterías y por último un nivel de 110 V_{AC} que cuenta con un respaldo del una UPS interna al módulo, para observar como está compuesto el módulo se muestra su estructura en la figura 9.

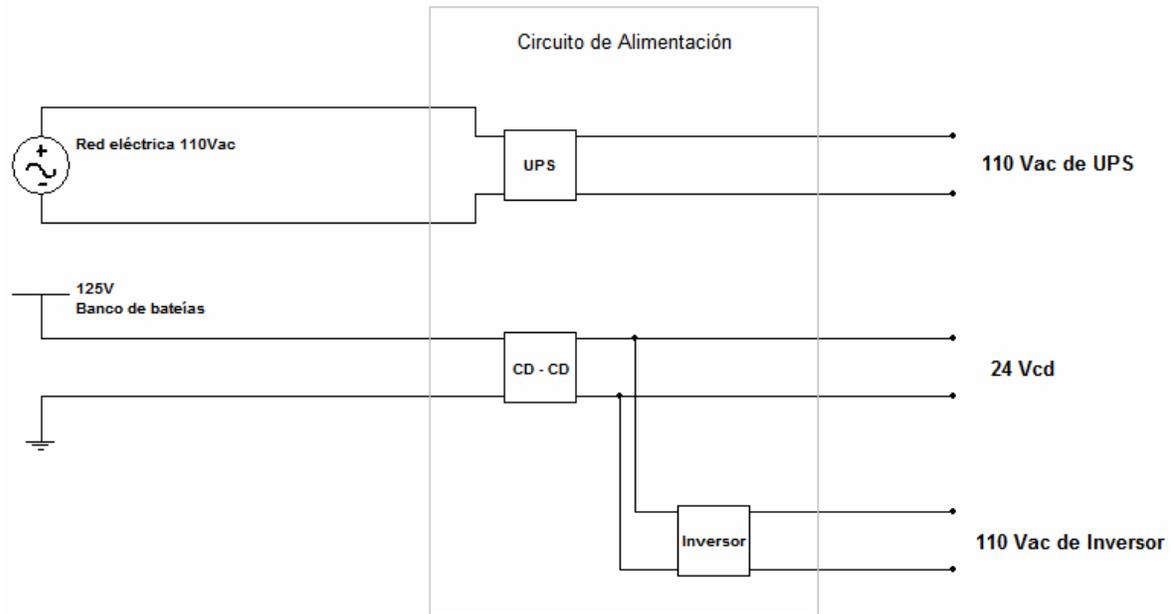


Figura 9. Diagrama eléctrico del módulo Circuito de Alimentación.

En la figura 9 se puede apreciar como está conformado el módulo Circuito de Alimentación, las dos salidas de 110 V_{AC} se obtienen de manera distinta, el módulo se constituye básicamente por una UPS, un convertidor CD-CD y un inversor de corriente.

La primera salida de 110 V_{AC} se obtiene de la red de alimentación externa a través de una UPS Powerware PW5110-1500 de 1.5 KVA, esta salida es exclusivamente para alimentar el módulo Computadora con SCADA, este módulo consume un máximo de 200 Watts de potencia por lo que la UPS lo puede alimentar de 20 a 25 minutos si la red eléctrica externa falla, el módulo Computadora con SCADA solo tiene la función de monitorizar por lo que si la UPS se queda sin carga funciones vitales como el control seguirán funcionando.

El nivel de 24 V_{CD} se obtiene a partir de la línea de 125 V_{CD} proveniente del banco de baterías, este banco de baterías tiene una capacidad de 750 Ah y alimenta los sistemas críticos de la planta, para obtener un nivel de 24 V_{CD} de un nivel de 125 V_{CD} se utilizó un convertidor CD-CD POWERSTREAM PST-DCH-P320 para con una corriente de salida de 13 A.

El PLC con sus módulos consumen un máximo de 5 A, los transmisores de presión y nivel consumen un máximo de 500 mA, el inversor de poder que alimenta los indicadores remotos consume menos de 500 mA, el módulo Actuadores tiene un consumo que no llega a 6 A y el controlador por contactores consume hasta 6 A, dado que solo puede trabajar un controlador a la vez, el peor de los casos en lo que a consumo se refiere ocurre cuando funciona el controlador por contactores, en este caso el consumo puede alcanzar 13 A que es la capacidad máxima del convertidor CD-CD, pero este caso nunca va a ocurrir pues para esto sería necesario que todos los módulos consuman el máximo simultáneamente y que se den situaciones que no ocurren durante el uso, como por ejemplo, abrir y cerrar el mismo pistón simultáneamente o agregar y sacar aire del acumulador simultáneamente, por lo que los 13 A de salida del convertidor CD-CD son suficientes para esta salida del módulo Circuito de Alimentación.

Por último el segundo nivel de 110 V_{AC} en la salida se obtiene de la entrada de 125 V_{CD} utilizando un inversor de corriente POWER BRIGHT ML400-24 que toma los 24 V_{CD} provenientes del convertidor CD-CD y los convierte en 110 V_{AC} con una potencia de salida continua máxima de 400 Watts, esta salida tiene entonces el respaldo del banco de baterías de la represa y se utiliza para alimentar dispositivos cruciales para el funcionamiento del controlador en el sistema que requieren alimentación de 110 V_{AC}, en este caso estos componentes se encuentran en el módulo Indicador de niveles, este módulo puede llegar a consumir hasta 300 mA, y dado que el inversor tiene una eficiencia de hasta 90% y un consumo de corriente de sin carga menor a 80 mA, la corriente consumida por el inversor será menor a 500 mA.

5.2.3 Indicador de Niveles

Este módulo toma la alimentación de una línea de 110 V_{AC} proporcionada por el Circuito de Alimentación, la función del Indicador de Niveles es tomar las señales de nivel de aceite y presión de aire que vienen del módulo Sensores en forma de lazos de corriente de 4 a 20 mA y convertirlas en señales que puedan ser interpretadas por el controlador por contactores que no utiliza señales analógicas, a su vez debe retransmitir las señales de lazo de corriente utilizadas hacia el controlador PLC, ya que este las utiliza en su forma analógica.

Para este propósito este módulo utiliza dos indicadores remotos de proceso industrial DWYER SI-23 cada uno con dos módulos de expansión SI-02P, los cuales permiten configurar dos alarmas con salida a relé configurables a niveles independientes cada uno, por lo que cada indicador remoto tiene la capacidad de indicar cuatro niveles discretos configurables independientemente para la variable de entrada de 4 a 20 mA.

Los circuitos de los dos indicadores remotos de proceso industrial son idénticos, por lo que se muestra el circuito correspondiente a la señal de nivel de aceite en la figura 10 para mostrar como se conforma este módulo.

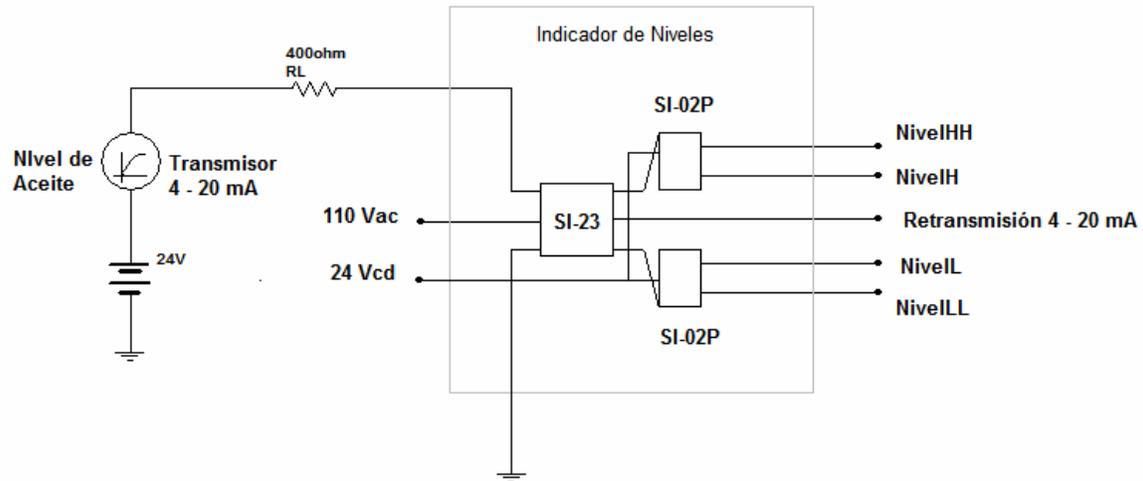


Figura 10. Diagrama eléctrico del módulo Indicador de Niveles.

Como se aprecia en la figura anterior, el módulo indicador de Niveles toma la señal analógica de 4 – 20 mA y la separa en cuatro niveles o alarmas discretas que son necesarias en el Controlador por Contactores, además retransmite la señal de 4 – 20 mA ya que esta es utilizada por el Controlador PLC.

Para examinar como funcionan los niveles discretos de la señal se examina el caso del nivel de aceite en el acumulador, la señal de presión el acumulador se trata de la misma manera, si el nivel está demasiado bajo se enciende la alarma NivelLL, si el nivel está bajo pero no menor al valor configurado para NivelLL entonces se activa la alarma NivelL, si el nivel de aceite está en un rango adecuado ninguna alarma se activa, si el nivel es alto se activa la alarma NivelH y si el nivel de aceite es demasiado alto se enciende la alarma NivelHH, estas alarmas son salidas a relé en los módulos de expansión SI-02P, por esto el módulo Indicador de Niveles utiliza la alimentación de 24 V_{CD} proveniente del convertidor CD - CD además de la alimentación de 110 V_{AC} proveniente del inversor de corriente requerida por los dos indicadores remotos SI-23, las dos líneas de alimentación tienen respaldo del banco de baterías de la represa en caso de que la red eléctrica externa falle.

5.2.4 Sensores

El módulo sensores contiene todos los componentes necesarios para que el controlador PLC y el controlador por contactores puedan monitorizar el estado del sistema, para esto utiliza principalmente dos tipos de sensores, los interruptores que entregan una señal digital que cambia de valor si se cumple alguna condición como por ejemplo que el nivel de aceite en la reserva alcance el límite establecido para valor bajo, o los finales de carrera de las válvulas de bypass, el otro tipo de sensores utilizados corresponden a los transmisores, los cuales proporcionan valores analógicos continuos que representan el estado de una de las variables del sistema, todos los transmisores utilizados tienen una salida que varía de 4 a 20 mA y se relaciona linealmente con una de las variables del sistema, entre estas se encuentran la presión y nivel de aceite en el tanque hidroneumático, el ángulo de apertura de las válvulas de mariposa y las presiones de aguas arriba y abajo en ambas válvulas de mariposa.

Tabla 2. Sensores utilizados por el sistema.

Variable	Cantidad	Condición o rango a medir	Tipo de sensor	Modelo	Capacidad de medición
Temperatura de aceite	1	Temperatura mayor a 70°C	Interruptor	T675A	Nivel de temperatura configurable de 15 a 30°C
Nivel de aceite en la reserva	2	Nivel muy bajo, bajo, adecuado	Interruptor	LM1BFP	Tres niveles de temperatura configurables
Fallo en bombas	2	Presión menor a 40 bar	Interruptor	SW-02-04-20	Presiones entre 27,5 y 345 bar
Presión diferencial en filtro de aceite	1	Presión mayor a 5 bar	Interruptor	Integrado al filtro	Integrado al filtro
Presión diferencial en mariposas	2	Presiones de 0 a 4,2 bar	Interruptor	UE J21K-357	Presiones diferenciales entre 0 y 4,8 bar
Posición de las mariposas	8	0, 76.5, 81 y 90 grados	Interruptor	PSN40-20DP	Inductivo de proximidad
Finales de carrera de los bypass	4	Cerrado y abierto	Interruptor	PSN40-20DP	Inductivo de proximidad
Inundación del sistema	1	Presencia de agua estancada	Interruptor	L10-S-3-A	Flotación en líquidos con gravedad específica mínima de 0.5
Presión en el acumulador	1	Presión de 48 a 64 bar	Transmisor	261AS	Presiones de 0 a 100 bar
Nivel de aceite en el acumulador	1	Columna de aceite de 1 metro	Transmisor	364DS	Span de 0 – 70 mbar (correspondiente a una columna de aceite con gravedad específica relativa de 0.7 de 1 metro de altura)
Angulo de apertura de las mariposas	2	Angulo de 0 a 90 grados	Transmisor	MARK 150D0J1	Ángulos de 0 a 300 grados
Presiones de aguas arriba y abajo en las mariposas	4	Presiones de 0 a 4,51 bar	Transmisor	261AS	Presiones de 0 a 10 bar

En la tabla 2 se puede apreciar las variables a medir en el sistema, además se puede apreciar la capacidad de medición de los sensores elegidos, por ejemplo para la presión en el acumulador se utilizó un transmisor de presión 2600T de la marca ABB, este transmisor cuenta con una pantalla LCD para despliegue de datos y configuración, además tiene una salida lineal de 4 – 20 mA con un Span configurable entre un mínimo de 0 – 5 bar y un máximo de 0 – 100 bar, por esto se utiliza tanto para la medición de la presión en el acumulador que puede alcanzar hasta 63 bar como para la medición de las presiones de aguas arriba y abajo en las válvulas de mariposa, para lo que se utiliza un Span de 0 – 10 bar.

Para el caso de los interruptores se utilizó el mismo circuito para todos los interruptores utilizados, se procede a utilizar el interruptor utilizado para ver si la presión en las bombas de aceite baja de 40 bar para ejemplificar los circuitos utilizados para los sensores tipo interruptor, este se muestra en la figura 11:

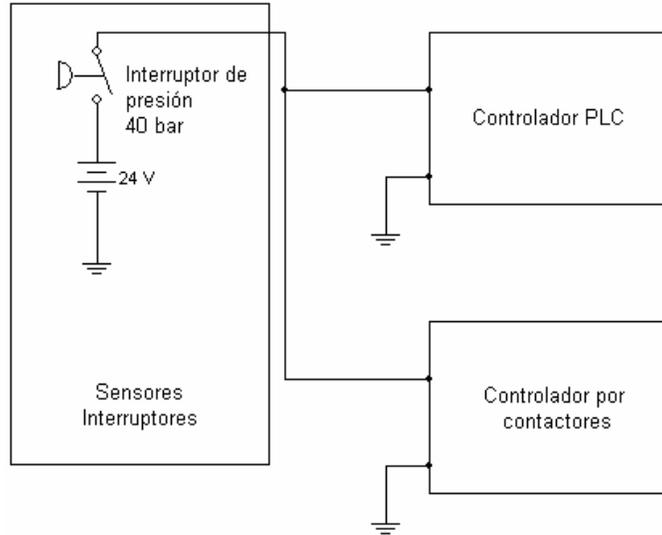


Figura 11. Diagrama eléctrico del circuito utilizado para los sensores tipo interruptor.

El fallo de las bombas se detecta si la presión después de la bomba cae por debajo de 40 bar, por lo que si se detecta que la presión después de la bomba es menor a 40 bares y la bomba se encuentra activa, los controladores pueden interpretar que hay un problema o fallo en la bomba.

Para detectar esta disminución en la presión se utiliza un interruptor de presión SW-02-04-20 normalmente abierto que se cierra cuando la presión cae a menos de 40 bar, polarizando así las entradas de los controladores PLC y por contactores, este circuito se muestra en la figura 11.

El otro tipo de sensores utilizados corresponde a transmisores con salida de corriente de 4 – 20 mA, todos tienen el mismo circuito, por lo que para describir el funcionamiento solo se recurre al transmisor de posición angular utilizado para medir el ángulo de apertura de las válvulas de mariposa, el circuito utilizado para este fin se muestra en la figura 12:

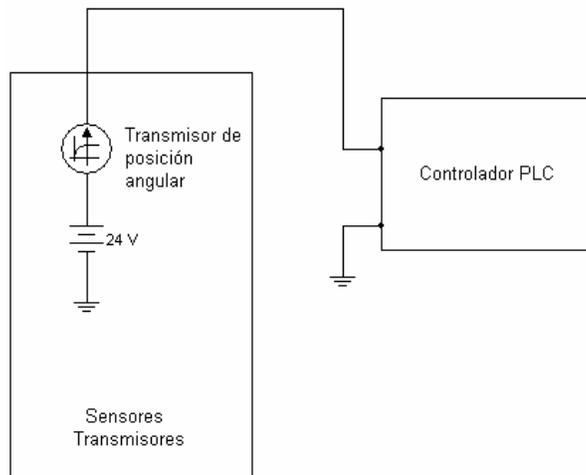


Figura 12. Diagrama eléctrico del circuito utilizado para los sensores tipo transmisor.

Para describir el funcionamiento de los sensores tipo transmisor utilizados en el sistema se recurre al transmisor de posición angular, ya que todos los transmisores tienen el mismo circuito ya que comparten características como salida de corriente de 4 a 20 mA que no requiere de resistencia de línea adicional para operar con fuentes de 24 V_{CD}.

El circuito utilizado para la medición del ángulo de apertura se muestra en la figura 12, se utiliza una fuente de 24 V_{CD} para polarizar el lazo de corriente de 4 a 20 mA, el transmisor utilizado para medir la posición angular de la válvula es el PROXIMITY Mark iom 150, el cual posee un Span configurable mínimo de 0° a 50° y máximo de 0° a 300°, en este caso se configura un Span de 0° a 90° por lo que 4mA en el lazo de corriente significa que la apertura de la válvula es de 0° mientras que 20 mA en el lazo de corriente significan a su vez que la apertura es de 90°, la relación entre la corriente y el ángulo de apertura es lineal.

El módulo sensores no se encuentra dentro del gabinete utilizado para proteger al equipo de la alta humedad, por lo que todos los sensores tienen un índice de protección IP 65 como mínimo.

5.2.5 Comunicación con el sistema central

En la represa hidroeléctrica de Sandillal existe un controlador central que se encarga de controlar la posición de los álabes de las turbinas tipo Kaplan y el resto de sistemas de la represa, para esto se utiliza una gran cantidad de cable, para controlar las válvulas de mariposa el sistema central intercambia señales por medio de más de 100 cables con el controlador de las válvulas de mariposa, el controlador desarrollado en este proyecto tiene la capacidad de tomar las decisiones de manera local. Por lo que el número de señales que se intercambian con el controlador central se disminuye a 18, se envían 6 señales hacia el sistema central y se reciben 12.

El sistema central utiliza señales a un nivel de 125 V_{CD} y los nuevos controladores desarrollados en este proyecto utilizan niveles de 24 V_{CD}, por lo que se debe cambiar los niveles de las señales antes de enviarlas o recibirlas, para esto se utilizan circuitos como los que se muestran a continuación:

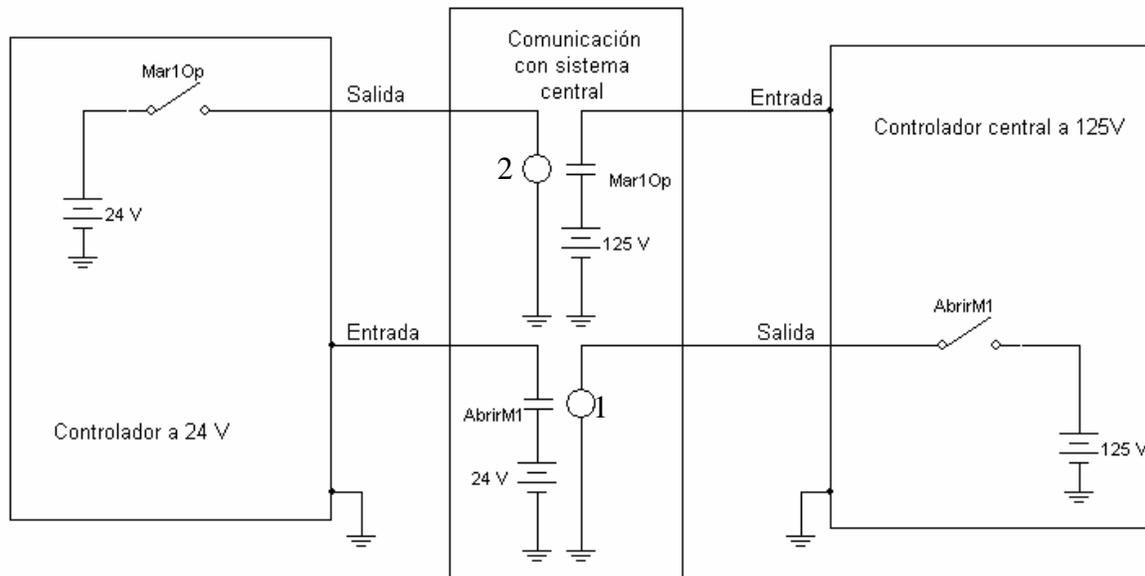


Figura 13. Diagrama eléctrico del circuito utilizado en el módulo Comunicación con Sistema Central.

En la figura 13 se pueden apreciar los circuitos utilizados en el módulo Comunicación con Sistema Central para las tanto para las señales recibidas como para las señales enviadas al controlador central.

Para el caso de las señales recibidas se utiliza la señal AbrirM1 para la descripción del funcionamiento, esta señal corresponde a la orden que da el sistema central para abrir la válvula de mariposa 1 cuando el primer generador de la represa se va entrar en funcionamiento y indica al controlador local que es necesario iniciar el proceso de apertura de la válvula, como todas las señales que vienen del sistema central, esta tiene un nivel de $125 V_{CD}$ que es muy elevado para el nivel que utilizan las señales de los controladores PLC y por contactores de $24 V_{CD}$, la señal proveniente del controlador central polariza el solenoide 1 por lo que se cierra el contacto correspondiente y el controlador a $24 V_{CD}$ recibe la señal AbrirM1 con un nivel de $24 V_{CD}$.

Para el caso de las señales enviadas hacia el controlador central, estas tienen un nivel de $24 V_{CD}$, pero el controlador central solo puede interpretar señales a un nivel de $125 V_{CD}$, por lo que cuando se activa la señal Mar1Op que indica que la mariposa 1 se encuentra completamente abierta y que el controlador central puede continuar con el proceso de puesta en marcha del generador de la turbina 1, se polariza el solenoide 2 y se cierra el contacto correspondiente, enviando la señal Mar1Op con un nivel de $125 V_{CD}$ hacia el controlador central, el resto de señales intercambiadas entre el sistema central y los controladores PLC y por contactores utilizan circuitos idénticos.

5.2.6 Controlador por contactores

El diseño del módulo Controlador por Contactores utilizado en el sistema no forma parte de este proyecto, pero como parte del proyecto se debe generar una serie de especificaciones para que el personal del Taller Eléctrico del MET del ICE realice el

diseño del controlador por contactores, como por ejemplo las entradas y las salidas del sistema que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Variables utilizadas por el Controlador por contactores con su descripción.

Variable	Tipo	Descripción
Aceite en la reserva (2 niveles)	Entrada	Indica el nivel de aceite en la reserva, si es crítico se activa la emergencia
Fallo en las bombas (2 bombas)	Entrada	Indica que hay un fallo en las bombas, se debe encender indicación luminosa
Filtro Sucio	Entrada	Indica el filtro de aceite esta sucio, se debe encender indicación luminosa
Temperatura de aceite alta	Entrada	Indica que la temperatura de aceite en la reserva es alta, se activa la emergencia
Presión en acumulador (4 niveles)	Entrada	Indica la presión en el acumulador, si es crítico se activa la emergencia
Nivel de aceite en acumulador (4 niveles)	Entrada	Indica el nivel de aceite en el acumulador, si es crítico se activa la emergencia
Posición de las mariposas (4 por cada mariposa)	Entrada	Indica la posición de las mariposas, si es crítico se activa la emergencia del sistema correspondiente
Finales de carrera de los bypass (2 bypass)	Entrada	Indica la posición de las válvulas de igualación de presión
Presión no balanceada en la mariposa (2 mariposas)	Entrada	Indica que la presión a ambos lados de la mariposa es distinta, no se debe abrir la válvula
Funcionamiento manual	Entrada	Indica que el controlador activo es el Controlador por Contactores
Presurizar sistema 1 o 2	Entrada	Indica que se debe habilitar el sistema hidráulico de la mariposa 1 o 2
Emergencia local	Entrada	El usuario ha activado el botón de emergencia local, se activa la emergencia
Cierre de emergencia general	Alarma de entrada	El sistema central ha detectado un error grave, se activa la emergencia
Cierre de emergencia Mariposa 1	Alarma de entrada	El sistema central ha detectado un error en el sistema 1, se activa la emergencia de este sistema
Cierre de emergencia Mariposa 2	Alarma de entrada	El sistema central ha detectado un error en el sistema 2, se activa la emergencia de este sistema
Encender bomba 1 o 2	Salida	Acción de encender las bombas de aceite
Retirar aceite	Salida	Acción de retirar aceite del acumulador
Retirar aire	Salida	Sacar aire a presión del acumulador
Agregar aire	Salida	Agregar aire a presión del acumulador
Abrir mariposa 1 o 2	Salida	Mover el pistón para abrir la válvula de mariposa
Cerrar mariposa 1 o 2	Salida	Mover el pistón para cerrar la mariposa
Abrir bypass 1 o 2	Salida	Mover el pistón para abrir válvula de bypass
Cerrar bypass 1 o 2	Salida	Mover el pistón para cerrar el bypass
Mariposa 1 o 2 en operación	Señalización de salida	Indica que las mariposas están operando
Paro por emergencia mariposa 1	Alarma de salida	Emergencia en el sistema 1, cerrar las válvulas
Paro por emergencia mariposa 2	Alarma de salida	Emergencia en el sistema 2, cerrar las válvulas
Paro por emergencia general	Alarma de salida	Emergencia general, cerrar las válvulas de los dos sistemas

El módulo estará conformado principalmente por contactores, botones, interruptores y luces para señalización, el módulo incluye además una botonera para brindar al usuario los botones necesarios para controlar el sistema y las luces utilizadas para desplegar el estado del equipo, de esta botonera hay dos señales que van además hacia el

Controlador PLC, Funcionamiento manual y Emergencia local, estas son las únicas señales que se intercambian entre ambos controladores.

Algunas de las especificaciones generales son que la alimentación disponible para el módulo es de 24 V_{CD}, además de que el sistema no debe permitir hacer acciones contrarias simultáneamente como abrir y cerrar una válvula de mariposa del sistema 1 al mismo tiempo, con la única excepción de bombear y retirar aceite, ya que esta acción permite circular el aceite intencionalmente a través del filtro, en caso de darse un cierre de emergencia se deben cerrar todas las válvulas correspondientes, además todas las señales utilizadas por el Controlador por Contactores son binarias por lo que para variables continuas como el ángulo de apertura de las válvulas y el nivel de aceite y presión en el tanque hidroneumático se hace uso de cuatro señales binarias para indicar niveles discretos de estas variables ya que no se utilizan señales analógicas o continuas.

Cada una de las dos válvulas de mariposa se trata como un sistema independiente, por lo que si se da una alarma en el sistema de la mariposa 2, esta se debe cerrar automáticamente junto con su bypass, pero el sistema 1 no se verá afectado, existe además una alarma de emergencia general, la cual se dispara por ejemplo si el Controlador por Contactores detecta que la temperatura de aceite en la reserva es demasiado elevada, en cuyo caso se deben cerrar las válvulas de ambos sistemas de manera automática.

Cuando el Controlador por contactores detecta que el nivel de aceite o presión en el acumulador está bajo o alto, a diferencia del Controlador PLC, no debe intentar corregir el problema, es solo hasta que el nivel alcanza un valor crítico que el Controlador por Contactores debe activar la alarma de emergencia general y cerrar de manera automática las válvulas que se encuentren abiertas.

Las únicas condiciones que disparan emergencias en el sistema 1 o 2 específicamente es que el ángulo de apertura de la mariposa disminuya mientras esta se encuentra en operación hasta que active el sensor de proximidad inductivo que se encuentra colocado a 76.5° de apertura o que el sistema central encienda la alarma de entrada de emergencia en el sistema específico, cualquier otra condición de alarma dispara la alarma general, estas condiciones se especifican en la tabla 2.

La selección de cual controlador es el que debe gobernar el sistema se la toma el usuario por medio de un interruptor de dos posiciones, un cero lógico en la variable Función manual indica que el gobernador es el Controlador PLC, mientras que un uno lógico indica que el módulo Controlador por Contactores se encuentra a cargo del sistema.

El Controlador por PLC no puede hacer una puesta en marcha si el sistema tiene variables fuera del rango de funcionamiento por seguridad, por lo que los procesos que se realizan con condiciones anormales como procesos de mantenimiento deben realizarse con el Controlador por Contactores.

Adicionalmente como parte de este proyecto se debe evaluar la propuesta de diseño del Taller Eléctrico del MET para aprobarlo o realizar recomendaciones según sea el caso.

5.2.7 Controlador PLC

El sistema elegido para implementar el controlador principal fue un PLC, este sistema se alimenta de la línea de 24 V_{CD} que tiene respaldo del banco de baterías de la represa hidroeléctrica, por lo que si la alimentación externa falla aun por extensos lapsos, el controlador no se vería afectado, el PLC elegido fue uno de la línea S7-300 de la marca SIEMENS el cual se programa con lenguaje de escalera utilizando el software STEP 7, a continuación se muestra la tabla con la información del PLC utilizado y sus módulos de expansión:

Tabla 4. Información de los módulos que conforman el controlador PLC en el bastidor 0.

