

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Diseño de control automático para apertura de
compuertas de excedencia del embalse Sandillal**

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

Alvaro José Alvarado Martínez

Cartago, marzo de 2009

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

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

Miembros del Tribunal



Ing. Arnaldo Rojas Coto

Profesor lector



Ing. Marvin Hernández Cisneros

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.

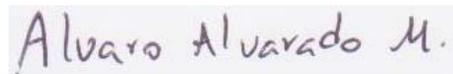
Cartago, 2 de marzo de 2009

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona y que en él se utilizaron conceptos extraídos de literatura referente al tema en estudio y conocimientos propios.

En los casos en que se utilizó material bibliográfico se procedió a indicar en cada caso las fuentes utilizadas mediante las respectivas citas.

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

Cartago, 2 de marzo del 2009

A handwritten signature in blue ink that reads "Alvaro Alvarado M." is written on a light blue rectangular background. The signature is written in a cursive style.

Álvaro José Alvarado Martínez

Céd. 5 0337 0223

RESUMEN

En la actualidad el manejo del recurso hídrico es de vital importancia, por lo que se debe tener un control confiable y adecuado de él. De esta inquietud surge este proyecto, que se relaciona con la necesidad de modernizar la lógica de control de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal, las cuales presentan sensores y dispositivos de control considerados poco confiables; además de presentar problemas en el sensor encargado de la realimentación del posicionamiento de las compuertas.

La modernización de los procesos presentes en el centro de producción Sandillal lleva a un cambio en los sistemas de control y comunicación de los dispositivos utilizados, por lo que se tiene la necesidad de buscar un sistema alternativo de control y comunicación que contenga una estructura capaz de conectarse con dispositivos presentes en otros procesos de la planta, así como una lógica de control de mayor fiabilidad en comparación con la de este momento.

Con la propuesta de una solución alternativa para el sistema de control de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal se presenta un proyecto que incluye un dispositivo de control programable, el cual muestra características suficientes para el control del movimiento en los diferentes modos de operación de las compuertas, y cuenta con capacidad de comunicación con el usuario mediante otros dispositivos instalados en el lugar. Se propone, a la vez, otro tipo de sensor para la realimentación de información del movimiento de las compuertas.

Palabras claves: Automatización, caracterizar, compuerta, comunicación, control, diseño, movimiento, PLC, sensor.

ABSTRACT

Nowadays, the management of hydric resources is of vital importance, that is why, having adequate and trustworthy control of them is fundamental. This project arises from the need of modernizing the logic of the control system for the flooding gates of Sandillal dam. These gates currently present sensors and control devices which are considered to have little trustworthiness; besides there are problems presented by the sensor in charge of the feedback for the gates positioning control.

The modernization of the processes present at the Sandillal production center, leads to a change in the control and communication systems of the used devices, reason why exists the need of searching for an alternative control and communication system with an structure capable of connecting with other devices within the plant, and a control's logic with a higher degree of trustworthiness compared to the actual system.

With an alternative solution proposal, to the control system of the flooding gates of Sandillal dam, is presented a project that includes a Programmable Logic Controller (PLC), which presents sufficient characteristics to achieve the control of the movement of the different operating modes of the gates. It also includes the capability of communicating with the user throughout other devices already installed in the plant. It is also proposed another feedback sensor for obtaining information from the gates.

Keywords: automation, characterize, gate, communication, control, design, movement, PLC, sensor.

DEDICATORIA

A Marlene Martínez Zamora, mi madre...
porque sin su ayuda, esto no hubiera pasado...

Álvaro José

AGRADECIMIENTO

A Marlene Martínez Zamora, mi madre...

A mi familia, por todo lo que siempre me ha brindado, especialmente a Raúl, por los consejos y la guianza en lo que se refiere a esta carrera.

A todo el personal del centro de producción Sandillal, por el apoyo brindado y el tiempo invertido en mi persona.

En especial a:

Alejandro Román Acuña, Raúl Martínez Zamora, Luis Castillo Morales, Carlos Acón Matamoros y José Canales Arce.

No existen palabras para describir mi aprecio.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA EXISTENTE E IMPORTANCIA DE SU SOLUCIÓN.....	1
1.2 SOLUCIÓN SELECCIONADA	5
CAPÍTULO 2: META Y OBJETIVOS	9
2.1 META	9
2.2 OBJETIVO GENERAL.....	9
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	11
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA POR MEJORAR	11
3.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES PRINCIPIOS FÍSICOS Y ELECTRÓNICOS RELACIONADOS CON LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	17
3.3.1 <i>Análisis del movimiento de la compuerta</i>	17
3.3.2 <i>Análisis de los componentes del sistema oleohidráulico</i>	23
3.3.3 <i>Herramienta de modelado</i>	27
CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	29
4.1 RECONOCIMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	29
4.2 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	30
4.3 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS Y SÍNTESIS DE UNA SOLUCIÓN.....	31
4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN	33
4.5 REEVALUACIÓN Y DISEÑO.....	34
CAPÍTULO 5: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN	35
5.1 ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y SELECCIÓN FINAL.....	35
5.1.1 <i>Descripción del modelo de las compuertas de excedencia</i>	35
5.1.2 <i>Descripción del prototipo de control y sus consideraciones</i>	35
5.1.3 <i>Sensores para medir el movimiento de las compuertas</i>	42
5.2 DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.....	43
5.2.1 <i>Características del PLC</i>	43
5.2.2 <i>Módulos propuestos para implementación del proyecto</i>	44
5.2.3 <i>Sensor de posición para implementación del proyecto</i>	52
5.3 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	58
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
6.1 RESULTADOS.....	70
6.2 ANÁLISIS	75
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
7.1 CONCLUSIONES	77
7.2 RECOMENDACIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA	79

APÉNDICES

A.1 GLOSARIO Y ABREVIATURAS

A.2 ESQUEMA ELÉCTRICO

A.3 INFORMACIÓN SOBRE LA EMPRESA

ANEXO A.1 DIAGRAMA DEL SISTEMA HIDRÁULICO

INDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1	Embalse Sandillal.....	2
Figura 1.2	Compuertas del embalse Sandillal.....	3
Figura 1.3	Dispositivo para medición de nivel de compuertas de excedencia del embalse.....	4

Capítulo 3

Figura 3.1	Esquema de compuertas radiales C4 y C5.....	12
Figura 3.2	Válvula elemento lógico.....	13
Figura 3.3	Diagrama general de la compuerta radial.....	17
Figura 3.4	Diagrama de movimiento y ángulos de la compuerta radial.....	18
Figura 3.5	Comportamiento del ángulo n (Figura 3.4).....	20
Figura 3.6	Comportamiento del ángulo m (Figura 3.4).....	21
Figura 3.7	Representación del movimiento de la compuerta.....	22
Figura 3.8	Sistema hidráulico básico.....	23
Figura 3.9	Partes de cilindro.....	24
Figura 3.10	Componentes de bomba de engranajes.....	26

Capítulo 5

Figura 5.1	Configuración Isla Advantys.....	38
Figura 5.2	Porcentaje de uso de recursos configurados.....	39
Figura 5.3	Forma de funcionamiento de IO scanning.....	41
Figura 5.4	PLC M340-2030.....	43
Figura 5.5	Descripción general de módulos para PLC M340.....	45
Figura 5.6	Módulo de entradas analógicas, BMX AMI 0410.....	46
Figura 5.7	Diagrama de conexiones internas de BMX AMI 0410.....	47
Figura 5.8	Módulo de salidas analógicas BMX AMO 0210.....	48
Figura 5.9	Módulo de entradas digitales, AMX DDI 3202K.....	48
Figura 5.10	Módulo de salidas digitales, AMX DDO 1602.....	49
Figura 5.11	Diagrama módulo BMX NOE 0100.....	50
Figura 5.12	Visualización de pantalla de configuración Tesys T.....	51
Figura 5.13	Pantalla de configuración de valores Tesys T.....	52
Figura 5.14	Señal de salida IT9420, respecto a su inclinación.....	55
Figura 5.15	Lugar donde se situaría el sensor.....	56
Figura 5.16	Movimiento del sensor IT9420.....	56
Figura 5.17	Diagrama de estados controlador de compuertas C4/C5.....	63
Figura 5.18	Diagrama de procesamiento de señales remotas.....	65
Figura 5.20	Panel de control.....	66
Figura 5.21	Diagrama de operación durante error en proceso.....	67
Figura 5.22	Diagrama de detección de fallas en el sensor de posición.....	68

Capítulo 6

Figura 6.1	Respuesta al escalón de los modelos de apertura del sistema.....	72
Figura 6.2	Respuesta al escalón de los modelos de cierre del sistema.	74

Apéndices

Figura A.1	Esquema Hidráulico_	
------------	---------------------	--

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 3

Tabla 3. 1	Características de los cilindros hidráulicos.....	12
Tabla 3. 2	Características del aceite de la central oleo-hidráulica.....	14
Tabla 3. 3	Características de la bomba hidráulica.....	14
Tabla 3. 4	Características del motor.....	15

Capítulo 5

Tabla 5. 1	Características M340.....	44
Tabla 5. 2	Módulos propuestos para implementación del proyecto.....	45
Tabla 5. 3	Características del BMX NOE 0100.	50
Tabla 5. 4	Características IT9420, respecto a las condiciones ambientales	54

Capítulo 6

Tabla 6. 1	Ecuación de primer orden del sistema durante la apertura.	71
Tabla 6. 2	Ecuación de segundo orden del sistema durante la apertura.....	71
Tabla 6. 3	Ecuación de tercer orden del sistema durante la apertura.	71
Tabla 6. 4	Ecuación de cuarto orden del sistema durante la apertura.	72
Tabla 6. 5	Ecuación de primer orden del sistema durante el cierre.....	73
Tabla 6. 6	Ecuación de segundo orden del sistema durante el cierre.	73
Tabla 6. 7	Ecuación de tercer orden del sistema durante el cierre.....	73
Tabla 6. 8	Ecuación de cuarto orden del sistema durante el cierre.....	73

Capítulo 1: Introducción

En el presente capítulo se exponen las características del sistema que se requiere y los elementos principales necesarios para su diseño y futura implementación como solución propuesta.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Debido a las necesidades de producción de energía, características y recursos del país, durante años la fuente de ella que más se ha aprovechado es la hidroeléctrica. El Instituto Costarricense de Electricidad es la empresa generadora que más la produce en el país.

En la explotación del recurso hídrico las plantas hidroeléctricas necesitan de una caída de agua para el movimiento necesario de los generadores de electricidad para que, luego de pasar el agua por una tubería, mueva las turbinas, las cuales convierten la energía hidráulica en mecánica, y para que esta mueva los generadores encargados de la producción de energía eléctrica.

Para mantener la producción de energía por parte de las plantas es necesario tener un flujo constante de agua por medio de la tubería, de lo que surge la necesidad de construir embalses (ver la figura 1.1), con el fin de mantener los generadores en funcionamiento y sin importar el caudal del río que alimente la planta. Estos generadores por lo general se encuentran a una distancia considerable de la casa de máquinas en la que se produce la electricidad.

El presente proyecto se desarrollará en el centro de producción Sandillal, ubicado en Cañas, Guanacaste, que cuenta con una capacidad de generación de 32 MW. En la figura 1.1 se observa el embalse del proyecto hidroeléctrico Sandillal.

Son de vital importancia el control del nivel del agua en la represa y la cantidad que es enviada mediante la tubería hacia la casa de máquinas, la cual se regula con el uso de compuertas, que cumplen con diferentes funciones según su ubicación. El proyecto hidroeléctrico Sandillal cuenta con compuertas para el control del nivel del embalse (llamadas de control de excedencia, o bien, C4 y C5), la cantidad de agua que entra en las tuberías hacia la casa de máquinas y la utilizada para limpieza de sedimentos presentes en el fondo de la represa (que estén cercanos a la tubería, la cual se dirige a la turbinas). Este método es conocido como descarga de fondo).



Fotografía facilitada por C.P. Sandillal
Figura 1.1 Embalse Sandillal.

En la actualidad se cuenta con cuatro compuertas en la represa, como se aprecia en la figura 1.2. En la figura B se observa el lugar donde se ubican dos de estas, las cuales se encuentran bajo el agua. Dos de estas se usan para el control del nivel de agua del embalse: una para control del flujo de agua que va hacia la tubería, dirigida a la casa de máquinas, y otra para el control de las limpiezas de fondo, para eliminar sedimentos que estén cerca de la tubería mencionada.

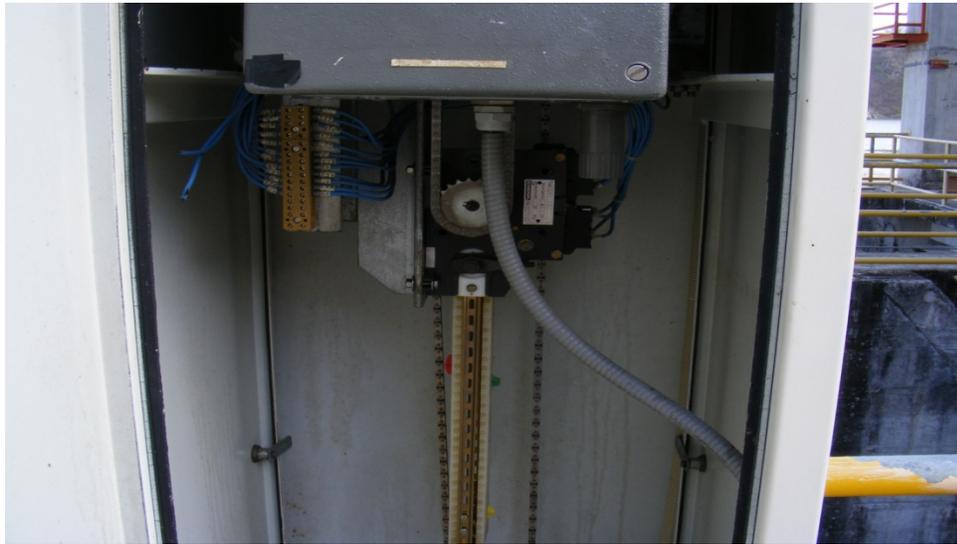


C.P. Sandillal, editado con Paint

Figura 1.2 Compuertas del embalse Sandillal.

Las compuertas observadas en la figura 1.2 (A) corresponden a las que se busca controlar con el diseño del proyecto, identificadas como C4 y C5 (izquierda y derecha, respectivamente). Estas son compuertas de movimiento radial, manipuladas mediante un sistema hidráulico, para la apertura o cierre de ellas.

Actualmente en el centro de producción la realimentación con la casa de máquinas, en el porcentaje de apertura necesario de las compuertas, se lleva a cabo por medio del dispositivo mecánico observado en la figura 1.3, y con el uso de una lógica de relés y botoneras se manejan las compuertas. El control del porcentaje de apertura de las compuertas está sujeto a las características mecánicas del dispositivo mencionado, pero está expuesto a problemas que se puedan dar en él, ya que en el caso de un mal funcionamiento daría información dudosa y, por lo tanto, se podría presentar un daño en el sistema de apertura de las compuertas o en ellas.



C.P. Sandillal, editado con Paint

Figura 1.3 Dispositivo para medición de nivel de compuertas de excedencia del embalse.

El control de forma remota de las compuertas de excedencia (desde la casa de máquinas) permite visualizar la presión (la presión normal, la sobre presión o la baja presión) y el nivel del tanque de aceite en las bombas hidráulicas que manejan las compuertas como un problema, sin tomar en cuenta si este podría resultar dañino para el equipo o si es un problema casual y que no sea necesario detener el proceso de apertura o cierre de las compuertas.

El dispositivo mecánico encargado de medir la posición relativa de las compuertas, a su vez, puede presentar fallas (salto de los eslabones de la cadena, o que se suelte la cadena) las cuales no serían detectadas, con lo que se tendría una realimentación errónea en el momento de conocer la posición de las compuertas. Dichas fallas podrían dañar el sistema encargado de la apertura y cierre de las compuertas.

A su vez, el control, de manera remota, no toma en cuenta fallas o interferencias que se puedan dar en la comunicación o señalización de acciones hacia las compuertas, con lo que se podría dar un accionamiento no deseado de ellas. Una vez que se disponga cerrar o abrir las compuertas, una interpretación

debida a fallas en el sensor o el sistema de control, o cualquier falla no detectada por el sistema quedará en manos del operador remoto, y también la decisión de detener o dejar continuar el sistema.

El mantenimiento y la revisión del sensor de posición actual también representa un gasto de tiempo y dinero a la hora de asignar tareas a los empleados de la planta, así como una señalización que se considere poco confiable por parte del personal.

El uso actual de una lógica basada en relés y botones para el control de las compuertas, además del uso de dispositivos mecánicos, como realimentación para conocimiento del porcentaje de apertura de las compuertas de excedencia, se considera poco eficiente, ya que si el uso de dispositivos mecánicos ha sido utilizado por mucho tiempo estos deben irse reemplazando por sensores de mayor grado de precisión y confiabilidad. Además, no se consideraron ciertos elementos de las compuertas en el diseño anterior del sistema de control (presión de las válvulas y tiempos de restitución para el funcionamiento del sistema hidráulico).

Un mal funcionamiento de las compuertas, o el incorrecto manejo de ellas, ya sea por error humano o por falta de realimentación de alto grado de confiabilidad para el conocimiento del comportamiento de ellas, podría causar daño en el equipo presente en la casa de máquinas o incluso problemas a las comunidades vecinas al proyecto.

1.2 Solución seleccionada

En el proyecto se busca el desarrollo, de manera escalonada, del control de las compuertas del embalse Sandillal. Como primer paso se buscó tener conocimiento de las características y componentes del sistema por manipular, el cual

corresponde a las compuertas C4 y C5, observadas en la figura 1.2 (A), para obtener una caracterización del sistema que permita identificarlo mediante una ecuación matemática representativa.

Con el uso de las herramientas de análisis, el control de sistemas y la lógica combinacional se obtiene el controlador que satisface las exigencias del conjunto de compuertas, para lograr que estas se ubiquen en la posición correspondiente al porcentaje de apertura deseado por parte del operador remoto.

En el diagrama de la figura 1.4 se observa la propuesta de solución del lazo de control del sistema que busca ser diseñado, en el cual se tiene:

- La interfaz con el usuario, que permitiría el ingreso del porcentaje de apertura (respecto al suelo) de las compuertas, observar el porcentaje actual de apertura de las compuertas y señales de emergencia y el funcionamiento de ellas, para el conocimiento de las condiciones del sistema.
- El sistema de control, el cual consta de la lógica de control diseñada para el manejo de las compuertas, que tendrá comunicación con los sensores que miden la apertura de la compuerta (realimentación) y con la interfaz de usuario, para conocer el funcionamiento del sistema, y con esto establecer las señales necesarias para el manejo de las compuertas.
- Señales de control necesarias a la hora de la implementación para el manejo de las compuertas.
- Compuertas del embalse, sistema mediante el cual se diseña el sistema de control durante el desarrollo del proyecto.

- Sensores que permitirían la realimentación para tener un sistema de control de lazo cerrado, en busca de sensores que determinen la posición de las compuertas de manera confiable y efectiva.

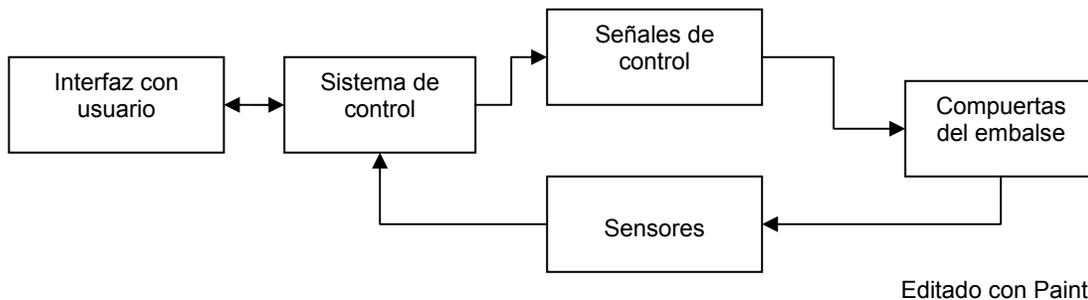


Figura 1.4 Diagrama de partes en el proyecto

El sistema de control, con ayuda de las herramientas del área de control automático y de lógica combinacional, está diseñado tomando en cuenta las señales necesarias para la apertura o cierre de las compuertas, según la acción requerida. En él se consideran los planos de las compuertas, además de los diferentes elementos presentes en estas, como son los tiempos para restablecer la presión en las bombas hidráulicas.

La solución viene de modo escalonado. En primera instancia se conoce la forma de manejo y el comportamiento de las compuertas, mediante el estudio de la documentación técnica de los motores y la realización de pruebas a estas. Con el conocimiento de las características mencionadas se propone la solución en la forma de diagramas de estados y ecuaciones para su control. Conseguido esto, se debe tener la información necesaria para tomar el sistema compuertas-motores-operador como un único sistema, el cual considere la decisión de puesta en marcha o no de las compuertas, según la presión de las bombas, el nivel de aceite y las funciones

llevadas en el momento de uso de las compuertas (mantenimiento, mando local o remoto). También se requiere establecer una secuencia necesaria para el inicio del movimiento de ellas.

El uso de las compuertas debe mantener funciones y capacidades presentes en el actual sistema de control, como la transferencia de electrobombas (intercambio de electrobombas entre compuertas), y el manejo de manera individual y sincrónica de las compuertas.

El sistema utiliza el circuito de las electrobombas únicamente en la operación de apertura, ya que el cierre se da por el peso de las compuertas.

El sistema de control seleccionado está en capacidad de conexión con dispositivos remotos de características semejantes (otros PLC), y tiene la capacidad de detectar fallas en la comunicación e intercambio de información mediante el uso de estrategias de comunicación.

Con un conocimiento claro de las características de los componentes se podrán recomendar o considerar los elementos que serán utilizados en el futuro para la implementación del sistema, teniendo en cuenta el diseño planteado en el actual proyecto.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

En el presente capítulo se exponen las metas y objetivos propuestos para solucionar el problema encontrado en el sistema de control de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal. El proyecto se orienta a encontrar un sistema alternativo que presente una mejor comunicación y robustez respecto a la forma de operación del sistema de regulación del nivel del embalse.

2.1 Meta

El desarrollo del proyecto busca la optimización del manejo de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal, con el fin de implementar en el futuro el sistema diseñado y adaptarlo a una red de control por parte del Instituto Costarricense de Electricidad. El logro de esta meta dependerá de que el sistema de control propuesto presente características funcionales y del uso de dispositivos que se considere que tienen menor incertidumbre a la hora de realizar mediciones.

2.2 Objetivo general

Diseñar un sistema de control para el manejo del porcentaje de apertura de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal, para definir el grado de apertura de manera remota o local. Este objetivo se alcanzará al tener un sistema de control capaz de posicionar las compuertas de excedencia en el nivel deseado por el usuario.

2.3 Objetivos específicos

2.3.1 Caracterizar el comportamiento de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal. Esto se logrará al obtener ecuaciones correspondientes al movimiento de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal.

2.3.2 Diseñar un sistema de control capaz de abrir y cerrar las compuertas de excedencia del embalse Sandillal. Este objetivo se alcanzará con una lógica de control con características que muestren la capacidad de abrir y cerrar las compuertas de excedencia, según las condiciones de funcionamiento de ellas.

2.3.3 Desarrollar un programa que permita observar y especificar el porcentaje de apertura de las compuertas. Este objetivo se alcanzará con un programa que permita visualizar el porcentaje de apertura de las compuertas y la modificación de él (mediante el uso de una simulación que representa el funcionamiento y la comunicación entre el dispositivo de control y el usuario).

Capítulo 3: Marco teórico

En el presente capítulo se presentan las principales consideraciones tomadas en cuenta a la hora del estudio del sistema por controlar. Se analizan las principales variables que afectan el sistema y la forma en que diferentes personas han buscado solución a problemas semejantes al planteado.

3.1 Descripción del sistema por mejorar

Con el fin de tener un conocimiento claro de la forma de operación y de las características del sistema por controlar, se obtuvo información de los principales documentos localizados en el centro de producción Sandillal.

Las compuertas por controlar son de funcionamiento radial y son llamadas C4 y C5. Están instaladas en el vertedero principal de excedencias del embalse Sandillal y se encuentran en el margen izquierdo del embalse.

El sistema de control y las dimensiones de las compuertas son semejantes para ambas. Las dimensiones de las compuertas C4 y C5 son de 6 m de ancho y 9,8 m de altura; cota de los umbrales de las compuertas 83,59 m.s.n.m. y cota de niveles superiores de las compuertas 92,5 m.s.n.m. Esto se observa en la figura 3.1.

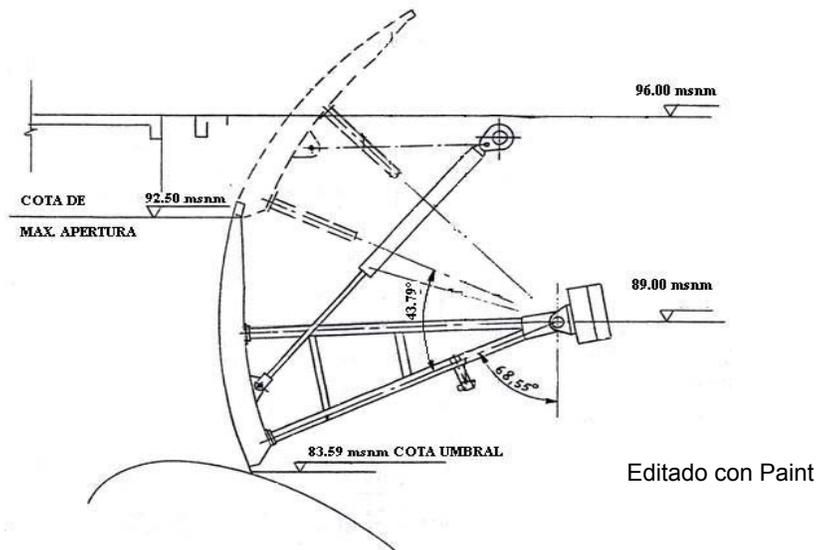


Figura 3.1 Esquema de compuertas radiales C4 y C5.

La capacidad máxima de descarga del vertedero principal de excedencias con un nivel del embalse de 94 msnm corresponde a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Las compuertas son funcionales cuando el embalse se encuentra en un nivel por encima de 84 msnm.

Se tiene como mecanismo de apertura un cilindro hidráulico de simple efecto con cierre por peso, sin fuente de energía externa. Las principales características de los cilindros hidráulicos de las compuertas C4 y C5 se observa en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Características de los cilindros hidráulicos

Tipo	Diámetro cilindro	Diámetro vástago	Carrera del pistón	Presión nominal
Simple efecto	320 mm	150 mm	4877 mm	$150 \text{ kg/cm}^2 = 2133.6 \text{ psi} = 147.1 \text{ bar}$

La energía hidráulica necesaria para el funcionamiento de las compuertas C4 y C5 se obtiene por medio de dos unidades de operaciones separadas e instaladas sobre un equipo electrohidráulico, y se tiene prevista la posibilidad de transferencia de las electrobombas. Se cuenta con una bomba de mano para efectuar la maniobra de apertura sin necesidad de energía eléctrica. Los mandos y controles eléctricos se

efectúan desde el tablero eléctrico de mando local o desde el tablero eléctrico de mando remoto centralizado, mediante el uso de una lógica de relés.

El cierre de las compuertas se hace por medio del peso de ellas, caso en el cual el vástago del cilindro se extrae por el peso de la compuerta, siempre y cuando se tenga presión en el cilindro hidráulico. Esto se da por medio de una válvula de cierre (elemento lógico), la cual tiene características para funcionar sin necesidad de energía eléctrica para maniobras manuales.

Las válvulas de cierre se utilizan para la regulación de la velocidad de descenso y para hacer re-circular el aceite entre las cámaras inferior y superior de los cilindros hidráulicos de las compuertas de excedencia C4 y C5.

La figura 3.2 muestra la configuración de uso de la válvula elemento lógico que es utilizada para realizar el cierre de la compuerta radial, con ajuste mecánico de la velocidad de cierre (se regula la cantidad de aceite que pasará por ella).

Las válvulas de cierre están constituidas por elementos lógicos colocados de forma tal que la superficie "S" tenga un área igual a la suma del área del asiento "A" y de la superficie anular "B". De este modo, si se tiene presión sobre la superficie anular "B" el elemento lógico estará perfectamente cerrado (sin pérdidas), puesto que la misma presión llega a la superficie superior "S" con área más grande a través del pilotaje "X".

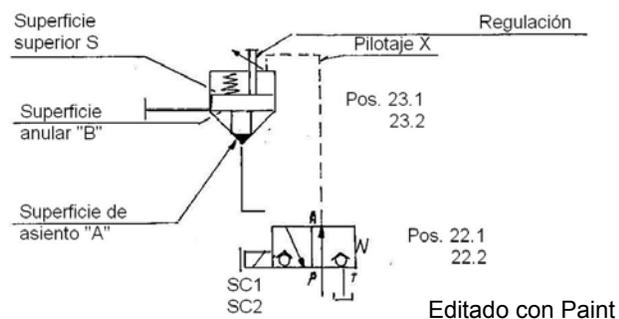


Figura 3.2 Válvula elemento lógico.

El aceite bajo presión determinado por la bomba o por el peso de la compuerta por medio de la electroválvula alcanza la superficie superior “S” de las válvulas elemento lógico a través del pilotaje X, como se describió, y cierra las mismas válvulas.

Cuando se efectúa el mando de cierre de la compuerta C4 ó C5 se abre la válvula elemento lógico y se deja a la descarga el pilotaje “X”.

El aceite bajo presión por el peso de la compuerta llega a la superficie anular “B” del elemento lógico que se abre. El aceite puede pasar, de esta manera, a la cámara superior del cilindro hidráulico y hace cerrar la compuerta. La velocidad de cierre es determinada por medio del regulador colocado sobre la válvula elemento lógico, que aumenta o disminuye la velocidad.

Para la correcta realización de las maniobras se cuenta con válvulas encargadas de controlar la máxima y la mínima presión del sistema; además de elementos de protección contra el calentamiento, mínimo nivel de aceite en el tanque de la central oleohidráulica.

En la tabla 3.2 se observan las características del aceite presentes en el sistema hidráulico.

Tabla 3. 2 Características del aceite de la central oleo-hidráulica.

Marca	Tipo	Peso Específico	Viscosidad cSt a 40 °C	Viscosidad cSt a 100 °C	Índice de viscosidad	Punto de escurrimiento
Y.P.F. o equivalente	Hidráulica BP 22	0.9 Kg/cm ³	22 cSt	4.2 cSt	100 aprox.	- 10 °C

Respecto a la bomba hidráulica, se tiene:

Tabla 3. 3 Características de la bomba hidráulica.

Tipo	Presión máxima			Velocidad máxima		Velocidad mínima
CPL 13	Continua	Intermitente	Picos de presión		Sin carga	
CPH 13	210 bar	180 bar	280 bar	3000 rpm	4000 rpm	650 rpm

Respecto al motor que mueve la bomba hidráulica, se tiene:

Tabla 3. 4 Características del motor.

Alimentación	Número de Polos	Caballos de fuerza	Velocidad
460 V – 60 Hz	4	7.5 hp	1730 rpm

3.2 Revisión bibliográfica

De la revisión de informes y tesis se obtuvieron las siguientes conclusiones y características de los sistemas analizados.

Se halló una forma de determinar si un equipo oleohidráulico presenta las condiciones necesarias para un correcto funcionamiento a la hora de implementarlo. También se halló un conjunto de ecuaciones correspondientes al flujo del aceite en una tubería y se estudió cómo se comporta este. Lo que despertó el mayor interés fue el conjunto de ecuaciones correspondientes al movimiento del fluido por la tubería y la presión necesaria para el movimiento del pistón (fuerza requerida para el movimiento) y su dimensionamiento. (Véase Coto, 2005).

De ahí surgió una propuesta de sistema de control en la que se pasa de un sistema manual a uno capaz de realizar operaciones de forma remota, con la debida señalización y control de las variables presentes en el sistema. Se tiene una lógica basada en dispositivos de finales de carrera y sensores para el correcto funcionamiento del equipo, además de tiempos considerados necesarios para que el equipo reaccione de manera correcta. Este informe muestra una idea de alternativas y consideraciones para la manipulación de equipo oleohidráulico, aparte de sensores y características de un programa que según se muestra ha sido funcional para el manejo de las compuertas manipuladas en el proyecto. (Véase Carranza, 2001).

Se propone un sistema de control basado en la toma de decisiones según las características y el comportamiento de dispositivos mecánico-eléctricos para la correcta puesta en marcha del equipo. Una vez más se observa la importancia de conocer el comportamiento del sistema a la hora de tomar decisiones referentes al tiempo en que se debe tener en funcionamiento parte del equipo, para luego tomar decisiones por medio del PLC. Se observa en el informe un planteamiento del equipo utilizado, del cual se toman consideraciones técnicas sobre las características necesarias del equipo. (Véase Arrieta, 2003).

Se presenta un conjunto de ecuaciones y consideraciones sobre el comportamiento de una viga accionada mediante un servoactuador hidráulico¹. De este documento se obtuvo el conocimiento sobre cómo interpretar el movimiento de un sistema accionado mediante un pistón, que fue de gran relevancia para el desarrollo del presente informe.

Se observó también la forma en la que se puede abordar el movimiento de objetos accionados por el sistema oleohidráulico², lo mismo que de distintos elementos de control y las consideraciones a la hora de la elección de ellos.

En los documentos consultados se pudieron observar algunos de los principales elementos que se consideran en el momento de realizar un informe. Al leerlos con mayor detenimiento se encontraron datos de gran ayuda, pero no fueron los únicos elementos considerados para el desarrollo de este documento.

¹ Cfr. Freire, Francisco. "Estudio cinemático y dinámico de un sólido elástico giratorio accionado mediante un servoactuador hidráulico", disponible en: http://www.tdr.cesca.es/TDX-0225103-113333/index_cs.html

² Cfr. Rivas, José. "Accionamiento y control del posicionado de aperos agrícolas mediante actuadores oleohidráulicos", disponible en: www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0630104-123215/

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

3.3.1 Análisis del movimiento de la compuerta

Para observar las características del movimiento de la compuerta se modificó la figura 3.3, con el fin de obtener un diagrama de cuerpo libre:

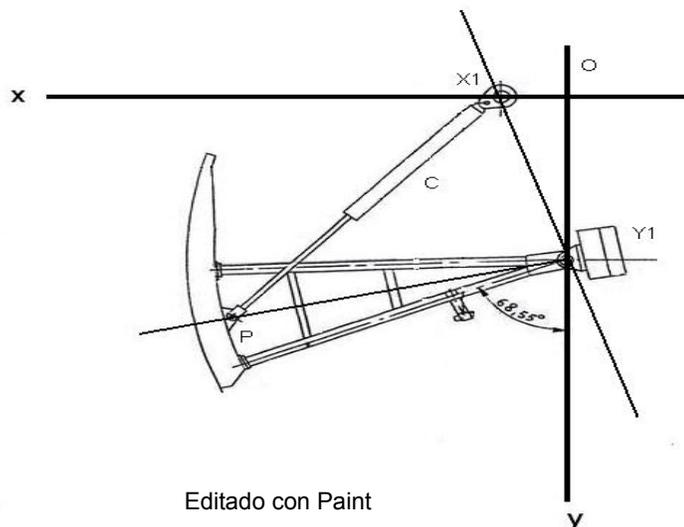


Figura 3.3 Diagrama general de la compuerta radial.

De la figura 3.3 se obtuvo la figura 3.4, en la que se representa la compuerta como una línea que se une al pistón en el punto P de la figura 3.4, y se obtienen así los ángulos mostrados para el análisis de ella.

$$\tan k = \frac{\overline{OX1}}{\overline{OY1}} \quad (3,3)$$

$$k = \arctan\left(\frac{\overline{OX1}}{\overline{OY1}}\right) \quad (3,4)$$

De los planos presentes en el C.P. Sandillal se determinó que el segmento de recta $\overline{OY1}$ tiene una longitud de 5951 mm, mientras que $\overline{OX1}$ mide 2708 mm, con lo que se tiene que el ángulo B mide 1,1438 radianes y el ángulo k mide 0,4270 radianes.

Los demás triángulos formados se calcularon por medio del teorema de cosenos.

Para el triángulo X1Y1P se tiene:

$$\overline{X1Y1}^2 = \overline{PY1}^2 + (\overline{PC} + \overline{CX1})^2 - 2\overline{PY1}(\overline{PC} + \overline{CX1})\cos(M - N) \quad (3,5)$$

$$\cos(m - n) = \frac{-\overline{X1Y1}^2 + \overline{PY1}^2 + (\overline{PC} + \overline{CX1})^2}{2\overline{PY1}(\overline{PC} + \overline{CX1})} \quad (3,6)$$

El segmento $\overline{CX1}$, correspondió a la distancia del eje de rotación del cilindro hidráulico hasta el disco de desplazamiento del pistón (posición del pistón). De manera similar se tiene:

$$\cos(B + n) = \frac{\overline{X1Y1}^2 + \overline{PY1}^2 - (\overline{PC} + \overline{CX1})^2}{2\overline{PY1}\overline{Y1X1}} \quad (3,7)$$

En que el ángulo (B+n) corresponde al formado entre $\overline{X1Y1}$ y $\overline{PY1}$ se tiene para el ángulo n (comprendido entre eje de rotación de la compuerta y horizontal):

$$n = \arccos \left[\frac{X1Y1^2 + FY1^2 - (PC + CX1)^2}{2FY1 Y1X1} \right] - B \quad (3,8)$$



Figura 3.5 Comportamiento del ángulo n (Figura 3.4).

Se nota cómo para el movimiento del pistón se tiene una relación lineal entre el ángulo de la compuerta respecto a la horizontal y la carrera del vástago.

La gráfica de la figura 3.5 se obtuvo a partir del diagrama de la figura 3.4.

Para el ángulo m, comprendido entre la horizontal y el centro del pistón:

$$m = 180^\circ - B - g \quad (3,9)$$

$$g = \arccos \left[\frac{X1Y1^2 - FY1^2 + (PC + CX1)^2}{2(PC + CX1) Y1X1} \right] \quad (3,10)$$

$$m = 180^\circ - B - \arccos \left[\frac{X1Y1^2 - FY1^2 + (PC + CX1)^2}{2(PC + CX1) Y1X1} \right] \quad (3,11)$$

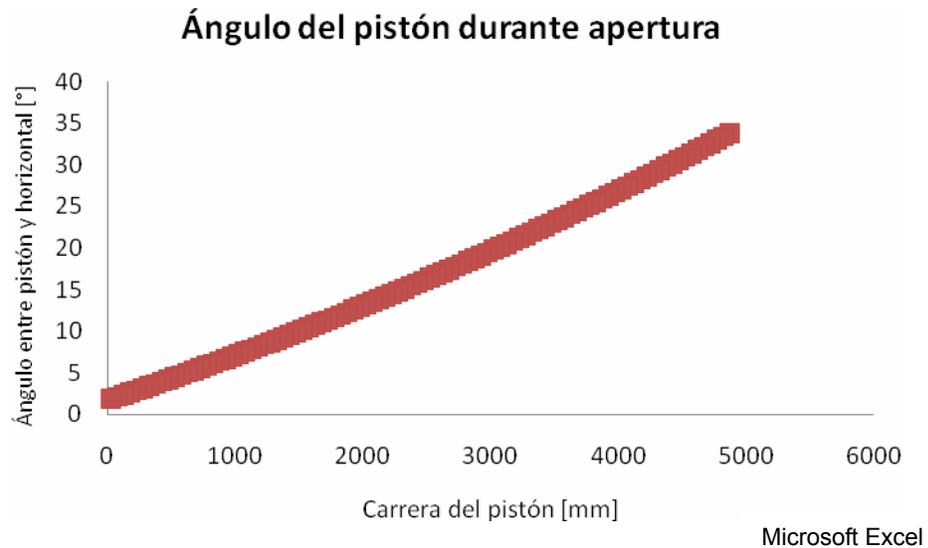


Figura 3.6 Comportamiento del ángulo m (Figura 3.4).

En el gráfico de la figura 3.6 se observa cómo el movimiento del pistón, respecto a su elongación, tiene una relación que se puede considerar lineal. El gráfico se obtuvo respecto a la horizontal. En él se observa, en concordancia con los planos, cómo los grados de apertura corresponden a valores de entre cero y 40° de inclinación.

Con el fin de observar la característica de la compuerta durante su apertura se toma en cuenta el movimiento de un círculo, el cual corresponde a un desplazamiento en “x” (horizontal) y en “y” (vertical). Según lo encontrado en los planos de referencia, se tiene un radio para la compuerta de 11,955 m desde el eje de rotación.

Con θ , correspondiente al ángulo de apertura de la compuerta, respecto a la posición de compuerta cerrada, el movimiento en x es:

$$x = r * \text{coseno}(\theta) \quad (3,12)$$

$$y = r * \text{seno}(\theta) \quad (3,13)$$

Con base en las ecuaciones 3,12 y 3,13 se obtuvo el gráfico de desplazamiento del punto inferior de la compuerta desde el punto en que se encuentra completamente cerrada hasta la máxima apertura.