Ranura	Módulo	Descripción
1	Vacío	Espacio exclusivo para la fuente (Opcional)
2	CPU 312C	Espacio exclusivo para la unidad central. CPU compacta con 10 entradas y 6 salidas digitales de 24 V _{CD}
3	Vacío	Espacio exclusivo para módulo de interfase, necesario únicamente para configuraciones con varios bastidores
4	SM 321 DI16xDC24V	Módulo de 16 entradas digitales a 24 V _{CD}
5	SM 321 DI16xDC24V	Módulo de 16 entradas digitales a 24 V _{CD}
6	SM 331 AI8x13Bit	Módulo de entradas 8 entradas analógicas de 13 bits
7	SM 322 DO8xRelés	Módulo de 8 salidas a relé de 24 Vcd @ 2 A. Salidas Generales
8	SM 322 DO8xRelés	Módulo de 8 salidas a relé de 24 Vcd @ 2 A. Salidas Mariposa 1
9	SM 322 DO8xRelés	Módulo de 8 salidas a relé de 24 Vcd @ 2 A. Salidas Mariposa 2
10	Vacío	Ranura de expansión disponible
11	Vacío	Ranura de expansión disponible

Como se puede apreciar en la tabla 4, el PLC 312C de SIEMENS y sus módulos de expansión se configuran por medio de bastidores en el programa STEP 7, cada bastidor puede almacenar 11 módulos de los cuales el primero, segundo y tercero están reservados para la fuente, el CPU y un módulo de interfase IM360, la fuente es opcional y en este proyecto se utiliza una fuente externa que se encuentra en el módulo Circuito de Alimentación por lo que esta ranura se encuentra vacía, algo similar ocurre con la ranura número 3, ya que el módulo de interfase IM 360 solo es necesario para configuraciones con mas de un bastidor, por esto esta ranura de expansión también se encuentra vacía.

Los CPU de la línea S7-300 pueden manejar de 1 a 4 bastidores dependiendo del CPU, es este caso la unidad central 312C solo puede manejar un bastidor que como se verá mas adelante es suficiente para los requerimientos del proyecto.

De las 11 ranuras existentes quedan entonces 8 para instalar módulos de expansión de entradas y salidas, de estos fueron utilizados solamente 6 espacios para abarcar las entradas y salidas requeridas y quedan disponibles 2 ranuras para expansiones en etapas posteriores a este proyecto de ser necesario, los principales requerimientos de PLC para el proyecto se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5. Requerimientos y capacidades del PLC S7-300 312C.

Recursos	Requeridos	Máximo Disponible	Disponible En configuración
Entradas Digitales	32	266	32 + 10
Entradas Analógicas	8	64	8
Salidas Digitales	21	262	24 + 6
Alimentación	24 V _{CD}	20.4 V _{CD} – 28.8 V _{CD}	24 V _{CD}
Comunicaciones	MPI, deseable Ethernet	MPI, Ethernet a través de módulo	MPI, espacio disponible para módulo Ethernet
Memoria de carga	8186 KB	Hasta 4 MB en tarjeta FLASH	64 KB
Memoria para Datos y Bloques	2496 KB	16 KB	16 KB

Otras características necesarias en el proyecto son que el PLC tenga una presencia fuerte en el mercado, un buen respaldo y alta disponibilidad de repuestos ahora y en años posteriores, se desea además que para etapas futuras del proyecto se tenga la posibilidad de establecer comunicaciones por medio de Ethernet. El PLC debe ser robusto, confiable y tener un diseño altamente modular.

Como se aprecia en la tabla 5, el PLC S7-300 312C elegido para el proyecto cumple con los requisitos para el proyecto, tiene suficiente cantidad de entradas y salidas tanto analógicas como digitales, suficiente memoria de carga y de datos, además cumple con las necesidades de comunicación, pues tiene capacidad de comunicarse utilizando el protocolo MPI que se requiere en este proyecto y además tiene la posibilidad de expansión para comunicación Ethernet, esta comunicación se planea implementar para etapas posteriores del proyecto, ya que en la represa se planea utilizar este mismo PLC y SCADA para montar otros proyectos adicionales a este, por eso es importante que se pueda expandir el número de entradas de ser necesario, todo esto hace que el CPU 312C de la línea S7-300 de SIEMENS sea muy conveniente para el proyecto, ya que además de lo expuesto anteriormente, SIEMENS es una de las marcas con las que el ICE cuenta con buenas relaciones y por lo tanto facilidad para obtener repuestos, factor clave en el proyecto, y sus soluciones ha sido ampliamente probadas por el ICE.

En el proyecto se requiere utilizar de 32 entradas digitales, estas se obtienen utilizando dos módulos de 16 entradas SM 321, los cuales funcionan a 24 V_{CD} como lo requiere el proyecto, todas las entradas están ocupadas, pero el CPU 312C es una unidad compacta, lo que significa que tiene integradas entradas y salidas, en este caso el CPU cuenta con 10 entradas digitales a 24 V_{CD} que pueden utilizarse de ser necesario en caso de emergencia si alguna de las entradas falla, estas entradas se dejaron sin utilizar para proteger a la unidad central que es la parte mas cara de los módulos utilizados.

Adicionalmente el proyecto necesita de 8 entradas analógicas con capacidad de manejar entradas de lazo de corriente de 4 a 20 mA, para este propósito se hizo uso de un módulo SM 331, este tiene 8 entradas que pueden ser configuradas para aceptar lazos de corriente de 4 a 20 mA y tiene una resolución de 13 bits lo que significa una resolución de mas de 1/8000 veces el valor máximo del rango a medir, por lo que es una excelente opción para el sistema.

El sistema requiere de 21 salidas digitales, las cuales deben polarizar bobinas de contactores y relés cuya corriente varía entre 50 y 300 mA, para esto se decidió utilizar

tres módulos SM 322 de 8 salidas a relé de 2 A con un voltaje de salida de 24 V_{CD}, esto tiene la desventaja de que se necesita de tres de las ocho ranuras de expansión del bastidor en comparación de utilizar dos módulos con un mayor número de salidas.

De la misma manera esta situación trae algunas ventajas por las que se tomó la decisión de utilizar estos módulos, las salidas a relé son más propensas a fallar debido al finito número de transiciones que pueden realizar los relés, adicionalmente las salidas son susceptibles a daños por sobrecargas o cortocircuitos, por lo que es más económico reemplazar un módulo de 8 salidas en caso de un daño en una salida en vez de reemplazar un módulo con un mayor número de salidas.

Además al utilizar módulos de 8 salidas es posible separar las salidas correspondientes al sistema de la mariposa 1 de las salidas correspondientes al sistema de la mariposa 2, ya que cada uno utiliza 7 salidas, por lo que si ocurre un error en el módulo de las salidas del sistema 2, el sistema 1 puede seguir funcionando sin verse afectado.

Finalmente al igual que con las entradas, la unidad compacta 312C tiene 6 salidas digitales integradas capaces de manejar voltajes de salida de 24 V_{CD} con una corriente de 500 mA, estas no fueron utilizadas para proteger a la costosa unidad central, por lo que en caso de una emergencia, y si las 3 salidas libres han sido utilizadas para reemplazar salidas dañadas, aun se dispondría de estas 6 salidas como opción de reemplazo para salidas dañadas.

5.2.8 Computadora con SCADA

Para implementar el sistema SCADA que realiza la monitorización de las variables, se decidió utilizar una pantalla táctil para mayor comodidad para el usuario y ofrecer una mayor ergonomía, adicionalmente debido a la gran humedad del ambiente en el área donde se instalará el equipo no es conveniente instalar dispositivos externos al gabinete o que implique tener que abrir el gabinete cada vez que se utilice el equipo.

Una de las especificaciones para este proyecto consiste en que el sistema de monitorización tenga la capacidad de publicar los datos del sistema en la red de la planta hidroeléctrica por medio de un servidor WEB, adicionalmente el sistema debe poder guardar datos del estado y funcionamiento de las válvulas de mariposas en un servidor de datos que permita conocer datos de los estados anteriores del sistema para poder buscar las causas de una falla en caso de que se dé una, este servidor de datos no existe actualmente en la empresa por lo que se deberá crear uno.

De lo anterior se aprecia que el sistema a utilizar para intercambiar datos con el usuario y realizar las funciones de monitorización debe tener satisfacer una serie de requerimientos, primero, capacidad para comunicarse con el Controlador PLC por medio de un protocolo MPI, además deberá de tener la capacidad para implementar un servidor de datos con una base de datos correspondiente a los estados anteriores del sistema y de ejecutar un servidor WEB que permita publicar la información del sistema por medio del protocolo HTTP, todo esto en un sistema con una alta protección contra la humedad.



Figura 14. Panel PC industrial con pantalla táctil PC217A.

Por los requerimientos mencionados anteriormente se eligió el panel PC industrial con pantalla táctil PC217A, ya que este ofrece una pantalla LCD táctil de 17 pulgadas con una resolución de 1280x1024 píxeles, un índice de protección de NEMA 4 e IP65 cuando se instala en un gabinete para proteger la parte trasera, pero principalmente por que es una computadora completa que ofrece la flexibilidad de una sistema operativo como Windows XP para implementar los servidores necesarios para el sistema, el SCADA y la interfase humano-máquina todo integrado en un solo equipo, esta computadora tiene un procesador celaron de 2.0 GHz, 1GB de memoria RAM, y un disco duro de 80 GB, por lo que tiene los recursos para ejecutar los servidores y el SCADA de manera simultanea, además tiene 2 puertos USB para facilitar la movilización de la base de datos si la red falla, tiene cuatro puertos de comunicación serial y un puerto Ethernet con capacidades 10/100/1000Mbps BaseT, todo esto en un dispositivo de robustez industrial que tiene la capacidad para hacer modificaciones directamente al programa del PLC y el SCADA de ser necesario.

Para poder implementar la comunicación hacia el PLC utilizando el protocolo MPI, fue necesario utilizar el adaptador SIEMENS 6ES7 972-0CA1x-0XA0 para convertir señales MPI a RS-232, ya que la PC217A utiliza el protocolo RS-232 en sus cuatro puertos seriales, este adaptador junto con el computador industrial conforman el módulo Computadora con SCADA.

5.2.9 Supervisión Remota

El módulo supervisión remota corresponde a los clientes del servidor WEB, los cuales podrán acceder a las pantallas que conforman el SCADA y la base de datos por medio de cualquier computadora con acceso a la red de la Represa Hidroeléctrica de Sandillal, solamente se necesita que la computadora tenga un navegador de Internet como el Internet Explorer V6.0 o superior, pues los datos se intercambian por medio de un servidor WEB utilizando el protocolo HTTP sobre TCP/IP, si se permite el acceso a una

dirección IP pública para el servidor WEB se puede acceder a los datos del estado actual y a la base de datos de los estados anteriores utilizando una computadora con acceso a Internet desde cualquier parte del mundo o inclusive desde una agenda personal o teléfono móvil con capacidad para desplegar páginas de Internet con protocolo HTTP, por lo que para el personal de la represa no es necesario ir hasta la ubicación del gabinete del sistema para acceder al SCADA, solamente se requiere que inicien una sesión desde la computadora en su oficina. Este es uno de los módulos de hardware que no se encuentra dentro del gabinete.

Por último, todo el Hardware a excepción de los módulos Supervisión Remota y Sensores se encuentra protegido de la alta humedad ambiental del lugar, esta protección se logra alojando el equipo dentro de un gabinete de dimensiones adecuadas, y con un índice de protección adecuado para el ambiente del lugar.

5.3 Descripción del software

Se procede ahora a hacer una explicación detallada de las rutinas de software escritas para el proyecto y las pantallas que conforman el SCADA y por último la programación realizada para configurar la página de Internet en la que se publica la información generada por el SCADA para la monitorización del sistema.

5.3.1 Software en PLC

En esta sección se encuentra una descripción detallada del programa en el PLC, presenta un diagrama de bloques con todos los bloques del sistema y su jerarquía, el diseño es altamente modular, por lo que si se desea optimizar el bloque que realiza alguna función como por ejemplo el algoritmo utilizado para controlar el nivel de aceite o la presión del tanque hidroneumático, este cambio no afectará el funcionamiento de los otros bloques.

El PLC utilizado corresponde al SIEMENS S7-300 312C, este PLC y sus módulos de expansión se programan y configuran utilizando el software Step 7 de la misma compañía, para configurar los módulos en este programa se organizan en bastidores con una capacidad de 11 módulos por bastidor, el CPU 321C solo puede utilizar un bastidor, la distribución de los módulos en las ranuras del bastidor se muestra en la tabla 3 en el apartado 5.2.7.

El programa requiere de 31 entradas digitales, 8 entradas analógicas y 21 salidas digitales, además utiliza un bloque operacional, 8 bloques de funciones y 18 bloques de datos, uno por cada instancia de un bloque de función, se utiliza también un bit de la memoria de marcas para seleccionar la bomba que esta trabajando, lo que utiliza un total de 8186 KB de memoria de carga y 2496 KB de memoria de datos, la comunicación con la computadora, ya sea para programación o intercambio de datos con el SCADA se de por medio del protocolo MPI.

El único módulo que requiere de una configuración especial es el de entradas analógicas, el cual requiere que todas sus entradas sean configuradas como lazos de corriente de 4 a 20 mA y que utilicen un tiempo de integración que permita una alta inmunidad al ruido con una frecuencia de 60 Hz.

El programa Step 7 permite utilizar tres distintos lenguajes para programar los PLC, diagramas de escalera, lista de instrucciones y diagrama de funciones, en este proyecto se utiliza diagramas de escalera por el tipo de proceso a controlar y por la facilidad de verificación de funcionamiento que ofrece el Step 7 con este lenguaje de programación, el diseño del software del PLC es modular y tiene una jerarquía como la que se muestra en la figura 15:

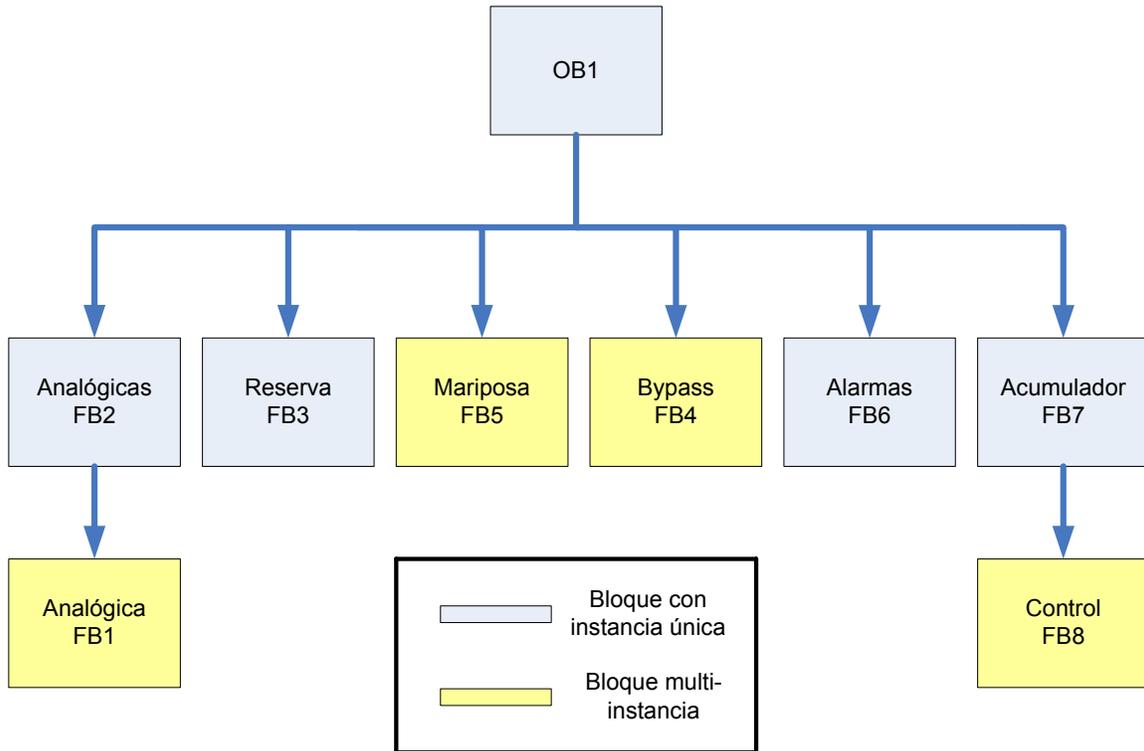


Figura 15. Diagrama de bloques del programa del PLC.

En la figura 15 se puede observar el diagrama de bloques que representa como esta conformado el programa el PLC, en esta figura los bloques de color azul corresponden a subrutinas que solo tienen una instancia en el programa y los bloques de color amarillo representan rutinas a las que se recurre varias veces en el programa, por ejemplo el bloque Analógica tiene 8 instancias simultaneas en el proyecto, el resto de bloques amarillos tiene dos, cada instancia de un bloque de función esta asociada a un bloque de datos, únicamente el bloque de operación OB1 no tiene asociado un bloque de datos, por lo que en el programa hay un total de 18 bloques de datos.

En la tabla 6 se muestran las entradas del sistema, en la tabla 7 las salidas, luego se procede ahora a hacer una descripción de cada uno de los bloques que conforman el programa.

Tabla 6. Entradas del programa PLC con su descripción.

Entradas	Tipo	Descripción
InicioMar1	BOOL	Indicador Mariposa 1 completamente cerrada
FinalMar1	BOOL	Indicador Mariposa 1 completamente abierta
InicioBypass1	BOOL	Indicador Bypass 1 completamente abierto
FinalBypass1	BOOL	Indicador Bypass 1 completamente cerrado
AceiteH	BOOL	Indicador Buen nivel de aceite en la reserva
AceiteL	BOOL	Indicador Nivel de aceite demasiado bajo en la reserva
BloqueoMecanico1	BOOL	Indicador de bloqueo mecánico en la mariposa 1
TemperaturaH	BOOL	Indicador Temperatura de aceite demasiado alta
FalloBomba1	BOOL	Indicador Fallo en bomba 1
FalloBomba2	BOOL	Indicador Fallo en bomba 2
FiltroSucio	BOOL	Indicador Filtro de aceite sucio
Emer1R	BOOL	Indicador Cierre por emergencia de mariposa 1 recibido de control central
AbrirM1	BOOL	Indicador Orden de sistema central de abrir mariposa 1
CerrarM1	BOOL	Indicador Orden de sistema central de cerrar mariposa 1
FalloMeca1	BOOL	Indicador Fallo mecánico recibido para el sistema de la mariposa 1
FalloElect1	BOOL	Indicador Fallo eléctrico recibido para el sistema de la mariposa 1
ParoER	BOOL	Indicador Paro de emergencia recibido de sistema central
ParoEM	BOOL	Indicador Paro de emergencia recibido de botonera
FuncionManual	BOOL	Indicador Funcionamiento manual, control a botonera
ManualRemoto	BOOL	Indicador Controlador central en funcionamiento manual
Inundacion	BOOL	Indicador Inundación en el área de sistema hidráulico
BloqueoMecanico2	BOOL	Indicador de bloqueo mecánico en la mariposa 2
InicioMar2	BOOL	Indicador Mariposa 2 completamente cerrada
FinalMar2	BOOL	Indicador Mariposa 2 completamente abierta
InicioBypass2	BOOL	Indicador Bypass 2 completamente abierto
FinalBypass2	BOOL	Indicador Bypass 2 completamente cerrado
AbrirM2	BOOL	Indicador Orden de sistema central de abrir mariposa 2
CerrarM2	BOOL	Indicador Orden de sistema central de cerrar mariposa 2
FalloMeca2	BOOL	Indicador Fallo mecánico recibido para el sistema de la mariposa 2
FalloElect2	BOOL	Indicador Fallo eléctrico recibido para el sistema de la mariposa 2
Emer2R	BOOL	Indicador Cierre por emergencia de mariposa 2 recibido de control central
AceiteLL	BOOL	Indicador Nivel de aceite demasiado bajo en la reserva
ReconoceAlarmas	BOOL	Señal que reinicia el estado de las alarmas
PresionArriba1A	WORD	Valor analógico de presión de aguas arriba en la mariposa 1
PresionAbajo1A	WORD	Valor analógico de presión de aguas abajo en la mariposa 1
Angulo1A	WORD	Valor analógico del ángulo de apertura de la válvula de mariposa 2
PresionA	WORD	Valor analógico de la presión de aire en el tanque hidroneumático
NivelA	WORD	Valor analógico de nivel de aceite en el tanque hidroneumático
PresionArriba2A	WORD	Valor analógico de presión de aguas arriba en la mariposa 2
PresionAbajo2A	WORD	Valor analógico de presión de aguas abajo en la mariposa 2
Angulo2A	WORD	Valor analógico del ángulo de apertura de la válvula de mariposa 2

Tabla 7. Salidas del programa PLC con su descripción.

Salidas	Tipo	Descripción
MasAire	BOOL	Acción de agregar aire comprimido al tanque hidroneumático
MenosAire	BOOL	Acción de sacar aire del tanque hidroneumático
Bomba1ON	BOOL	Acción de encender la bomba 1
Bomba2ON	BOOL	Acción de encender la bomba 2
MenosAceite	BOOL	Acción de sacar aceite del tanque hidroneumático
ParoEmergencia	BOOL	Alarma de paro por emergencia
AlarmaLeve	BOOL	Alarma leve en el sistema
Mar1Abrir	BOOL	Acción de abrir la mariposa 1
Mar1Cerrar	BOOL	Acción de cerrar la mariposa 1
Mar1Presurizar	BOOL	Acción de presurizar el sistema hidráulico de la mariposa 1
AbrirB1	BOOL	Acción de abrir Bypass 1
CerrarB1	BOOL	Acción de cerrar bypass 1
Mar1Operando	BOOL	Mariposa 1 en operación
CierreE1O	BOOL	Alarma de cierre de emergencia de la mariposa 1
Mar2Abrir	BOOL	Acción de abrir la mariposa 2
Mar2Cerrar	BOOL	Acción de cerrar la mariposa 2
Mar2Presurizar	BOOL	Acción de presurizar el sistema hidráulico de la mariposa 2
AbrirB2	BOOL	Acción de abrir Bypass 2
CerrarB2	BOOL	Acción de cerrar bypass 2
Mar2Operando	BOOL	Mariposa 2 en operación
CierreE2O	BOOL	Alarma de cierre de emergencia de la mariposa 2

En las tablas 6 y 7 se enlistan las entradas y las salidas del programa del PLC, sin embargo los datos contenidos en los bloques de datos asociados a los bloques de función pueden ser accedidos por el SACADA, por lo que la cantidad de variable intercambiadas con el Panel PC industrial es mayor a la mostrada en estas tablas.

Adicionalmente todos los bloques que conforman el programa desactivan sus salidas si el sistema se encuentra en funcionamiento manual, ya que el control se le concede al controlador por contactores, únicamente quedan activas las funciones de monitorización, por lo que el usuario podrá seguir visualizando el estado del sistema en el SCADA y generar reportes de funcionamiento.

OB1

El bloque operacional OB1 es el ciclo principal, se repite infinitamente mientras el PLC se encuentre en modo RUN, este bloque es el encargado de llamar a las subrutinas que realizan las funciones del sistema, una vez que se termina de ejecutarlas, se vuelve a ejecutar el bloque OB1, esto se repite infinitamente mientras el PLC se encuentre en modo RUN, la única función del bloque es llamar a las subrutinas y lo hace en el siguiente orden: Analógicas, Reserva, Mariposa1, Bypass1, Mariposa2, Bypass2, Alarmas y Acumulador, luego de completar la ejecución de las subrutinas el ciclo vuelve a comenzar, este bloque se encarga del intercambio de variables entre los otros bloques, además en este bloque se definen los rangos a los que se mantendrán las variables del sistema y los niveles a los que se activan las alarmas.

Analógicas

La subrutina Analógicas esta implementada en forma de un bloque de función, tiene la función de tomar las 8 entradas analógicas y convertirlas de un valor binario a un valor real dentro de un rango de medición, por ejemplo toma el valor binario de la presión de aguas arriba y lo convierte en un número real entre 0 y 10 que corresponde al rango de medición, para lograr esto recurre a la subrutina Analógica en 8 instancias simultaneas, una para cada variable analógica, tiene como insumos las entradas analógicas y sus rangos de medición, luego retorna los valores reales, la llamada a las subrutinas hace que la conversión se realice en el siguiente orden: PresionArriba1, PresionAbajo1, Angulo1, Presion, Nivel, PresionArriba2, PresionAbajo2 y finalmente Angulo2.

Analógica

Esta subrutina que corresponde al bloque de función 1, es utilizada por el bloque de función Analógicas para convertir el valor binario de una entrada analógica a un valor real dentro del su rango de medición, tiene como entradas el valor de la señal analógica y su rango de medición, y devuelve su valor como número real dentro del rango de medición, tiene 8 instancias simultaneas en el proyecto, una por cada entrada analógica del PLC, el algoritmo utilizado por la subrutina se muestra a continuación:

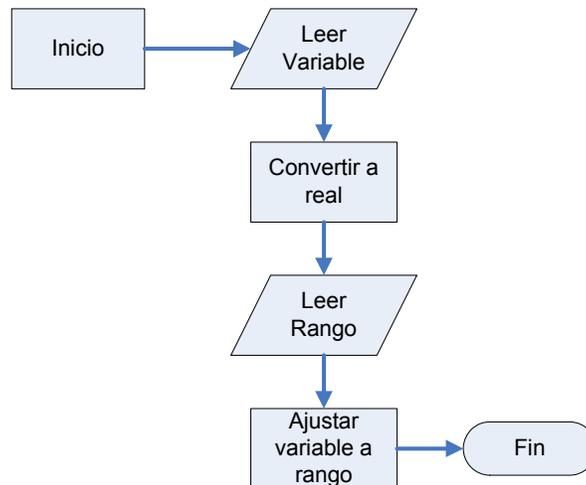


Figura 16. Algoritmo utilizado por el bloque Analógica.

En la figura 16 se muestra el algoritmo utilizado para convertir la variable de su valor en base binaria a un valor real dentro del rango de medición, primero se toma el valor y se convierte a entero, luego a real y por último se ajusta el valor al rango con el siguiente procedimiento: se divide entre el valor máximo representable en base binaria con 15 bits, se multiplica por el valor del rango y se le suma el valor mínimo del rango, luego de esto el valor de la variable es un número real dentro del rango de medición, este cálculo se muestra en la fórmula (5.1).

$$RealRango = \frac{(RangoMax - RangoMin)}{2^{15}} \times ValorBase_2 + RangoMin \quad (5.1)$$

Reserva

Este bloque de función es el encargado de monitorizar el estado del tanque de la reserva, genera las alarmas que indican si el nivel de aceite esta bajo o si la temperatura del aceite es muy elevada, utiliza en algoritmo mostrado en la siguiente figura:

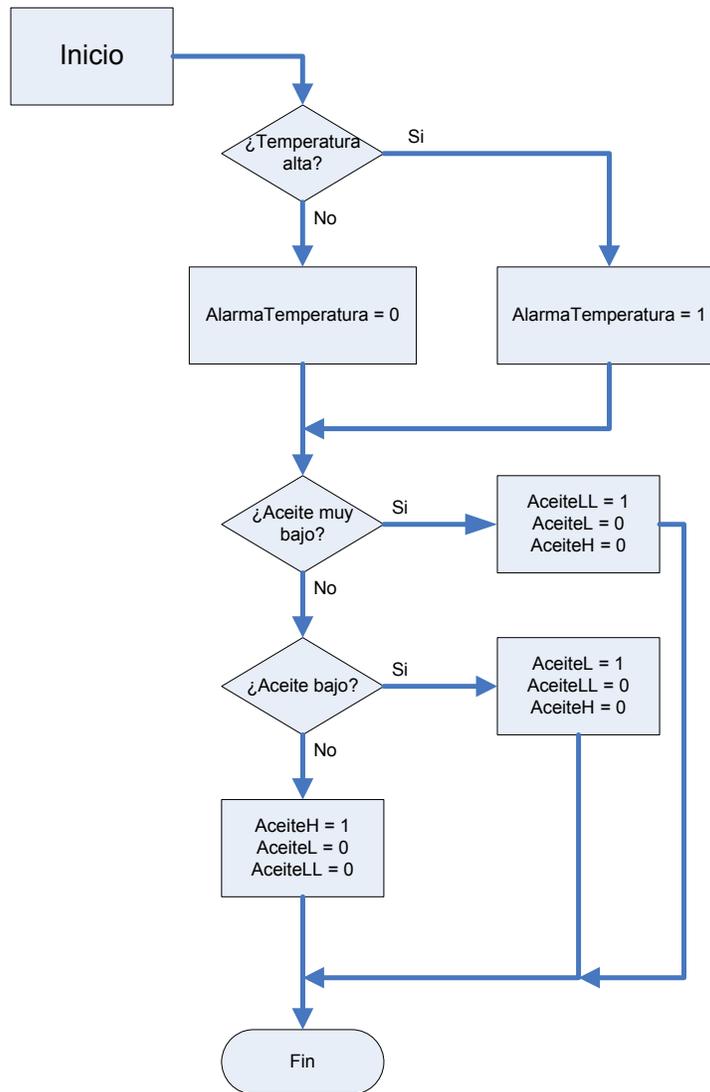


Figura 17. Algoritmo utilizado por el bloque Reserva.

En la figura 17 se muestra el algoritmo utilizado para monitorizar el estado del tanque de reserva de aceite, solo puede estar activo un indicador de nivel de aceite en el tanque a la vez.