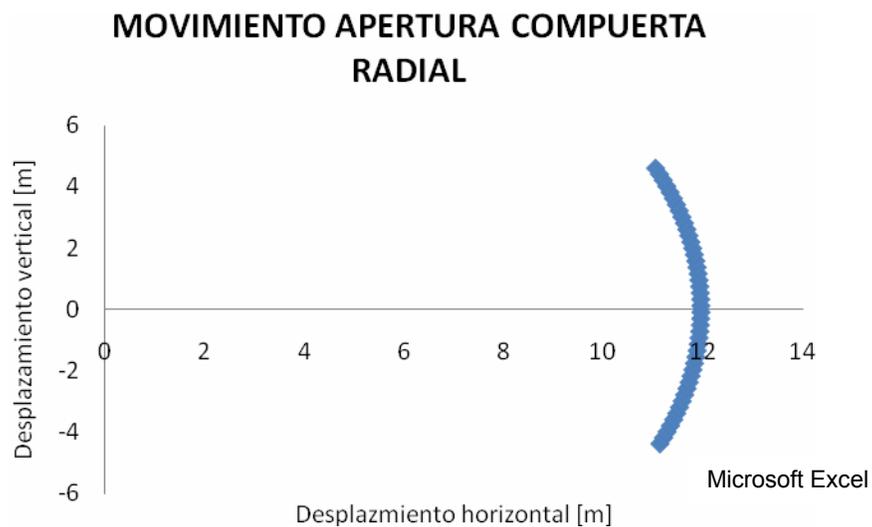


Figura 3.7 Representación del movimiento de la compuerta.

En el gráfico de la figura 3.7 se observa que para el movimiento de apertura de la compuerta de 0 a 44° se tiene un movimiento que se puede considerar lineal, debido a los cambios mínimos en el movimiento de la compuerta respecto a los ángulos en los que esta se posicionará, según empiece a abrir y permita el flujo de agua fuera de ella.

Con base en eso se considera que 100% de apertura corresponde a un ángulo de 44°, considerando que el movimiento de la compuerta (figura 3.7) en su movimiento de apertura varía muy poco respecto al movimiento rotacional. Este se

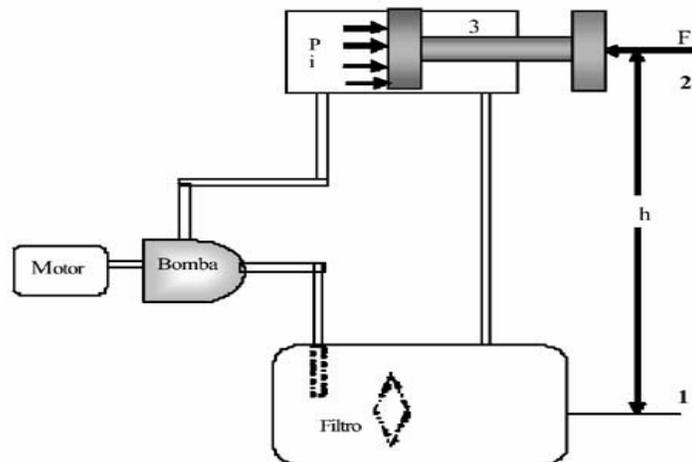
considera lineal, por lo que se toman los cambios de $0,44^\circ$ como un movimiento de uno por ciento en cuanto a la posición de la compuerta.

3.3.2 Análisis de los componentes del sistema oleohidráulico

En los sistemas hidráulicos la energía se transmite por la tubería que permite la circulación del aceite, el cual se encuentra asociado con el caudal y la presión de funcionamiento del sistema.

La presión a la que se encuentra el sistema determina la fuerza del cilindro, mientras que el caudal del aceite a presión determina la velocidad a la que se mueve el sistema.

En la figura 3.8 se observa la configuración básica de un sistema hidráulico, en la que se nota la existencia de un depósito en que se almacena el fluido que mueve el pistón, y un motor encargado de proporcionar energía a la bomba para la circulación del fluido encargado de generar el movimiento en el sistema.

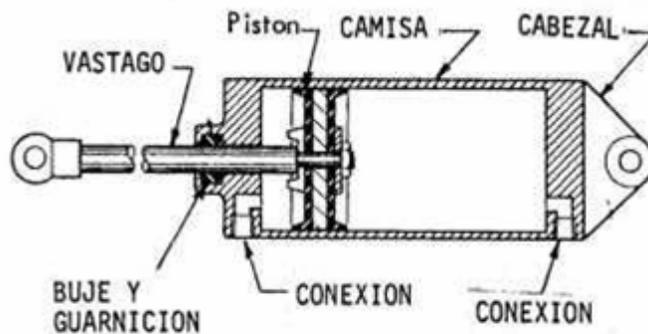


<http://www.scielo.org.pe/img/revistas/id/v8n1/a03fig01g.jpg>

Figura 3.8 Sistema hidráulico básico.

En todo sistema hidráulico es de vital importancia considerar si la bomba tiene la capacidad de mover el pistón para una determinada carga de funcionamiento. A la hora de estudiar las relaciones entre los elementos del sistema se deben tener en cuenta: la presión del sistema, el área del pistón, el diámetro y espesor del cilindro del pistón, el diámetro del cilindro del vástago, la velocidad del pistón, el caudal de la bomba y los requisitos para funcionamiento de ella.

En la figura 3.8 se observan las partes de un cilindro hidráulico.



http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm

Figura 3.9 Partes de cilindro.

La fuerza con la que se da el movimiento del cilindro es la que resulta de la ecuación:

$$F = A * p \quad (3,14)$$

En que:

F: fuerza.

A: Área dentro del cilindro, la cual será diferente en el momento de considerar el avance o retorno del vástago del cilindro. Según el diagrama de la figura 3.3, para la apertura de la compuerta (retorno) $A = (D^2 - d^2) * \pi / 4$, D es el diámetro de la superficie interior del pistón, d corresponde al diámetro del vástago; para el cierre de la compuerta (avance) $A = D^2 * \pi / 4$.

p: presión.

Con base en el principio de Pascal, cuando se aplica presión a un fluido confinado la presión se transmite a las paredes del recipiente que lo contiene y forma ángulos rectos con la superficie por la que pasa el fluido.

Característica por analizar para el sistema hidráulico. La presión del circuito hidráulico determinará la fuerza con la que se desplaza el vástago, mientras que el caudal establecerá la velocidad del movimiento de este.

En el caso en estudio, con lo visto en la tabla 3.1, para las dimensiones del cilindro se tendrá un área aproximada de 627,53 cm². Sumados los diferentes componentes de las compuertas se encuentra que el peso aproximado de ellas es de 23100 kg, por lo que el cilindro deberá ejercer una presión superior a 36,81 kg/cm² (36,08 bar) para mover la compuerta, surgida de la ecuación 3,14.

La velocidad de desplazamiento del vástago del cilindro hidráulico vendrá determinada por:

$$\frac{Q}{A} = v \quad (3,15)$$

En que:

- Q: Caudal del fluido [m³/min].

- A: Área transversal de la tubería o cilindro [m²].
- V: Velocidad media de la sección [m/min].

En el sistema hidráulico en estudio la bomba con que se cuenta corresponde a una de engranajes, cuyo esquema básico de sus componentes se observa en la figura 3.10. También se observa que con el movimiento de los engranajes impulsados por el motor eléctrico se introduce presión al sistema.

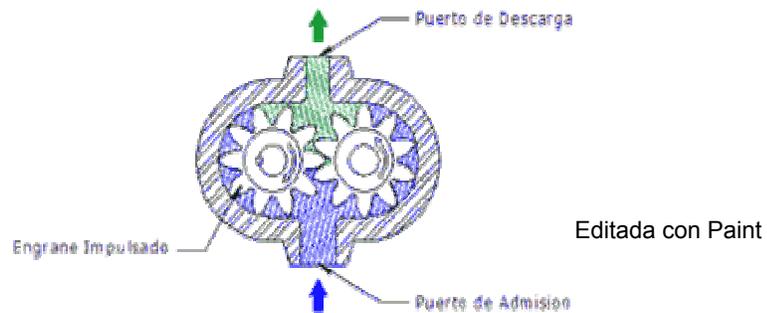


Figura 3.10 Componentes de bomba de engranajes.

La bomba debe estar en capacidad de introducir la suficiente presión y caudal al sistema para moverlo a velocidad y fuerza determinadas. El hecho de que la tubería tenga un área menor a la del cilindro se compensa por efectos de la ecuación de continuidad, en la que se especifica:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{constante} \quad (3,16)$$

Por ello la tubería deberá estar en capacidad de soportar la presión y el caudal provenientes de la bomba.

La potencia del sistema hidráulico viene determinada por:

$$\text{Potencia} = P * Q \quad (3,17)$$

En que:

- P: Presión.
- Q: Caudal.

Para una eficiencia de 85% esa potencia se puede determinar mediante la ecuación:

$$Potencia [kW] = \frac{P[bar] \cdot Q[LPM]}{600 \cdot 0.85} \quad (3,18)$$

3.3.3 Herramienta de modelado

El conocimiento de las características de las funciones matemáticas en las que se basa el sistema en estudio es importante porque permite notar su complejidad y la posibilidad de usar un controlador para la elección de los valores necesarios para el manejo del sistema, por medio de una ecuación que muestre su comportamiento, para el control del valor de una consigna correspondiente a la posición deseada de las compuertas.

Debido a las características del sistema en estudio, se tienen restricciones a la hora de su manipulación, por lo que es necesaria la búsqueda de una ecuación que caracterice la forma en la que se comportará el sistema.

Por ejemplo, no se tiene la posibilidad de medir el desplazamiento de la compuerta a diferentes presiones del sistema, sea este por ajustes en el sistema hidráulico o por variación del valor del voltaje aplicado al motor eléctrico que mueve la bomba hidráulica.

Se busca un modelo basado en un estudio determinístico o estocástico de las características del sistema, de lo que surge que el modelo determinístico tendrá una relación de entrada y salida dada por una ecuación exacta. El estocástico cuenta con un grado de error en su ecuación obtenida. Ambos se obtienen por métodos de probabilidad o estadística.

Para la obtención de una ecuación que caracterice el sistema se recurre al modelo estocástico³, mediante el uso de Stochastic2, por medio de estimación de mínimos cuadrados.

³ Cfr. "1 Modelado estocástico por estimación de mínimos cuadrados", disponible en:
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/Laboratorio/3.6ModeladoEstocastico.pdf>

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

En el presente capítulo se explica el procedimiento metodológico seguido para obtener información que permitiera elaborar la propuesta de solución del problema planteado.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

El uso de compuertas para el control de las aguas de un embalse resulta de vital importancia para el manejo de su nivel y de la cantidad de recurso hídrico que pasará por los conductos que se dirigen a la casa de máquinas.

Con el uso actual de una lógica basada en relés y botones para el control de las compuertas, además de una realimentación poco confiable para el conocimiento del nivel de apertura de las compuertas de excedencia del embalse, se busca una solución alternativa para tener un sistema de control automático más confiable y capaz de interactuar con el usuario de una manera eficaz, el cual no presente un alto grado de complejidad a la hora de manejarlo.

En el momento de realizar pruebas de las compuertas con el fin de observar su comportamiento, se notó cómo el mecanismo encargado de medir la posición de las compuertas presenta problemas al ponerse en marcha, ya que al accionarse por medio de un conjunto de cadenas y engranajes, estas presentan saltos de eslabones, retrasos en el movimiento, dependencia del mantenimiento del dispositivo (para seguridad de que este funcione de manera correcta), entre otros datos observados. Personal encargado del manejo y el mantenimiento de las compuertas mencionaron que el dispositivo presenta problemas debido a que el mantenimiento debe ser constante. De no ser así se puede salir la cadena del piñón cuando rota o quedarse trabada y los cambios de posición marcarse de forma errónea o de golpe

(en caso de trabarse la cadena, cuando la compuerta se mueve, el dispositivo no marca el movimiento hasta que logre moverse la cadena).

En vista de la constante modernización de procesos por parte del C.P. Sandillal y como estos en ocasiones no son explotados por parte del personal, se plantea un sistema de comunicación con otro PLC, con lo que se permitiría la comunicación entre dispositivos presentes en lugares remotos, la realización de comandos de apertura y el cierre de las compuertas. Ello sin la necesidad de que el operador de toma de aguas tenga que intervenir directamente y delegar tareas en otra parte del personal (operadores de casa de máquinas); esto en vista de la instalación de un mando remoto en la casa de máquinas.

El cambio de una lógica de relés a un dispositivo programable es con la idea de reducir la cantidad de elementos de control necesarios para el manejo de las compuertas, sin considerar las señales que no generan mayor incertidumbre en el control del sistema. Ello con el fin de no generar un gasto mayor para la institución en el momento de su implementación y a la vez para que al tenerse un dispositivo programable este presente capacidad de comunicación, a fin de mantener un control del funcionamiento de las compuertas por parte del usuario.

4.2 Obtención y análisis de información

Luego de estudiar las características de las compuertas y obtener resultados en el marco teórico, se obtienen las principales conclusiones que llevan a la elección de componentes y decisiones para el sistema de control propuesto.

Mediante el estudio de diferentes tipos de sensores utilizados para medir el movimiento de las compuertas, según lo estudiado sobre ellas, se recomienda el que es considerado más eficiente, por sus características, las cuales se mencionan en el documento. Si bien otros sensores de inclinación presentan mayor sensibilidad en la medición, estos requieren información y pruebas para que se recomienden su instalación y medición. Por falta de respuesta de proveedores de otros sensores, o una vez estudiadas las características técnicas de los ofrecidos, se fueron desechando opciones para la selección final.

El análisis de los componentes y características del circuito oleohidráulico fue realizado en su mayor parte con información de sitios web o trabajos o investigaciones realizadas con anterioridad. Se encontraron en diferentes fuentes ejemplos de formas de control para la operación de una compuerta radial. En ellas se muestra que el manejo de la compuerta en realidad no presenta mayor dificultad en su lógica de funcionamiento, pero sí se deben tomar las medidas necesarias para que los actuadores funcionen de manera correcta.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

La realización de la medición de las características del sistema se busca por medio de diferentes métodos, como busca una solución práctica que lleve a un control eficaz del proceso.

MATLAB posee herramientas para el diseño de sistemas de control. Mediante el modelado de ellos y con base en sus principios de movimiento se encontró, por ejemplo, el conjunto de herramientas de Simulink, como es simScape, en que se encuentra: SimMechanics, el cual permite la simulación y caracterización del movimiento de sistemas, en conjunto con SimHydraulics, que permite la caracterización de pistones y elementos hidráulicos. El uso de los elementos mencionados no fue utilizado por la complejidad de algunos de los componentes

matemáticos necesarios para el modelo del sistema por controlar, por la forma de movimiento y sus características. Se obtiene por medio del modelado estocástico, descrito en el marco teórico, la caracterización del sistema que toma en cuenta la presión, respecto a su desplazamiento.

La propuesta del sensor surgió el estudio de los diferentes actuadores propuestos en la web para sistemas de movimiento similar.

El uso del software de programación, PLC y sus módulos, viene determinado por la facilidad de contacto con los distribuidores, el uso de dispositivos semejantes en la empresa, el software presente en la empresa, la amplia documentación de dispositivos por parte de los fabricantes y la propuesta por parte de la empresa para utilizar el producto seleccionado en el control del sistema.

La verificación del correcto funcionamiento del programa de control de las compuertas se lleva a cabo mediante la implementación de un prototipo con componentes de la marca de los módulos por utilizar, los cuales tendrán respuesta semejante a la del sistema durante su funcionamiento.

La decisión de no variar el sistema hidráulico viene de la idea de que el sistema hidráulico trabaja ya a velocidad máxima de funcionamiento (según las condiciones de funcionamiento del motor que mueve la bomba hidráulica), por lo que no se considera de mayor relevancia cambiar los actuadores del sistema de control, que podrían no ser los indicados para el funcionamiento manual del circuito hidráulico en caso de falta de energía eléctrica.

Se decide mantener algunas señales del actual sistema de control para la señalización de entradas al PLC, con el fin de disminuir gastos a la empresa, además de facilitar la implementación del sistema de control por parte del personal de la planta.

4.4 Implementación de la solución

En el proyecto planteado se propone el diseño de un sistema de control, por lo que la implementación no se lleva a cabo en el momento de la realización del proyecto de graduación.

Se deja en la empresa el conjunto de manuales y planos para su futura implementación. Se dejan recomendaciones para la instalación del nuevo sistema de control, planos eléctricos de la solución propuesta, componentes por utilizarse, sensores de medición y el programa correspondiente a la solución propuesta.

Se muestra el funcionamiento del sistema de control mediante el montaje de un prototipo, correspondiente a un PLC con características semejantes al propuesto como la solución, y se simulan las fallas y condiciones de operación de las compuertas de excedencia con el fin de obtener una visualización que satisfaga los requerimientos de funcionamiento del sistema.

Se presta atención al desarrollo de las pruebas al prototipo, a las características que son más susceptibles de error mencionadas por parte de los operadores de las compuertas en el anterior sistema de control, y a las características solicitadas por el asesor a la empresa, de tiempos requeridos para la toma de medidas por parte del PLC, a la hora de presentarse una falla, ya sea de comunicación con otros dispositivos o de error en el funcionamiento de las compuertas.

El centro de producción Sandillal posee copia del informe del proyecto de graduación, así como manuales de operación y modificación del programa que va a ser descargado en el controlador, con el fin de realizar ajustes en caso de ser necesario a la hora de su implementación.

4.5 Reevaluación y diseño

Como parte de las mejoras a la propuesta, se presentan las características del módulo Tesys T (módulo para medición de voltajes y corrientes en dispositivos), utilizado en el prototipo del programa y mencionadas las formas de su conexión, con fines de diseño de un programa capaz de notar fallas en el futuro, según las condiciones de consumo de carga de los motores que manejan las bombas.

Se propone la búsqueda de otro sensor para mantener un control de dos formas diferentes de medición de la posición de las compuertas, como pueden ser sensores de distancia que cumplan con características suficientes para la medición con base en las características vistas en el marco teórico. Con el uso de dos sensores se podrán incluir en el programa del controlador condiciones por tomar en cuenta para considerar la exactitud de la medición con base en dos mediciones.

Con el fin de llevar control de la cantidad de agua que es vertida por las compuertas durante su apertura, se deben buscar sensores de caudal, con el fin de brindar información a la comunidad sobre la cantidad de agua que se está enviando al río. De esta manera, en caso de inundaciones en zonas vecinas se podrá tener claro si se debió a condiciones naturales o la forma en que se utilizaron las compuertas.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En el presente capítulo se detallan las características de los componentes por utilizar en el proyecto, así como los módulos y el software del prototipo realizado y mediante él se muestra el funcionamiento del sistema por implementar. Se mencionan las consideraciones tomadas en cuenta para el desarrollo del proyecto.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

En esta sección se muestran los datos encontrados y considerados a la hora de elaborar la propuesta de solución. También se explican algunas de las soluciones encontradas.

5.1.1 Descripción del modelo de las compuertas de excedencia

Como se menciona en el procedimiento metodológico, una vez realizado el estudio de diferentes formas, procedimientos y métodos de modelado de sistemas se escoge, por experiencia, fiabilidad en la solución y manejo del programa, el uso de método de modelado estocástico. Se usa el programa Sthochastic2 que había sido utilizado con anterioridad, y con él se obtienen resultados satisfactorios a la hora de corroborar las ecuaciones dadas por él durante la manipulación del sistema. En el capítulo 6 se observan las condiciones de medición y los resultados obtenidos.

5.1.2 Descripción del prototipo de control y sus consideraciones

En el momento de escoger el controlador por utilizar se llega a la elección de un PLC debido a que la empresa hace uso de ellos en otros sistemas de control presentes en el centro de producción, y debido a las características que presentan en cuanto a robustez, confiabilidad y expansión (capacidad de insertar varios módulos de medición y control) que se consideran para el proyecto.

El uso de productos Schneider se debe a que en la empresa se cuenta con software de programación para equipo de dicha compañía. La facilidad de contacto con la empresa, el uso de dispositivos programables distribuidos por la empresa en otros procesos de la planta y el hecho de que los productos ofrecidos por la empresa presentan compatibilidad con otros PLC instalados en el lugar llevan a considerar los dispositivos distribuidos por Schneider como una buena opción.

El uso de sensores analógicos para el conocimiento de la posición de la compuerta viene de la necesidad de controlar en todo momento la posición de ella. Esto mediante el uso de un sensor que presente características adecuadas al comportamiento mostrado en el marco teórico para el movimiento de las compuertas de tipo radial. El accionamiento de las señales del sistema hidráulico (interruptores de presión) es considerado eficiente y no se plantea la modificación de estos; no así en cuanto a la forma de comunicación remota, por lo que se proponen más señales de información del comportamiento del sistema, al proponer el uso de una red Ethernet para comunicación remota con otros dispositivos.