Mariposa

El bloque de función 5 corresponde a la subrutina encargada de realizar la monitorización y control de una válvula de mariposa, debido a que en el sistema hay

dos válvulas de mariposa, este bloque tiene dos instancias en el proyecto, el algoritmo utilizado para esta subrutina se muestra a continuación:

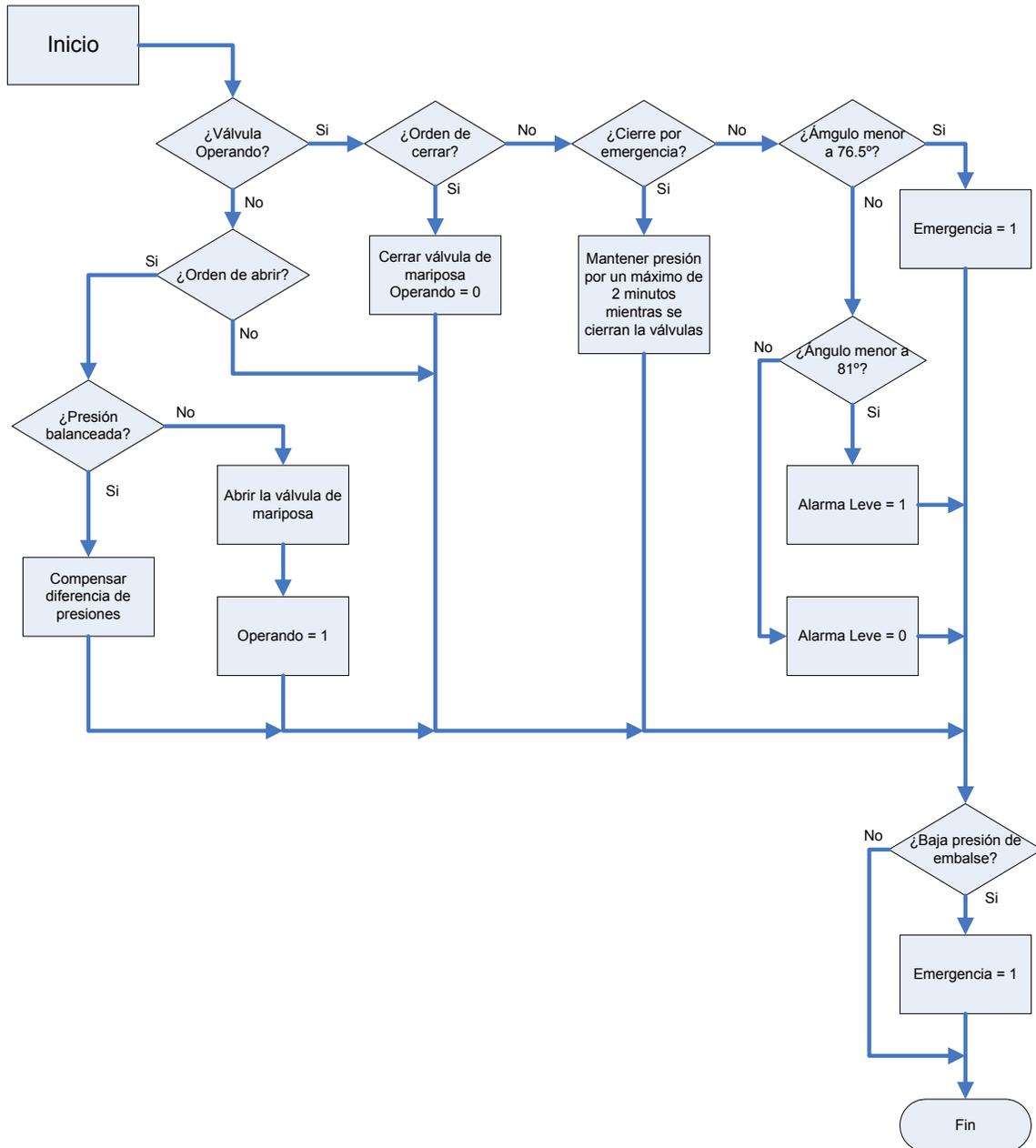


Figura 18. Algoritmo utilizado por el bloque Mariposa.

El algoritmo utilizado para controlar y monitorizar las válvulas de mariposa se muestra en la figura 18, la señal de emergencia generada por el bloque va hacia el bloque alarmas, el cual a su vez responde con una señal de cierre por emergencia, cuando se da una emergencia que amerite el cierre de emergencia de la válvula, se mantiene la presión en el sistema hidráulico por dos minutos mientras se cierran las válvulas correspondientes si se logra cerrar las válvulas antes de los dos minutos se retira la presión antes, el bloque de alarmas también activa una alarma de cierre por emergencia

cuando se presenta una situación grave en el resto del sistema, como por ejemplo una temperatura muy elevada en el aceite.

Existe una señal de bloqueo en el pistón de mariposa que se activa cuando se inserta un pin para bloquear el movimiento de la mariposa, si esta señal se encuentra activa el sistema deshabilita las salidas de abrir o cerrar la mariposa.

Las turbinas utilizadas para impulsar los generadores eléctricos de la represa son del tipo Kaplan, estas turbinas ajustan el ángulo de sus álabes para mantener una alta eficiencia aun si el caudal a través de la turbina cambia, pero si el caudal se sale del rango tolerado la eficiencia disminuye rápidamente y el equipo AVR(Regulador Automático de Voltaje) puede sufrir daños, por esto si se da una disminución en el caudal, ya sea por una disminución en el ángulo de apertura de la mariposa o una disminución en la presión de aguas arriba, se debe realizar un cierre de emergencia.

Bypass

La rutina utilizada para controlar las válvulas de bypass se implementó en el bloque de función FB4, esta rutina controla y monitoriza el estado de una válvula de bypass, por lo que tiene dos instancias simultáneas en el proyecto, una para cada bypass presente, la subrutina utiliza el algoritmo mostrado en la siguiente figura:

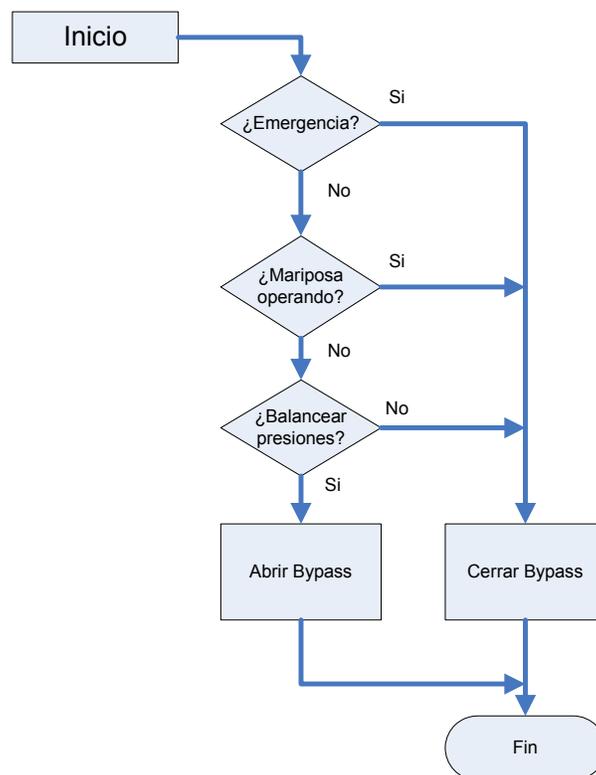


Figura 19. Algoritmo utilizado por el bloque Mariposa.

En la figura 19 se aprecia el algoritmo utilizado para la subrutina Bypass, en esta se aprecia que el bypass debe permanecer cerrado en todo momento, con la única excepción de cuando se esta igualando la presión.

La mariposa necesita que la presión de aguas arriba sea igual a la presión de aguas abajo antes de poder abrirse, por lo que si se da una orden de abrir la mariposa primero se prueba que la presión a ambos lados de esta sea igual, si esta no es igual se debe compensar la diferencia por medio del bypass antes de abrir la mariposa, cuando la presión es igual a los lados de la mariposa se procede a abrirla, en este momento se debe cerrar nuevamente la válvula de bypass.

Acumulador

La subrutina utilizada para controlar y monitorizar el funcionamiento del tanque hidroneumático se encuentra en el bloque de función Acumulador, es la encargada de monitorizar el nivel de aceite y la presión en el acumulador, además del estado de las bombas y filtro de aceite, adicionalmente la subrutina debe controlar y balancear la carga de trabajo de las dos bombas de aceite del sistema y controlar el nivel de aceite y la presión en el acumulador, para controlar estas dos variables la rutina utiliza dos instancias la subrutina Control, el algoritmo utilizado es el siguiente:

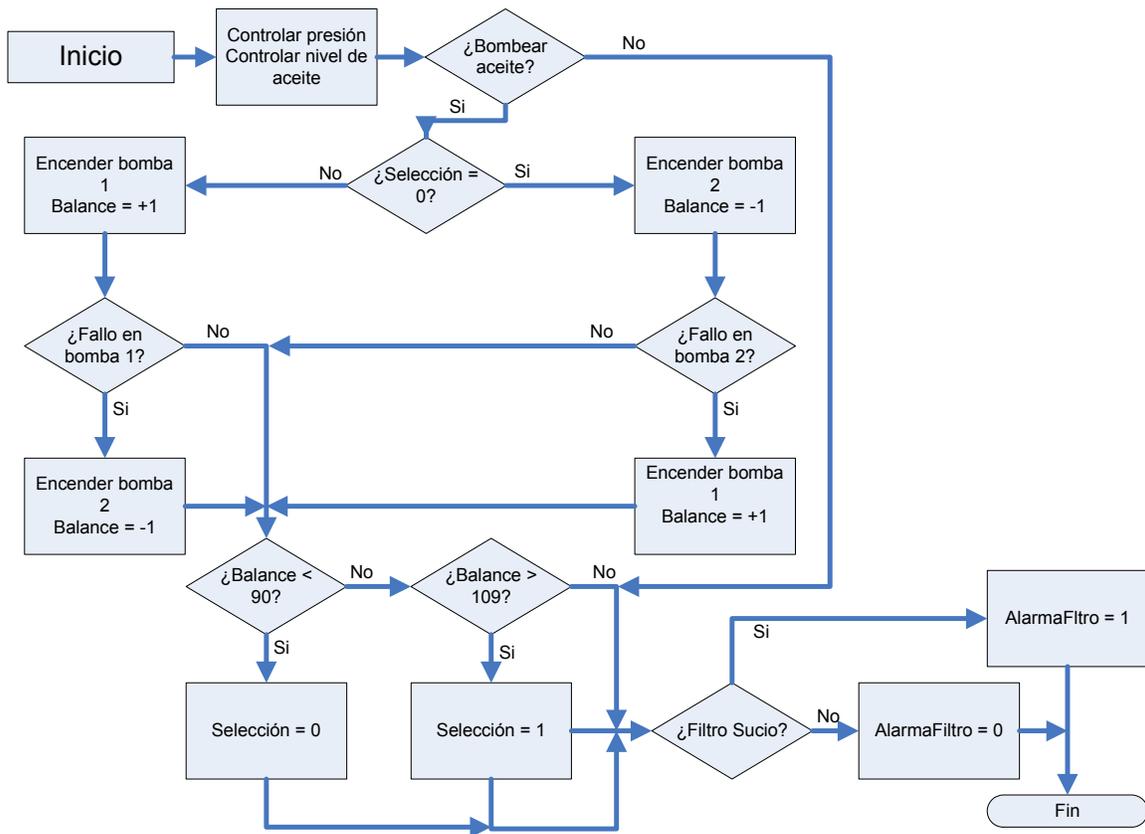


Figura 20. Algoritmo utilizado por la rutina Acumulador.

En la figura 20 se puede apreciar el algoritmo utilizado para monitorizar y controlar el estado del tanque hidroneumático, lo primero que se hace es ejecutar la subrutina para controlar el nivel de aceite y la presión del acumulador, posteriormente si la rutina de control de nivel de aceite indica que es necesario bombear aceite se procede a

encender la bomba de aceite elegida para realizar el trabajo, si esta bomba falla se procede a elegir la otra bomba para poder aumentar el nivel de aceite en el acumulador, la elección de la bomba principal para bombear el aceite la debe tomar el sistema de forma automática, el sistema debe procurar que la carga de trabajo sea distribuida equitativamente entre las dos bombas de manera que la frecuencia con la que halla que dar mantenimiento a las bombas se vea disminuida.

Para lograr balancear la carga de trabajos entre las dos bombas se procedió a utilizar la variable Selección, si esta variable vale cero entonces la bomba principal es la bomba 1, pero si Selección vale 1, entonces la bomba principal es la número 2, adicionalmente se hace uso de la variable Balance, esta toma inicialmente un valor de 100 cuando el sistema arranca, luego cada vez que se utiliza la bomba 1 el valor de Balance se incrementa en uno, cuando este valor supera 109, se hace un cambio de bomba principal hacia la número 2 cambiando el valor de Selección a 1, ahora cada vez que la bomba 2 se encienda se sustrae uno al valor de Balance, si este valor es menor a 90 entonces la bomba 1 vuelve a ser la principal ya que se cambia el valor de Selección a cero nuevamente y el ciclo vuelve a comenzar, el efecto de este balanceo de la carga de trabajo es que cada vez que una bomba se utiliza veinte veces para bombear aceite la otra toma su lugar para las veinte siguientes operaciones de bombeo.

Adicionalmente la subrutina se encarga de monitorizar el estado del filtro de aceite por lo que si la presión diferencial en el filtro de aceite supera los cinco bar activando el interruptor de presión diferencial instalado en el filtro, la subrutina debe indicarle al bloque Alarmas que el filtro está sucio para que este genere la alarma correspondiente.

Control

Esta subrutina se encarga de mantener una variable continua del sistema dentro de un rango indicado, además se encarga de generar las alarmas correspondientes si el valor de la variable se sale del rango especificado, debido a que el sistema cambia los valores de las variables lentamente y a que no se dispone de válvulas proporcionales ni controladores para la velocidad del motor, el control implementado es del tipo ON-OFF con histéresis, por lo que por ejemplo si una variable disminuye y es necesario aumentarla la subrutina Control da el orden de incrementarla, no hasta el limite inferior del rango si no hasta una posición central en el rango, disminuyendo así las veces que es necesario corregir los valores de las variables ahorrando energía y disminuyendo el desgaste de los actuadores del sistema como los motores ocasionado por arranques y paradas frecuentes.

Esta subrutina se implementó en el bloque de función FB8, tiene dos instancias simultaneas en el proyecto, la primera para controlar y monitorizar la presión en el tanque hidroneumático donde la subrutina debe generar las alarmas correspondientes y la orden de retirar o agregar aire comprimido al sistema, y la segunda para el nivel de aceite en el acumulador, donde debe generar las ordenes e retirar o bombear aceite hacia el tanque acumulador con las alarmas correspondientes, el algoritmo utilizado para crear esta subrutina se muestra a continuación.

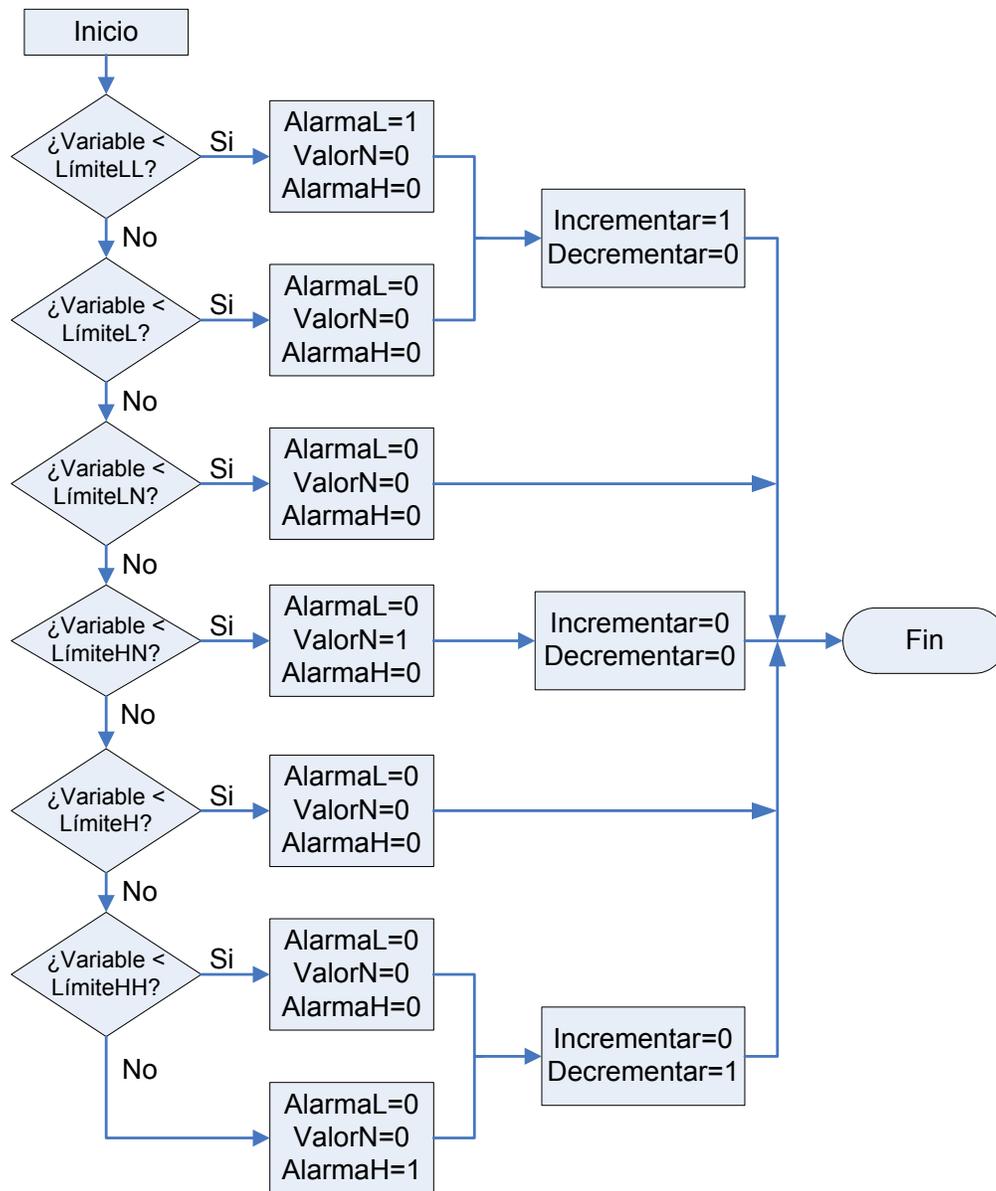


Figura 21. Algoritmo utilizado por la subrutina Control.

El algoritmo desarrollado para implementar el control ON-OFF con histéresis se aprecia en la figura 21, si el valor de la variable a controlar es menor que el límite demasiado bajo, se activa la alarma de valor bajo y se da la orden de incrementar el valor, si el valor de la variable está entre el valor del límite muy bajo y el valor de límite bajo se da la orden de incrementar la variable y se desactivan las alarmas, si la variable está entre el valor de límite bajo y el valor de límite bajo normal no se cambia nada, si la orden de incrementar estaba activa, esta sigue activa por la histéresis del controlador, si el valor está entre el límite normal bajo y normal alto se deja de incrementar o disminuir las variables, de igual manera se desactivan las alarmas, si el valor sobrepasa el límite normal alto pero es menor al límite alto, no se hace nada, si se estaba reduciendo el valor, se sigue haciendo por la histéresis, si el valor se encuentra entre el límite alto y el límite demasiado alto, se da la orden de disminuir el valor de la variable, por último, si el valor de la variable es mayor al valor del límite demasiado alto además de disminuir el

valor de la variable se activa la alarma de valor alto, las alarmas generadas por el bloque Control van hacia el bloque Alarmas y generan paros de emergencia o las acciones necesarias.

Alarmas

Antes de discutir el funcionamiento del bloque se muestra una tabla con la clasificación de las alarmas del sistema:

Tabla 8. Alarmas del sistema con su descripción.

Alarma	Dispara	Descripción
Angulo1LL	Cierre por emergencia en sistema 1	Angulo de apertura muy bajo en mariposa 1
FalloMec1	Cierre por emergencia en sistema 1	Controlador central indica fallo mecánico en sistema 1
FalloElect1	Cierre por emergencia en sistema 1	Controlador central indica fallo eléctrico en el sistema 1
Emer1	Cierre por emergencia en sistema 1	Controlador central indica emergencia en sistema 1
SinPressA1	Cierre por emergencia en sistema 1	Baja presión de aguas arriba de la mariposa 1
Angulo2LL	Cierre por emergencia en sistema 2	Angulo de apertura muy bajo en mariposa 2
FalloMec2	Cierre por emergencia en sistema 2	Controlador central indica fallo mecánico en sistema 2
FalloElect2	Cierre por emergencia en sistema 2	Controlador central indica fallo eléctrico en el sistema 2
Emer2	Cierre por emergencia en sistema 2	Gobernador indica emergencia en sistema 2
SinPressA2	Cierre por emergencia en sistema 2	Baja presión de aguas arriba de la mariposa 2
AceiteLR	Alarma Leve	Poco aceite en la reserva
AnguloL1	Alarma Leve	Angulo de apertura 1 bajo
AnguloL2	Alarma Leve	Angulo de apertura 2 bajo
FiltroSucio	Alarma Leve	Filtro de aceite sucio
FalloBomba1O	Alarma Leve	Fallo en la bomba número 1
FalloBomba2O	Alarma Leve	Fallo en la bomba número 2
TemperaturaH	Paro de emergencia	Temperatura de aceite muy alta
AceiteLA	Paro de emergencia	Demasiado poco aceite en el acumulador
AceiteHA	Paro de emergencia	Demasiado aceite en el acumulador
PresionH	Paro de emergencia	Presión en acumulador demasiado alta
PresionL	Paro de emergencia	Presión en acumulador demasiado baja
AceiteLLR	Paro de emergencia	Demasiado poco aceite en la reserva
Inundación	Paro de emergencia	Inundación detectada en el área del sistema
ParoLocal	Paro de emergencia	Paro de emergencia indicado por el usuario
ParoExterno	Paro de emergencia	Paro de emergencia indicado por el controlador central

En la tabla 8 se encuentra la clasificación de las alarmas del sistema con su respectiva descripción, los tipos de alarmas son leve, paro de emergencia, cierre por emergencia 1 y cierre por emergencia 2, las alarmas de cierre por emergencia 1 y 2 además de la alarma de paro de emergencia no se desactivan aun cuando la situación que las disparó se normaliza, por cuestiones de seguridad requieren ser reconocidas por el usuario

utilizando el SCADA antes de desactivarse, ahora se muestra el algoritmo utilizado por el sistema:

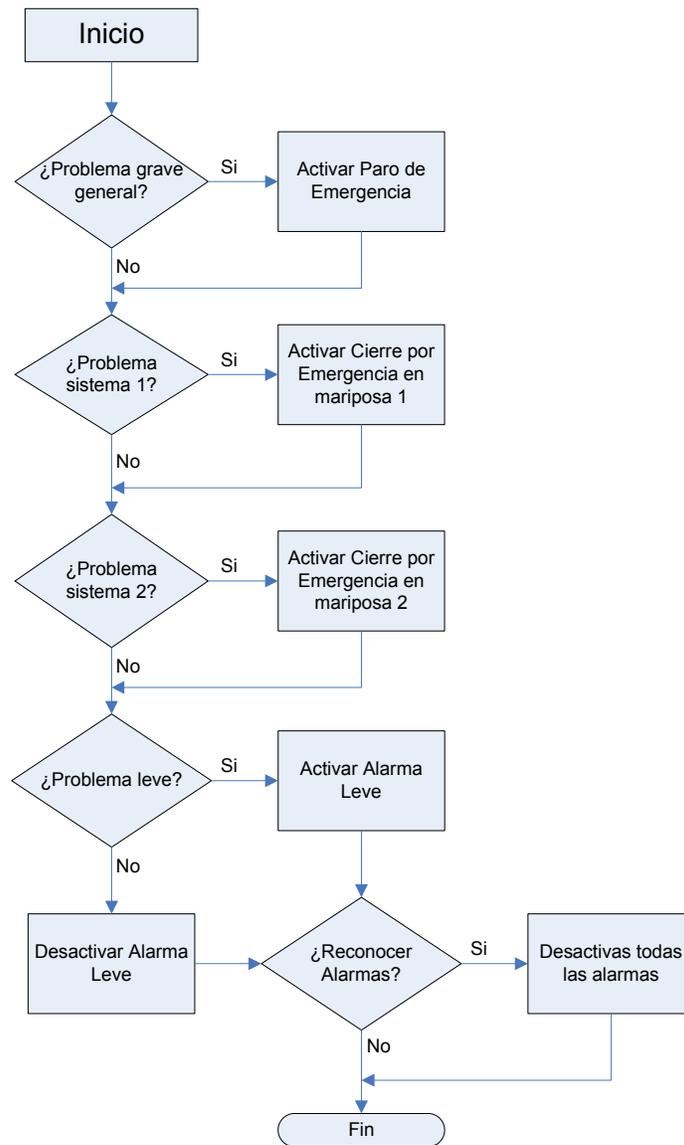


Figura 22. Algoritmo utilizado por la rutina Alarmas.

Como se puede observar en el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para implementar el bloque Alarmas de la figura 22, el sistema evalúa las condiciones y el estado del equipo en busca de alarmas, si detecta la presencia de algún problema grave en el sistema como por ejemplo una inundación, activa la alarma de Paro de Emergencia, si detecta un problema grave en uno de los dos sistemas como por ejemplo una presión muy baja en las aguas del embalse, entonces activa la alarma de Cierre por Emergencia en el sistema correspondiente sin afectar e sistema que está libre de problemas, por seguridad todas estas alarmas quedan activas aún cuando se normalice la condición que las disparó, la manera de desactivarlas es que el usuario reconozca las alarmas utilizando el SCADA.

Para el caso de las alarmas leves, el sistema las activa cuando detecta un problema leve, pero tan pronto como la condición que disparó la alarma vuelva a la normalidad la Alarma Leve se desactivará, ya que este tipo de alarmas no necesita reconocimiento del usuario.

Existe una manera adicional para desactivar las alarmas en caso de que el SCADA no esté funcionando o se encuentre dañado, esta consiste en pasar el sistema momentáneamente a funcionamiento manual y luego volverlo a funcionamiento automático, este procedimiento es para casos de emergencia, el sistema no está diseñado para este procedimiento si no hay emergencias y alguna mariposa se encuentra operando.

5.3.2 Descripción detallada del software de la PC

La PC utilizada corresponde a un panel PC industrial con pantalla táctil, el cual tiene el sistema operativo Windows XP, el programa de la PC se divide principalmente en dos partes, la primera, el SCADA con el servidor de datos y la segunda, el servidor WEB para publicar los datos.

Para implementar el servidor WEB se utilizó el APACHE HTTP Server v2.2, que corresponde al servidor WEB de distribución libre más utilizado en Internet, la única configuración requerida es cambiar dos líneas del archivo de texto http.config para apuntar el servidor a la carpeta del disco duro que contiene la página de Internet creada por el SCADA.

Para implementar el SCADA se utilizó el INDUSOFT Web Studio v6.1 + SP3, ya que este maneja directamente un servidor con la base de datos y crea automáticamente una página de Internet donde el usuario puede observar el estado actual del sistema y acceder a la base de datos con la información de los estados anteriores, por lo que con una sola licencia del programa se puede acceder al SCADA desde varias computadoras simultáneamente utilizando únicamente un navegador de Internet como el Internet Explorer.

El SCADA elegido se programa por medio de pantallas, en estas pantallas se implementan diversas funciones al igual que ocurre con las subrutinas del PLC, se utilizan seis pantallas en total: Principal, Reporte, Actual, RegistroAlarmas, Reconoce Alarmas y Cerrar, se procede ahora a hacer una descripción detallada de las pantallas utilizadas en el programa desarrollado para el SCADA.

Principal

Es la primer pantalla que se ejecuta al abrir el proyecto, su única función es iniciar los servicios como el servidor de datos y las otras pantallas, no intercambia datos con el usuario y es invisible para este excepto cuando funciona como fondo color azul para las pantallas RegistroAlarmas, Cerrar y Reconoce Alarmas, adicionalmente define cual de las pantallas se muestra primero.

Reporte

En esta pantalla se muestran cuatro gráficas con dos variables continuas cada una, de esta manera se puede ver el historial del valor de las ocho variables analógicas del sistema, esta es la primer página que se muestra al ejecutar el SCADA, pero también se muestra si el usuario pulsa el botón Ver historial de funcionamiento ubicado en la pantalla Actual, en el centro tiene un botón que permite ir hacia la página Actual, que es la página en la que se ve el estado de todo el sistema, en la figura 23 se muestra una imagen completa de la pantalla Reporte.