Al ser un sistema que debe ser funcional en todo momento y luego del estudio de los componentes del sistema hidráulico, no se proponen modificaciones a este, ya que los cambios en el sistema deben permitir un correcto accionamiento de las compuertas de manera manual y en condiciones de pruebas o mantenimiento, ya sea de forma remota o local (en el vertedero de excedencia).

Se considera necesario instalar un sistema capaz de medir la carga consumida por los motores para que esta sea monitoreada e interpretada por el operador remoto. Esto con el fin de que este posea información suficiente para realizar predicciones del comportamiento de los motores de las compuertas con base en su consumo de corriente y la forma en que varía.

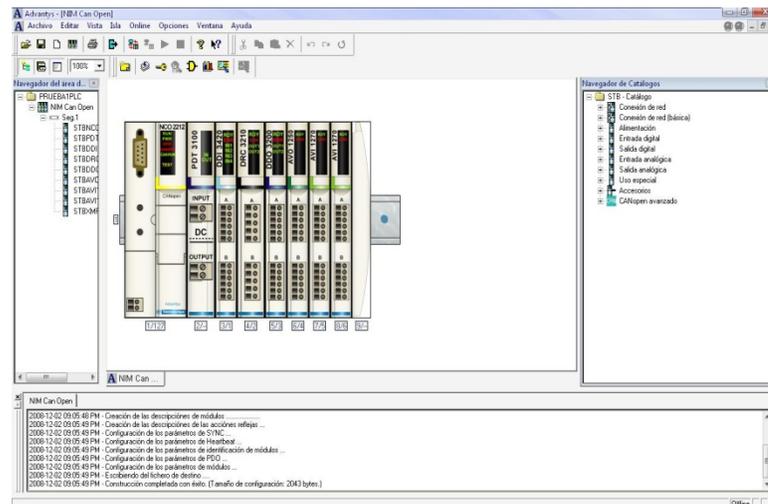
El software utilizado para el desarrollo del programa corresponde al UnityPro XL, el cual presenta cuatro distintas formas de estructuras de programación, las cuales ofrecen características que permiten relacionarlas entre sí. Se cuenta con:

- Lenguaje FBD
- Lenguaje LD
- Lenguaje SFC
- Lenguaje ST

Las características del UnityPro XL permiten el desarrollo de un programa o proyecto según el modelo o tipo de unidad programable seleccionada. Se tienen a la disposición los modelos Modicon M340, Momentum y Quantum con los CPU que mejor se ajusten a las necesidades del usuario. A la vez, se tienen las características para la simulación del software desarrollado y la capacidad de comunicación con otros software de programación, que son distribuidos por Schneider Electric. Las características de entradas y salidas soportadas por los autómatas son suficientes para los requerimientos del sistema en donde serán utilizados. Se cuenta también con gran cantidad de información referente al producto por programar y con los módulos de conexión; además de un apoyo técnico por parte de los distribuidores.

El software de programación para la configuración de los módulos que se encuentran conectados de manera remota se obtiene por medio de Advantys, que permite configurar módulos llamados islas y que corresponden a entradas/salidas remotas al PLC, o bien, a dispositivos de control que son referenciados en el programa realizado en el PLC.

Para el desarrollo del prototipo del proyecto se parte de una red CANopen por configurar. Para el desarrollo de este se realiza la configuración con ayuda del software Advantys, en el que se introducen los módulos que se van a utilizar para la isla por implementar. En la figura 5.1 se observa el módulo configurado para la realización del proyecto.



Advantys

Figura 5.1 Configuración Isla Advantys.

Una vez realizada la configuración se procede a realizar la compilación del proyecto con el fin de detectar errores en el proceso. Si no se encuentran errores en la aplicación diseñada se procede a determinar si la configuración es la más adecuada mediante los estudios de los gráficos de las características de los recursos

del sistema. En la figura 5.2 se observa el porcentaje de uso de recursos para el prototipo del proyecto, con un bajo nivel de manejo de ellos, por lo cual la configuración es exitosa.

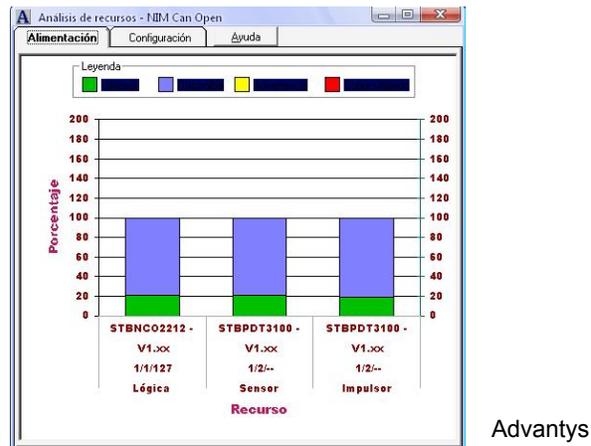


Figura 5.2 Porcentaje de uso de recursos configurados

La principal característica del Advantys que lo hace atractivo en la configuración de islas es que da la distribución de los módulos y su posición en memoria para el PLC, sin necesidad de configurar de modo manual las direcciones del sistema remoto.

Para la interfaz de usuario se cuenta con la posibilidad de desarrollo de una pantalla de tacto (en el vertedero de excedencia); pero, debido a que esta puede resultar de alto costo y a que la utilidad de ella en el lugar sería mínima por la capacidad de mandos remotos y la optimización del proceso, que generaría una disminución en el número operaciones locales del proceso, se propone el uso de entradas digitales sobrantes al PLC para la selección de porcentaje de apertura de la compuerta y la visualización. Ello mediante el uso de una pantalla con capacidad de mostrar el equivalente de 0 a 100% de una señal de 4... 20 mA, solución que se considera más económica por el uso de recursos presentes en la empresa. En el manual de usuario se muestra la forma de funcionamiento de la interfaz que se instalaría en el vertedero de excedencias.

La red Ethernet es utilizada en el manejo y la comunicación de puertos remotos y supervisión de procesos, entre otros. El uso de este tipo de red en el proceso viene como resultado del estudio de otros tipos de comunicación y de la forma de intercambio de información de otros procesos en el centro de producción Sandillal.

Para el intercambio de información se plantea el uso de comunicación entre PLC debido a que se cuenta con un programa de comunicación entre PC y el controlador programable, que toma en cuenta otros procesos de la planta y no se considera necesario modificarlo. Ese programa es dejado a disposición de cambios capaces de adaptarlo ya que en él se especifica el porcentaje de apertura de las compuertas y se tiene comunicación con un PLC, que se conecta con la lógica de relés encargada de abrir y cerrar las compuertas. Con el proyecto mencionado se eliminaría la necesidad de señales dadas por el PLC remoto y se incluiría una lógica capaz de tomar decisiones, y le quitaría la responsabilidad al operador del programa remoto, el cual podría ser una persona cualquiera, sin mayor conocimiento del sistema, ya que las solicitudes serían procesadas según la lógica programada en el PLC presente en el vertedero de excedencia.

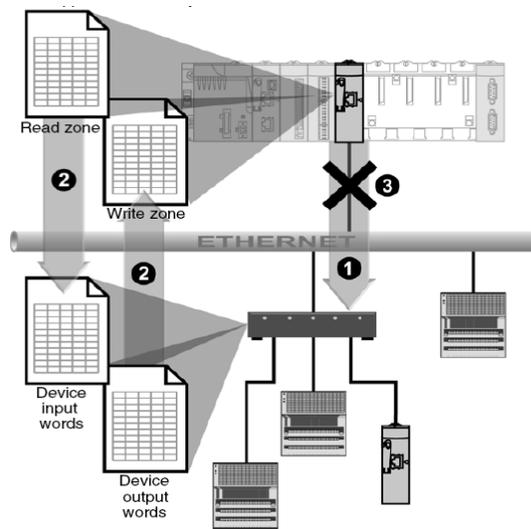
Con el fin de tener comunicación entre dispositivos se buscan soluciones alternativas, entre las cuales se tienen como las más simples las correspondientes a:

- Mensajería TCP/IP. Correspondiente a tipos de comunicación para ser configurado cada PLC como cliente o servidor, para la conexión entre dispositivos. En este caso es necesaria la realización de más operaciones para la comunicación, en comparación con las otras posibilidades presentes.
- Datos globales. Esta forma de comunicación con otros dispositivos está presente en los PLC distribuidos por Schneider. Al ser el PLC maestro del

manejo de las señales provenientes de la casa de máquinas un PLC de la familia del módulo M340 que va a ser utilizado en las compuertas, se cuenta con esta característica de intercambio de datos, en la que se declara un dato de forma tal que puede ser observado por otros PLC remotos. Por medio de comunicación Ethernet es usado en redes pequeñas, debido a que puede hacer más lento el tráfico de red, por dejar disponible datos a todos los usuarios por medio de la realización de la estructura de comunicación Multicast a la hora de compartir datos.

- I/O Scanning. Corresponde a la asignación de lugares de lectura y escritura a un PLC remoto, por parte del controlador maestro, el cual realiza dichas operaciones de manera periódica sin necesidad de utilizar un programa específico.

El I/O Scanning debe tener una zona de lectura, escritura o ambas en conjunto, las cuales se dan siempre y cuando el PLC se encuentre en modo RUN, en las posiciones de memoria asignadas durante la configuración de estas zonas. En la figura 5.3 se observa la forma de aplicación de este método.



Editada con Paint

Figura 5.3 Forma de funcionamiento de IO scanning.

En la figura 5.3 se observa la forma de uso y manejo del IO *scanning* mencionado. En este escaneo de posiciones asignadas de entradas-salidas se aplican las consideraciones de lectura/escritura de Modbus solicitadas como un modo de servicio TCP/IP, el cual, en comparación con otros métodos, es considerado más viable para la aplicación debido a su facilidad de programación y al uso de recursos de la red.

5.1.3 Sensores para medir el movimiento de las compuertas

En cuanto al tipo de sensor por utilizar, se encontró, luego del análisis del movimiento de las compuertas, una variedad amplia de lógica de medición:

Un sensor de desplazamiento lineal, con el fin de medir la carrera del pistón durante la apertura o cierre de las compuertas. Este tipo de medición es descartado por el costo en cuanto a su compra y adaptación al sistema. Esto debido al tamaño del pistón en el que debe montarse.

El uso de dispositivos que giren en conjunto con la compuerta no deja de lado el problema que presenta el actual sistema de medición del movimiento de la compuerta, ya que de esta manera aún se dependería de elementos presentes entre el sistema por medir y el sensor, lo que provoca mayor incertidumbre en la medición.

Se encontró que el manejo de sensores de inclinación para la medición de la posición de la compuerta presenta características suficientes para obtener una medición fiable de la posición. Una gran cantidad de estos sensores en el mercado para aplicaciones industriales deja a criterio del usuario la consideración de cuál satisface mejor sus necesidades. En el presente capítulo se proponen dos sensores considerados como los más eficientes, con base en las características del sistema. Ambos sensores presentan características semejantes de conexión y el criterio de elección final se dará con base en la diferencia de precios y la facilidad de colocación de ellos.

5.2 Descripción del hardware

A la hora de seleccionar el hardware por utilizar se busca un producto que cumpla con las características de robustez y funcionalidad para el proceso. Se debe tener en cuenta, a la vez, la facilidad de soporte del personal distribuidor en la región y confiabilidad por parte de la empresa en la que se utilizará el producto de los proveedores.

En esta sección se observan las características de los componentes físicos del sistema. La forma de conexión se observa en el manual de usuario, en la parte referida a esquemas eléctricos.

5.2.1 Características del PLC

En la búsqueda de un PLC robusto y con características de comunicación con otros dispositivos confiables se encontró el M340-2030, que se observa en la figura 5.4.



schneider-electric

Figura 5.4 PLC M340-2030

En la tabla 5.1 se observan las características del CPU por utilizar. Este dispositivo fue utilizado en la realización del prototipo y propuesto para la implementación.

Tabla 5. 1 Características M340

Tipo	Puertos	Capacidad manejo de I/O discretas	Capacidad manejo de I/O analógicas	Canales de conteo y puertos seriales	Memoria aplicación	Memoria datos
BMX P34 2030	- USB -Comunicación CANopen y Ethernet	1024	256	36	4 Mb	256 Kb

El PLC es programable con software presente en la empresa y cuenta con características de comunicación y manejo de entradas salidas-aptas para la aplicación; además de ser distribuido por un representante local.

5.2.2 Módulos propuestos para implementación del proyecto

Para la identificación de los módulos de entrada/salida que son conectados al M340 se describe la forma en que son nombrados estos por el fabricante, como se presentan en la figura 5.5.

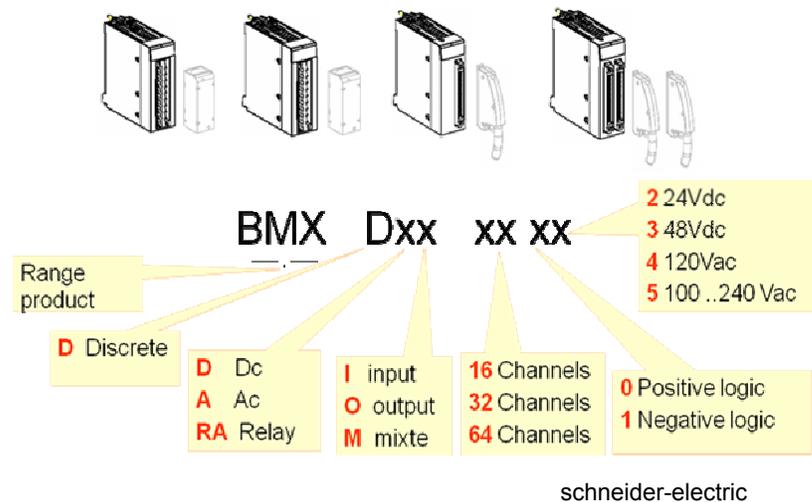


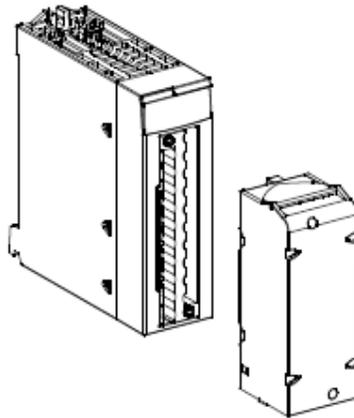
Figura 5.5 Descripción general de módulos para PLC M340.

Para la aplicación se proponen los siguientes módulos de entradas/salidas, descritos en la tabla 5.2:

Tabla 5.2 Módulos propuestos para implementación del proyecto.

TIPO DE MÓDULO	IDENTIFICADOR	DESCRIPCIÓN
Entrada digital	BMX DDI 3202K	32 entradas, 24 Vdc, lógica positiva, 1 conector de 40 puntos
Salida digital	BMX DDO 1602	16 canales de salida, 24 Vdc, 0.5 A, protecciones para cada canal, Bloque terminal de 20 puntos
Entradas analógicas	BMX AMI 0410	4 Canales multi-rangos: +/- 10V, 0...10V, +/- 5V, 0.5 V / 0.20 mA, +/- 20 mA, 1..5 V / 4..20 mA Alta velocidad, resolución de 16 bits
Salidas analógicas	BMX AMO 0210	2 canales multi-rango: +/- 10V, 0...20mA y 4...20mA, alta velocidad, resolución de 16 bits

El módulo de entradas analógicas se observa en la figura 5.6.



Schneider-electric

Figura 5.6 Módulo de entradas analógicas, BMX AMI 0410.

El BMX AMI 0410 corresponde al módulo de entradas analógicas, el cual cuenta con cuatro canales de medición. Estos son configurados para la medición de una señal proveniente de los sensores de posición, que tienen una salida analógica de 4... 20 mA. La búsqueda de una señalización por corriente se da por el hecho de la robustez de ella y por la distancia del lazo; aparte de sus características, por ejemplo, la capacidad de notar fallas (ejemplo, el cable roto, marcaría 0mA, con lo que se detectaría más rápido la falla). El módulo de entradas analógicas cuenta también con la característica de mantener el último valor marcado por el sensor en su entrada en caso de falla (usado en el proyecto para la detección de fallas en el sensor). La velocidad de refrescamiento de la señal es configurable y parte de 5 ms, tiempo de refrescamiento suficiente para notar cambios en la posición de la compuerta y los cambios especificados por el fabricante del sensor.

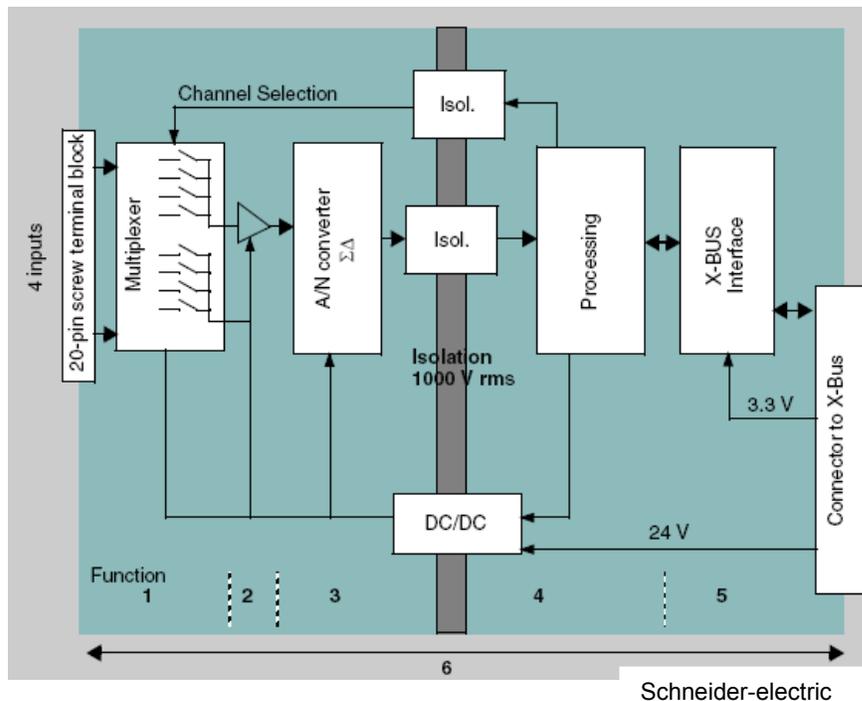


Figura 5.7 Diagrama de conexiones internas de BMX AMI 0410.

En la figura 5.7 se observa la configuración interna del módulo de entradas analógicas, para el cual resulta importante la utilización de un circuito de protección externo. La forma en que se debe instalar el dispositivo se muestra en el plano con designación SND-C4/5-C9 (presente en sección de esquemas eléctricos).

El módulo de salidas analógicas propuesto para la interfaz con el usuario (generación de señal 4...20mA, para visualización en una pantalla un valor de 0...100 correspondiendo al porcentaje de apertura deseado) corresponde al BMX_AMO_0210.

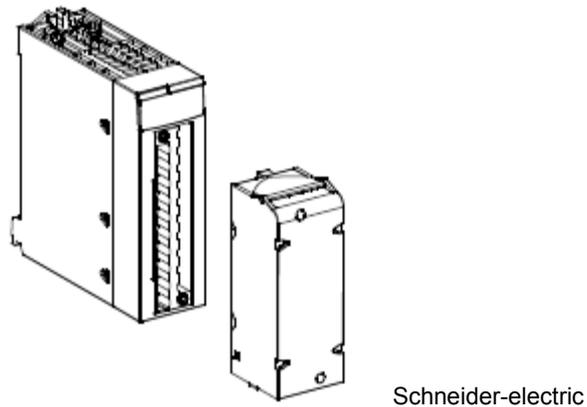


Figura 5.8 Módulo de salidas analógicas BMX AMO 0210.

En la figura 5.8 se observa el módulo BMX AMO 0210. Este cuenta con dos salidas analógicas, configurables a señal de voltaje o corriente. La forma en la que se conecta se observa en el plano con designación SND-C4/5-C10.

El módulo de entradas digitales corresponde al AMX DDI 3202K, que cuenta con 32 entradas digitales, y es mostrado en la figura 5.9. A la hora de realizar el diseño de la forma de conexión se coloca un relé independiente de las señales de voltaje alterno que generan la señalización, con el fin de evitar que se den corrientes en sentido contrario a la alimentación CD. Esto se observa en los planos en los que se tienen las entradas al PLC.