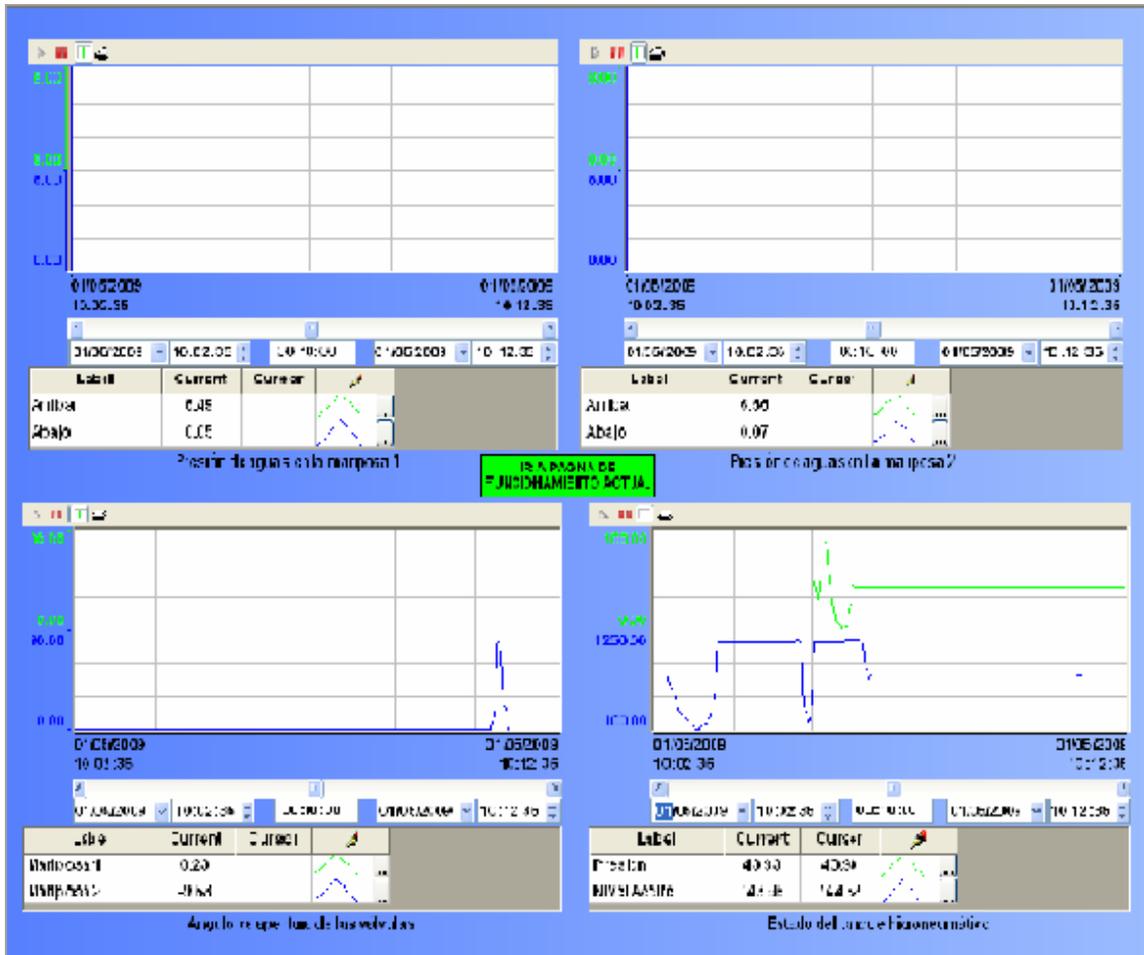


Figura 23. Imagen de la pantalla Reporte.

Cada uno de los gráficos de un par de variables es idéntico, la única diferencia es las variables utilizadas, estas se distribuyen de la siguiente manera, presión de aguas arriba y debajo de la mariposa 1, presión de aguas arriba y debajo de la mariposa 2, ángulo de apertura de la mariposa 1 y la mariposa 2, por último presión y nivel de aceite en el acumulador.

Como todos los gráficos tienen las mismas opciones y funcionalidad se muestra el gráfico de la presión y el nivel de aceite en el tanque hidroneumático para describir el

funcionamiento y las capacidades de la pantalla, este gráfico se encuentra en la figura 24.

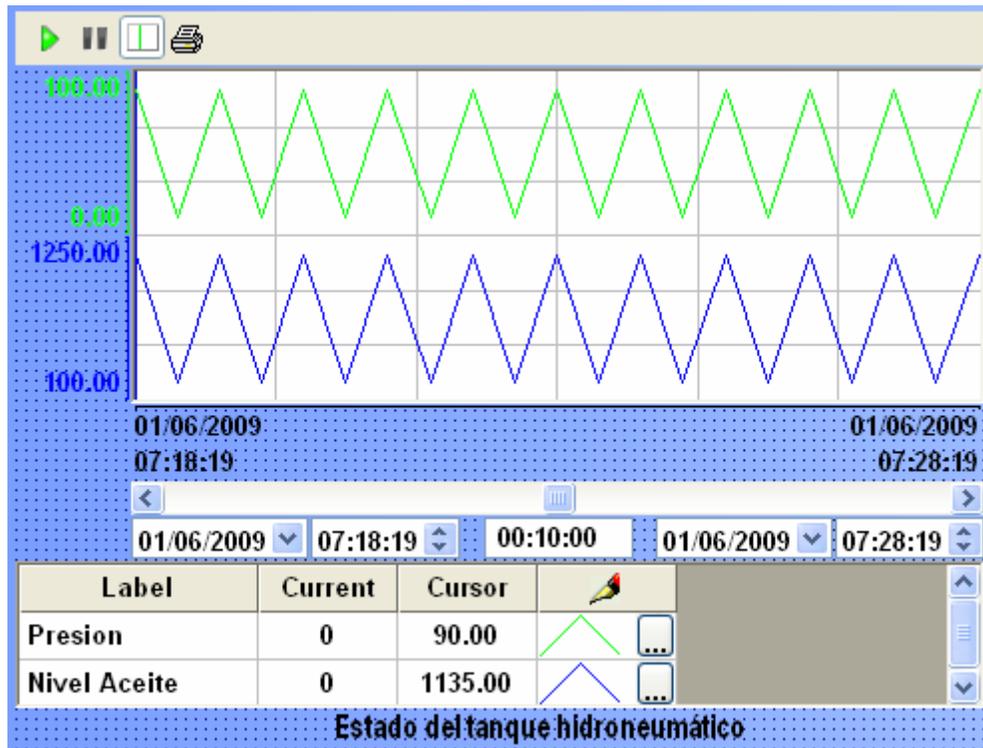


Figura 24. Imagen detallada de las gráficas generadas en la pantalla Reporte.

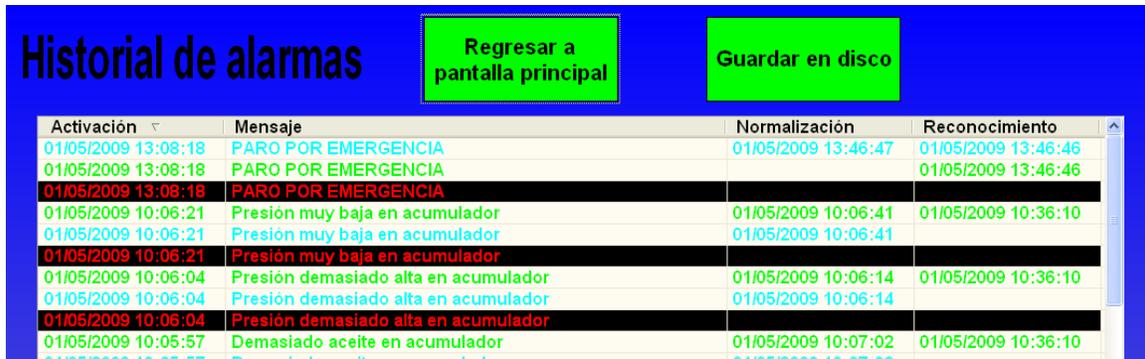
En la figura 24 se observa el gráfico utilizado por el SCADA para desplegar el historial de los valores de las variables analógicas, se utilizan 4 gráficos como el mostrado en la figura, cada uno muestra la información de dos de las variables analógicas, en este caso se utiliza el gráfico que muestra las variables analógicas correspondientes a la presión y el nivel de aceite en el acumulador, el gráfico consiste de un gráfico del valor de las variables contra el tiempo, como se puede ver en la figura, la frecuencia de muestreo, el inicio, final y duración del lapso que se despliega se puede cambiar mientras se ejecuta el proyecto sin necesidad de reiniciarlo.

Se cuenta además con la información de las variables despagadas, su valor actual y un cursor para poder conocer el valor de las variables en cualquier punto del lapso mostrado, se puede además cambiar el color utilizado para mostrar cada variable, es posible incluso imprimir la información del gráfico si el usuario lo desea.

Los gráficos utilizan información que se encuentra en la memoria RAM de la computadora, por lo que únicamente se pueden conocer los valores tomados por la variable desde que se inició el programa, esto no conlleva ningún problema debido a que el sistema está diseñado para estar siempre encendido, los lapsos configurados por defecto son de un día con muestreo cada minuto.

RegistroAlarmas

Esta pantalla tiene como función mostrar el historial de alarmas del sistema, muestra simultáneamente los últimos 40 registros de alarma del sistema, se despliega cuando el usuario pulsa el botón Ver historial de alarmas en la pantalla Actual, además se puede navegar por los 200 registros más recientes y guardarlos en el disco duro si el usuario lo desea en un archivo PDF con nombre igual a la fecha, el archivo se guarda en el fólder donde se encuentra el proyecto que corresponde a la base de datos, si se guarda más de un reporte de alarmas por día, el último sobrescribe al anterior.



Activación	Mensaje	Normalización	Reconocimiento
01/05/2009 13:08:18	PARO POR EMERGENCIA	01/05/2009 13:46:47	01/05/2009 13:46:46
01/05/2009 13:08:18	PARO POR EMERGENCIA		01/05/2009 13:46:46
01/05/2009 13:08:18	PARO POR EMERGENCIA		
01/05/2009 10:06:21	Presión muy baja en acumulador	01/05/2009 10:06:41	01/05/2009 10:36:10
01/05/2009 10:06:21	Presión muy baja en acumulador	01/05/2009 10:06:41	
01/05/2009 10:06:21	Presión muy baja en acumulador		
01/05/2009 10:06:04	Presión demasiado alta en acumulador	01/05/2009 10:06:14	01/05/2009 10:36:10
01/05/2009 10:06:04	Presión demasiado alta en acumulador	01/05/2009 10:06:14	
01/05/2009 10:06:04	Presión demasiado alta en acumulador		
01/05/2009 10:05:57	Demasiado aceite en acumulador	01/05/2009 10:07:02	01/05/2009 10:36:10
01/05/2009 10:05:57	Demasiado aceite en acumulador		

Figura 25. Imagen parcial detallada la pantalla RegistroAlarmas.

Se aprecia en la figura 25 que la pantalla RegistroAlarmas tiene dos botones los cuales permiten al usuario regresar a la pantalla Actual y guardar el archivo PDF con el reporte de las alarmas en el que se encuentran las columnas Activación que indica la fecha y hora a la que se activó la alarma, Mensaje que muestra que causó la alarma, Normalización que muestra la fecha y hora en que se normalizó la alarma y por último Reconocimiento que indica el momento en el que el usuario reconoció la alarma.

Como puede observarse existen tres tipos de registro de alarma, el primero en letras rojas significa que se activó una alarma, este tipo de alarmas únicamente tiene fecha de activación pues la situación no se ha normalizado, acaba de generarse además el usuario no puede reconocer alarmas en el momento que se generan, el segundo tipo de registro de alarma es el de letras celestes, este se da cuando la situación que causó la alarma se normaliza, y el tercer tipo que corresponde al registro con letras verdes, el cual se da cuando la alarma es reconocida por el usuario.

El sistema está diseñado para que cuando el usuario detecta una alarma, primero resuelva el problema que ocasionó la alarma y el sistema detecte entonces que esta se normalizó, luego el usuario debe proceder a reconocer la alarma, sin embargo el usuario puede reconocer la alarma antes de que esta se normalice, pero esta seguirá activa.

Reconocer Alarmas

Esta pantalla se muestra por seguridad para cerciorarse que el usuario desea reconocer las alarmas activas del sistema, la pantalla se despliega cuando el usuario pulsa el botón designado para reconocer las alarmas del sistema ubicado en la pantalla actual, funciona como una ventana de diálogo para intercambiar información con el usuario a continuación se muestra una imagen detallada de la pantalla.

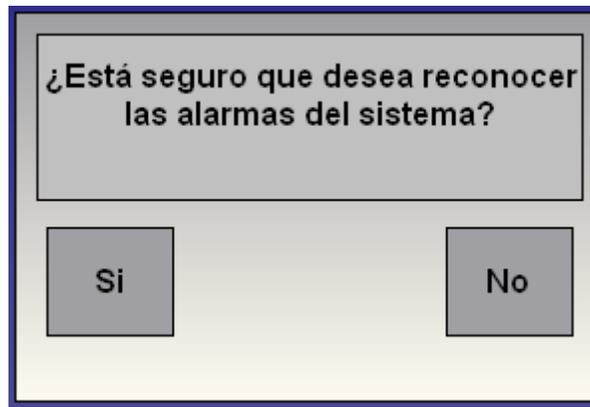


Figura 26. Imagen detallada la pantalla Reconoce Alarmas.

En la figura 26 se muestra una imagen detallada de la pantalla Reconocer Alarmas, si el usuario pulsa no la pantalla se cierra y se muestra nuevamente la pantalla Actual, si el usuario pulsa el botón si entonces el contenido de la pantalla cambia al siguiente:



Figura 27. Imagen mostrada al reconocer las alarmas del sistema.

Para continuar, el usuario debe pulsar el botón aceptar, las alarmas han sido reconocidas y el sistema muestra posteriormente la pantalla RegistroAlarmas, las alarmas de Paro de Emergencia y Cierre por Emergencia 1 y 2 del PLC no se desactivan aunque la situación que causó la alarma se haya normalizado, para desactivarlas el usuario debe reconocer las alarmas.

Cerrar

La pantalla cerrar hace la función de ventana de diálogo con el usuario, se utiliza para confirmar que el usuario desea cerrar el programa SCADA y aparece cuando el usuario pulsa en botón salir en la pantalla Actual, si el usuario confirma esta acción entonces se cierran todas las pantallas además de que también se cierran todos los servicios como el servidor de datos y la comunicación con el PLC, si el usuario indica que no desea cerrar el programa entonces se vuelve a mostrar la pantalla Actual, a continuación se encuentra una imagen de la pantalla Cerrar:

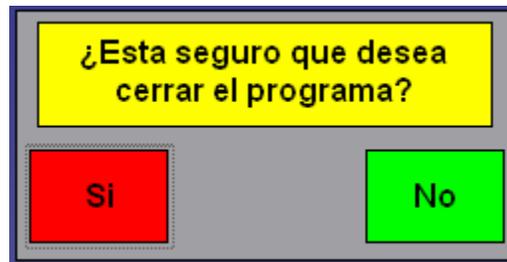


Figura 28. Imagen de la pantalla cerrar.

Actual

Esta es la pantalla donde se encuentra toda la información actual del sistema, se despliegan indicadores analógicos para todas las señales continuas del sistema, además todas las variables continuas a excepción de los ángulos de apertura muestran su valor digital en esta pantalla, hay además animaciones que varían conforme al valor real para la apertura de las mariposas y el nivel del tanque hidroneumático.

Adicionalmente a la información de las variables del sistema, en la pantalla actual se encuentra una versión simplificada del equipo con todas las partes principales de este, se encuentra el tanque de reserva, el acumulador, el filtro y las bombas de aceite, la toma de aire comprimido, las válvulas para agregar y retirar aire y aceite, las válvulas de bypass, los pistones de la mariposa con el bloqueo mecánico y las válvulas de mariposa.

Los niveles de aceite en los dibujos que representan la reserva de aceite y el acumulador varían según los niveles reales leídos por el PLC, adicionalmente la posición de los pistones y la válvula de mariposa varían para reflejar la posición real leída por el PLC, el resto de válvulas y actuadores del sistema tienen su representación en la pantalla Actual, cuando alguna de las válvulas se abre, como por ejemplo la válvula para igualar presiones de bypass su color pasa de rojo a verde, lo mismo ocurre para las bombas de aceite, se muestra además un mensaje con la función de la válvula cuando se encuentra activa.

El sistema muestra cuadros de alarma con la condición que ocasionó la alarma cuando alguna se activa, estos cuadros de alarma se ubican cerca de la parte del sistema afectada, además hay dos tipos de alarmas, las leves con un fondo que alterna de amarillo a blanco y las graves que alternan de rojo a amarillo.

Por lo que al activarse la alarma grave por temperatura elevada del aceite en el tanque de reserva, aparecerá entonces un cuadro de alarma grave cerca del tanque de reserva indicando este acontecimiento, de igual manera si se detecta la alarma leve ocasionada por el filtro de aceite sucio, aparecerá entonces un cuadro de alarma leve cerca del filtro indicando la presencia de la alarma.

Para ilustrar mejor las características de la pantalla se muestra una imagen completa de esta a continuación.

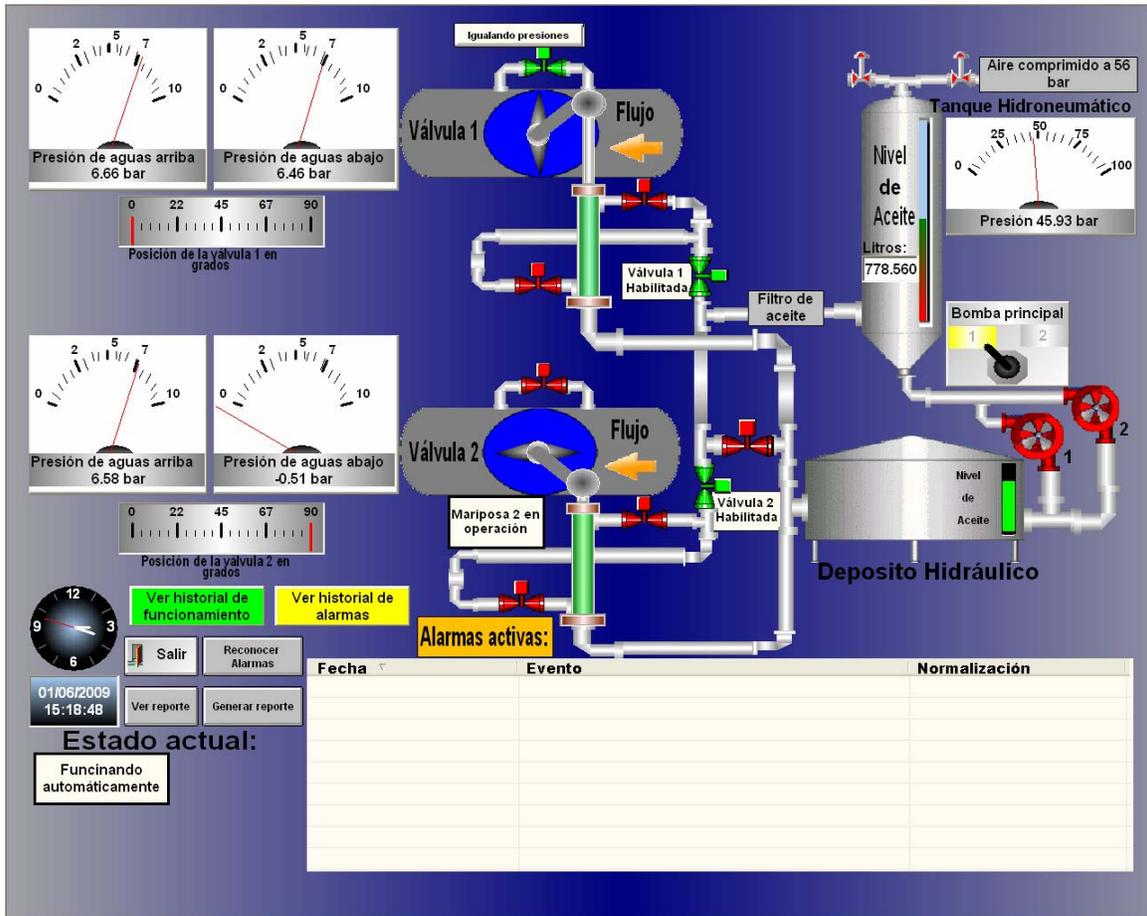


Figura 29. Imagen de la pantalla Actual.

En la figura 29 se puede observar la pantalla Actual, se observa como algunas de las válvulas se encuentran activas (de color verde con mensaje) y otras inactivas (de color rojo), cerca de las bombas se ve un indicador que marca cual de las bombas se encuentra seleccionada como principal, se pueden observar la mariposa 1 y 2 con sus pistones y válvulas de bypass (válvula en la parte superior), también el tanque hidroneumático y la reserva de aceite (deposito hidráulico), se observan además los indicadores continuos para las presiones arriba y abajo además del ángulo de apertura de ambos sistemas, y para la presión del acumulador, además se observa como el nivel de los tanques es animado al igual que la posición de los pistones y las mariposas, nótese que una se encuentra completamente cerrada y otra abierta.

En la parte inferior a la izquierda se encuentra un reloj con la fecha y la hora, abajo se encuentra el indicador del estado actual, aquí se pueden ver mensajes que indican si se está funcionando manual o automáticamente, si hay alarmas leves o graves presentes y si el controlador central se encuentra funcionando manualmente.

En la figura 30 se muestran los botones del sistema utilizados para generar reportes de funcionamiento y para ir a otras pantallas.



Figura 30. Imagen detallada de los botones de la pantalla Actual.

El botón reconocer alarmas muestra la pantalla Reconoce Alarmas que se utiliza para reconocer las alarmas en el sistema, si se pulsa el botón salir se muestra la pantalla Cerrar para confirmar que el usuario desea cerrar la aplicación, el botón generar reporte muestra la ventana de diálogo de la figura 31 donde el usuario escoge uno de los reportes de la base de datos para observarlo.

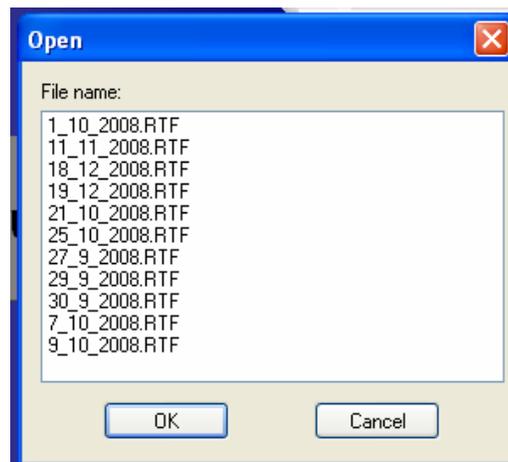


Figura 31. Imagen de la ventana de diálogo para seleccionar un reporte.

Por su parte el botón ver historial de funcionamiento llama a la pantalla Reporte donde se muestran los valores contra el tiempo de las variables analógicas del sistema, el botón ver historial de alarmas muestra la pantalla RegistroAlarmas en la que se pueden generar reportes de alarmas y ver el historial de alarmas del sistema y por último el botón generar reporte genera un reporte de funcionamiento con el nombre del día y la información acerca de las alarmas activas del sistema, el estado del sistema, tanque

hidroneumático, tanque de reserva hidráulica y mariposa 1 y 2, este reporte se guarda con nombre igual a la fecha en la carpeta del proyecto, adicionalmente si se genera más de un reporte por día este se anexa al final del reporte existente y no se sobre escribe su contenido.

Adicionalmente se ofrece un registro de alarmas similar al de la pantalla RegistroAlarmas, con la diferencia que solo contiene las alarmas que se encuentran activas, para cada alarma despliega un mensaje indicando la causa que activó la alarma, fecha y hora de activación y la fecha y hora de normalización si requiere de reconocimiento. Este registro se muestra en la figura 32.

Fecha	Evento	Normalización
01/06/2009 16:13:22	Válvula 1 en cierre de emergencia	
01/06/2009 16:13:21	Angulo de apertura da la válvula 1 demasiado bajo	
01/06/2009 16:13:20	Se disparó una alarma leve en el sistema	01/06/2009 16:13:22
01/06/2009 16:13:20	Angulo de apertura de válvula 1 bajo	01/06/2009 16:13:22
01/06/2009 16:12:39	Nivel de aceite bajo en la reserva	01/06/2009 16:12:59
01/06/2009 16:09:46	Controlador central en modo manual	

Figura 32. Registro de alarmas activas de la página Actual.

En la figura se aprecia el registro de alarmas activas del sistema en la página actual, existen tres tipos de registros, las alarmas que no se han normalizado ni han sido reconocidas que tienen las letras de color rojo, las alarmas que se reconocieron pero no se han normalizado correspondientes a los registros con letras verdes y por último los registros con letras celestes que corresponden a alarmas que se normalizaron pero que no han sido reconocidas por el usuario.

Por último se ofrece un cuadro de advertencia que solo se hace visible si se pierde la comunicación con el PLC, junto a este cuadro aparece un código que ayuda a identificar el error ocurrido, este cuadro se muestra en la figura 33.

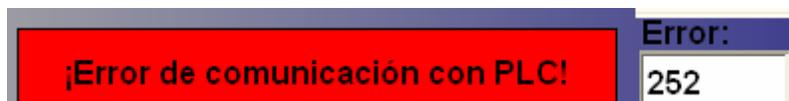


Figura 33. Cuadro de advertencia por perdida de comunicación con el PLC.

El error correspondiente al código 252 es: no se encuentra el PLC, estos códigos de error se pueden encontrar en la ayuda técnica del Driver de comunicación SIEME distribuida con el INDUSOFT Web Studio v6.1.

5.4 Descripción del banco de pruebas para la simulación

Debido a que el montaje del equipo en la planta hidroeléctrica de Sandillal está planteado para el mes de Junio, ya que las tres plantas del complejo ARCOSA son las

únicas que pueden funcionar continuamente durante todo el verano y no es rentable sacar al centro de producción Sandillal de producción para montar el proyecto en verano, y además por los atrasos en algunos de los procesos de compras de equipo, ocasionados por un cambio en los protocolos de compra en el ICE, no es posible montar todo el proyecto a tiempo para la presentación ante la Escuela de Ingeniería en Electrónica del ITCR, por lo que se procedió a montar el sistema en un banco de pruebas para este propósito.

Las rutinas de software tanto en el PLC como en la PC no sufrieron ningún cambio, pero debido a que aún no se dispone de todo el equipo y aun faltan la mayoría de sensores y actuadores, se procedió a hacer algunos cambios al hardware utilizado para conformar el banco de pruebas, a continuación vemos el nuevo diagrama de bloques utilizado para el hardware en el banco de pruebas.

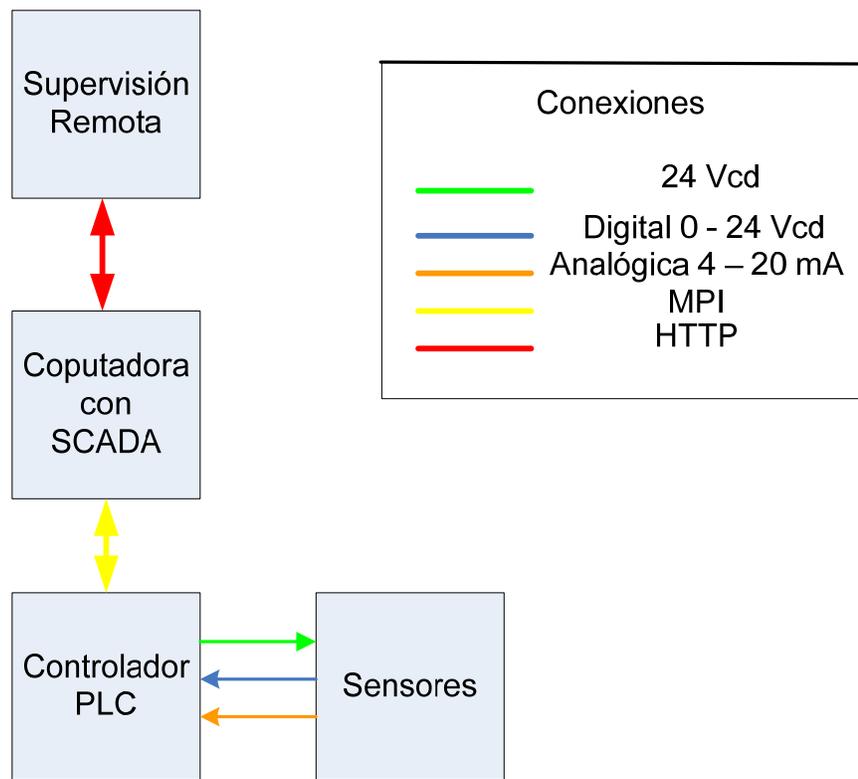


Figura 34. Diagrama de bloques de hardware utilizados en el banco de pruebas.

Como se puede apreciar en la figura 34, el número de bloques ha disminuido, adicionalmente algunos han cambiado, sin embargo los bloques utilizados son suficiente para probar la funcionalidad del sistema.