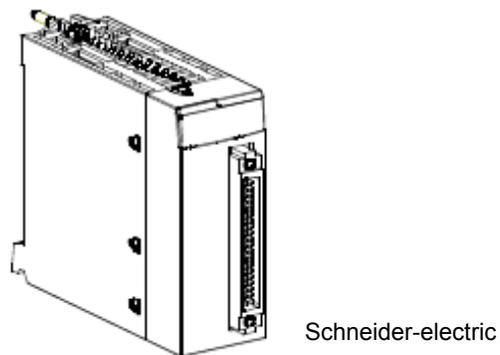


Figura 5.9 Módulo de entradas digitales, AMX DDI 3202K.

El módulo de salidas digitales, AMX DDO 1602 (figura 5.10), corresponde a 16 salidas a pre-actuadores, por lo que se colocan relés a la salida del módulo visto para accionar los indicadores luminosos y señales de control. La forma de conexión para el control de las señales se observa en el plano con designación SND-C4/5-C08.

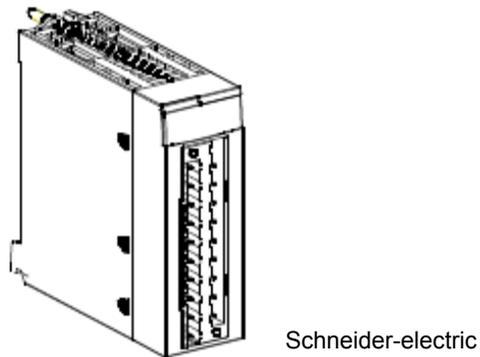


Figura 5.10 Módulo de salidas digitales, AMX DDO 1602.

Al PLC escogido, se le debe adaptar un módulo para hacer uso de la característica de escritura y lectura con otro PLC remoto, mediante el método IO Scanning, planteado para el desarrollo de la comunicación con otro dispositivo semejante, el cual corresponde al BMX NOE 0100.

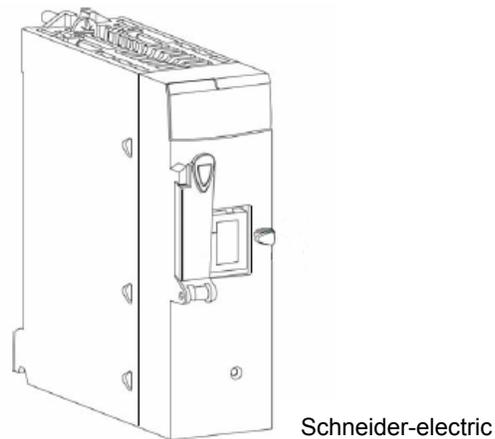


Figura 5.11 Diagrama módulo BMX NOE 0100.

El BMX NOE 0100 corresponde a un módulo de red para PLC que permite conexión a una red Ethernet. La característica que se consideró para el uso de este módulo es el servicio I/O scanning que ofrece.

El I/O scanner del BMX NOE 0100 tiene capacidad de escanear un máximo de 64 dispositivos, y para cada dispositivo se puede procesar un volumen de entrada/salida máxima de 2K *words* por cada solicitud.

En la tabla siguiente se observan algunas de las principales características:

Tabla 5.3 Características del BMX NOE 0100.

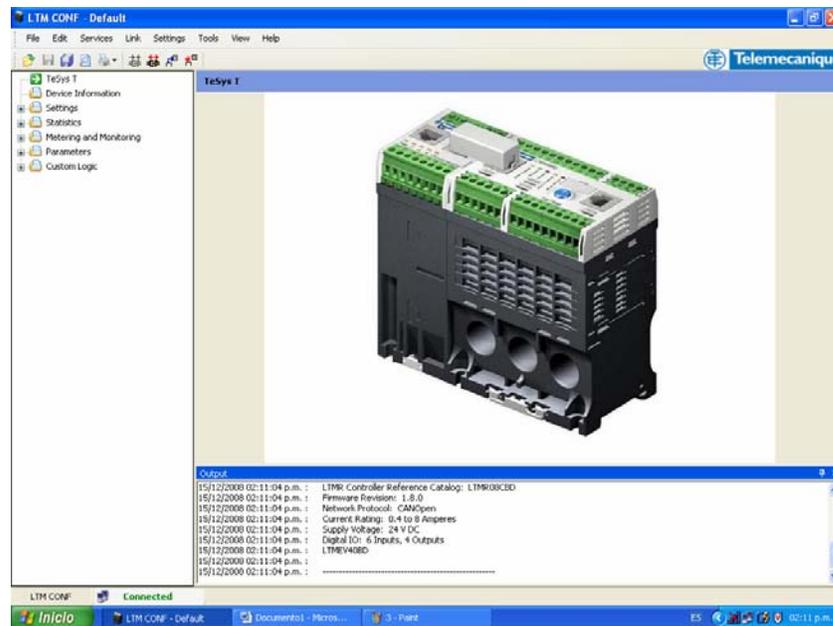
Parámetro	Número de I/O por dispositivo	Tasa repetitiva	Área de almacenaje de datos
Rango de valores	0 ... 64	0 ... 60 s	%IW, %MW

La dirección IP del dispositivo debe estar determinada por parte del usuario final ya que este tomará en cuenta las direcciones asignadas a los diferentes

dispositivos del grupo ARCOSA, para no tener un conflicto de direcciones y una comunicación remota, una vez que el sistema sea implementado.

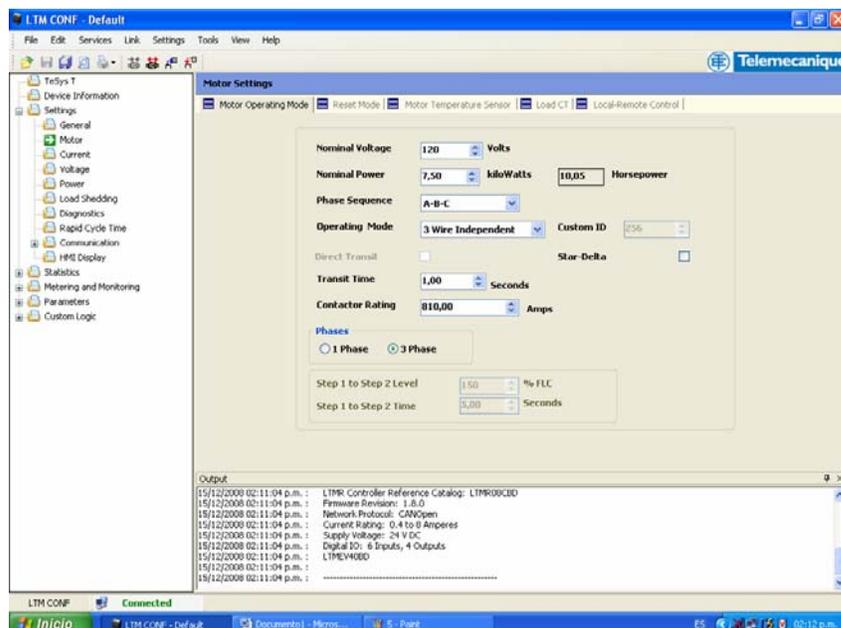
Se propone el uso de un dispositivo capaz de medir la corriente de carga en los motores de la central hidráulica, con el fin de observar el comportamiento de estos. Esto se considera útil a la hora de observar los cambios en el consumo de corriente de los motores y la tensión de alimentación, y así determinar su correcto funcionamiento. Para esto se plantea el uso del dispositivo Tesys T, que cuenta con características de medición y comunicación con otros dispositivos en una red Ethernet o CANopen.

En las figuras 5.12 y 5.13 se observa la configuración del Tesys T, realizada con el programa *Power Suite*.



PowerSuite

Figura 5.12 Visualización de pantalla de configuración Tesys T



PowerSuite

Figura 5.13 Pantalla de configuración de valores Tesys T.

El módulo de medición y control Tesys T tiene la capacidad de medir y configurar el consumo de carga que debe tener el dispositivo sensado, en este caso los motores que mueven las electrobombas. Mediante el uso del software *Power Suite* se tiene acceso a la configuración de los valores y a la visualización de los valores en cada instante. La conexión de este dispositivo corresponde a una lectura de posición de memoria en el PLC, luego de configurar la red de comunicación con el dispositivo. El dispositivo se usa como aparato de medición de voltajes y corrientes, sin intervenir en el proceso.

5.2.3 Sensor de posición para implementación del proyecto

Se busca un sensor de posición con capacidad para permanecer en la intemperie y con una señalización robusta, el cual debe estar en capacidad de medir los cambios según el movimiento estudiado de la compuerta.

Se buscaron medidores de distancia con el fin de medir la carrera de salida del pistón para de esta forma relacionar la apertura con la posición del pistón. Esta idea se desecha por el alto costo de los sensores confiables para la distancia recorrida en la carrera del actuador, la cual corresponde a 4880 mm, por lo que este tipo de sensor para medición de distancia no fue propuesto.

En vista de que la carrera de apertura de la compuerta corresponde aproximadamente a un movimiento de 44° , se busca un sensor capaz de medir el movimiento de este ángulo, que presente características de medición lineal. Entre las opciones encontradas se presentan sensores de inclinación, sensores de pendiente y acelerómetros.

Si bien los acelerómetros son de bajo costo y se podrían utilizar encapsulados para su protección, la mayoría de las opciones encontradas presentan un bajo rango de medición lineal y la forma de posicionarlo para una correcta medición necesitaría la realización de pruebas en el lugar, a la hora de decidir una correcta ubicación de él en la compuerta. En su mayoría, los modelos de acelerómetros encontrados no definían el grado de protección (IP) del producto. Al ser esencial para el proceso de control de movimiento de las compuertas el sensor de posición, es preferible buscar equipo que tenga características dadas por el fabricante.

La mayoría de equipo de medición de desplazamiento angular o inclinación presentan características de sensibilidad un poco altas, y la forma de alimentación y medición requeriría ajustar el sensor con un movimiento mecánico de él, para obtener una referencia buscada que mida desde cero hasta los 44 grados correspondientes a la carrera de apertura en grados.

Se busca que el sensor tenga una alimentación que pueda ser brindada por el equipo presente en el área de las compuertas, una salida que pueda ser conectada a la entrada directamente al PLC, ya sea de manera digital o analógica, y

un grado de protección que permita la exposición al polvo y el lanzamiento de agua. Estas características fueron buscadas en diferentes productos ofrecidos en internet. De ellos se considera el inclinómetro (inclinometer) como el más adecuado, manufacturado por CELESCO IT9420, y también el inclinómetro de serie GNi, fabricado por Rieker.

Rieker es una empresa que lleva años en la fabricación de inclinómetros, lo que genera confianza en ellos. El producto es el que corresponde al modelo NG3i, el cual presenta las condiciones necesarias para la medición, con un valor por unidad de \$492,00. Este sensor se deja de lado por la forma en que se ensambla; ya que debe ser montado de manera paralela al plano del movimiento. Por eso queda como segunda opción, aun cuando en caso de escogerlo para la implementación la forma de conexión con el PLC es idéntica a la del escogido, y solo requeriría una pequeña modificación en el programa.

El sensor propuesto para la implementación del proyecto es el IT9420, manufacturado por Celesco, que tiene un costo por unidad de \$807,00 sin incluir costos de envío ni impuestos de entrada. A continuación se describe este sensor:

Lo importante es la posición del sensor respecto a su vertical. Mediante un potenciómetro de precisión se mide la diferencia entre la vertical del sensor y la posición del objeto que mueve el potenciómetro, que envía una señal de salida que relaciona este ángulo.

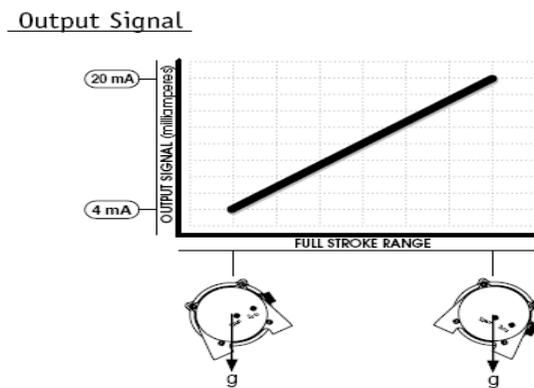
El sensor encontrado presenta las siguientes características que lo hacen adecuado para el proceso:

Tabla 5. 4 Características IT9420, respecto a las condiciones ambientales

Empaquetado	Temperatura de operación	Vibración
IP 67	-34° a 90° C	Arriba de 10 G's hasta 2000 Hz

La tabla 5.4 muestra cómo el encapsulado del sensor presenta características suficientes para dejarlo a la intemperie, debido a que cuenta con un IP 67. Este corresponde a una protección total contra el polvo y, a la vez, está protegido contra la inmersión en agua.

Respecto a la salida, se cuenta con una señalización por corriente, la cual corresponde a una salida de 4 a 20 miliamperios, los cuales surgen de forma lineal al movimiento, como se observa en la figura 5.14.



Celesco Transducer Products, Inc.

Figura 5.14 Señal de salida IT9420, respecto a su inclinación.

La selección de las posiciones para la especificación de fabricación del sensor está determinada por la forma del movimiento con el que se colocará el sensor. En planos de referencia se encuentra que el brazo superior de la compuerta se encuentra paralelo al eje horizontal. Al estar esta cerrada localiza el sensor en la posición observada en la siguiente figura (la cual corresponde a un punto cercano a la cadena que mueve el transductor de posición actual).

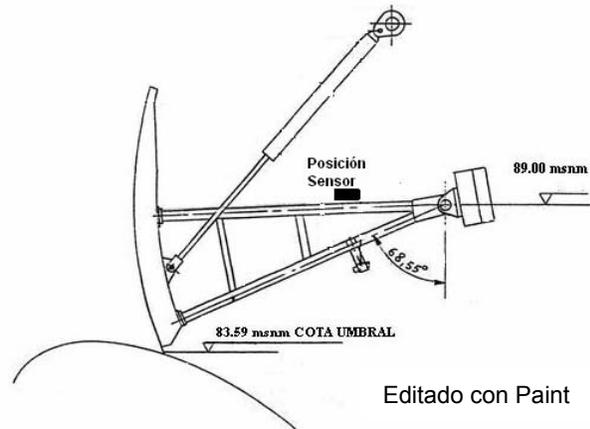


Figura 5.15 Lugar donde se situaría el sensor.

La elección de la referencia de movimiento del sensor de posición propuesto está determinada por la figura 5.16:

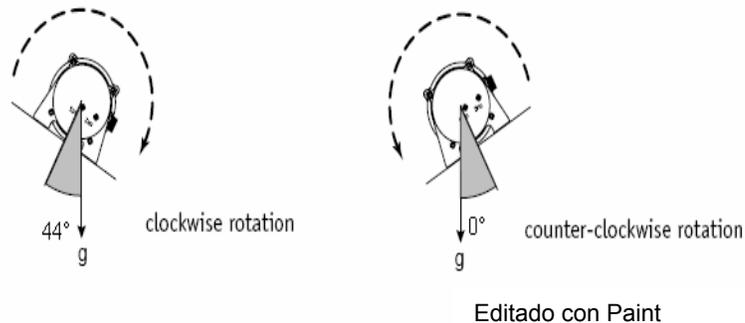


Figura 5.16 Movimiento del sensor IT9420

En esa figura se observa cómo para el movimiento del sensor, en la rotación en sentido horario (la cual corresponde al movimiento de apertura de la compuerta), se llegará a un movimiento máximo de 44° , el cual corresponde a la apertura total de la compuerta; mientras que en el movimiento mostrado como “counter-clockwise rotation” se tienen cero grados, y correspondería a la posición de compuerta completamente cerrada.

Los puntos de cierre y apertura para los grados de apertura de la compuerta deben ajustarse al sensor, ya que para las especificaciones del sensor se pide que la suma de ambos este dentro del rango de 45 a 240°, por lo que se escoge, según las condiciones del fabricante, un valor de 60° para la rotación en sentido horario. Este elemento no presentaría mayor inconveniente a la hora de implementar la propuesta de este sensor; porque se cuenta con un ajuste de 20% del cero mecánico del pedido a la fábrica; a la vez, de 20% del *spam* del rango de valores de medición del sensor.

La sensibilidad del sensor viene determinada por la ecuación:

$$16\text{mA} / \text{rango de medición del sensor}, \pm 0,25\% \quad (5,1)$$

Eso corresponde para los 60° del rango total a una sensibilidad de $0,266\text{mA} \pm 0,25\%$, lo que a su vez correspondería a una detección de cambios de $0,15^\circ$, con una exactitud (*accuracy*) de $\pm 0,5\%$ del valor de la escala total del sensor ($0,3^\circ$), y esto permite notar cambios de $0,15 \pm 0,3^\circ$ en la medición. Se busca un dispositivo capaz de notar cambios de $0,45^\circ$ en la medición, para lograr tener una relación de 1% para cada valor de cambio en la apertura de la compuerta.

Para el pedido del inclinómetro este se solicita mediante el pedido "IT9420-60-0-1121", que se refiere a las especificaciones de medición mencionadas. Con una alimentación de 8 – 40 Vdc, encapsulado de aluminio, los 4mA se tendrán con el counter-clockwise y los 20mA con el clockwise, con 3m de cable a prueba de agua con un IP67 y sin amortiguación magnética.

Con las especificaciones dadas, se solicitó cotización del sensor y se recibió como respuesta que su valor, más los gastos de envío, sin impuestos de entrada al país, corresponde a \$1.047 por cada uno.

5.3 Descripción del software

Una vez estudiado el anterior sistema de control para las compuertas de excedencia del embalse Sandillal y el software Unity Pro XL, se decide desarrollar un programa que realiza acciones en forma paralela. Este debe estar en capacidad de detener el movimiento de las compuertas en cualquier momento en caso de falla, de una manera segura y rápida, mediante una lógica de programación semejante para cada compuerta, y comportarse como si fueran sistemas individuales. Seguidamente se explica el funcionamiento y se hacen consideraciones sobre el programa realizado.

La configuración de los módulos de entrada-salida se realiza como se especifica en hojas de fabricantes y tutoriales en línea, puestos a disposición por Schneider Electric. La corroboración de la correcta configuración se comprueba mediante el desarrollo de un prototipo, con el conjunto de módulos de entrada-salida facilitado por Schneider Electric que, si bien no son los planteados en la propuesta de solución, presentan características semejantes, consideradas suficientes para corroborar la eficacia de la estructura de control.

Es necesaria la verificación continua del correcto funcionamiento de las compuertas durante las maniobras de apertura, por lo que se tiene una constante revisión de las señales provenientes de los interruptores de presión, ya sean de baja o alta presión, calentamiento del motor, mínimo nivel de aceite en el tanque o falla en la comunicación con dispositivos remotos. Estas señales accionan relés para detener

motores que ponen en funcionamiento el movimiento que acciona las bombas e indicadores luminosos de falla.

Para la revisión de estos errores en el proceso de apertura de las compuertas se cuenta con el diagrama de estados de la figura 5.17 para la activación de señales.

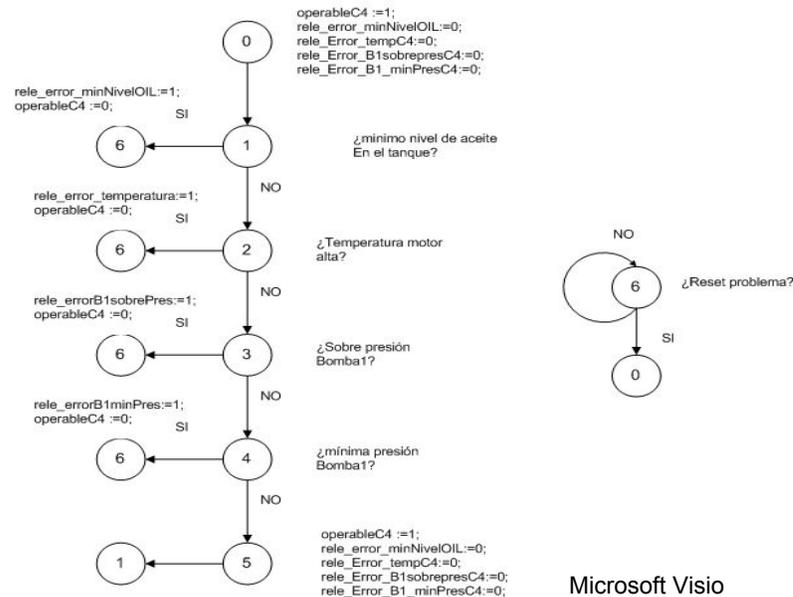


Figura 5.17 Diagrama de estados para detección de errores de funcionamiento

En la figura 5.17 se observa la forma de revisión constante de las señales de error. En el caso de darse alguna falla, esta activará la señal del error correspondiente, lo cual se realiza para cada compuerta por aparte. Con el fin de realizar menos preguntas que retrasen la actualización de la bandera de error solo se identificará un error a la vez; esto con el fin de detener el funcionamiento de la máquina. El error hará que se deba ir al lugar (vertedero de excedencias) para la corrección, por lo que a la hora de realizar su corrección podrá notarse si existe otro error. El programa no saldrá del estado de “error presente” (estado 6, figura 5.17) sin darse la señal *reset de error* (correspondiente a un botón), con lo que se asegura que la configuración del sistema tenga presente la existencia de un error.

Para el control del movimiento de apertura se desarrolla una máquina de estados capaz de activar las señales para la apertura de las compuertas. En la figura 5.18 se observan las consideraciones tomadas en cuenta a la hora de la apertura de las compuertas.

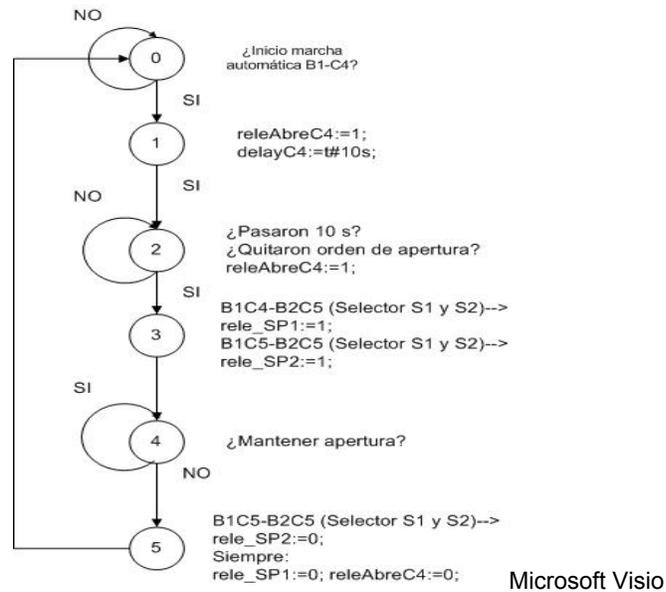


Figura 5.18 Esquema de maniobras de compuertas.

Las maniobras de apertura empezarán una vez que se active la señal de inicio de maniobras de cada compuerta. Si la señal es activada, se acciona el actuador, que muestra la indicación de que la compuerta se encuentra en maniobras de apertura. Se espera un tiempo específico luego de encender los motores (determinado por medio de la medición de este en el actual sistema de control) para que el circuito hidráulico llegue a la presión suficiente para intentar la apertura (en el manual de operación se indica el tiempo para realizar esta maniobra). Una vez pasado el tiempo se acciona la electroválvula SP1/SP2 según la compuerta (vistas en la figura A.1) y se inicia la apertura de la compuerta en caso de no haber falla.

Esta parte del programa toma en cuenta si se está accionando una transferencia de bombas (abrir C4 con bomba de C5 o viceversa) mediante las señales del selector S1 y S2. Una vez realizada la maniobra de movimiento del pistón se continuará esta hasta que no se indique que se detenga la apertura mediante la desactivación de la señal de apertura para cada compuerta. Esto se lleva a cabo en el programa llamado “principal”. Realizado esto se espera una nueva activación de la señal.

Las señales de retrasos se realizan por medio de un temporizador, para definir una variable que indique la finalización del tiempo programado.

La maniobra de cierre de las compuertas se da por el peso de las compuertas, por lo que no es necesaria la activación de motores. Basta con que se tenga presión en el cilindro hidráulico, ya que de no haber presión en el pistón la compuerta se encuentra descansando sobre algún punto.

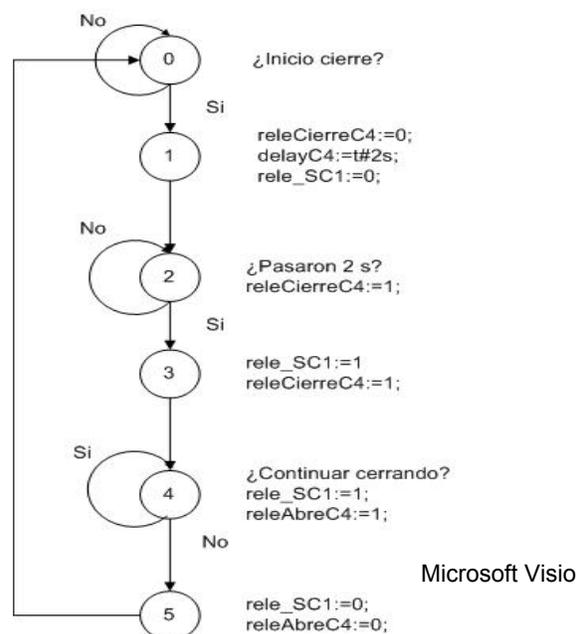


Figura 5.19 Diagrama de estados de cierre compuertas.

La maniobra de cierre de las compuertas se da de manera que una vez activada la señal de cierre de la compuerta esta accionará la señal de la compuerta en cierre y esperará el tiempo especificado para el inicio del cierre. Transcurrido este tiempo se acciona la válvula de cierre SC1/SC2 (figura A.1), la que, en caso de existir presión en el cilindro, iniciará el cierre hasta llegar a la posición deseada, o hasta que el cilindro quede sin presión.

El programa encargado del manejo y la toma de decisiones de activación de señales de cierre o apertura de las compuertas, llamado “principal”, consiste en una máquina de estados que constantemente revisa la condición de compuertas operables. Él se encarga de procesar las solicitudes y es transparente, una vez procesada (en la forma de llevarla a cabo, ya que sigue el mismo rumbo de consulta de posición buscada en el cierre o apertura). El diagrama se observa en la figura 5.20.

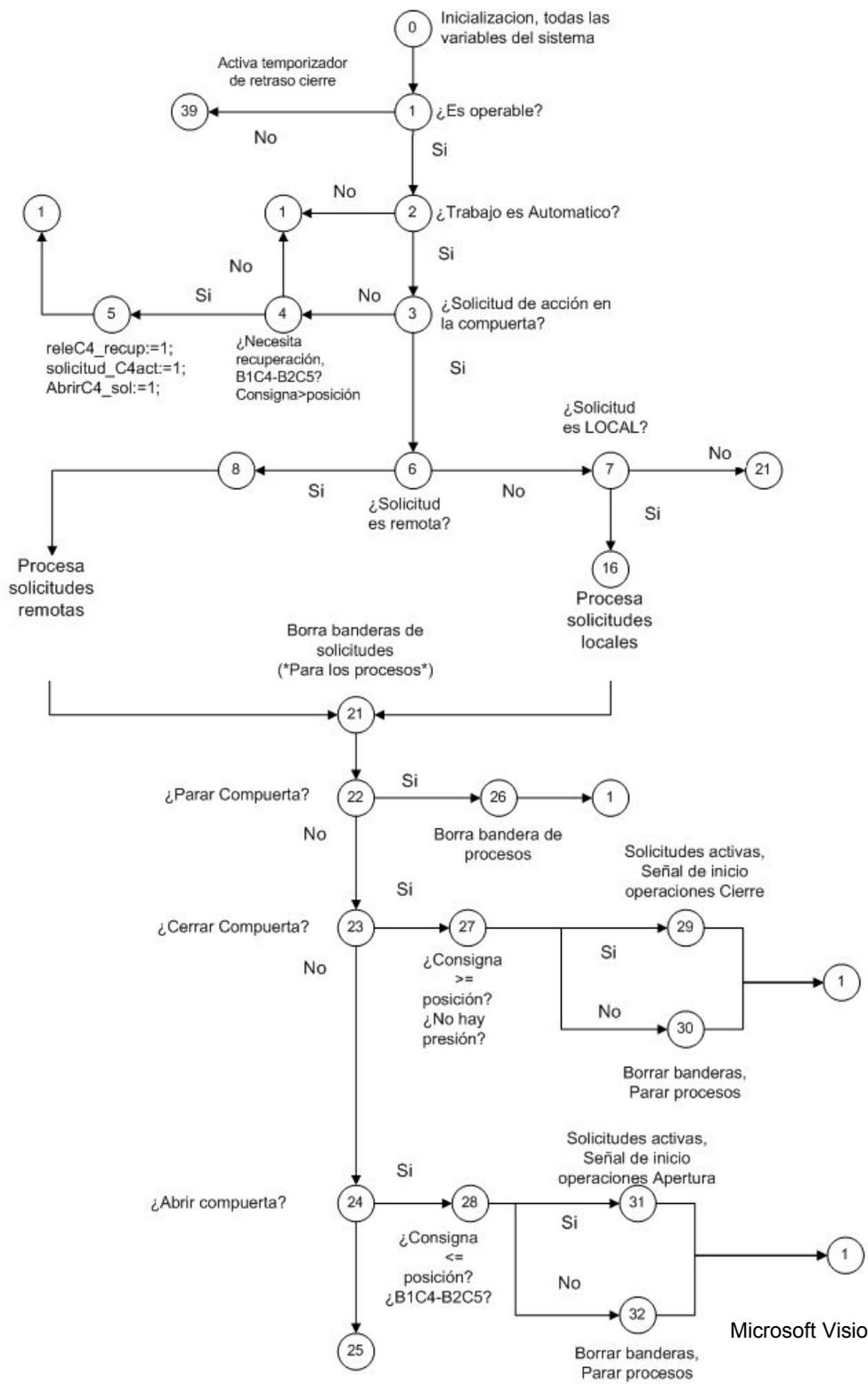


Figura 5.17 Diagrama de estados controlador de compuertas C4/C5

Se dice que el programa es transparente en la forma de procesar solicitudes, porque una vez que procesa la solicitud (sea remota o local) luego será procesada de la misma forma. En primera instancia, consultará si el proceso es realizado de manera automática (con PLC) o manual. En caso de ser de forma automática se preguntará si hay una solicitud y, de ser así, lo hará; y constantemente preguntará si ya se llegó a la posición deseada o si existe una nueva solicitud, para actualizarla.

El anterior diagrama muestra la capacidad del sistema de corrección de error en estado de reposo, que genere un descenso de la posición de la compuerta. Esto se realiza mediante la inserción, en el código de revisión, del valor del sensor de posición y la última solicitud realizada, configurada a un cambio no menor a 1% configurable por software.

En caso de darse una solicitud nueva de operación remota, debe estar el interruptor SLR marcando mando remoto, para atender solicitudes remotas. Si este interruptor no está en dicha posición el manejador remoto será un observador del proceso. En la siguiente figura se observa la forma en que se procesan solicitudes remotas.

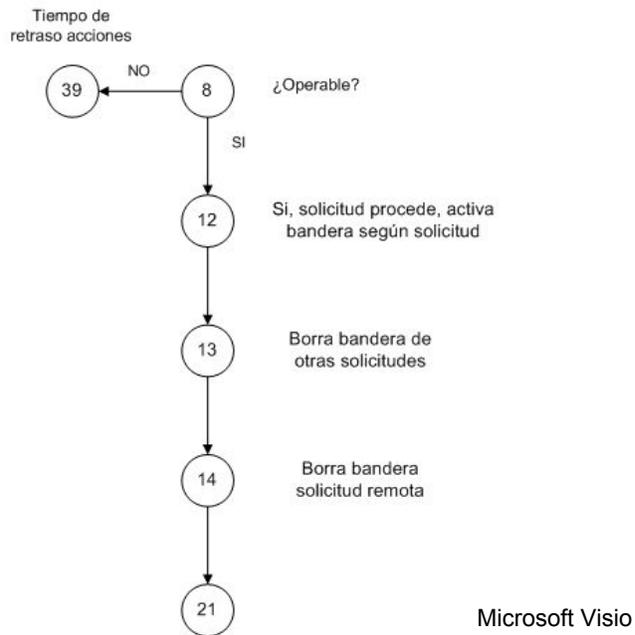


Figura 5.18 Diagrama de procesamiento de señales remotas.

El procesamiento de solicitudes remotas se inicia con la revisión de si la compuerta es operable. En caso de serlo se procesa la solicitud remota y se inicia la maniobra, que borra, a su vez, la bandera de solicitudes remotas.

Para el procesamiento de señales locales se presenta el siguiente diagrama:

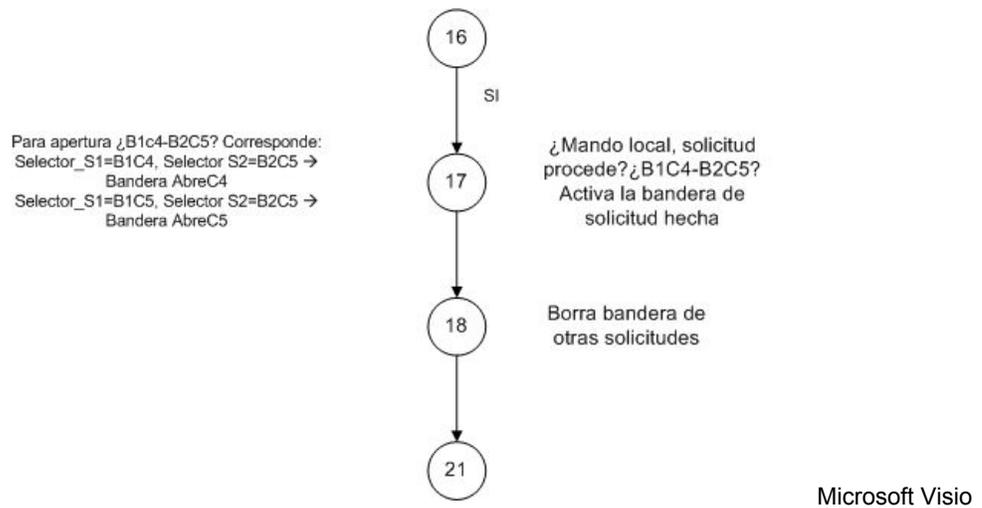


Figura 5.19 Diagrama de procesamiento de señales locales.

En la figura 5.22 se toman en cuenta las condiciones de los interruptores de funcionamiento de las bombas, es decir, si se encuentran operando en condiciones normales o si existe una operación especial, como en el caso de transferencia de electrobombas (las compuertas intercambian bombas de funcionamiento). Esta lógica únicamente actualizará las solicitudes y borrará la bandera de nueva solicitud.

Las solicitudes locales son procesadas por medio de una interfaz con el usuario que corresponde a botones de solicitud de incremento o decremento de porcentaje de apertura, la cual se observará en una pantalla que muestra el equivalente de 0 a 100% de apertura, a partir de señal de corriente. La forma de uso se explica en el manual de usuario. La visualización de la interfaz será como se muestra en la figura 5.23.

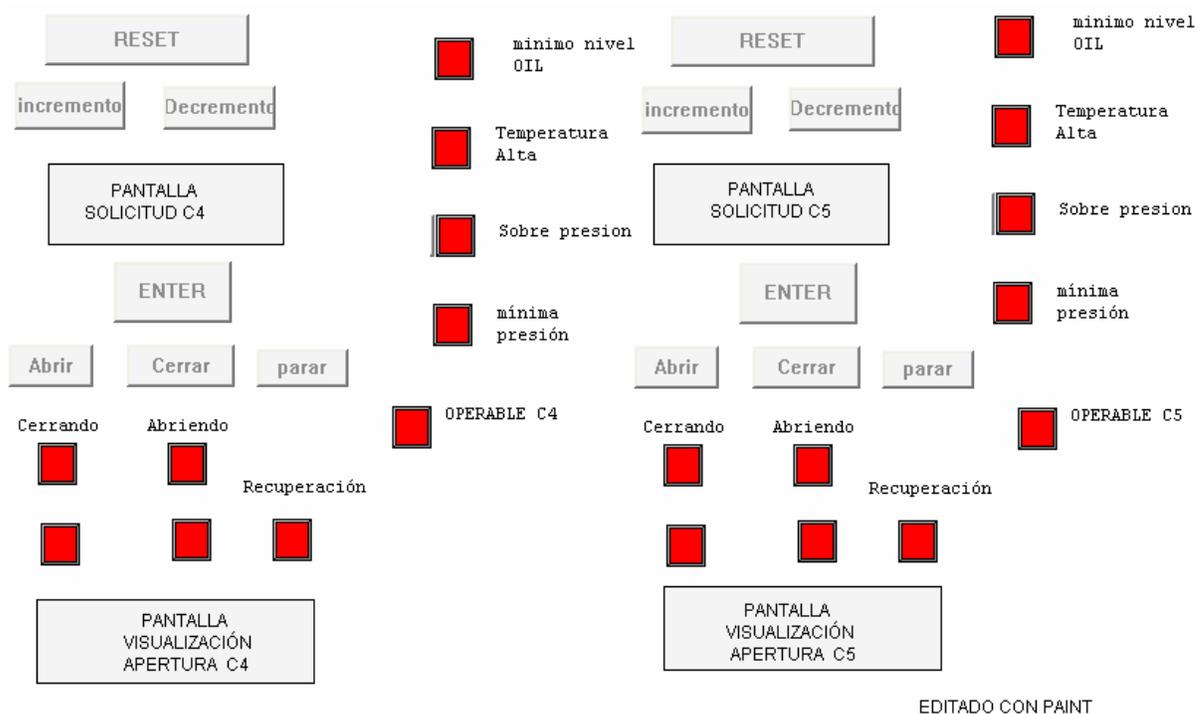


Figura 5.20 Panel de control.

En la figura 5.23 se observa la configuración de la interfaz que tendrá el operador local en el vertedero de excedencia. Se tendrá, a la izquierda de la figura, las configuraciones de la compuerta C4, y a la derecha corresponde a la compuerta C5 en que se muestran los botones y pantallas de visualización. Las conexiones de estos se observan en los esquemas eléctricos. Dicha configuración es con el fin de una fácil interpretación. En el manual de usuario se da una explicación de la forma en que se da el funcionamiento.

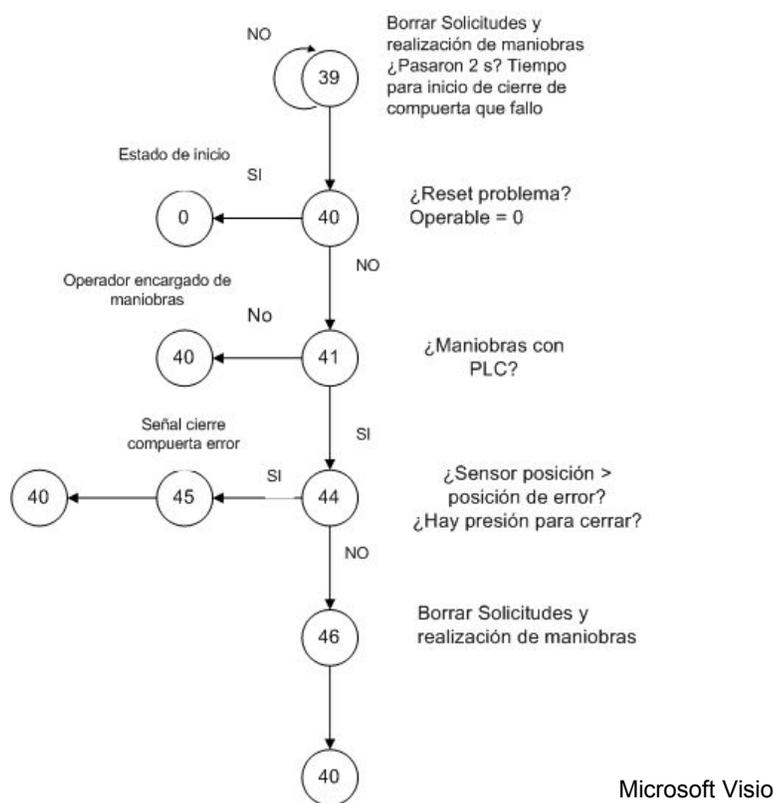
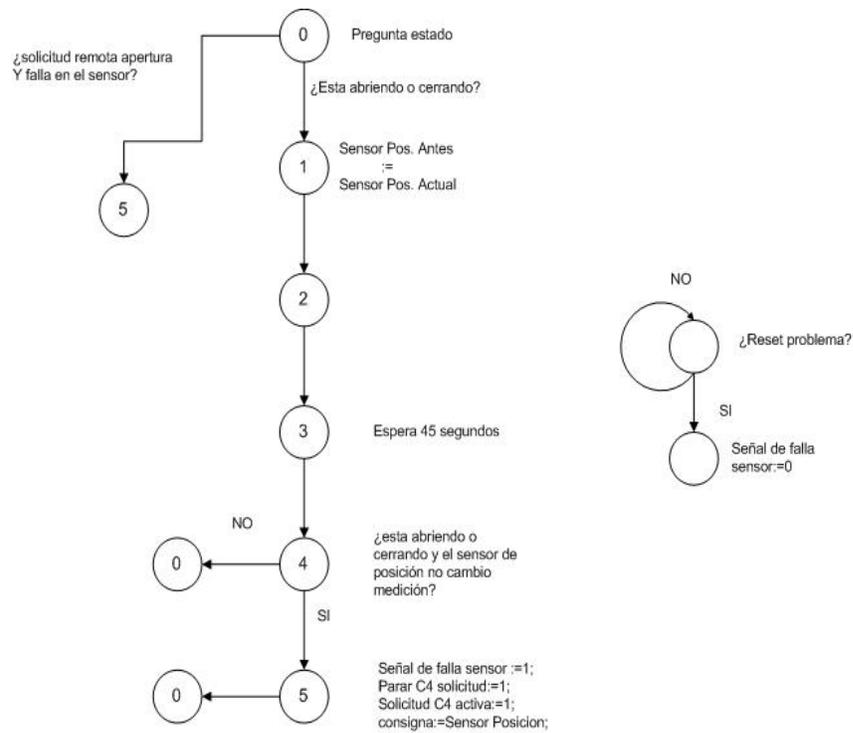


Figura 5.21 Diagrama de operación durante error en proceso.