Entre los principales cambios están: el bloque alimentación ha desaparecido, ahora se dispone de la red eléctrica para alimentar a la computadora y el PLC, el módulo actuadores a desaparecido, pero las salidas se simulan con las luces de salida del PLC además de las animaciones en el SCADA cuando alguna se activa, el controlador por contactores no forma parte de la prueba, por lo que a su vez el módulo Indicador de Niveles ya no es requerido, no se dispone de una fuente de 125 V_{CD}, por lo que el módulo comunicación con el módulo central ya no se utiliza, los módulos supervisión

remota y Computadora con SCADA no se ven afectados por el cambio, el módulo Controlador PLC únicamente sufre de un cambio, debido a que no se utiliza el módulo Circuito de alimentación y que se debe tomar la energía de la red eléctrica, se agrega en la primer ranura del bastidor una fuente PS 307 con salida de 10 A a 24 V_{CD} y toma la energía de los 110 V_{AC} de la red eléctrica, esta misma fuente se utiliza para alimentar el módulo Sensores que cambia su circuito para simular los sensores del sistema, el nuevo circuito utilizado en el módulo Sensores es el siguiente:

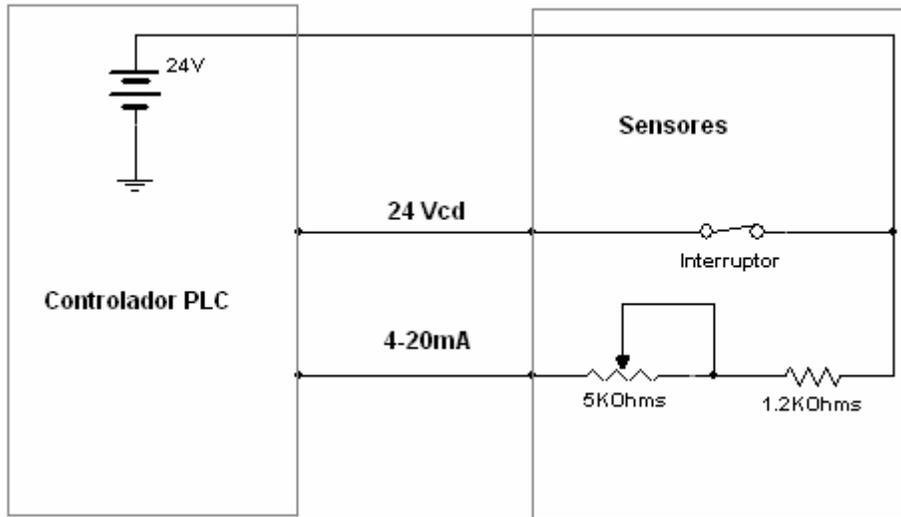


Figura 35. Circuito utilizado por el módulo Sensores en el banco de pruebas.

En la figura 35 se muestra el circuito utilizado para el módulo sensores en el banco de pruebas, las salidas de los sensores tipo interruptor son señales de con 24 V_{CD} cuando se encuentran activas, estas señales se simulan utilizando interruptores mecánicos de dos posiciones para cada uno de los 31 interruptores del sistema, por otro lado los o transmisores de lazo de corriente de 4 a 20 mA se simulan utilizando un potenciómetro de 5KΩ en serie con un resistor de 1200Ω, dado que el voltaje disponible es de 24V, la corriente varía de 3.87 a 20 mA al girar el potenciómetro de un extremo al otro, se utilizan ocho potenciómetros en serie a resistencias como esta para simular los ocho sensores continuos del sistema.

Capítulo 6: Análisis de Resultados

6.1 Características de los sensores

Uno de los objetivos del proyecto era realizar un estudio de las instalaciones, entrevistas con los ingenieros de la represa hidroeléctrica en Sandillal y un estudio profundo de los manuales para determinar las características de los nuevos sensores a utilizar en el proyecto, los requerimientos de los nuevos sensores que se utilizan en el sistema se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 9. Requerimiento de los sensores utilizados en el proyecto.

Variable	Cantidad	Condición o rango a medir	Tipo de sensor	Señal de salida
Temperatura de aceite	1	Temperatura mayor a 70°C	Interruptor de presión	Binaria
Nivel de aceite en la reserva	2	Nivel muy bajo, bajo, adecuado	Interruptor de nivel	Binaria
Fallo en bombas	2	Presión menor a 40 bar	Interruptor de presión	Binaria
Presión diferencial en filtro de aceite	1	Presión mayor a 5 bar	Interruptor de presión diferencial	Binaria
Presión diferencial en mariposas	2	Presión diferencial menor a 1 bar	Interruptor de presión diferencial	Binaria
Posición de las mariposas	8	0, 76.5, 81 y 90 grados	Interruptor de proximidad inductivo	Binaria
Finales de carrera de los bypass	4	Cerrado y abierto	Interruptor de proximidad inductivo	Binaria
Inundación del sistema	1	Presencia de agua estancada	Interruptor de flotación	Binaria
Presión en el acumulador	1	Presión de 48 a 64 bar	Transmisor de presión manométrica	Lazo de 4 a 20 mA
Nivel de aceite en el acumulador	1	Columna de aceite de 1 metro	Transmisor de presión diferencial	Lazo de 4 a 20 mA
Angulo de apertura de las mariposas	2	Angulo de 0 a 90 grados	Transmisor de posición angular	Lazo de 4 a 20 mA
Presiones de aguas arriba y abajo en las mariposas	4	Presiones de 0 a 4,51 bar	Transmisor de presión manométrica	Lazo de 4 a 20 mA

Los sensores para medir las presiones de aguas arriba y abajo en cada mariposa están expuestos a presiones desde 0 bar si no hay agua o las tuberías se encuentran bloqueadas hasta presiones que pueden alcanzar los 4.51 bar cuando el nivel de embalse es máximo como lo indican los cálculos realizados en la sección 3.3, los manómetros reemplazados en la represa tienen un rango de medición de 0 a 10 bar, y las tres mediciones de la presión que se realizaron en las distintas visitas a la represa tuvieron valores entre 4.20 bar y 4.35 bar, con un valor medio de 4.28 bar.

Adicionalmente fue necesario determinar las características de que deben tener los sensores utilizados en el sistema, como índice de protección, rango de medición, comunicación con el PLC entre otras, debido a que el lugar donde se instalará el sistema en la represa hidroeléctrica de Sandillal tiene alta humedad, se determinó que los sensores deben soportar una alta humedad, además se decidió que los sensores para variables continuas como el ángulo de apertura de las mariposas utilizarían

comunicación con un lazo de corriente de 4 a 20 mA para disminuir la sensibilidad al ruido electromagnético presente en la represa, los rangos a medir para la mayoría de las variables se obtuvieron del manual del sistema a reemplazar y de entrevistas con el ingeniero encargado de ejecutar el proyecto paralelo encargado de la parte hidráulica, este ingeniero decidió que el sistema utilizaría los mismos niveles de aceite y el mismo rango de presión en el acumulador que el sistema anterior.

Para determinar el rango de medición de los transmisores de presión utilizados por el sistema para medir la presión de aguas arriba y la presión de aguas debajo de la mariposa se procedió a utilizar la ecuación 3.1 que relaciona la presión hidrostática dentro de un líquido con la profundidad a la que se quiere conocer la presión, utilizando información obtenida en la represa de Sandillal utilizando en la altura sobre el nivel del mar a la que están instalados los sensores y a la que se encuentra el nivel máximo del embalse, se calculó la presión máxima a la que estarán expuestos los sensores es de 4.51 bar, para corroborar esta información se tomaron medidas de la presión en tres distintas ocasiones cuando se realizaron visitas a la represa, estas medidas promediaron un valor de 4.28 bar con un valor máximo de 4.35 bar en la segunda visita, esta información se encuentra en el apartado 3.3 y en la tabla 1.

A partir de la información recolectada y de los cálculos realizados se decidió utilizar los transmisores de presión 261AS de la marca ABB para medir las presiones de agua arriba y abajo en las mariposas, los cuales tienen un rango de medición configurable desde 0 a 5 bar hasta 0 a 100 bar con una exactitud de 0.06% con un índice de protección IP67, pantalla LCD y transmisor de 4 a 20 mA.

Todos los sensores deben ser alimentados con 24 V_{CD}, la tabla con las características principales que deben tener los sensores utilizados en el proyecto se encuentran en la tabla 9, adicionalmente en la tabla 2 se encuentran los modelos de los sensores seleccionados para el proyecto y su capacidad de medición.

Para evaluar el funcionamiento del sistema se procede a realizar cuatro pruebas distintas, una simulación completa de una puesta en marcha, una prueba de reacción ante los posibles problemas, una prueba de las capacidades del sistema para controlar las variables del tanque hidroneumático y balancear la carga entre las dos bombas de aceite y por último una prueba de las capacidades del servidor de WEB para publicar la información del SCADA y como reacciona este ante un fallo en el PLC.

Las pruebas que se realizaron al sistema se hicieron utilizando el hardware del banco de pruebas, de esta manera se prueba el PLC con sus módulos de expansión, el bloque para simular los sensores y el SCADA a la vez, esto debido a que el SCADA es una excelente herramienta para la monitorización por lo que facilita la prueba del PLC y de sus módulos, las salidas se observaron además en los diodos LED que tiene el PLC para corroborar la información del SCADA.

En el apartado 1.3 se muestran las especificaciones de funcionamiento que determinan las capacidades que debe tener el sistema final, se generó una lógica provisional para que el controlador, esta lógica que se muestra en la figura 5, sirvió como punto de partida para desarrollar la lógica utilizada para implementar los módulos o bloques del controlador en un PLC S7-200 312C de la marca SIEMENS por medio de diagramas de escalera, esta lógica se explica detalladamente en el apartado 5.3.1.

Para evaluar la lógica utilizada para desarrollar el programa del PLC y el SCADA, la selección del PLC y sus módulos de expansión y la selección del panel táctil con el que se implementaría el SCADA se procedió a realizar una simulación de una puesta en marcha de los generadores en las represas para probar las capacidades del todo el sistema a la vez, si este cumple con lo esperado se puede concluir entonces que sus partes funcionan correctamente y cumplen con su función.

6.2 Puesta en marcha

Se procedió a realizar una puesta en marcha completa del sistema en la que se prueba las capacidades de monitorización del sistema en funcionamiento manual, además las reacciones del sistema ante situaciones de bloqueos mecánicos y la capacidad de generar reportes, se presentan los resultados conforme se van produciendo en el procedimiento para facilitar su comprensión:

- 1) Encender el PLC en funcionamiento manual y ejecutar el SCADA.
- 2) Poner todas las variables en valores normales de operación, igualar las presiones de agua arriba y abajo en las mariposas.

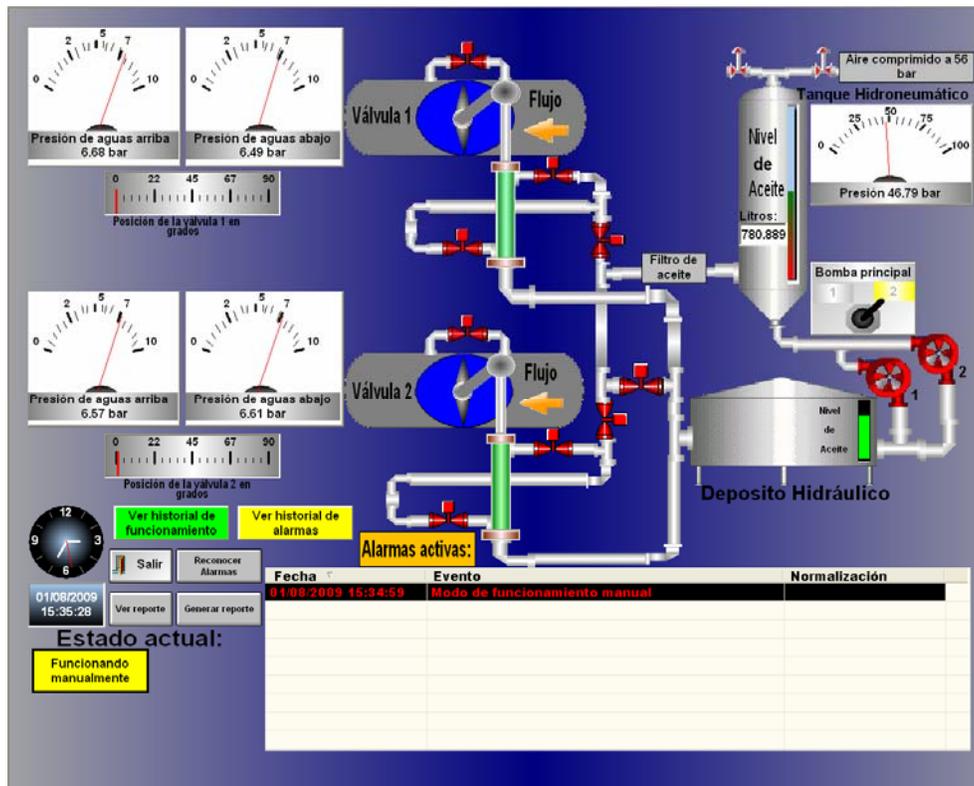


Figura 36. Información mostrada por el SCADA en el paso 2 de la puesta en marcha.

En la figura 36 se aprecia que el sistema indica en un mensaje que se encuentra en funcionamiento manual, además se genera un registro de alarmas donde se guarda la fecha y hora en que se inició el funcionamiento manual.

- 3) Evaluar las capacidades del PLC y el SCADA en funcionamiento manual observando la información desplegada en el SCADA.

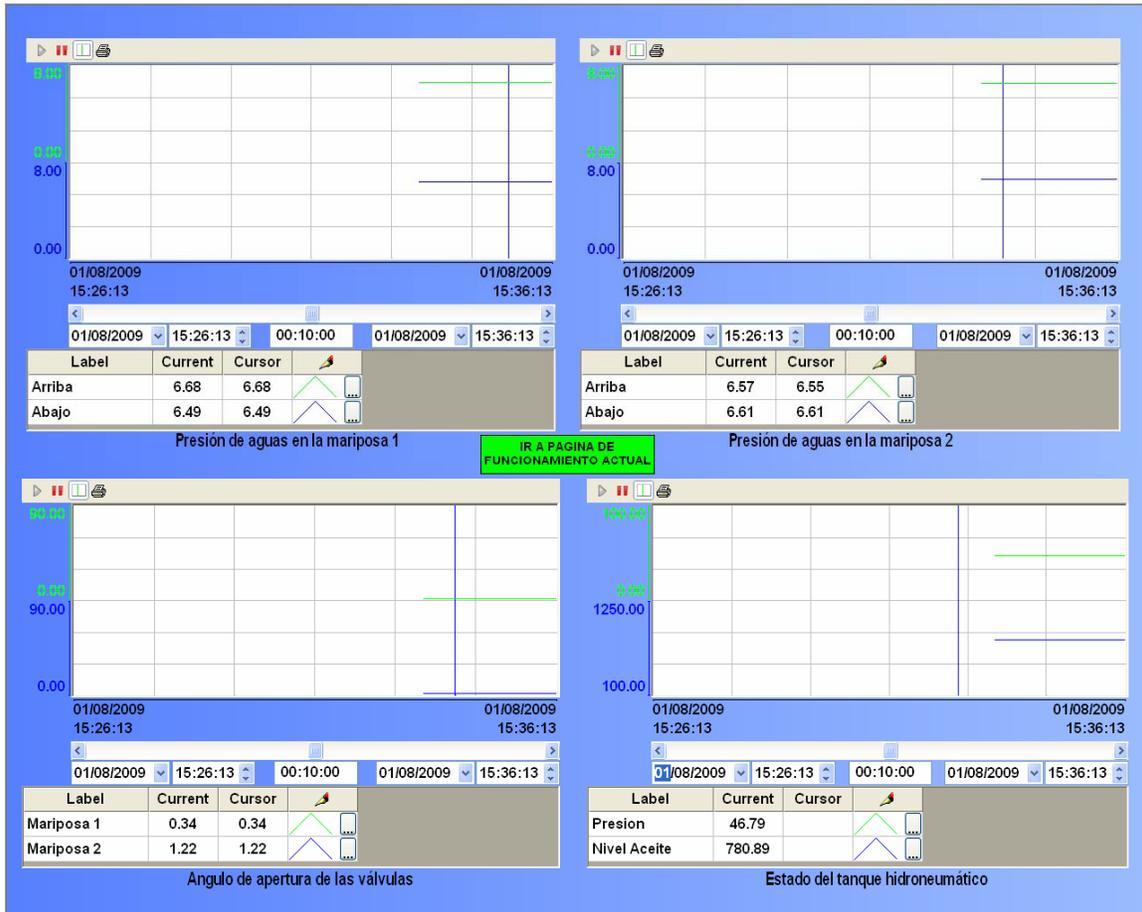


Figura 37. Historial de funcionamiento mostrado por el SCADA en el paso 3 de la puesta en marcha.

Se puede apreciar en las figuras 36 y 37 que el sistema realiza las funciones de monitorización del estado actual y estados anteriores, aun cuando se encuentra en funcionamiento manual, se aprecia que el sistema indica los valores de las variables analógicas del sistema como la posición de las mariposas o la presión en el tanque hidroneumático, por lo que el usuario que está utilizando la botonera de control manual tiene a su disposición toda la información del sistema en un solo lugar, lo que facilita el uso del sistema, adicionalmente el SCADA puede generar reportes de estado aun cuando el PLC no está controlando el equipo.

- 4) Generar órdenes de abrir las mariposas y verificar que estas permanecen cerradas.

Las salidas del sistema permanecen inactivas y las órdenes de abrir las mariposas no se generan.

Esto ocurre dado que el sistema se encuentra en funcionamiento manual, por lo que el PLC cede el control de todo el sistema a la botonera manual, si se desea accionar alguna válvula o bomba deberá hacerse en la botonera manual.

- 5) Poner el sistema en funcionamiento automático y comprobar que no se abren las mariposas.

El controlador presuriza los sistemas de ambas mariposas pues no hay alarmas activas, no se generan órdenes de abrir las mariposas, adicionalmente se indica que el sistema está trabajando automáticamente.

El PLC vuelve a retomar el control del sistema, pero debido a que las ordenes abrir la mariposa que se dieron al sistema en el paso 4 ocurrieron cuando el sistema estaba en modo manual, el sistema no abre las mariposas, al no haber señales de emergencia activas, el sistema está listo para abrir las mariposas cuando el gobernador lo indique, por esto ambas unidades se encuentran presurizadas.

- 6) Poner en emergencia por fallo externo (eléctrico) la mariposa 1 y generar la orden de abrirla, comprobar que esta no se abre.

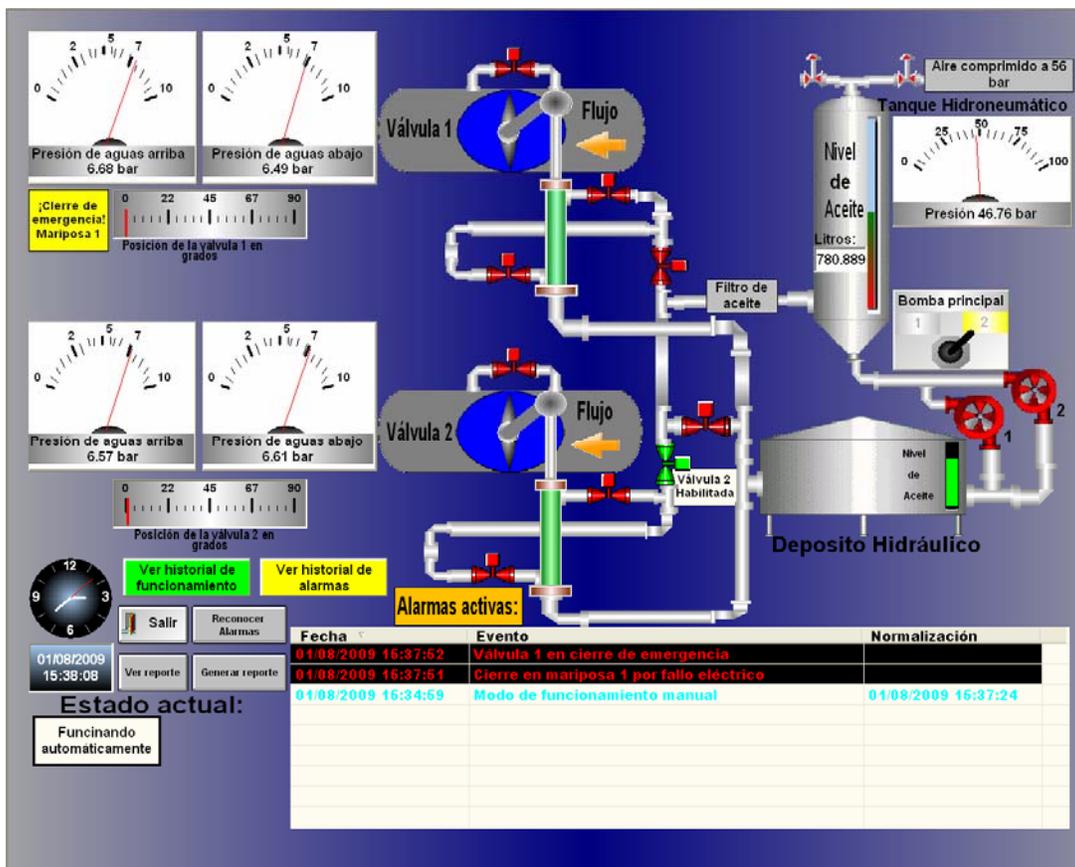


Figura 38. Información mostrada por el SCADA en el paso 6 de la puesta en marcha.

El sistema hace un cierre de emergencia de la mariposa 1, al estar cerradas las válvulas de mariposa y bypass el sistema retira la presión del sistema a, no se afecta el

funcionamiento del sistema 2 y se generan registros de alarma con la fecha y hora a la que se dio el problema.

El sistema no puede abrir las válvulas mientras haya una emergencia en estas y si estas se encuentran abiertas cuando ocurre la emergencia el sistema las cierra y retira la presión de las unidades afectadas para disminuir la posibilidad de problemas como fugas de aceite.

- 7) Poner la mariposa 2 en bloqueo mecánico y dar la orden de abrirla, comprobar que esta no se abre.

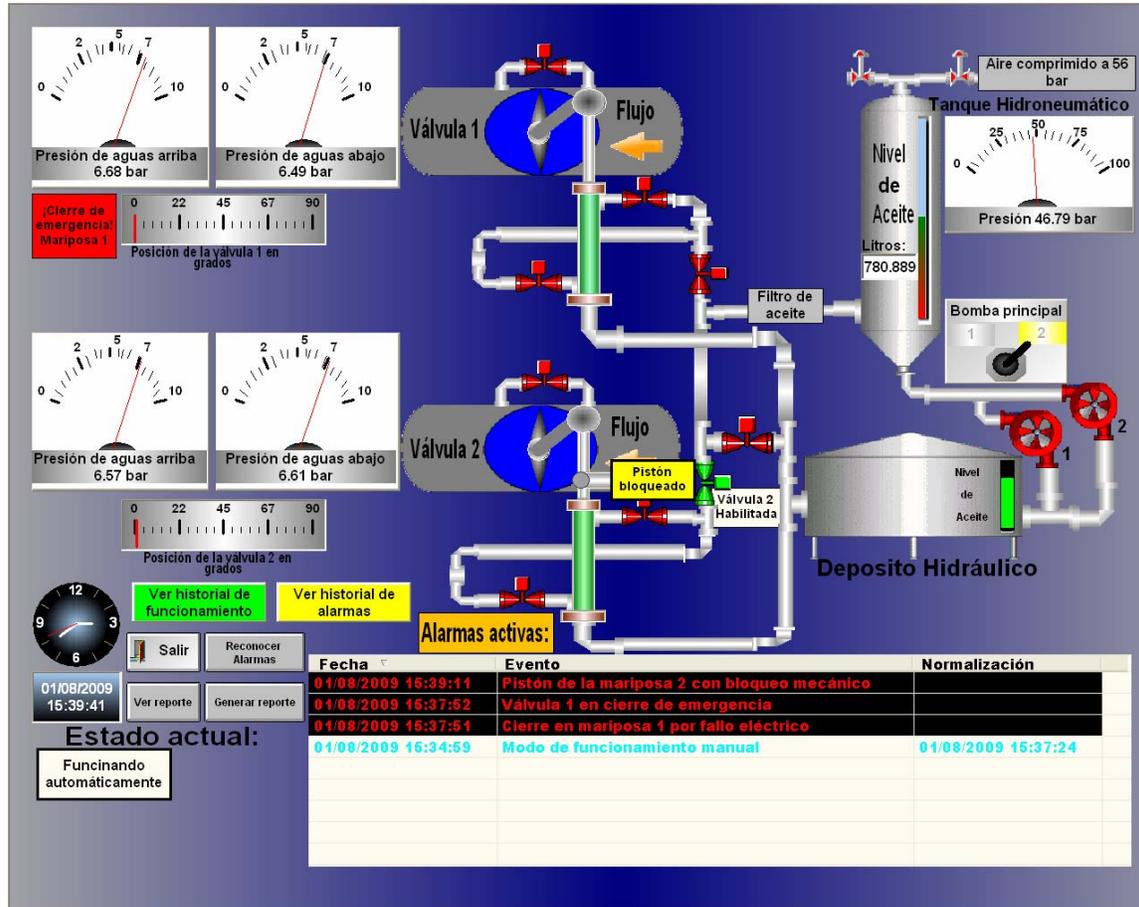


Figura 39. Información mostrada por el SCADA en el paso 7 de la puesta en marcha.

El sistema hace una indicación visual y sonora (solo audible si el computador tiene parlantes) y genera un registro de alarma donde se indica que el pistón se encuentra bloqueado y el momento en que se bloqueó el pistón, adicionalmente muestra un dibujo de un pin que bloquea el movimiento de la mariposa, no se generan ordenes de abrir la mariposa 2 mientras esta está bloqueada. Esta información corresponde a la figura 39.

El bloqueo de las mariposas se da cuando se va a realizar un mantenimiento al sistema o por alguna razón se desea evitar que el pistón se mueva, consiste en un perno metálico que se introduce a través de unas argollas metálicas fijas y otras argollas en el

pistón inmovilizándolo, mientras el pistón se encuentre bloqueado, el PLC no genera ordenes de abrir ni de cerrar la mariposa afectada.

En el apartado 1.3 se muestran las especificaciones de funcionamiento que dio el ICE, en estas se indica que el sistema debe asegurarse de que las condiciones de operación son adecuadas antes de abrir las mariposas, esto se comprobó en los pasos 4 a 7 del proceso de puesta en marcha.

- 8) Descompensar las presiones de aguas arriba y abajo en las mariposas, remover el bloqueo mecánico de la mariposa 2 y normalizar y reconocer todas las alarmas presentes.

Como se desactivaron y se reconocieron las alarmas del sistema, el registro de alarmas activas queda limpio, estas alarmas quedan registradas sin embargo en el historial de alarmas anteriores, adicionalmente el controlador presuriza los sistemas hidráulicos de las dos mariposas y queda a la espera de que el controlador central o gobernador que controla todos los sistemas de la represa genere la orden de abrir alguna de las válvulas de mariposa para iniciar el proceso de apertura en la unidad correspondiente. Este comportamiento corresponde a lo especificado por ingenieros del ICE en el apartado 1.3

- 9) Generar la orden de abrir la mariposa 1, comprobar que el sistema da la orden de abrir el bypass 1.

El sistema genera la orden de abrir el bypass de la mariposa 1, no se genera aun la orden de abrir la mariposa.

Cuando se va a realizar una apertura de la válvula de mariposa, el sistema debe asegurarse primero que la presión de aguas a ambos lados de la mariposa esté equilibrada antes de dar la orden de abrir la mariposa, esto debido a que abrir la mariposa con una presión diferencial alta puede dañar la válvula y el sistema hidráulico, en este paso se comprueba que el sistema da la orden de abrir el bypass y queda a la espera de que se igualen las presiones.

- 10) Activar el final de carrera del bypass 1, verificar que el SCADA indica que se están igualando las presiones.

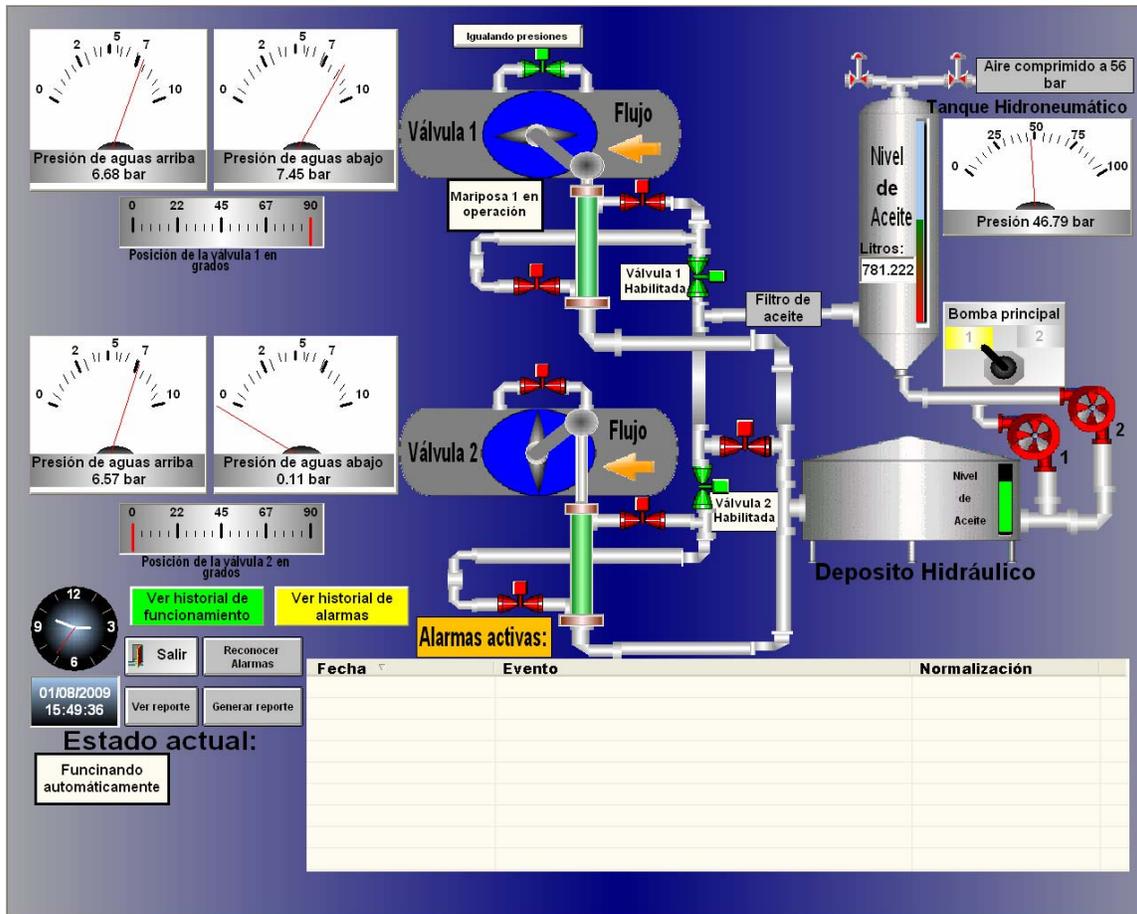


Figura 42. Información mostrada por el SCADA en el paso 12 de la puesta en marcha.