En la figura 5.24 se observan las acciones ejecutadas por el sistema una vez que se detecta un error, el cual inicia maniobras de cierre de compuerta, siempre y cuando se encuentre en modo automático el manejo de las compuertas.



Microsoft Visio

Figura 5.22 Diagrama de detección de fallas en el sensor de posición.

Ya que las compuertas no pueden permanecer indisponibles, en caso de falla de sensores se dispone de un tiempo modificable (diagrama figura 5.25). Esta falla se detecta al no cambiar el valor de la señal del sensor, luego de 45 segundos, lo que indica que el sensor probablemente dejó de funcionar o que las señales en la compuerta están fallando, con lo que se tendrá la activación de la señal “falla sensor compuerta Cx”. La consideración viene de forma que el cierre o apertura de las compuertas se presente en porcentajes de 5% (aproximadamente 45 segundos), según mediciones de apertura realizadas y mencionadas por los operadores de las compuertas. La operación de apertura de manera remota no se realizará en caso de falla en el sensor, pero sí estará disponible en porcentajes de apertura mencionados de manera local (en el vertedero de excedencias).

En el programa se toma en cuenta una estrategia para notar la comunicación entre dispositivos remotos, la cual corresponde a la generación de números que son escritos desde el controlador presente en el vertedero de excedencia en el PLC de control remoto (PLC QUANTUM, presente en la sala de operadores de toma de aguas). El QUANTUM transferirá internamente el dato escrito de manera remota a otra posición de memoria y el dato proveniente del PLC del vertedero de excedencias (momentum); mientras que el momentum leerá el dato escrito en la posición a la que el QUANTUM pasó el dato. En caso de romperse la comunicación este dato no será refrescado, por lo que se notará un fallo en la comunicación del equipo, que se mostrará mediante una señalización en ambos PLC.

En caso de falla de comunicación se esperan 60 segundos para tomar medidas. En caso de estar activo el mando remoto de las compuertas se iniciarán, de estar abierta cualquiera de las compuertas, las maniobras de cierre de la compuerta que se encuentre a un porcentaje mayor a cero por ciento de apertura, mediante el accionamiento de solicitud de cierre de compuertas a cero por ciento. Una vez que se recobre la comunicación se podrán realizar nuevas solicitudes de apertura.

En el manual de usuario se observan las posibles modificaciones en el programa y la localización de las señales para intercambio de información, que se deberán ajustar a la hora de la implementación o de cambios en los elementos de la lógica de control. En este se presenta, a la vez, el esquema eléctrico del sistema de control presentado.

Capítulo 6: Análisis de Resultados

6.1 Resultados

El método de modelado estocástico parte de la premisa de que se debe excitar el sistema con una entrada con el valor conocido para observar el comportamiento de salida (comportamiento del sistema), por lo que se procede a estimular el sistema con el equivalente a una señal escalón, que viene dada por un valor de presión constante.

Para el uso del programa Stochastic2 se tomaron muestras del movimiento de la compuerta respecto al tiempo, midiendo, a la vez, la presión de funcionamiento del sistema. Se toman muestras tanto para apertura como para cierre de la compuerta de excedencia, con el fin de obtener ecuaciones independientes de cierre y apertura de las compuertas, ya que el sistema hidráulico tiene un funcionamiento diferente en el momento de realizar las acciones.

Las mediciones fueron realizadas por medio de la grabación de un vídeo del movimiento de las compuertas, las cuales se llevan a cabo al medir la distancia del eje de rotación de las compuertas a un punto ubicado a 3.850 mm sobre el brazo superior de la compuerta (según plano, punto está a 3863mm). Se ubica una cinta métrica paralela al eje vertical con el fin de tener una medición semejante a un triángulo, para tener relaciones geométricas que llevan a identificar el ángulo de la compuerta, y relacionarla con las características del sensor por utilizar.

Las mediciones fueron realizadas al abrir las compuertas a 15%. Luego de llegar al nivel se da la orden de cierre con el nivel del embalse a 92,05msnm. La presión de apertura es constante a un valor de 85 bar al abrirse la compuerta y de 6 bar al cerrarse. El tiempo de muestreo corresponde a 0,3 segundos. Las muestras

son tomadas a partir del vídeo con el uso del programa “VirtualDubMod_1.5.10.2_es”, el cual permite obtener una serie de imágenes a partir de un vídeo con extensión “.avi”.

Al realizarse las mediciones se nota en la medición que el lapso estimado para abrir la compuerta a 1% corresponde aproximadamente a nueve segundos; esto en concordancia con los datos suministrados por los operadores de las compuertas. A la vez se encuentra que la velocidad de apertura es aproximadamente de 0,65 m/min y la de cierre de 0,68 m/min.

Con las consideraciones descritas se obtienen las siguientes ecuaciones y figuras para el modelado del movimiento de la compuerta a una presión constante, la cual, con el programa de MATLAB, muestra el comportamiento estimado del sistema.

Tabla 6. 1 Ecuación de primer orden del sistema durante la apertura.

Presión de Entrada	G(z)	Matriz de varianza – covarianza	Coeficientes ± incertidumbre								
85 bar	$\frac{0.035473}{z^2(z-1)}$	<table border="0"> <tr> <td>1.6613e-7</td> <td>-4.1593e-7</td> </tr> <tr> <td>-4.1593e-7</td> <td>1.3939e-6</td> </tr> </table>	1.6613e-7	-4.1593e-7	-4.1593e-7	1.3939e-6	<table border="0"> <tr> <td>999.8793e-3</td> <td>805.5339e-6</td> </tr> <tr> <td>35.4731e-3</td> <td>2.3334e-3</td> </tr> </table>	999.8793e-3	805.5339e-6	35.4731e-3	2.3334e-3
1.6613e-7	-4.1593e-7										
-4.1593e-7	1.3939e-6										
999.8793e-3	805.5339e-6										
35.4731e-3	2.3334e-3										

Tabla 6. 2 Ecuación de segundo orden del sistema durante la apertura.

Presión Entrada	G(z)	Matriz de varianza – covarianza	Coeficientes ± incertidumbre																								
85 bar	$\frac{0.030751(z+0.6564)}{z^2(z-1)(z+0.4314)}$	<table border="0"> <tr> <td>5.77e-3</td> <td>-5.77e-3</td> <td>2.928e-19</td> <td>-2.05e-4</td> </tr> <tr> <td>-5.77e-3</td> <td>5.77e-3</td> <td>-4.23e-19</td> <td>2.0525e-4</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>4.1542e-5</td> <td>-4.1542e-5</td> </tr> <tr> <td>-2.056e-4</td> <td>2.052e-4</td> <td>-4.154e-5</td> <td>5.001e-5</td> </tr> </table>	5.77e-3	-5.77e-3	2.928e-19	-2.05e-4	-5.77e-3	5.77e-3	-4.23e-19	2.0525e-4	0	0	4.1542e-5	-4.1542e-5	-2.056e-4	2.052e-4	-4.154e-5	5.001e-5	<table border="0"> <tr> <td>568.3951e-3</td> <td>150.2491e-3</td> </tr> <tr> <td>431.3723e-3</td> <td>150.2223e-3</td> </tr> <tr> <td>30.7513e-3</td> <td>12.7396e-3</td> </tr> <tr> <td>20.1844e-3</td> <td>13.9788e3</td> </tr> </table>	568.3951e-3	150.2491e-3	431.3723e-3	150.2223e-3	30.7513e-3	12.7396e-3	20.1844e-3	13.9788e3
5.77e-3	-5.77e-3	2.928e-19	-2.05e-4																								
-5.77e-3	5.77e-3	-4.23e-19	2.0525e-4																								
0	0	4.1542e-5	-4.1542e-5																								
-2.056e-4	2.052e-4	-4.154e-5	5.001e-5																								
568.3951e-3	150.2491e-3																										
431.3723e-3	150.2223e-3																										
30.7513e-3	12.7396e-3																										
20.1844e-3	13.9788e3																										

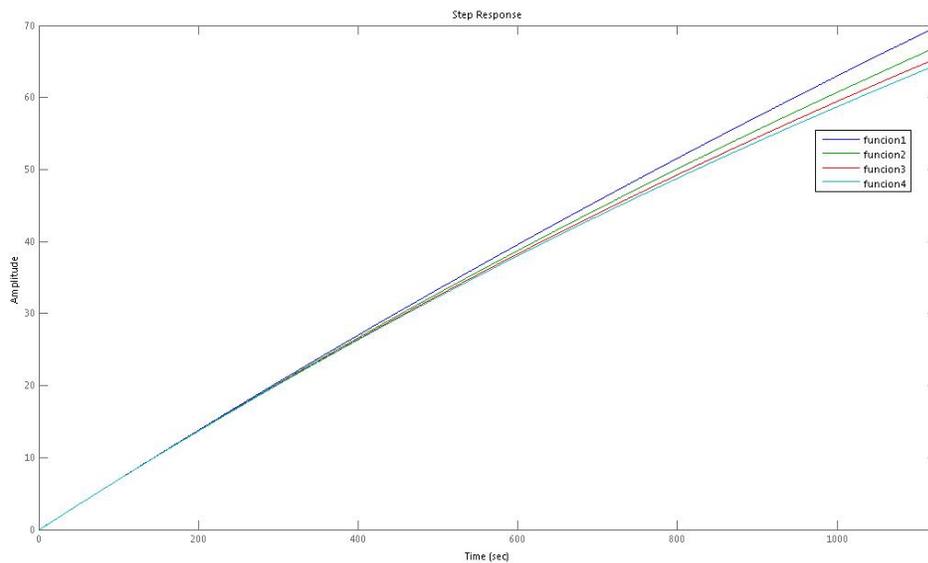
Tabla 6. 3 Ecuación de tercer orden del sistema durante la apertura.

Presión Entrada	G(z)	Matriz de varianza – covarianza	Coeficientes ± incertidumbre																																	
85 bar	$\frac{0.030751(z^2+0.55z+0.565)}{z^2(z-1)(z^2+0.55z+0.273)}$	<table border="0"> <tr> <td>6.575e-3</td> <td>-3.776e-3</td> <td>-2.798e-3</td> </tr> <tr> <td>-1.18e-18</td> <td>-2.0222e-4</td> <td>-1.3174e-4</td> </tr> <tr> <td>-0.0037762</td> <td>0.0076262</td> <td>-3.8505e-3</td> </tr> <tr> <td>-4.8478e-19</td> <td>1.1612e-4</td> <td>-1.1782e-4</td> </tr> <tr> <td>-0.002798</td> <td>-0.0038505</td> <td>0.0066473</td> </tr> <tr> <td>8.4837e-19</td> <td>8.6043e-5</td> <td>0.00024918</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	6.575e-3	-3.776e-3	-2.798e-3	-1.18e-18	-2.0222e-4	-1.3174e-4	-0.0037762	0.0076262	-3.8505e-3	-4.8478e-19	1.1612e-4	-1.1782e-4	-0.002798	-0.0038505	0.0066473	8.4837e-19	8.6043e-5	0.00024918	...			<table border="0"> <tr> <td>448.5698e-3</td> <td>160.3040e-3</td> </tr> <tr> <td>277.8207e-3</td> <td>172.6311e-3</td> </tr> <tr> <td>273.2675e-3</td> <td>161.1717e-3</td> </tr> <tr> <td>30.7513e-3</td> <td>12.2943e-3</td> </tr> <tr> <td>16.9572e-3</td> <td>18.0721e-3</td> </tr> <tr> <td>17.3772e-3</td> <td>13.8745e-3</td> </tr> </table>	448.5698e-3	160.3040e-3	277.8207e-3	172.6311e-3	273.2675e-3	161.1717e-3	30.7513e-3	12.2943e-3	16.9572e-3	18.0721e-3	17.3772e-3	13.8745e-3
6.575e-3	-3.776e-3	-2.798e-3																																		
-1.18e-18	-2.0222e-4	-1.3174e-4																																		
-0.0037762	0.0076262	-3.8505e-3																																		
-4.8478e-19	1.1612e-4	-1.1782e-4																																		
-0.002798	-0.0038505	0.0066473																																		
8.4837e-19	8.6043e-5	0.00024918																																		
...																																				
448.5698e-3	160.3040e-3																																			
277.8207e-3	172.6311e-3																																			
273.2675e-3	161.1717e-3																																			
30.7513e-3	12.2943e-3																																			
16.9572e-3	18.0721e-3																																			
17.3772e-3	13.8745e-3																																			

Tabla 6.4 Ecuación de cuarto orden del sistema durante la apertura.

Presión Entrada	G(z)	Matriz de varianza - covarianza	Coefficientes \pm incertidumbre
85 bar	$\frac{0.030751(z + 0.7637)(z^2 - 0.1493z + 0.6059)}{z^4(z - 1)(z + 0.3651)(z^2 + 0.4912z + 0.3638)}$	0.0069099 -0.0031384	385.62e-3 164.34e-3
		-0.0018901 -0.0018789	222.48e-3 175.32e-3
		-2.046e-19 -0.0002124	185.91e-3 176.069e-3
		-0.0001159	205.52e-3 164.60e-3
		-0.0031384 0.0078643	30.751e-3 12.079e-3
		-0.0028565 -0.0018693	18.892e-3 17.814e-3
		9.065e-019 9.651e-5	15.126e-3 17.978e-3
		-0.00014533	14.229e-3 13.927e-3
	...		

En la figura 6.1 se observa el gráfico de las ecuaciones obtenidas para las maniobras de apertura de las compuertas, en que el número de función corresponde al orden de la ecuación.



MATLAB

Figura 6.1 Respuesta al escalón de los modelos de apertura del sistema.

Se presentan las ecuaciones obtenidas para el sistema a la hora de darse las maniobras de cierre de las compuertas.

Tabla 6.5 Ecuación de primer orden del sistema durante el cierre.

Presión de Entrada	G(z)	Matriz de varianza – covarianza	Coefficientes \pm incertidumbre								
5 bar	$\frac{0.010646}{z(z - 0.994)}$	<table style="display: inline-table; border: none;"> <tr> <td>3.2845e-7</td> <td>-1.4747e-7</td> </tr> <tr> <td>-1.4747e-7</td> <td>9.2288e-8</td> </tr> </table>	3.2845e-7	-1.4747e-7	-1.4747e-7	9.2288e-8	<table style="display: inline-table; border: none;"> <tr> <td>999.3780e-3</td> <td>1.1401e-3</td> </tr> <tr> <td>-10.6463e-3</td> <td>604.3352e-6</td> </tr> </table>	999.3780e-3	1.1401e-3	-10.6463e-3	604.3352e-6
3.2845e-7	-1.4747e-7										
-1.4747e-7	9.2288e-8										
999.3780e-3	1.1401e-3										
-10.6463e-3	604.3352e-6										

Tabla 6.6 Ecuación de segundo orden del sistema durante el cierre.

Presión Entrada	G(z)	Matriz de varianza – covarianza	Coefficientes \pm incertidumbre																								
85 bar	$\frac{0.0052977(z + 0.978)}{z(z - 0.9989)(z - 0.001074)}$	<table style="display: inline-table; border: none;"> <tr> <td>2.316e-6</td> <td>-2.315e-6</td> <td>-1.0945e-9</td> <td>2.59e-8</td> </tr> <tr> <td>-2.315e-6</td> <td>2.6514e-6</td> <td>-3.012e-7</td> <td>1.23e-7</td> </tr> <tr> <td>-1.094e-9</td> <td>-3.0123e-7</td> <td>2.13e-6</td> <td>-1.99e-6</td> </tr> <tr> <td>2.592e-8</td> <td>1.230e-7</td> <td>-1.993e-6</td> <td>1.94e-6</td> </tr> </table>	2.316e-6	-2.315e-6	-1.0945e-9	2.59e-8	-2.315e-6	2.6514e-6	-3.012e-7	1.23e-7	-1.094e-9	-3.0123e-7	2.13e-6	-1.99e-6	2.592e-8	1.230e-7	-1.993e-6	1.94e-6	<table style="display: inline-table; border: none;"> <tr> <td>999.9623e-3</td> <td>3.0288e-3</td> </tr> <tr> <td>-1.0725e-3</td> <td>3.2404e-3</td> </tr> <tr> <td>-5.2977e-3</td> <td>2.9047e-3</td> </tr> <tr> <td>-5.1810e-3</td> <td>2.7780e-3</td> </tr> </table>	999.9623e-3	3.0288e-3	-1.0725e-3	3.2404e-3	-5.2977e-3	2.9047e-3	-5.1810e-3	2.7780e-3
2.316e-6	-2.315e-6	-1.0945e-9	2.59e-8																								
-2.315e-6	2.6514e-6	-3.012e-7	1.23e-7																								
-1.094e-9	-3.0123e-7	2.13e-6	-1.99e-6																								
2.592e-8	1.230e-7	-1.993e-6	1.94e-6																								
999.9623e-3	3.0288e-3																										
-1.0725e-3	3.2404e-3																										
-5.2977e-3	2.9047e-3																										
-5.1810e-3	2.7780e-3																										

Tabla 6.7 Ecuación de tercer orden del sistema durante el cierre.

Presión Entrada	G(z)	Matriz de varianza – covarianza	Coefficientes \pm incertidumbre																																							
85 bar	$\frac{0.17078(z - 1.089)(z - 0.2164)}{(z - 0.9989)(z + 0.3428)(z - 0.1532)}$	<table style="display: inline-table; border: none;"> <tr> <td>0.0111</td> <td>-0.0121</td> <td>0.000942</td> </tr> <tr> <td>-0.0100</td> <td>0.0108</td> <td>-0.000729</td> </tr> <tr> <td>-0.0121</td> <td>0.0195</td> <td>-0.00743</td> </tr> <tr> <td>0.0108</td> <td>-0.0175</td> <td>0.00660</td> </tr> <tr> <td>0.000942</td> <td>-0.00743</td> <td>0.00649</td> </tr> <tr> <td>-0.000844</td> <td>0.00666</td> <td>-0.00588</td> </tr> <tr> <td>-0.0100</td> <td>0.0108</td> <td>-0.000844</td> </tr> <tr> <td>0.00897</td> <td>-0.00972</td> <td>0.000653</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	0.0111	-0.0121	0.000942	-0.0100	0.0108	-0.000729	-0.0121	0.0195	-0.00743	0.0108	-0.0175	0.00660	0.000942	-0.00743	0.00649	-0.000844	0.00666	-0.00588	-0.0100	0.0108	-0.000844	0.00897	-0.00972	0.000653	...			<table style="display: inline-table; border: none;"> <tr> <td>809.376e-3</td> <td>210.442e-3</td> </tr> <tr> <td>241.861e-3</td> <td>278.276e-3</td> </tr> <tr> <td>-52.470e-3</td> <td>160.481e-3</td> </tr> <tr> <td>170.779e-3</td> <td>188.553e-3</td> </tr> <tr> <td>-222.975e-3</td> <td>249.336e-3</td> </tr> <tr> <td>40.2533e-3</td> <td>145.2673e-3</td> </tr> </table>	809.376e-3	210.442e-3	241.861e-3	278.276e-3	-52.470e-3	160.481e-3	170.779e-3	188.553e-3	-222.975e-3	249.336e-3	40.2533e-3	145.2673e-3
0.0111	-0.0121	0.000942																																								
-0.0100	0.0108	-0.000729																																								
-0.0121	0.0195	-0.00743																																								
0.0108	-0.0175	0.00660																																								
0.000942	-0.00743	0.00649																																								
-0.000844	0.00666	-0.00588																																								
-0.0100	0.0108	-0.000844																																								
0.00897	-0.00972	0.000653																																								
...																																										
809.376e-3	210.442e-3																																									
241.861e-3	278.276e-3																																									
-52.470e-3	160.481e-3																																									
170.779e-3	188.553e-3																																									
-222.975e-3	249.336e-3																																									
40.2533e-3	145.2673e-3																																									

Tabla 6.8 Ecuación de cuarto orden del sistema durante el cierre.