En el apartado 1.3 dice que cuando la válvula esté completamente abierta el sistema debe indicarle al gobernador que puede seguir adelante con la activación del generador de la unidad correspondiente. Este comportamiento se verificó en este paso de la puesta en marcha.

- 13) Verificar que el sistema genera la orden de cerrar el bypass 1 y activar el final de carrera correspondiente.

Adicionalmente cuando la apertura de la mariposa 1 alcanza los 89 grados, el sistema da la orden de cerrar la válvula bypass del sistema 1, cuando se desactiva el final de carrera que indica que el bypass se encuentra abierto el sistema retira el mensaje que indica que se están igualando las presiones.

- 14) Realizar el procedimiento para llevar la mariposa 2 a operación dejando el bypass abierto.

Al seguir nuevamente el procedimiento para llevar la mariposa a operación en el sistema 2 se vuelve a observar que el sistema primero compensa la diferencia de presión de aguas arriba y abajo, además se aprecia la animación de muestra el ángulo de apertura de la mariposa incrementándose y la posición del pistón cambiando, cuando la mariposa entra en operación el sistema da la orden cerrar la válvula de bypass ya que

indican al usuario mediante el SCADA, adicionalmente se le indican al gobernados, pero no afectan el funcionamiento de las mariposas, solamente las alarmas graves sacan al sistema de operación.

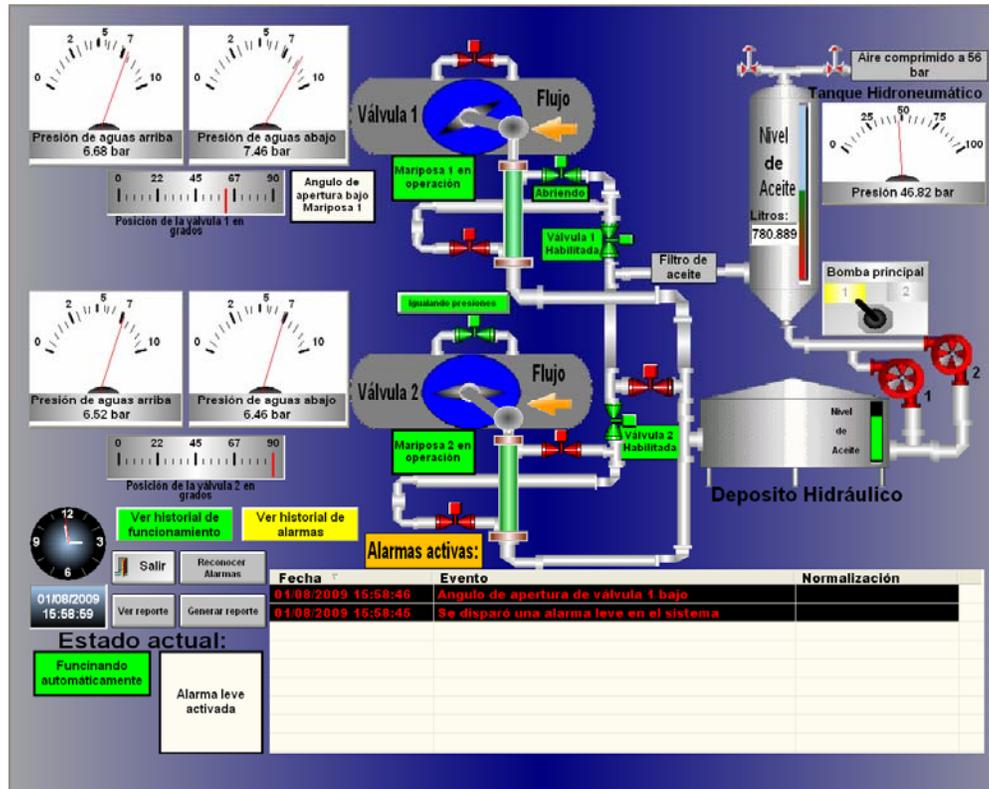


Figura 44. Información mostrada por el SCADA en el paso 15 de la puesta en marcha.

En la figura 44 se aprecia esta situación, adicionalmente se aprecia como la animación de la apertura de la mariposa 1 cambia para reflejar el nuevo ángulo de apertura.

- 16) Disminuir el ángulo de apertura de la mariposa 1 a 35 grados para confirmar que se genera una emergencia en la mariposa 1 y se da la orden de cerrarla.

Si en algún momento la mariposa se encuentra en operación y el ángulo de apertura disminuye a menos de 35 grados, la situación pasa a ser un problema grave y se debe cerrar la mariposa pues para flujos de agua bajos la eficiencia de las turbinas tipo Kaplan disminuye dramáticamente arriesgando dañar equipos como el AVR, por lo que el sistema debe generar un registro de alarma con los datos del problema, realizar un cierre de emergencia, indicarle al gobernador el problema e indicar el problema en el SCADA.

Este procedimiento está especificado en el apartado 1.3 como una de las funciones del sistema.

Adicionalmente solo el sistema en el que se da el problema se ve afectado, el otro sistema puede seguir funcionando, una situación como la anterior se simula en este paso del procedimiento de puesta en marcha, la información generada se muestra en la figura 45.

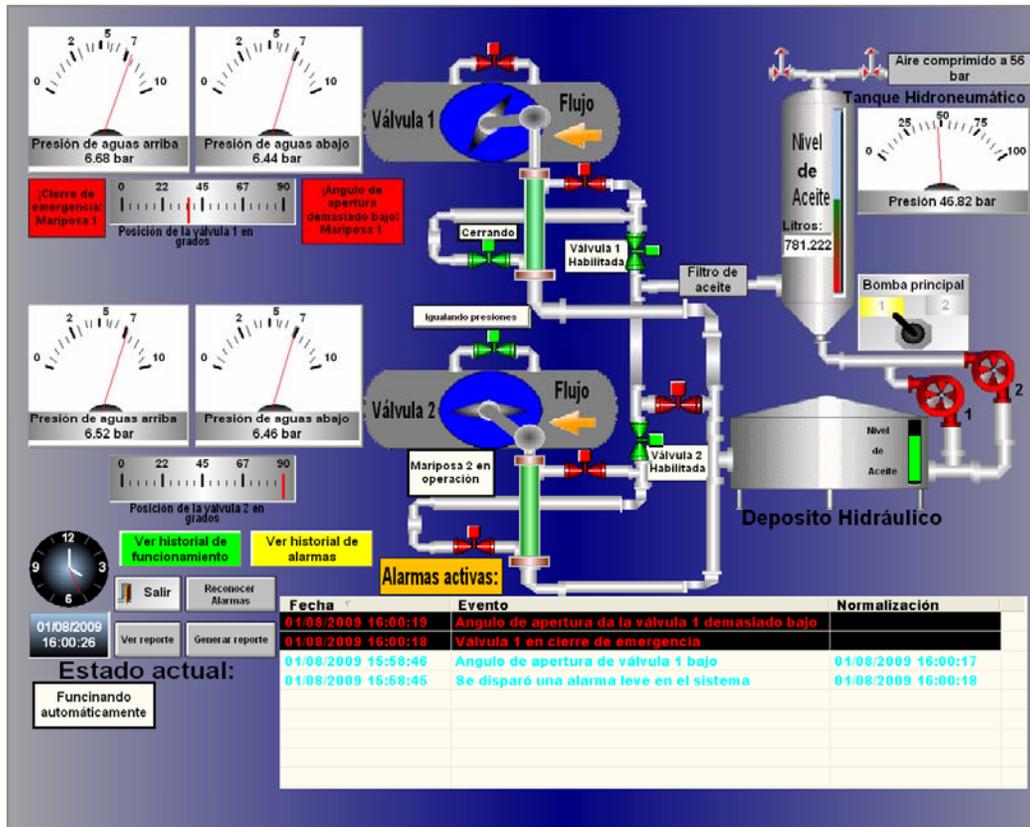


Figura 45. Información mostrada por el SCADA en el paso 16 de la puesta en marcha.

17) Llevar el ángulo de apertura de la mariposa 1 a menos de 0.5° , confirmar que el sistema retira la presión del sistema de la mariposa 1.

En el paso número 17 se cierra la mariposa 1 acatando la orden generada por el PLC de cerrar la mariposa como parte del cierre de emergencia del sistema 1, causado deliberadamente disminuyendo el ángulo de apertura de la válvula de mariposa.

Las acciones que toma el sistema para llevar a cabo el cierre de emergencia consisten en mantener la presión del sistema hidráulico por un máximo de dos minutos y esperar mientras se cierran las válvulas de mariposa y bypass, si el sistema logra cerrar las válvulas antes de que transcurran los dos minutos entonces retira la presión del sistema hidráulico de la unidad afectada luego de haber cerrado las válvulas.

En el cierre de emergencia que se produjo para la mariposa 1 el sistema tenía cerrada la válvula de bypass, por lo que solo falta cerrar la válvula de mariposa para completar el procedimiento, en el paso 17 se lleva a cabo esta acción, por lo que al completarse el sistema retira la presión del sistema hidráulico de la unidad 1 cerrando la válvula de presurización.

La información mostrada en el SCADA luego de completar el paso 17 del proceso de puesta en marcha se encuentra en la figura 46.

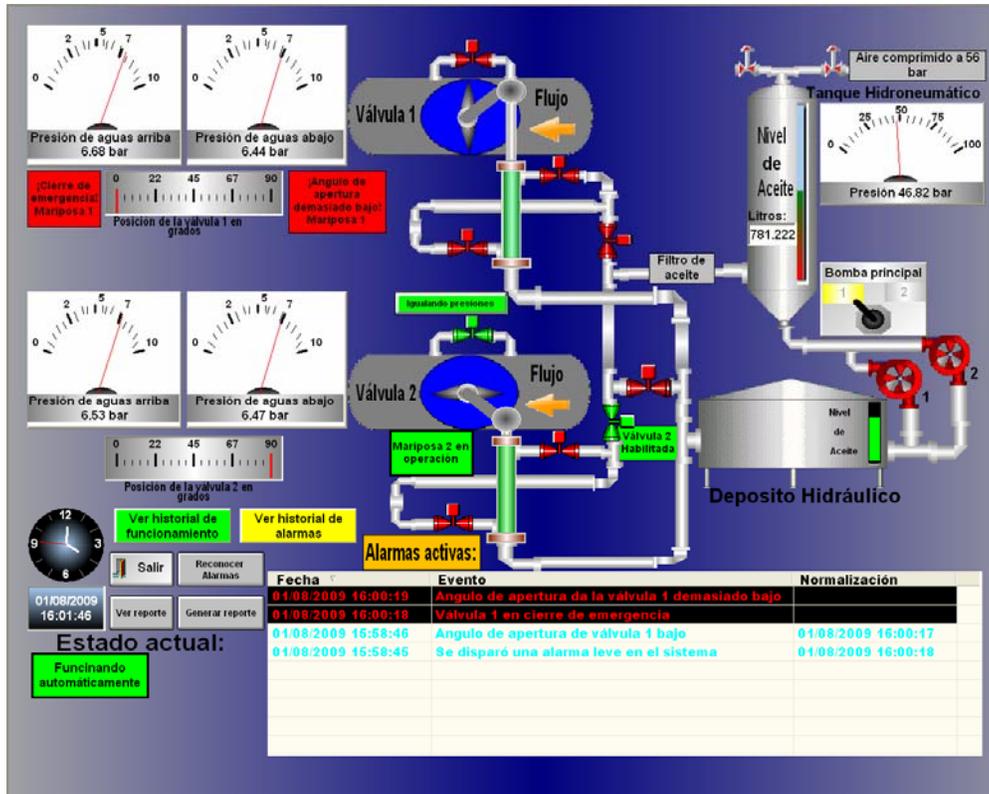


Figura 46. Información mostrada por el SCADA en el paso 17 de la puesta en marcha.

En la figura 46 se puede apreciar que el sistema genera registros de alarma con la información del problema y la fecha y hora en que ocurrieron, adicionalmente al cerrar la válvula de mariposa el sistema cierra la válvula de presurización del sistema quitando la presión de la unidad afectada para disminuir la posibilidad de que se generen otros inconvenientes en caso de que el problema ocurrido sea causado por una fuga de aceite o un fallo en una válvula.

- 18) Generar una orden de emergencia general por inundación, comprobar que el sistema genera la orden de cerrar el bypass 2 y la mariposa 2 además de la alarma correspondiente.

Un problema como una inundación en el área del sistema afecta a las dos unidades simultáneamente, por lo que la acción tomada por el sistema pasa a ser un Paro de Emergencia el cual no está relacionado con ningún de los dos sistemas específicamente, cuando un paro de emergencia se da, el sistema cierra por emergencia las dos unidades a diferencia de un cierre de emergencia en un sistema específico, que afecta únicamente a una de las unidades del sistema.

En el paso 18 de la simulación de una puesta en marcha, se simula una inundación del sistema, por lo que inmediatamente después de que el controlador detecta esta situación, se genera una indicación visual en el SCADA, un registro de alarmas con el mensaje correspondiente y el momento en el que ocurrió el problema, se indica del problema al gobernador y se realiza un paro por emergencia.

La información mostrada por el SCADA se muestra en la figura 47.

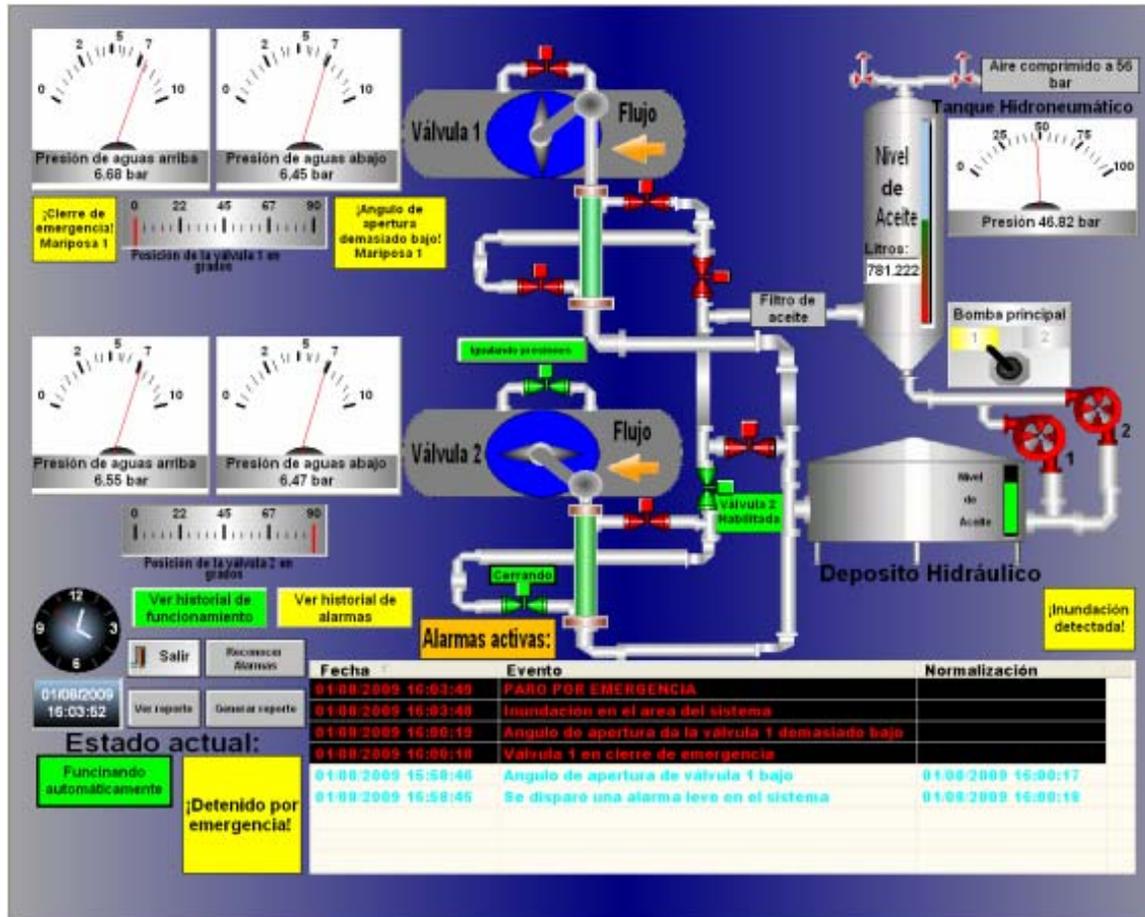


Figura 47. Información mostrada por el SCADA en el paso 18 de la puesta en marcha.

En la figura 47 se aprecia que el sistema saca de operación a la mariposa dos que se encontraba activa, además al observar las salidas que se encuentran activas en el PLC se nota que se generan las ordenes de cerrar la mariposa y el bypass que se había dejado abierto deliberadamente ignorando la orden de cerrar el bypass generada por el sistema para simular un fallo y se le indica del problema al gobernador central.

Se generan adicionalmente los registros de alarma con la descripción de los problemas que causaron la emergencia y la fecha y hora a la que se detectaron, además, el sistema mantiene la presión hasta que se cierran las válvulas correspondientes o hasta que transcurren dos minutos.

19) Llevar el ángulo de apertura de la mariposa 2 a menos de 0,5°.

Debido a que el sistema se encuentra en paro de emergencia, genera ordenes de cerrar la mariposa y el bypass del sistema 2 que se encuentran abiertos, en este paso del proceso de puesta en marcha se cierra la válvula de mariposa dos disminuyendo su ángulo de apertura a menos de 0.5° pero se ignora la orden de cerrar la válvula de bypass simulando un problema en esta válvula, por lo que el sistema mantiene presurizado el sistema para poder cerrar esta válvula.

20) Verificar que dos minutos después de la emergencia el sistema quita la presión del sistema hidráulico de la mariposa 2 aunque el bypass está abierto.

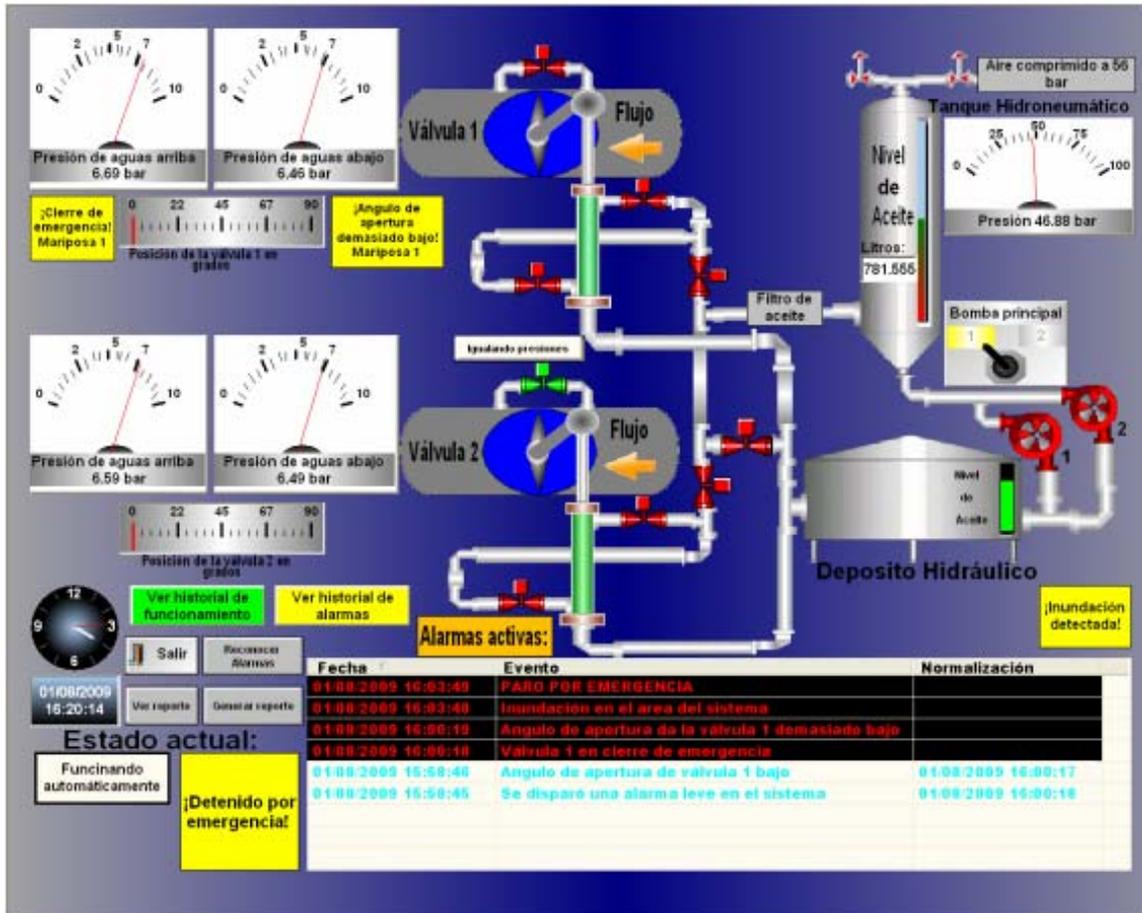


Figura 48. Información mostrada por el SCADA en el paso 20 de la puesta en marcha.

Al completar el paso 20 del proceso de puesta en marcha, el SCADA muestra la información que se muestra en la figura 48, en esta se aprecia que el controlador retiró la presión del sistema hidráulico de la unidad dos aun cuando la válvula de bypass está abierta, ya que si luego de que se dé una emergencia si en dos minutos no se cerraron las válvulas, el PLC retira la presión del sistema hidráulico.

El bypass de la mariposa 2 se había dejado abierto deliberadamente en el paso 14, ignorando la orden de cerrarlo que había generado el PLC precisamente para probar esta característica del comportamiento del controlador.

21) Generar un reporte de funcionamiento.

En el paso 21 se genera un reporte de funcionamiento en el que debe quedar registrado el estado actual del sistema y la hora a la que se tomaron los datos, el reporte se guarda en un archivo con formato RTF que tiene por nombre la fecha el día el fólder en

los últimos 200 registros de alarma del sistema, el archivo se guarda en el fólder donde se encuentra la aplicación y si un archivo con el mismo nombre existía este se sobrescribe.

24) Llevar la mariposa 2 a operación y generar un reporte de funcionamiento.

El reporte de funcionamiento se anexa al final del texto del archivo generado en el paso 21 de la puesta en marcha, no se sobrescribe el archivo, se indica la nueva hora a la que se generó el reporte y la información de los dos reportes generados está disponible.

25) Evaluar que los reportes de alarma y funcionamiento generados tengan la información adecuada.

De los reportes de funcionamiento generados en los pasos 21 y 24 se extrae la siguiente información:

Tabla 10. Resumen de la información contenida en el reporte de estado generado en el paso 21 del proceso de simulación de puesta en marcha del sistema.

Información	Obtenido	Esperado
Alarmas graves	Paro por Emergencia. Inundación. Cierre de Emergencia 1. Angulo 1 demasiado bajo	Paro por Emergencia. Inundación. Cierre de Emergencia 1. Angulo 1 demasiado bajo
Alarmas leves	Ninguna	Ninguna
Estado del sistema	En paro de emergencia	En paro de emergencia
Válvula 1	Apertura 0.1°. Aguas Arriba 6.69 bar. Aguas Abajo 6.46 bar. Cerrada por emergencia.	Apertura 0.1°. Aguas Arriba 6.69 bar. Aguas Abajo 6.46 bar. Cerrada por emergencia.
Válvula 2	Apertura 0.16°. Aguas Arriba 6.59 bar. Aguas abajo 6.49 bar.	Apertura 0.16°. Aguas Arriba 6.59 bar. Aguas abajo 6.49 bar.
Acumulador	Presión 46.88 bar Nivel 781.6 Litros	Presión 46.88 bar Nivel 781.566 Litros
Reserva	Nivel alto	Nivel alto

Tabla 11. Resumen de la información contenida en el reporte de estado generado en el paso 24 del proceso de simulación de puesta en marcha del sistema.

Información	Obtenido	Esperado
Alarmas graves	Ninguna	Ninguna
Alarmas leves	Ninguna	Ninguna
Estado del sistema	Normal	Normal
Válvula 1	Apertura 0.13°. Aguas Arriba 6.69 bar. Aguas Abajo 6.43 bar.	Apertura 0.13°. Aguas Arriba 6.69 bar. Aguas Abajo 6.46 bar.
Válvula 2	Apertura 90.63°. Aguas Arriba 6.57 bar. Aguas Abajo 6.49 bar. Válvula en operación.	Apertura 90.63°. Aguas Arriba 6.59 bar. Aguas Abajo 6.49 bar. Válvula en operación.
Acumulador	Presión 46.91 bar Nivel 781.9 Litros	Presión 46.91 bar Nivel 781.888 Litros
Reserva	Nivel alto	Nivel alto

En las tablas 10 y 11 se encuentran resúmenes de la información contenida en los reportes de estado generados en los pasos 21 y 24 contrastados contra la información que se espera que contengan, la información esperada se obtiene a partir de la información desplegada por el SCADA en el momento de generar el reporte de funcionamiento.

El reporte de alarmas contiene la fecha y hora a la que se activó la alarma, se normalizó la alarma y se reconoció la alarma en caso de que la alarma necesite reconocimiento, adicionalmente contiene un mensaje que describe la situación que originó el problema.

Al analizar las diferencias entre las columnas Obtenido y Esperado para los reportes de estado generados en los pasos 21 y 24 del proceso de puesta en marcha, se aprecia que los estados contenidos en los reportes son iguales al estado real o esperado del sistema, las únicas diferencias son de unos cuantos decimales en los valores analógicos y son producidas por variaciones constantes de pequeña magnitud en la lectura realizada por el PLC, el valor que tiene mas diferencia es la presión de aguas debajo de la mariposa 1 en el reporte del paso 24, la diferencia en este caso es de un 0.47% entre el valor leído y el valor esperado.

Por lo anterior se puede afirmar que el reporte de estado que genera el SCADA tiene información exacta del estado del sistema en un momento dado.

El reporte de alarmas que genera el sistema se puede utilizar para ver en que momento se dio un problema, además en que momento se normalizó o si no se ha normalizado y en que momento fue reconocida por el usuario si esto ha ocurrido, a continuación se muestra la parte del reporte de alarmas generado por el sistema correspondiente al proceso de puesta en marcha, cada reporte completo tiene 200 posiciones para registros de alarmas.

Tabla 12. Resumen de la información contenida en el reporte de alarmas generado en el paso 23 del proceso de simulación de puesta en marcha del sistema.

Activación	Mensaje	Normalización	Reconocimiento
01/08/2009 16:03:49	PARO POR EMERGENCIA	01/08/2009 16:26:03	01/08/2009 16:26:02
01/08/2009 16:03:49	PARO POR EMERGENCIA		01/08/2009 16:26:02
01/08/2009 16:03:49	PARO POR EMERGENCIA		
01/08/2009 16:03:49	PARO POR EMERGENCIA		
01/08/2009 16:03:48	Inundación en el área del sistema	01/08/2009 16:25:23	01/08/2009 16:26:02
01/08/2009 16:03:48	Inundación en el área del sistema	01/08/2009 16:25:23	
01/08/2009 16:03:48	Inundación en el área del sistema		
01/08/2009 16:03:48	Inundación en el área del sistema		
01/08/2009 16:00:19	Angulo de apertura válvula 1 demasiado bajo	01/08/2009 16:26:03	01/08/2009 16:26:02
01/08/2009 16:00:19	Angulo de apertura válvula 1 demasiado bajo	01/08/2009 16:26:02	
01/08/2009 16:00:19	Angulo de apertura válvula 1 demasiado bajo		
01/08/2009 16:00:19	Angulo de apertura válvula 1 demasiado bajo		
01/08/2009 16:00:18	Válvula 1 en cierre de emergencia	01/08/2009 16:26:03	01/08/2009 16:26:02
01/08/2009 16:00:18	Válvula 1 en cierre de emergencia		01/08/2009 16:26:02
01/08/2009 16:00:18	Válvula 1 en cierre de emergencia		
01/08/2009 16:00:18	Válvula 1 en cierre de emergencia		
01/08/2009 15:58:46	Angulo de apertura de válvula 1 bajo	01/08/2009 16:00:17	
01/08/2009 15:58:46	Angulo de apertura de válvula 1 bajo		
01/08/2009 15:58:45	Se disparó una alarma leve en el sistema	01/08/2009 16:00:18	
01/08/2009 15:58:45	Se disparó una alarma leve en el sistema		
01/08/2009 15:39:11	Pistón de la mariposa 2 con bloqueo mecánico	01/08/2009 15:40:16	01/08/2009 15:42:40
01/08/2009 15:39:11	Pistón de la mariposa 2 con bloqueo mecánico	01/08/2009 15:40:16	
01/08/2009 15:39:11	Pistón de la mariposa 2 con bloqueo mecánico		
01/08/2009 15:37:52	Válvula 1 en cierre de emergencia	01/08/2009 15:42:41	01/08/2009 15:42:40
01/08/2009 15:37:52	Válvula 1 en cierre de emergencia		01/08/2009 15:42:40
01/08/2009 15:37:52	Válvula 1 en cierre de emergencia		
01/08/2009 15:37:51	Cierre en mariposa 1 por fallo eléctrico	01/08/2009 15:42:36	01/08/2009 15:42:40
01/08/2009 15:37:51	Cierre en mariposa 1 por fallo eléctrico	01/08/2009 15:42:36	
01/08/2009 15:37:51	Cierre en mariposa 1 por fallo eléctrico		
01/08/2009 15:34:59	Modo de funcionamiento manual	01/08/2009 15:37:24	01/08/2009 15:42:40
01/08/2009 15:34:59	Modo de funcionamiento manual	01/08/2009 15:37:24	
01/08/2009 15:34:59	Modo de funcionamiento manual		

Se pueden apreciar en la tabla 12 el contenido del reporte de alarmas generado por el sistema en el paso 23 del proceso de puesta en marcha, al analizar el contenido del reporte se puede seguir el orden en el que se activaron las alarmas si se utiliza la columna que indica el momento de activación de las alarmas.

Al analizar el contenido de la primer columna de reporte de aprecia en orden cronológico las alarmas ocurrieron es el siguiente orden, funcionamiento manual, fallo eléctrico en el sistema 1 con cierre de emergencia en el sistema 1 un segundo después, bloqueo mecánico en mariposa 2, alarma leve del sistema especificada un segundo después la causa de ángulo de apertura bajo en la mariposa 1, cierre de emergencia en la mariposa 1 causado por un ángulo de apertura demasiado bajo como se especifica un segundo después, y por último una inundación del sistema que causa un segundo después un paro de emergencia.

Adicionalmente se puede observar el momento en que ocurrieron las cosas, por ejemplo se puede ver que el sistema se inundó a las 16:03:48 del día 8 de enero del 2009, además el problema fue reconocido por algún usuario hasta las 16:26:02 del mismo día y el problema se normalizó un segundo mas tarde.

Este orden de acontecimientos coincide con el orden en que se ocasionaron los problemas en el proceso de puesta en marcha, esto demuestra que la capacidad de

recrear las causas de un problema y su ubicación en el tiempo hacen que el reporte de alarmas sea una herramienta muy poderosa para monitorizar el sistema.

El proceso a seguir ante una alarma por el usuario debe ser generar un reporte de funcionamiento, solucionar el problema que causó la alarma, reconocer las alarmas, generar un reporte de alarmas y por último generar un reporte de funcionamiento nuevamente, de esta manera en la base de datos habrá información detallada de los problemas del sistema y en que momento se solucionaron y se utiliza el SCADA como un método muy eficiente para la monitorización del sistema.

6.3 Reacción del sistema ante problemas

Adicionalmente se hace una prueba donde se generan todas las posibles situaciones de error, generando una tabla de datos donde se muestran las acciones tomadas por el sistema y las acciones que se espera que el sistema tome ante cada una de las condiciones.

Estas acciones consisten de mostrar indicaciones en el SCADA, disparar alarmas leves, disparar Cierres de Emergencia que a su vez conllevan a cerrar las válvulas del sistema afectado, y por último disparar un Paro por Emergencia que cierra las válvulas de los dos sistemas.

Un cierre de emergencia es un proceso que solo afecta a una de las dos unidades del sistema en el que se realizan varias acciones, se genera una indicación visual en el SCADA que indica que se realizó un cierre de emergencia y su causa, se activa una salida del PLC que le indica al gobernador central que se está cerrando una de las válvulas por una emergencia y que debe sacar de funcionamiento al generador correspondiente, se crea un registro de alarma con la información del problema y el momento en que se detectó, se da la orden de cerrar la válvula de mariposa y bypass de la unidad afectada si estas se encuentran abiertas y por último, se mantiene presurizado el sistema mientras se cierran las válvulas correspondientes hasta que terminen de cerrarse o transcurran dos minutos, lo que se cumpla primero, de esta manera si hay un fallo en las válvulas, los pistones o el sistema hidráulico, el sistema hidráulico de la unidad afectada no se queda activo permanentemente durante la emergencia.

Un paro por emergencia afecta a las dos unidades simultáneamente, y puede verse como dos cierres de emergencia simultáneos, ya que las acciones que toma el sistema para cada unidad son iguales a las del cierre de emergencia con la única diferencia que saca de operación a ambas unidades.

Se procede a simular situaciones con diversas emergencias y se tabulan los resultados obtenidos además de los resultados esperados o las acciones que se espera que el sistema tome ante una situación como la simulada, esto facilitará un posterior análisis del desempeño del sistema y la capacidad de reaccionar ante situaciones problemáticas, los resultados de esta prueba se muestran en la tabla número 12.

Tabla 13. Acciones tomadas por el sistema ante diversos problemas y fallos.

Condición	Acción realizada	Acción esperada
Pasar a función manual	Indica y desactiva salidas	Indica y desactiva salidas
Apertura demasiado baja sistema 1	Sistema 1 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 1
Fallo mecánico sistema 1	Sistema 1 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 1
Fallo eléctrico sistema 1	Sistema 1 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 1
Emergencia sistema 1	Sistema 1 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 1
Poca agua arriba sistema 1	Sistema 1 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 1
Apertura demasiado baja sistema 2	Sistema 2 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 2
Fallo mecánico sistema 2	Sistema 2 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 2
Fallo eléctrico sistema 2	Sistema 2 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 2
Emergencia sistema 2	Sistema 2 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 2
Poca agua arriba sistema 2	Sistema 2 cerrado por emergencia	Cierre de emergencia sistema 2
Poco aceite en reserva	Disparó alarma leve	Activar alarma leve
Apertura baja sistema 1	Disparó alarma leve	Activar alarma leve
Apertura baja sistema 2	Disparó alarma leve	Activar alarma leve
Filtro de aceite sucio	Disparó alarma leve	Activar alarma leve
Fallo en bomba 1	Disparó alarma leve	Activar alarma leve
Fallo en bomba 2	Disparó alarma leve	Activar alarma leve
Temperatura de aceite demasiado alta	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Muy poco aceite en acumulador	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Demasiado aceite en acumulador	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Presión demasiado alta en acumulador	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Muy poca presión en acumulador	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Muy poco aceite en reserva	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Inundación en área del sistema	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Emergencia indicada por usuario	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Emergencia indicada por control central	Sistema detenido por emergencia	Paro por emergencia
Sistema central en función manual	Condición indicada en SCADA	Indicación en SCADA
Bloqueo mecánico mariposa 1	Indicación y bloqueo realizados	Indicar y bloquear pistón
Bloqueo mecánico mariposa 2	Indicación y bloqueo realizados	Indicar y bloquear pistón

Al analizar la información contenida se observa que las acciones tomadas por el sistema son las esperadas para todos los problemas evaluados, el sistema realizó el procedimiento de cierre de emergencia cuando se esperaba que lo hiciera y lo mismo

ocurrió para los procedimientos de paro por emergencia, alarmas leves e indicaciones en el SCADA.

6.4 Capacidad de control

Seguidamente se evalúa la capacidad del sistema para controlar la presión y el nivel de aceite en el tanque hidroneumático, además de la capacidad del sistema para balancear las cargas de las bombas.

El sistema cuenta con módulos de control tipo ON-OFF con histéresis ya que los actuadores que utiliza el sistema no son proporcionales, se utiliza la histéresis para disminuir la frecuencia con la que se activan y desactivan los actuadores para disminuir el desgaste y la electricidad necesaria para activar dispositivos como los motores de las bombas de aceite, además el sistema balancea la carga entre las dos bombas de aceite para disminuir la frecuencia con la que se debe dar mantenimiento a las dos bombas.

Primero se procedió a evaluar el control de la presión en el tanque hidroneumático para lo que se llevó la presión a valores fuera del rango óptimo de funcionamiento utilizado para el banco de pruebas de 30 bar a 65 bar para observar la reacción del sistema, se llevó la presión a un valor menor a 30 bar y se verificó que el sistema diera la orden de agregar aire comprimido al acumulador, en la siguiente figura se observan los resultados:



Figura 50. Sistema compensando el bajo valor de la presión en el acumulador.

En la figura 50 se observa que el sistema añade aire comprimido al acumulador cuando su presión está por debajo del rango óptimo de funcionamiento, esta orden desaparece únicamente cuando la presión ha alcanzado un valor de 40 bares, luego se procede a llevar el valor de la presión en el tanque hidroneumático por encima del valor máximo del rango óptimo de 65 bares para evaluar la reacción del sistema, la información generada por el SCADA se muestra en la figura 51.

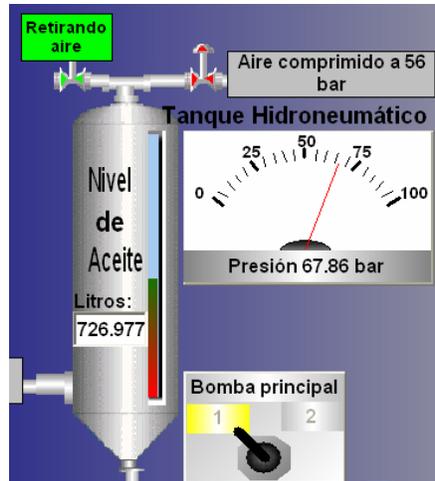


Figura 51. Sistema compensando el alto valor de la presión en el acumulador.

Se aprecia que el sistema da la orden de retirar aire del acumulador para disminuir la presión, debido a la histéresis del controlador esta orden permanece activa hasta que el valor de la presión disminuya a 50 bar.

Ahora se evalúa la capacidad para controlar el nivel de aceite en el acumulador, este controlador también tiene una histéresis en el controlador tipo ON-OFF, en este caso la histéresis es de 100 litros de aceite.

El rango óptimo de funcionamiento para el nivel de aceite es de 600 a 900 litros, primero se evalúa la reacción del sistema ante un valor bajo de nivel de aceite en la figura 52.

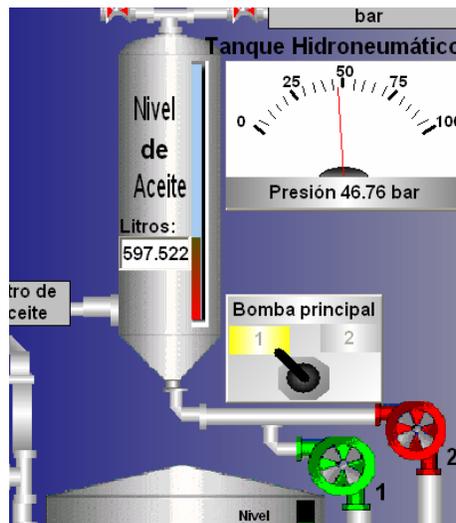


Figura 52. Sistema compensando el bajo nivel de aceite en el acumulador.

Cuando el nivel de aceite es menor a 600 litros, se bombea aceite para subir el nivel hasta que este alcance un valor de al menos 700 litros, ahora se lleva el nivel de aceite por encima de los 900 litros y se observa la reacción del sistema, la información desplegada por el SCADA se muestra en la figura 53.

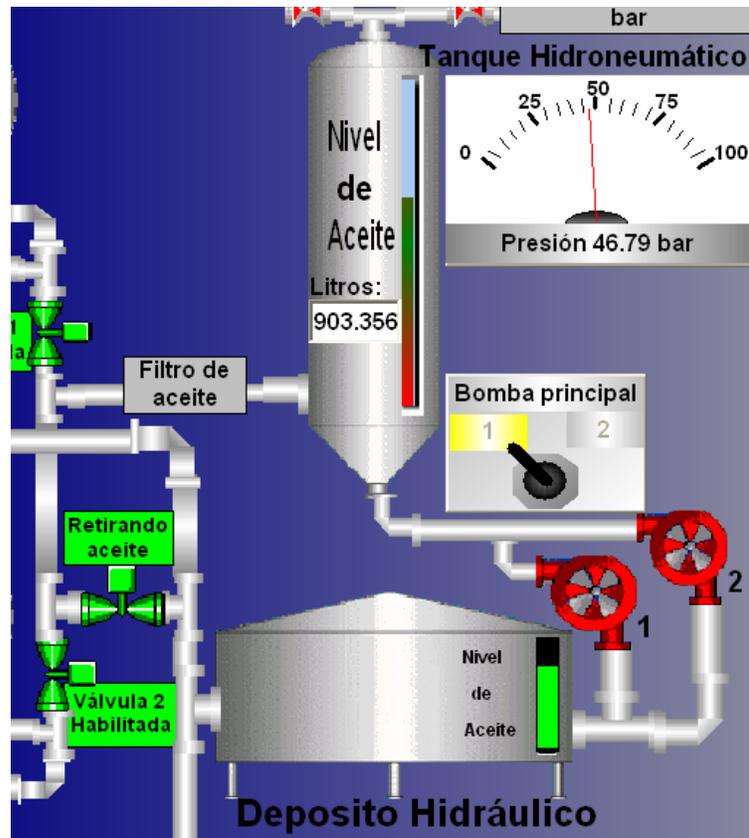


Figura 53. Sistema compensando el elevado nivel de aceite en el acumulador.

Para disminuir el nivel de aceite en el tanque hidroneumático el sistema abre la válvula de salida de aceite, la cual permite que el aceite salga del acumulador, pase a través del filtro de aceite y regrese al tanque de la reserva hidráulica, la válvula se mantiene abierta hasta que el nivel de aceite alcanza los 800 litros de aceite, cerca del centro del rango óptimo de 600 litros a 900 litros.

En el apartado de especificaciones de funcionamiento se indica que cuando alguna variable se salga de su rango de operación normal, el sistema debe activar el actuador correspondiente para normalizar la situación de haberlo, se ha demostrado que el sistema tiene la capacidad de controlar las variables del tanque hidroneumático que son las que tienen actuadores para cambiarlas.

Luego se procede a evaluar la capacidad del sistema para balancear la carga de trabajo entre las dos bombas de aceite, para lograrlo se siguió el siguiente procedimiento, primero se llevó el nivel de aceite a un valor bajo hasta que el sistema encendiera la bomba seleccionada como principal, luego se llevó el valor de aceite hasta un nivel óptimo para completar el ciclo de bombeo, se repitió esta acción hasta que el sistema cambió la bomba principal de la 1 a la 2.

Posteriormente se repitieron ciclos de bombeo de aceite hasta que el sistema seleccionara como bomba principal la número 1 y re contaron los ciclos necesarios para realizar el cambio, luego se hicieron mas ciclos hasta que el sistema cambiara la bomba

principal nuevamente a la 2 y se volvieron a contar los ciclos necesarios, los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 14. Ciclos de bombeo de aceite requeridos para que el sistema cambie de bomba principal.

Cambio de bomba realizado	Número de ciclos de bombeo requeridos
Bomba 2 a bomba 1	20
Bomba 1 a bomba 2	20

En la tabla 14 se aprecia que son necesarios 20 ciclos de bombeo para que el sistema cambie la elección de bomba principal, el sistema balancea la carga por número de ciclos y no por cantidad de trabajo, aunque estadísticamente después de un largo periodo de uso, la cantidad de trabajo realizado por cada una de las bombas tiende a ser el mismo utilizando este método para balancear la carga.

6.5 Servidor WEB

Para probar las capacidades del servidor WEB implementado con el APACHE HTTP SERVER v2.2, se procedió a ingresar a la página de Internet generada por el SCADA donde se encuentra la base de datos y los reportes de funcionamiento y de alarmas del sistema por medio de un navegador de Internet, y luego iniciar una sesión remota en el SCADA para acceder al historial de alarmas.

Para realizar esto el sistema está configurado por motivos de seguridad para pedir un nombre de usuario y una contraseña para los usuarios que se conectan por red, se procede a realizar el inicio de sesión por medio de la dirección HTTP://192.168.1.5, esta dirección debe corresponder a la dirección IP de la computadora donde corre el SCADA, en este caso el panel PC industrial.

Esta es la página principal del sistema, en esta página se observa la base de datos del sistema con los reportes de funcionamiento y los reportes de alarma que hayan sido generados por el sistema, con solo dar clic en uno de estos el usuario puede acceder a la información que el reporte contiene. En la figura 54 se muestra una imagen de esta página.

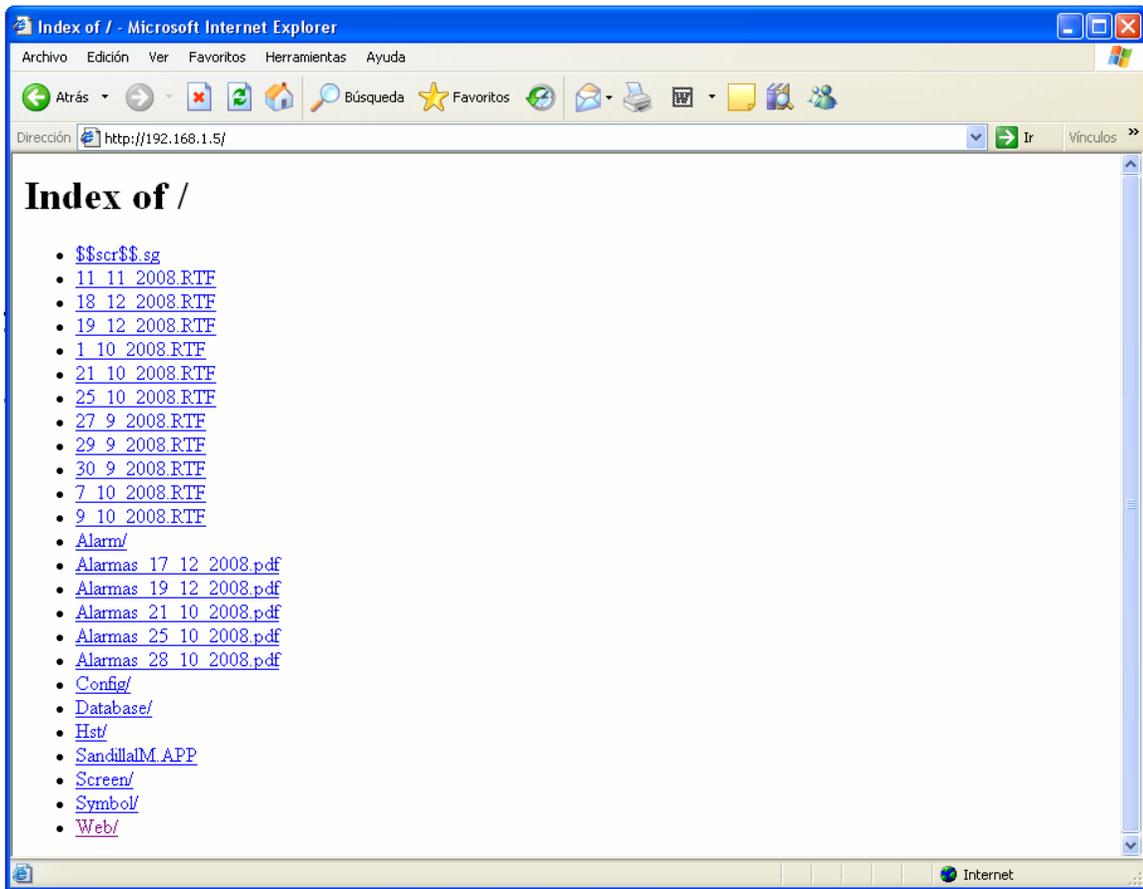


Figura 54. Página de Internet con la base de datos de sistema.

En la figura 54 se aprecia la base de datos del sistema, los archivos con formato RTF corresponden a reportes de estado y los PDF a reportes de alarmas, en la carpeta Web encontramos las pantallas del SCADA, se ingresa en esta carpeta y se tiene llega a la página mostrada en la figura 55.

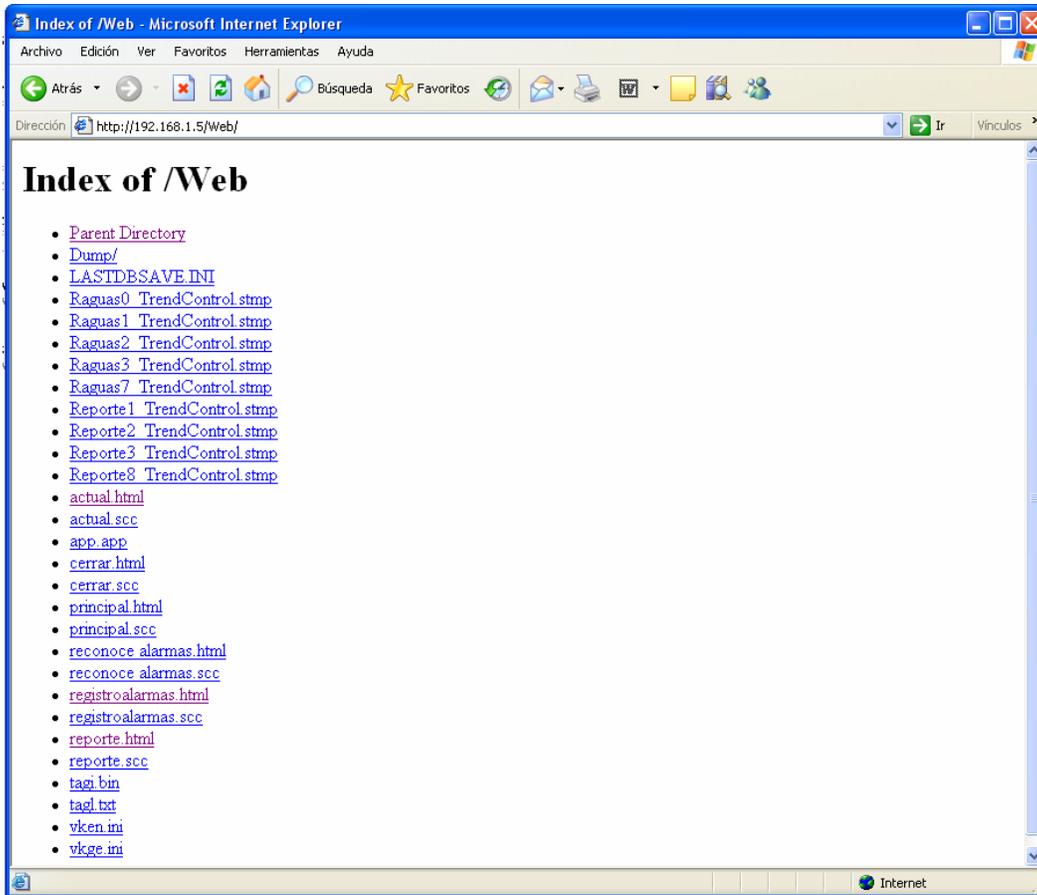


Figura 55. Página de Internet con las pantallas del SCADA.

En la figura anterior se muestra la página de Internet que tiene la lista de las pantallas del SCADA, estas corresponden a los archivos con formato HTML, en este caso se procede a ingresar a la pantalla RegistroAlarmas para observar el historial de alarmas, cuando el usuario no ha abierto ninguna pantalla en la sesión, al realizar el primer acceso el sistema pide un usuario y una contraseña por medio de una ventana de dialogo, esta información se muestra en la figura 56.



Figura 56. Pantalla para inicio de sesión de los usuarios de red.

Luego de iniciar la sesión el usuario puede navegar entre las pantallas del SCADA como si estuviera utilizando el equipo directamente, se muestra a continuación el contenido de la pantalla RegistroAlarmas visto a través del navegador de Internet.

Activación	Mensaje	Normalización	Recon
12/19/2008 15:39:16	Válvula 2 en cierre de emergencia	12/19/2008 15:39:42	12/19/2
12/19/2008 15:39:16	Válvula 2 en cierre de emergencia		
12/19/2008 15:39:16	Válvula 2 en cierre de emergencia		12/19/2
12/19/2008 15:39:16	Angulo de apertura de la válvula 2 demasiado bajo		
12/19/2008 15:39:16	Angulo de apertura de la válvula 2 demasiado bajo		12/19/2
12/19/2008 15:39:16	Angulo de apertura de la válvula 2 demasiado bajo	12/19/2008 15:39:42	12/19/2
12/19/2008 15:39:11	Se disparó una alarma leve en el sistema	12/19/2008 15:39:16	
12/19/2008 15:39:11	Se disparó una alarma leve en el sistema	12/19/2008 15:39:16	12/19/2
12/19/2008 15:39:10	Angulo de apertura de válvula 2 bajo	12/19/2008 15:39:16	12/19/2
12/19/2008 15:39:10	Angulo de apertura de válvula 2 bajo	12/19/2008 15:39:16	
12/19/2008 15:18:07	Válvula 1 en cierre de emergencia	12/19/2008 15:18:58	12/19/2
12/19/2008 15:18:07	Válvula 1 en cierre de emergencia		
12/19/2008 15:18:07	Válvula 1 en cierre de emergencia		12/19/2
12/19/2008 15:18:06	Aceite demasiado bajo en la reserva		
12/19/2008 15:18:06	Aceite demasiado bajo en la reserva	12/19/2008 15:18:39	12/19/2
12/19/2008 15:18:06	Aceite demasiado bajo en la reserva	12/19/2008 15:18:39	
12/19/2008 15:18:06	Presión muy baja en acumulador	12/19/2008 15:18:39	12/19/2
12/19/2008 15:18:06	Muy poco aceite en acumulador	12/19/2008 15:18:39	12/19/2
12/19/2008 15:18:06	Presión muy baja en acumulador		
12/19/2008 15:18:06	Muy poco aceite en acumulador		
12/19/2008 15:18:06	Muy poco aceite en acumulador	12/19/2008 15:18:39	

Figura 57. Pantalla RegistroAlarmas vista por medio de un navegador de Internet.

En esta pantalla el usuario puede ver los registros de alarmas, regresar a la pantalla Actual o generar un reporte de alarmas, se mantiene la misma funcionalidad que si se estuviera utilizando el panel PC directamente.

Luego de realizar todas estas pruebas para evaluar el funcionamiento de todo el sistema a la vez, se puede afirmar que sus capacidades cumplen con lo propuesto en los objetivos y en el apartado 1.3, adicionalmente si el sistema completo funciona correctamente entonces las partes que lo conforman están cumpliendo con las funciones correspondientes.

De esta manera se concluye que el PLC y los módulos de expansión seleccionados, el panel PC y el banco de pruebas desarrollado cumplen con los objetivos de hardware planteados en el proyecto para cada uno.

El PLC tiene las capacidades adecuadas para manejar las entradas y salidas necesarias para el sistema y las capacidades de comunicación requeridas, el panel PC mostró ser una poderosa herramienta para la monitorización del sistema incluso desde otras computadoras por medio de un servidor Web.

El banco de pruebas desarrollado permitió realizar pruebas como por ejemplo simulaciones enteras de procesos de puesta en marcha para evaluar y optimizar el funcionamiento del sistema, de esta manera se probó que la lógica desarrollada para el controlador que se implementó en un PLC utilizando diagramas de escalera, y la programación del SCADA y servidor Web funcionan correctamente.

Adicionalmente se determinaron las características que deben tener los nuevos sensores utilizados para reemplazar los del sistema utilizado anteriormente en la Planta Hidroeléctrica del ICE en Sandillal.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- El banco de pruebas desarrollado permitió simular satisfactoriamente los sensores y otras entradas del sistema para realizar un proceso de puesta en marcha y diversas pruebas para verificar si el prototipo desarrollado tiene capacidad de realizar las funciones en el apartado 1.3.
- Los sensores necesarios para reemplazar los utilizados por el sistema a cambiar en el controlador de mariposas de la represa en Sandillal deben tener las características que se muestran en la tabla 9.
- El PLC SEIMENS S7-300 312C utilizado en el proyecto con sus módulos de expansión, tiene la capacidad para manejar las entradas y salidas del sistema y para realizar las tareas de comunicación requeridas para el proyecto.
- El panel táctil seleccionado fue capaz de desplegar la interfase de usuario generada por el SCADA del sistema y de intercambiar datos con el usuario por medio de su pantalla táctil.
- La lógica de control desarrollada para el sistema permitió realizar las funciones especificadas para el proyecto en el apartado 1.3 Especificaciones de funcionamiento.
- El software Step 7 permitió implementar la lógica de control desarrollada para el sistema en un PLC 312C utilizando el lenguaje de programación de diagrama de escalera.
- El software Indusoft Web Studio V6.3 permitió implementar un SCADA para el sistema utilizando pantallas para crear a interfase de usuario donde se intercambian datos con este y se generan los reportes de funcionamiento.
- El software APACHE HTTP Server v2.2 permitió programar un servidor de Web para publicar la página de Internet generada por el SCADA con los datos del sistema utilizando el protocolo de comunicación HTTP.
- Los resultados obtenidos luego de realizar el proceso de simulación de una puesta en marcha, y las otras pruebas realizadas al prototipo desarrollado en el banco de pruebas, permiten concluir que el sistema tiene las capacidades especificadas en el apartado 1.3 que corresponden a las expectativas del ICE al impulsar este proyecto.
- El SCADA desarrollado es una herramienta clave para el mantenimiento correctivo y preventivo del sistema de válvulas de mariposa de la represa del ICE en Sandillal, pues permite determinar las causas de una emergencia y recrear el orden en que ocurrieron los problemas y en que momento se dieron.
- Los módulos de control ON-OFF desarrollados para el sistema tienen la capacidad de mantener la presión y el nivel de aceite del acumulador en un rango óptimo de funcionamiento disminuyendo los arranques y paradas de actuadores gracias a un comportamiento con histéresis.

- El módulo implementado para controlar el tanque hidroneumático tiene la capacidad de balancear la carga de trabajo de las bombas de aceite disminuyendo la frecuencia con las que estas requieren de mantenimiento.
- Las modificaciones realizadas al sistema original permiten que el sistema tenga un mayor control sobre el estado del equipo y pueda prevenir una mayor cantidad de situaciones adversas.
- El sistema es capaz de monitorizar el estado del tanque de reserva de aceite para generar alarmas graves o leves cuando ocurre un problema.

7.2 Recomendaciones

En etapas posteriores a este proyecto se pueden realizar mejoras al sistema, cuando el sistema sea instalado en la represa y sea probado por el tiempo surgirán características del sistema que pueden ser mejoradas, adicionalmente a estas mejoras se procede a sugerir un par de mejoras que podrían considerarse en estas etapas futuras que le dan una mayor funcionalidad al sistema pero que quedaron fuera de esta etapa del proyecto.

La primera consiste en modificar el tanque de reserva hidráulica para proveer al sistema con capacidades correctivas ante algún problema, actualmente se monitoriza que el nivel de aceite en la reserva no se salga de valores límites y que la temperatura de aceite no sea demasiado alta, pero cuando un valor se sale del rango óptimo el sistema no puede hacer nada para tratar de normalizar la situación.

Una mejora a las capacidades del sistema sería instalar un radiador de aceite y un sistema de bombeo, de manera que cuando el sistema detecte que la temperatura del aceite esta llegando a valores elevados active el sistema de bombeo para que haga circular el aceite por el radiador de manera que se logre enfriar el aceite antes de que la situación sea crítica y halla que realizar procedimientos como paros de emergencia.

Para lograr esto sería idóneo que se utilice un sensor analógico para la temperatura de aceite que permita saber la temperatura exacta del sistema y no solo niveles discretos de esta, para esto es necesario ampliar la cantidad de entradas analógicas del PLC, pues las 8 entradas del módulo actual están ocupadas, sin embargo el PLC tiene 2 espacios mas para agregar módulos de expansión, de esta manera al agregar un módulo para entradas analógicas adicional, se puede aprovechar además para utilizar un sensor de nivel de aceite analógico para medir el nivel de aceite en la reserva y mostrar esta lectura en el SCADA, por lo que el usuario puede conocer el nivel exacto de aceite en la reserva desde su oficina en vez de conocer solamente una aproximación a un nivel alto medio o bajo, o tener que ir hasta donde está el sistema para conocer el nivel exacto.

Otra modificación que se recomienda para el sistema es ampliar la capacidad de dar potencia del circuito de alimentación en la línea de 110V_{AC} con respaldo del banco de baterías de la represa, esto permitiría que el inversor de poder alimente al panel táctil por lo que aun cuando falle la red eléctrica externa, el sistema podría seguir funcionando por largos periodos de tiempo sin verse afectado, actualmente esta línea

alimenta a los dos controladores del sistema pero no al panel PC, por lo que ante una falla en la red eléctrica el panel se alimenta de una UPS, que al cabo de cerca de 30 minutos se queda sin energía, el control no se ve afectado, pero se pierde la capacidad de monitorización del sistema.

Para hacer esta modificación habría que ampliar la capacidad del convertidor DC-DC que alimenta al inversor de poder, actualmente este tiene una capacidad de 350 Watts, pero se necesitaría de una capacidad de al menos 550Watts.

Bibliografía

1. ABB. **2600T Series Pressure Transmitters** [PDF]. Model 261AS. Italia. Marzo del 2008.
2. ALLEN-BRADLEY, **CompactLogix Overview** [En línea] <<http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/2416247/407648/7921736/index.html>> [Consulta: 19 de noviembre del 2008]
3. ICE, **La Misión del Grupo ICE** [En línea] <www.grupoice.com/esp/ele/infobase/mision.htm> [Consulta: 9 de mayo 2008].
4. ICE, **Proyectos Electricidad - Generación** [En línea] <<http://www.grupoice.com/esp/ele/infraest/electric/instalac1b.htm#1>> [Consulta: 9 de mayo 2008].
5. Ing. Ricardo Jiménez. **Control Lógico y Controladores Lógicos Programables** [En línea] < <http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-Control-logico-y-controladores-logicos-programables.pdf> > [Consulta: 30 de agosto 2008]
6. Indusoft. **SIEME** [PDF]. Driver Version 2.04. 28 de Marzo del 2006. Revisión F.
7. Maple Systems. **PC217A** [En línea] < <http://www.maple-systems.com/products/specs/PC217A.htm> > [Consulta: 03 de enero 2009].
8. SCHNEIDER-ELECTRIC, **HMI and SCADA solution** [En línea] <[http://www.download.schneider-electric.com/C1257307002C04D7/all/1FF3BD48C7E07E20C12573090047949F/\\$File/_hmi%20et%20scada%20for%20water_broc_en_200704.pdf](http://www.download.schneider-electric.com/C1257307002C04D7/all/1FF3BD48C7E07E20C12573090047949F/$File/_hmi%20et%20scada%20for%20water_broc_en_200704.pdf)> [Consulta: 19 de noviembre del 2008]
9. SIEMENS, **SIMATIC Controllers, the innovative solution for all automation tasks** [En línea] <http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/en/brochure_simatic-controller_en.pdf > [Consulta: 19 de noviembre 2008]
10. SIEMENS, **S7 NIVEL 1 Totally Integrated Automation**. SITRAIN Formación en Automatización y Accionamientos, Versión 5.2_1.1, Siemens SA, 2005.
11. Rincón educativo. **Cifras significativas e incertidumbres en las mediciones** [En línea] <www.rinconeducativo.com/datos/arbol/Bachiller/Física/cifras%20significativas.doc> [Consulta: 7 de enero del 2009]
12. Voest-Alpine. **Manual de Válvula de Mariposa Turbina**. Departamento de Turbinas y Plantas Hidráulicas, Volumen V, Linz, Austria, 1991.

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

- **A:** Unidad para medir intensidad de corriente eléctrica.
- **Actuador:** Dispositivo que interviene activamente en un proceso al ser accionado.
- **Acumulador:** Tanque con aceite y aire a presión, guarda energía en forma de presión para mover el aceite con esta, también conocido como tanque hidroneumático.
- **ADSL:** Línea de suscripción digital asimétrica, provee acceso ininterrumpido a Internet.
- **Ah:** Amperio-horas, unidad para medir la capacidad de almacenar energía de una batería.
- **Álabes:** Cada una de las paletas curvas en una turbina.
- **Algoritmo:** Lista de pasos que permiten solucionar un problema o realizar una tarea.
- **ARCOSA:** Proyecto hidroeléctrico del ICE conformado por las plantas hidroeléctricas de Arenal, Corobicí y Sandillal.
- **AVR:** Regulador Automático de Voltaje.
- **Banco de baterías:** Grupo de baterías que se utilizan juntas para aumentar la capacidad.
- **Banco de pruebas:** Conjunto de equipo utilizado para hacer simulaciones y pruebas a otros equipos.
- **Bar:** Unidad para medir presión, equivale a 14.5 PSI.
- **Bool:** Tipo de variable que tiene valor falso o verdadero.
- **Botonera:** Panel donde se concentran los botones y dispositivos para que un circuito interactúe con el usuario.
- **Bypass:** Válvula utilizada para igualar la presión en dos sistemas independientes.
- **Caudal:** Cantidad de fluido por unidad de tiempo que pasa a través de un elemento.
- **Convertidor CD-CD:** Dispositivo electrónico que cambia el nivel de voltaje en corriente directa de una línea de alimentación a otro nivel en corriente directa.

- **CPU:** Unidad central de Procesamiento, se refiere el módulo principal del PLC.
- **Diagramas de escalera:** Lenguaje de programación que utiliza contactores y bobinas como elementos principales para establecer lógica de control.
- **Dirección IP:** Dirección de una computadora en una red de computadoras que utiliza la pila de protocolos TCP/IP para comunicarse.
- **Electroválvulas:** Válvulas controladas eléctricamente, pueden abrirse o cerrarse por medio de una señal eléctrica.
- **Embalse:** Acumulación de agua producida por una represa.
- **Ethernet:** Medio físico mas utilizado para implementar redes de computadoras.
- **FLASH:** Tipo de memoria no volátil de estado sólido.
- **Francis:** Tipo de turbina utilizada para represas hidroeléctricas con saltos de mediana altura.
- **Generador:** Máquina eléctrica como la utilizada en las represas hidroeléctricas para convertir la energía cinética del agua en energía eléctrica.
- **Gobernador:** Sistema de control central de una represa que se encarga de controlar todos los subsistemas de esta.
- **GSM:** Sistema Global para Móviles, red utilizada para comunicar algunos dispositivos celulares.
- **Hardware:** Parte física de un sistema, consiste en el equipo palpable.
- **Histéresis:** Tendencia de un sistema de conservar su estado cuando una condición está cambiando.
- **HMI:** Interfase Humano-Máquina, utilizada por un sistema para intercambiar datos con el usuario.
- **HTML:** Lenguaje de Marcas de Hipertexto, es el lenguaje mas utilizado para implementar páginas de texto.
- **HTTP:** Protocolo para Transportar Hipertexto, protocolo utilizado para acceder a páginas de Internet en una red de computadoras.
- **Hz:** Unidad de medida de frecuencia, corresponde a 1 ciclo por Segundo.
- **ICE:** Instituto Costarricense de Electricidad.
- **Inductancia:** Uno de los componentes básicos de los circuitos eléctricos, es la relación entre el flujo magnético y la intensidad de corriente eléctrica.

- **Interfase gráfica:** Medio utilizado por un sistema para intercambiar datos con el usuario de manera gráfica.
- **Internet:** La mayor red de computadoras a nivel mundial.
- **Inversor de poder:** Dispositivo electrónico que permite obtener un nivel de tensión en corriente alterna a partir de un nivel de tensión en corriente directa.
- **IP:** Estándar internacional para clasificar el nivel de protección contra intrusión de objetos y agua.
- **ITCR:** Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- **Kaplan:** Tipo de turbina utilizada en represas con saltos de poca altura y gran caudal de agua.
- **KVA:** KiloVoltioAmperios, unidad de capacidad de respaldo ofrecida por las UPS.
- **KW:** KiloWatts, medida de potencia eléctrica equivalente a mil watts.
- **KB:** KiloByte, unidad para medir la capacidad de una memoria para guardar datos binarios, equivale a 8192 bits.
- **LCD:** Pantalla de cristal líquido, se caracteriza por tener un aspecto delgado.
- **LED:** Diodo emisor de luz, semiconductor que emite luz cuando lo atraviesa una corriente eléctrica.
- **m.s.n.m.:** metros sobre el nivel del mar, se utiliza para medir alturas relativas referidas a la altura de la superficie del mar.
- **mA:** miliAmperios, equivale a una milésima de Amperio.
- **Manómetro:** Instrumento que mide la presión de un sistema referida a la presión atmosférica.
- **Mariposa:** Válvula que gira 90 grados para pasar de su posición abierta a cerrada.
- **MB:** MegaByte, equivale a 1048576 bits.
- **MET:** Máquinas, Equipos y Talleres. Proyecto del ICE ubicado en las instalaciones de la represa hidroeléctrica en La Garita.
- **Módulo:** Componente auto controlado de un sistema, posee una interfaz definida hacia otros componentes.

- **MPI:** Interfase de Paso de Mensajes, protocolo de comunicación muy utilizado en sistemas de control distribuidos.
- **NEMA:** Índice de protección estandarizado por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de los Estados Unidos.
- **ON-OFF:** Tipo de control donde activa o desactiva un actuador para intervenir en el sistema.
- **Panel táctil:** Pantalla tipo LCD con capacidad de reaccionar al contacto.
- **Pascal:** Físico, matemático y filósofo francés.
- **PC industrial:** Computadora robusta preparada para trabajar en las difíciles condiciones de los ambientes industriales.
- **PDF:** Formato de documento portátil, utilizado para almacenar documentos.
- **PLC:** Controlador Lógico Programable, dispositivos electrónicos muy utilizados para automatización industrial.
- **Potenciómetro:** Resistor que tiene la capacidad de variar el valor de su resistencia.
- **Presión de aguas abajo:** Presión ejercida sobre la válvula de mariposa por las aguas al lado de la turbina en una represa hidroeléctrica.
- **Presión de aguas arriba:** Presión ejercida sobre la válvula de mariposa por las aguas al lado del embalse en una represa hidroeléctrica.
- **Presión hidrostática:** Presión ejercida en un punto en el interior de un líquido proporcional a la profundidad de inmersión.
- **Presión manométrica:** Presión en un punto referida a la presión atmosférica.
- **RAM:** Memoria de acceso aleatorio, de carácter volátil.
- **Relé:** Dispositivo electrónico que cierra o abre un contacto cuando se polariza so bobina, utilizado en circuitos de control.
- **RS232:** Interfase de comunicación entre computadoras, utiliza comunicación serial.
- **RTF:** Formato de Texto Enriquecido, utilizado por programas para edición de texto.
- **RUN:** Estado de un PLC en el que se ejecuta el programa en la memoria del dispositivo.

- **SCADA:** Registro de Datos y Control de Supervisión, aplicación diseñada para funcionar en computadoras de control industrial, se comunica con los dispositivos de campo como PLC.
- **Sensor:** Dispositivo que transforma variables físicas en variables eléctricas.
- **Sensor analógico:** Sensor que utiliza señales analógicas para hacer mediciones continuas de una variable, indica el valor exacto de la variable.
- **Sensores de interruptor:** Sensor que indica cuando una variable se encuentra en un rango determinado, no indica el valor exacto de la variable.
- **Sistema operativo:** Conjunto de programas de una computadora que se encargan de administrar sus recursos.
- **Software:** Lógica que se encuentra dentro de un computador digital.
- **Solenoide:** Conductor arrollado de manera que produce un campo magnético uniforme cuando es atravesado por una corriente.
- **Span:** Rango de valores que puede tomar una variable en el que un sensor puede tomar una medida exacta de su valor.
- **Tanque hidroneumático:** Ver acumulador.
- **TCP/IP:** Pila de protocolos de comunicación en los que se basa Internet.
- **Turbina:** Máquina que se utiliza para extraer energía de los fluidos que la atraviesan.
- **UPIC:** Unidad de Proyección, Innovación y Crecimiento, pertenece al ICE.
- **UPS:** Sistema de Alimentación Ininterrumpida, dispositivo que es capaz de proveer energía eléctrica por un periodo de tiempo a los dispositivos que tiene conectados cuando la red eléctrica externa falla.
- **V_{AC}:** Voltios en corriente alterna.
- **V_{CD}:** Voltios en corriente directa.
- **Web:** Ver Internet.
- **Word:** Posición de memoria en una computadora con una capacidad de 16 bits.

A.2 Protocolos de medición

Para evaluar el desempeño del proyecto se realizó una serie de pruebas al sistema en el banco de pruebas desarrollado con este fin, inicialmente se procedió a hacer una simulación de un proceso de puesta en marcha, este consiste de 25 pasos que se muestran a continuación:

- 1) Encender el PLC en funcionamiento manual y ejecutar el SCADA.
- 2) Poner todas las variables en valores normales de operación, igualar las presiones de agua arriba y abajo en las mariposas.
- 3) Evaluar las capacidades del PLC y el SCADA en funcionamiento manual observando la información desplegada en el SCADA.
- 4) Generar órdenes de abrir las mariposas y verificar que estas permanecen cerradas.
- 5) Poner el sistema en funcionamiento automático y comprobar que no se abren las mariposas.
- 6) Poner en emergencia por fallo externo (eléctrico) la mariposa 1 y generar la orden de abrirla, comprobar que esta no se abre.
- 7) Poner la mariposa 2 en bloqueo mecánico y dar la orden de abrirla, comprobar que esta no se abre.
- 8) Descompensar las presiones de aguas arriba y abajo en las mariposas, remover el bloqueo mecánico de la mariposa 2 y normalizar y reconocer todas las alarmas presentes.
- 9) Generar la orden de abrir la mariposa 1, comprobar que el sistema da la orden de abrir el bypass 1.
- 10) Activar el final de carrera del bypass 1, verificar que el SCADA indica que se están igualando las presiones.
- 11) Igualar las presiones de agua de la mariposa 1 y verificar que el sistema da la orden de abrir la mariposa 1.
- 12) Llevar la mariposa 1 a 90 grados y evaluar la animación de la apertura de la mariposa y el movimiento pistón, verificar si el sistema indica que la válvula se encuentra operando.
- 13) Verificar que el sistema genera la orden de cerrar el bypass 1 y activar el final de carrera correspondiente.
- 14) Realizar el procedimiento para llevar la mariposa 2 a operación dejando el bypass abierto.
- 15) Disminuir el ángulo de apertura de la mariposa 1 a 65° y verificar que se genera una alarma leve y el sistema intenta abrir la mariposa.
- 16) Disminuir el ángulo de apertura de la mariposa 1 a 35 grados para confirmar que se genera una emergencia en la mariposa 1 se da la orden de cerrarla.

- 17) Llevar el ángulo de apertura de la mariposa 1 a menos de 0.5° , confirmar que el sistema retira la presión del sistema de la mariposa 1.
- 18) Generar una orden de emergencia general por inundación, comprobar que el sistema genera la orden de cerrar el bypass 2 y la mariposa 2 además de la alarma correspondiente.
- 19) Llevar el ángulo de apertura de la mariposa 2 a menos de $0,5^\circ$.
- 20) Verificar que dos minutos después de la emergencia el sistema quita la presión del sistema hidráulico de la mariposa 2 aunque el bypass está abierto.
- 21) Generar un reporte de funcionamiento.
- 22) Remover las alarmas y reconocerlas.
- 23) Generar un reporte de alarmas.
- 24) Llevar la mariposa 2 a operación y generar un reporte de funcionamiento.
- 25) Evaluar que los reportes de alarma y funcionamiento generados tengan la información adecuada.

Seguidamente se hace una prueba donde se generan todas las posibles situaciones de error, generando una tabla de datos donde se muestran las acciones tomadas por el sistema y las acciones que se espera que el sistema tome ante cada una de las condiciones.

Se procede a simular situaciones con diversas emergencias y se tabulan los resultados obtenidos además de los resultados esperados o las acciones que se espera que el sistema tome ante una situación como la simulada, esto facilitará un posterior análisis del desempeño del sistema y la capacidad de reaccionar ante situaciones problemáticas.

Adicionalmente se evalúa la capacidad del sistema para controlar la presión y el nivel de aceite en el tanque hidroneumático, además de la capacidad del sistema para balancear las cargas de las bombas.

Con este fin se procede a evaluar el control de la presión en el tanque hidroneumático, para lo que se lleva la presión a valores fuera del rango óptimo de funcionamiento utilizado para el banco de pruebas de 30 bar a 65 bar para observar la reacción del sistema, se lleva la presión a un valor menor a 30 bar y se verifica que el sistema de la orden de agregar aire comprimido al acumulador

Luego se procede a llevar el valor de la presión en el tanque hidroneumático por encima del valor máximo del rango óptimo de 65 bares para evaluar la reacción del sistema.

Ahora se evalúa la capacidad para controlar el nivel de aceite en el acumulador, el rango óptimo de funcionamiento para el nivel de aceite es de 600 a 900 litros, primero se evalúa la reacción del sistema ante un valor bajo de nivel de aceite.

Posteriormente se lleva el nivel de aceite por encima de los 900 litros y se observa la reacción del sistema.

Se procede a evaluar la capacidad del sistema para balancear la carga de trabajo entre las dos bombas de aceite, para lograrlo se sigue el siguiente procedimiento, primero se lleva el nivel de aceite a un valor bajo hasta que el sistema encendiera la bomba seleccionada como principal, luego se lleva el valor de aceite hasta un nivel optimo para completar el ciclo de bombeo, se repite esta acción hasta que el sistema cambie la bomba principal de la 1 a la 2.

Posteriormente se repiten los ciclos de bombeo de aceite hasta que el sistema seleccione como bomba principal la número 1 y se cuentan los ciclos necesarios para realizar el cambio, luego se hacen mas ciclos hasta que el sistema cambie la bomba principal nuevamente a la 2 y se vuelve a contar los ciclos utilizados para producir este cambio.

Para probar las capacidades del servidor WEB implementado con el APACHE HTTP SERVER v2.2, se procede a ingresar a la página de Internet generada por el SCADA donde se encuentra la base de datos y los reportes de funcionamiento y de alarmas del sistema por medio de un navegador de Internet, y luego iniciar una sesión remota en el SCADA para acceder al historial de alarmas.

Para realizar esto el sistema está configurado, por motivos de seguridad, para pedir un nombre de usuario y una contraseña para los usuarios que se conectan por red, se procede a realizar el inicio de sesión por medio de la dirección HTTP://192.168.1.5, esta dirección debe corresponder a la dirección IP de la computadora donde corre el SCADA, en este caso el panel PC industrial.

Luego de iniciar la sesión se debe verificar que el usuario puede navegar entre las pantallas del SCADA como si estuviera utilizando el equipo directamente.

Anexos

Anexo B.1 Datos del PLC S7-300 312C

Technical data of CPU 31xC
7.2 CPU 312C

Technical data	
Address areas (I/O)	
Total I/O address area	
• Inputs	1024 bytes (user-specific addressing)
• Outputs	1024 bytes (user-specific addressing)
I/O process image	
• Inputs	128 bytes
• Outputs	128 bytes
Digital channels	
• Integrated channels (DI)	10
• Integrated channels (DO)	6
• Inputs	266
• Outputs	262
• Inputs, central	266
• Outputs, central	262
Analog channels	
• Integrated channels (AI)	None
• Integrated channels (AO)	None
• Inputs	64
• Outputs	64
• Inputs, central	64
• Outputs, central	64
Removal	
Racks	Max. 1
Modules per rack	Max. 8
Number of DP masters	
• Integrated	None
• Via CP	4
Operable function modules and communication processors	
• FM	Max. 8
• CP (PtP)	Max. 8
• CP (LAN)	Max. 4
Time	
Clock	Yes (SW clock)
• Buffered	No
• Accuracy	Deviation per day < 15 s
• Behavior of the realtime clock after POWER ON	The clock keeps running, continuing at the time-of-day it had when power was switched off.

Anexo B.2 Datos del panel PC industrial PC217A

Hardware Specifications

Model Part Number - PC217A

Display

Type - SXGA Color TFT LCD
Size (Diagonal)- 17 inches [432 mm]
Size (W x H) - 13.4 x 10.8 inches [342 x 274 mm]
Resolution - 1280 x 1024 pixels
Brightness - 300 cd/m²
Brightness Control- potentiometer on rear panel
Contrast- 500:1
Max. Colors - 16M (6-bit FRC)
Pixel Pitch (H x V) - 0.264 x 0.264 mm
Viewing Angle (T/B/R/L)- 70°/60°/70°/70°
Backlight - CCFL with 50,000 hour minimum life span

Touchscreen

Type - 7-wire analog resistive

Hardware

Microprocessor - Intel® Celeron® 2.0GHz, expandable to Intel® Pentium 4® 2.8 GHz
Memory Support - 256MB DDR, expandable to 1GB
Hard Drive - 80 GB standard
Storage - IDE Compact Flash module optional (internal)
Drive Bays - for optional CD/DVD drive and 3.5" Floppy drive
USB - 2 x USB 2.0
VGA port - up to 1600 x 1200 pixels max.
Keyboard/mouse - 2 mini DIN ports
Audio - Line in/Line out/Mic in
Warranty - 1 year

Software

Operating System - Microsoft® Windows® XP Professional Edition

Physical Dimensions

Height - 13.5 inches [344 mm]
Width - 17.3 inches [440 mm]
Total Depth - 4.2 inches [107 mm]

[Panel Cutout and Dimensional Drawings](#)

Mechanical

Material - aluminum front bezel + electro galvanized steel chassis
Mounting - panel
Wiring - AC input jack for power and D-style Comm connectors
Weight - 28.6 pounds [13 kg]

Environment

Ratings - IP65, NEMA 4
Operating Temperature - 32 to 104° F [0 to 40° C]

Anexo B.3 Datos del transmisor de presión 261AS

2600T Series Pressure Transmitter
Model 261GS, 261AS

SS/261GS/AS_3

Functional Specifications

Range and span limits

Sensor Code	Upper Range Limit (URL)	Lower Range Limit (LRL) für 261GS	Minimum span	
			261GS gauge	261AS absolute
C	6 kPa 60 mbar 24 inH ₂ O	-6 kPa -60 mbar -24 inH ₂ O	0.3 kPa 3 mbar 1.2 inH ₂ O	0.3kPa 3 mbar 2.25 mmHg
F	40 kPa 400 mbar 160 inH ₂ O	-40 kPa -400 mbar -160 inH ₂ O	2 kPa 20 mbar 8 inH ₂ O	2 kPa 20 mbar 15 mmHg
L	250 kPa 2500 mbar 1000 inH ₂ O	0 absolute	12.5 kPa 125 mbar 50 inH ₂ O	12.5 kPa 125 mbar 93.8 mmHg
D	1000 kPa 10 bar 145 psi	0 absolute	50 kPa 500 mbar 7.25 psi	50 kPa 500 mbar 375 mmHg
U	3000 kPa 30 bar 435 psi	0 absolute	150 kPa 1.5 bar 21.7 psi	150 kPa 1.5 bar 21.7 psi
R	10000 kPa 100 bar 1450 psi	0 absolute	500 kPa 5 bar 72.5 psi	
V	60000 kPa 600 bar 8700 psi	0 absolute	3000 kPa 30 bar 435 psi	

Note:

Lower Range Limit (LRL) for 261AS is 0 absolute for all ranges.

Span limits

Maximum span = Upper range limit (URL)
IN ORDER TO OPTIMISE THE TRANSMITTER PERFORMANCE IT IS ADVISABLE TO SELECT THE TRANSMITTER SENSOR TO PROVIDE THE MINIMUM POSSIBLE TURNDOWN.
Turndown = Upper range limit / Calibrated span

Zero suppression and elevation

Zero and span can be adjusted to any value within the range limits detailed in the table as long as:
- calibrated span ≥ minimum span

Damping

Adjustable time constant: 0 to 60 s. This is in addition to sensor response time. Can be adjusted via local indicator, hand terminal or PC based software.

Turn on time

Operation within specification in less than 10 s with minimum damping.

Insulation resistance

> 100 MΩ at 500 V DC (terminals to earth)

Operative limits

Temperature limits °C (°F):

Ambient temperature limits (is the operating temperature)

-40°C and +85°C (-40°F and +185°F)
white oil filling: -6°C and +85°C (-21°F and +185°F)
Lower limit for LCD indicator and Viton gasket: -20°C (-4°F)
Lower limit for perfluorelastomer gasket: -25°C/-15°C (-13°F/+5°F) (ref. to section "Pressure Limits")
Upper limit for perfluorelastomer gasket: +80°C (+176°F)
Upper limit for LCD indicator: +70°C (+158°F)

Note:

For Hazardous Atmosphere applications see the temperature range specified on the certificate/approval relevant to the aimed type of protection.

Process temperature limits

Lower limit
- -50°C (-58°F); -20 C (-4°F) for Viton gasket
-25°C/-15 °C (-13 F/+5 °F) for perfluorelastomer gasket (ref. to section "Pressure Limits")
-6°C (+21°F) for white oil filling
Upper limit
- +120°C (+250°F)
- +80°C (+176°F) for perfluorelastomer gasket

Storage temperature limits

Lower limit: -50°C (-58°F), -40°C (-40 °F) for LCD indicators
-6°C (+21F) for white oil filling
Upper limit: +85°C (+185°F)

Pressure limits

Overpressure limits (without damage to the transmitter)

0 absolute to
- 1 MPa, 10 bar, 145 psi for sensor codes C, F
- 0.5 MPa, 5 bar, 72.5 psi for sensor code L
- 2 MPa, 20 bar, 290 psi für Sensorcode D
- 6 MPa, 60 bar, 870 psi for sensor code U
- 20 MPa, 200 bar, 2900 psi for sensor code R
- 90 MPa, 900 bar, 13050 psi for sensor code V
- 0.6 MPa abs, 6 bar abs, 87 psia for perfluorelastomer gasket, T ≥ -15 °C (+5 °F)
- 0.18 MPa abs, 1.8 bar abs, 26 psia for perfluorelastomer gasket, T ≥ -25 °C (-13 °F)

Proof pressure

The transmitter can be exposed to line pressure for pressure test up to:
refer to Overpressure limits