Presión Entrada	G(z)	Matriz de varianza – covarianza	Coefficientes \pm incertidumbre																																		
85 bar	$\frac{0.24297(z + 0.6563)(z - 1.053)(z - 0.3853)}{(z - 0.9988)(z - 0.3074)(z^2 + 0.5774z + 0.2426)}$	<table style="display: inline-table; border: none;"> <tr> <td>0.013</td> <td>-0.010</td> </tr> <tr> <td>-0.003</td> <td>0.00064</td> </tr> <tr> <td>-0.012</td> <td>0.0097</td> </tr> <tr> <td>0.0029</td> <td></td> </tr> <tr> <td>-0.0108</td> <td>0.0197</td> </tr> <tr> <td>-0.0093</td> <td>0.0004</td> </tr> <tr> <td>0.0097</td> <td>-0.0176</td> </tr> <tr> <td>0.0082</td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> </tr> </table>	0.013	-0.010	-0.003	0.00064	-0.012	0.0097	0.0029		-0.0108	0.0197	-0.0093	0.0004	0.0097	-0.0176	0.0082		...		<table style="display: inline-table; border: none;"> <tr> <td>728.796e-3</td> <td>230.901e-3</td> </tr> <tr> <td>204.552e-3</td> <td>279.911e-3</td> </tr> <tr> <td>139.625e-3</td> <td>281.911e-3</td> </tr> <tr> <td>-74.4886e-3</td> <td>159.8469e-3</td> </tr> <tr> <td>242.970e-3</td> <td>206.881e-3</td> </tr> <tr> <td>-189.550e-3</td> <td>250.800e-3</td> </tr> <tr> <td>-130.991e-3</td> <td>252.882e-3</td> </tr> <tr> <td>64.366e-3</td> <td>144.585e-3</td> </tr> </table>	728.796e-3	230.901e-3	204.552e-3	279.911e-3	139.625e-3	281.911e-3	-74.4886e-3	159.8469e-3	242.970e-3	206.881e-3	-189.550e-3	250.800e-3	-130.991e-3	252.882e-3	64.366e-3	144.585e-3
0.013	-0.010																																				
-0.003	0.00064																																				
-0.012	0.0097																																				
0.0029																																					
-0.0108	0.0197																																				
-0.0093	0.0004																																				
0.0097	-0.0176																																				
0.0082																																					
...																																					
728.796e-3	230.901e-3																																				
204.552e-3	279.911e-3																																				
139.625e-3	281.911e-3																																				
-74.4886e-3	159.8469e-3																																				
242.970e-3	206.881e-3																																				
-189.550e-3	250.800e-3																																				
-130.991e-3	252.882e-3																																				
64.366e-3	144.585e-3																																				

En la figura 6.2 se observa el gráfico de las ecuaciones obtenidas para las maniobras de cierre de las compuertas. En ellas el número de función corresponde al orden de la ecuación.

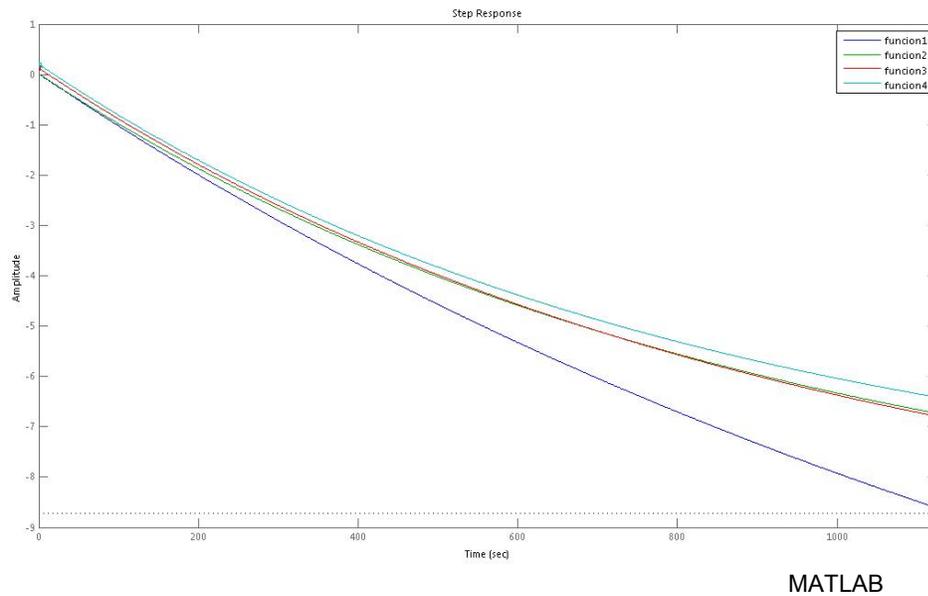


Figura 6.2 Respuesta al escalón de los modelos de cierre del sistema.

El programa desarrollado para el manejo de las compuertas no presenta errores en la compilación. Manifiesta la existencia de tres señales de alarma, las cuales corresponden a las entradas y salidas del PLC que no son utilizadas y quedan sin ser asignadas. La verificación del correcto funcionamiento del programa se tiene con su desarrollo en Unity Pro XL, programa que el proveedor recomienda y considera de alta confiabilidad. A la vez, el prototipo realizado muestra la respuesta esperada ante las diferentes condiciones de operación del proceso.

6.2 Análisis

Se obtiene, mediante el uso del modelado estocástico, la ecuación correspondiente al proceso de apertura y cierre de las compuertas. Se observa el error presente para la ecuación de apertura o cierre según lo visto en las tablas 6.1 a 6.8 y las figuras 6.1 y 6.2. Se escogen las ecuaciones de segundo orden como las que representan el comportamiento de las compuertas (tablas 6.2 y 6.6).

$$\frac{0.030751(z+0.6564)}{z^2(z-1)(z+0.4314)} \quad (6,1)$$

$$\frac{0.0052977(z+0.978)}{z(z-0.9989)(z-0.001074)} \quad (6,2)$$

Las ecuaciones escogidas se seleccionaron debido a que al observar su comportamiento en las figuras, en comparación con las curvas que más se asemejan, no presentan mayor diferencia en comparación con las otras ecuaciones; además, son de un orden menor, lo cual las hace más fáciles de manipular para la propuesta de un sistema de control.

El uso del sistema de control por medio de un controlador manipulable mediante las variables del sistema fue desechado, como se mencionó, porque este representa mayores gastos para la empresa y porque sus beneficios en el manejo de las compuertas no son considerados de mayor relevancia en comparación con el sistema que se propuso como solución. Si bien no se cuenta con capacidad para variar la velocidad de movimiento de las compuertas por medio del dispositivo propuesto, se presentan las características suficientes como para que un operador pueda manipular sin mayor conocimiento el sistema.

Las diferentes configuraciones de las compuertas quedan simuladas en el software del programa, así como en el prototipo. Se dejan, a la vez, diferentes señales y condiciones que evitan la salida de operación de las compuertas que se daba con el sistema de control anterior. A la vez, el sensor y los nuevos dispositivos propuestos presentan características de confiabilidad superior y menor necesidad de mantenimiento del equipo.

La comunicación con dispositivos remotos permite un mayor aprovechamiento de los proyectos realizados con anterioridad y eliminan la necesidad de que los operadores de la sala presentes en el embalse tengan que intervenir en el manejo de las compuertas, debido a las estrategias planteadas de comunicación entre dispositivos. En la figura 5.27 se observa la interfaz de usuario que se instalaría en el vertedero de excedencias con la configuración del IO scanning. Se dejan las señales para comunicación con dispositivos remotos.

La forma de conectar los diferentes elementos del circuito propuesto se presenta en los planos de control, con designación SND C4/5 C01 al SND C4/5 C13, los cuales presentan elementos nuevos y del anterior sistema de control.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. Se obtuvieron dos ecuaciones, que corresponden a los movimientos de apertura y cierre de las compuertas excedencia del embalse. El orden de las mismas permite la posibilidad de observar el nivel de complejidad del mismo.
2. Se desarrolló un prototipo del sistema de control de las compuertas, el cual, complementado con las características funcionales de un controlador lógico programable permitió observar la funcionalidad del sistema desarrollado.
3. En caso de falla del sensor de posición para el movimiento de las compuertas (sistema a lazo abierto), se desarrolló una lógica de movimiento, la cual estima la posición de la compuerta en base al tiempo transcurrido.

7.2 Recomendaciones

1. Si se desea plantear un sistema de control alternativo, basado en ecuaciones de diferencias, las ecuaciones de estado presentadas, dejan la posibilidad de llevarlo a cabo.
2. Para evitar fallas de comunicación en el sistema, en caso de cambiar el PLC recomendado, se debe tener en cuenta que este presenta un protocolo de comunicación diseñado por el fabricante para sus equipos, y por lo tanto, si se escoge uno de otro fabricante, debe verificarse que cumpla con dichas

especificaciones de comunicación o bien plantear un protocolo de comunicación diferente.

3. Al escoger el sensor de posición se deben considerar dentro de sus datos técnicos que posee una sensibilidad de 0.4° en el movimiento; y que su grado de protección sea mayor a un IP64.

Bibliografía

- [1] **“Advantys STB Standard CANopen Network Interface Module Applications Guide 890USE17600 Version 2.0”**, extraído el 30 de Noviembre 2008 del sitio web: http://biblioteca.schneiderelectric.es/nbd-update/cont2/35008150_K01_000_01.pdf
- [2] **“Application Description Magelis XBT Terminals on Advantys STB”**, extraído el 30 de Noviembre 2008 del sitio web: http://www.schneider-electric.se/Downloads/VijeoDesigner/Magelis_AdvantysSTB.pdf
- [3] Arrieta M., KATIRIA, **“Diseño de la Lógica de Control de las Compuertas de la Toma de Aguas del Río Pejibaye y del Río Tapantí, Centro Producción Río Macho.”**, informe de proyecto de graduación para optar por el título de Ingeniera en Electrónica con el Grado Académico de Licenciatura, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Agosto 2003.
- [4] **“Automation & Control Modicon M340, automation platform Unity”**, extraído el 20 de Setiembre 2008 del sitio web: http://dokumentacia.schneider-electric.sk/pdf/Modicon_M340_katEN07.pdf
- [5] **“Bombas de engranajes con perfiles trocoidales. Análisis experimental”**, extraído el 15 de octubre 2008, del sitio web: http://www.tdcat.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0103105-131245//10Pigm10de13.pdf
- [6] **“BOMBAS HIDRAULICAS I”** extraído el 30 de Noviembre 2008, del sitio web: http://www.techniforum.com/central_hidraulica_20.htm
- [7] **“BOMBAS HIDRAULICAS IV”** extraído el 30 de noviembre, del sitio web: http://www.techniforum.com/central_hidraulica_23.htm

[8] Carranza V., Carlos A., **“AUTOMATIZACION DE COMPUERTAS DE REGULACION DEL PROYECTO BIRRIS 3 PARA JASEC”**, informe de proyecto de graduación para optar por el grado de bachiller en Ingeniería Electrónica, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Agosto 2001.

[9] **“Cilindros hidráulicos y neumáticos”** extraído el 18 de Octubre 2008, del sitio web: http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm

[10] Coto C., Juan C., **“Diseño y Mantenimiento del sistema de accionamiento oleohidráulico de las compuertas en el Proyecto Hidroeléctrico ICE-Peñas Blancas”**, informe de práctica de especialidad para optar por el grado de Bachiller en Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Noviembre 2005.

[11] **“Ejemplo de estimación estocástica de funciones de transferencia”**, extraído el 21 de Octubre 2008, del sitio web: <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/Laboratorio/3.6.1EjemploModeladoEstocastico.pdf>

[12] **“Elementos neumáticos de trabajo.”** extraído el 18 de Octubre 2008, del sitio web: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica9.htm>

[13] **“Empuje hidrostático sobre superficies planas.”**, extraído el 15 de octubre 2008, del sitio web: <http://fluidos.eia.edu.co/tfluidos/files/planas/planas.html>

[14] **“Estandarización de esquemas”**, extraído el 4 de noviembre 2008 del sitio web: http://www.isaatc.ull.es/asignaturas/nco/eie/Cdcomun/Profesor/simbolos_electrotecnica.pdf

[15] Fernández C, Lorena. lfernand@conicit.go.cr; Malavassi R, Eduardo, emalava@una.ac.cr, **“Elaboración y Uso de Referencias Bibliográficas: Consideraciones Generales e Introducción al formato APA”**, extraído el 30 de Noviembre 2008 del sitio web http://www.conicit.go.cr/documentos/Referencias_APA_Ferias.pdf

[16] Freire V., Francisco J., **“Estudio cinemático y dinámico de un sólido elástico giratorio accionado mediante un servoactuador hidráulico”**, informe de proyecto para optar por el título Doctor Ingeniero Industrial, extraído el 20 de Agosto 2008 del sitio web: http://www.tdr.cesca.es/TDX-0225103-113333/index_cs.html

[17] **“Guía de arranque para Unity Pro Puesta en funcionamiento de una Aplicación, Septiembre 2004”**, extraído el 20 de Octubre 2008 del sitio web: <http://www.schneider-electric.cl/tm/controladores%20programables%20alta%20gama/manualesdeusuario/quantum/Guia%20de%20inicio%20software%20Unity%20Pro%2022.pdf>

[18] **“Guía Rápida, Unity Pro”**, extraído el 22 de Octubre 2008 del sitio web: http://www.infopl.net/Descargas/Descargas_Schneider/Des_Schneider_Files/infoPLC_net_GuiaRapidaUnityPRO.html

[19] **“IIMPI, Departamento de Diseño Mecánico, sistemas Oleohidráulicos y Neumáticos”**, extraído el 28 de Octubre 2008 del sitio web: <http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/sistoleo/teorico/modulo-neumatica/05-080617-ValvulasDdireccionales.pdf>

[20] **“Inclinometer, IT9420”** extraído el 10 de octubre 2008 del sitio web: <http://www.celesco.com/datasheets/it9420.pdf>

[21] Instituto Costarricense de electricidad, Costa Rica, “**Control de Compuertas de Planta Sandillal, CODIGO 4601-1035-09-004**”, Centro de documentación C.P. Sandillal.

[22] Instituto Costarricense de electricidad, Costa Rica, “**Esp. técnica compuertas y ataguías C4 y C5 componentes hidráulicos y eléctricos, PE 23 ET 21 00**”, Centro de documentación C.P. Sandillal.

[23] Instituto Costarricense de electricidad, Costa Rica, “**Esquema eléctrico compuertas C4/C5, 078.C4/5 015**”, Centro de documentación C.P. Sandillal.

[24] Instituto Costarricense de electricidad, Costa Rica, “**Esquema hidráulico compuertas C4/C5, 078.C4/5 014**”, Centro de documentación C.P. Sandillal.

[25] Instituto Costarricense de electricidad, Costa Rica, “**Manual de operación y mantenimiento de los equipos electrohidráulicos compuertas C4 y C5, PE23MA21**”, Centro de documentación C.P. Sandillal.

[26] Interiano Salguero, Eduardo. “**stochastic2**”.

<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/trabajosmatlab/stochastic2.zip>

[27] “Introduction to Model-Based Design” extraído el 26 de Septiembre 2008 del sitio web: www.humusoft.cz/old/pub/matlab/10_MBD_CDA/10_MBD_CDA.ppt

[28] Kuo, Benjamín C. Sistemas de Control Automático, Prentice Hall, 1996, 7ª Ed., México.

[29] “**Lock Gates and Operating Equipment**”, extraído el 18 de Septiembre 2008 del sitio web <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-2703/basdoc.pdf>

[30] López G., María Elena. “**Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua**”, extraído el 20 de Octubre 2008, del sitio web:

http://www.depeca.uah.es/docencia/ING-ECA/ctr_avz/Identif.PDF

[31] McNally, Conor P. (Conor Peter), “**Development of a numerical model of piston secondary motion for internal combustion engines**”, informe de proyecto para optar por el título B.E. Ingeniería Mecánica, USA, Massachusetts Institute of Technology, extraído el 24 de Octubre 2008 del sitio web:

<http://hdl.handle.net/1721.1/26880>

[32] “**Modbus/TCP AS-Interface, Gateway with Quantum, System User Guide**”, extraído el 18 de Noviembre 2008, del sitio web:

http://www.automationskompetens.se/Downloads/quantum/QUA_ModbusTCP_AS-Interface_Gateway_EN.pdf

[33] “**MODBUS TCP Master driver**”, extraído el 20 de Octubre 2008 del sitio web:

https://www.hmisource.com/otasuke/files/manual/gpproex/v2_21/device/data/mod_tcpm.pdf

[34] “**1 Modelado estocástico por estimación de mínimos cuadrados**”, extraído el 21 de Octubre 2008, del sitio web:

<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/Laboratorio/3.6ModeladoEstocastico.pdf>

[35] “**Modicon M340 for Ethernet Communications Modules and Processors, User Manual, 4/2007**”, extraído el 23 de Septiembre 2008 del sitio web:

http://www.schneider-electric.ro/pages/pdf/plc/M340_ETH-comm.pdf

[36] “**Modicon M340 Using Unity Pro Discrete Input/Output Modules User Manual**”, extraído el 10 de Noviembre 2008 del sitio web: [www.schneider-electric.cz/download/dokumentace/Automatizace.../Modicon M340/M340 DiscreteIO_manual_7_2007.pdf](http://www.schneider-electric.cz/download/dokumentace/Automatizace.../Modicon_M340/M340_DiscreteIO_manual_7_2007.pdf)...

[37] “**Modicon M340 with Unity Pro Analog Input/Output Modules User Manual**”, extraído el 12 de Noviembre 2008 del sitio web: [www.schneider-electric.cz/download/dokumentace/Automatizace.../Modicon M340/M340 AnalogIO_manual_7_2007.pdf](http://www.schneider-electric.cz/download/dokumentace/Automatizace.../Modicon_M340/M340_AnalogIO_manual_7_2007.pdf)

[38] “**NGi series, General Specifications Brochure**” extraído el 8 de Octubre 2008 del sitio web: [http://www.riekerinc.com/E-Inclinometers/SeikaPDF/NGi BrochW.pdf](http://www.riekerinc.com/E-Inclinometers/SeikaPDF/NGi_BrochW.pdf)

[39] “**NORMAS, SIMBOLOS Y MARCAS (interpretación)**” extraído el 2 de Octubre 2008 del sitio web: http://www.bjc.es/nc/menu-accesos/descargas/catalogos-iluminacion/?tx_abdownloads_pi1%5Baction%5D=getviewclickeddownload&tx_abdownloads_pi1%5Buid%5D=80.

[40] Rivas, José R., “**Accionamiento y control del posicionado de aperos agrícolas mediante actuadores oleohidráulicos**”, informe de proyecto, extraído el 11 de Setiembre 2008 del sitio web: www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0630104-123215/

[41] Serway, Raymond A. **FÍSICA**, McGRAW-HILL, 1999, cuarta edición, México.

[42] “**SimHydraulics User’s Guide**” extraído el 29 de Septiembre 2008 del sitio web http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/physmod/hydro/hydro_ug.pdf

[43] "[SimMechanics User's Guide](http://www.mathworks.de/access/helpdesk/help/pdf_doc/phymod/mech/mech_ug.pdf)" extraído el 29 de Septiembre 2008 del sitio web http://www.mathworks.de/access/helpdesk/help/pdf_doc/phymod/mech/mech_ug.pdf

[44] "**TeSys® T LTM R Profibus-DP® Motor Management Controller Quick Start Guide**" extraído el 19 de noviembre de 2008 del sitio web: <http://www.schneider-electric.cl/tm/proteccion%20y%20control%20de%20potencia/manualesdeuso/tesyst/Guia%20de%20arranque%20rapido%20-%20Profibus-ENG.pdf>

[45] Vargas V., Manuel. "**TUTORIAL DE INTRODUCCIÓN A MATLAB**", extraído el 18 de Octubre 2008, del sitio web: <http://www.esi2.us.es/~vargas/docencia/cpc/guiasMatlab/tutorialMatlab.pdf>

Apéndices

A.1 Glosario y abreviaturas

A.1.1 Glosario

Carrera del pistón: Corresponde a la distancia de movimiento del vástago del pistón.

Datos globales: Característica de configuración que permite el intercambio de datos entre PLCs.

I/O scanning: Característica que permite el control de entrada y salida de una posición de memoria en una red Ethernet.

Lenguaje FBD: Corresponde a una estructura de bloques, la cual presenta característica de conexión entre estos, con el fin de lograr lógica de control y comunicación, en que los bloques representan funciones lógicas ya creadas.

Lenguaje LD (por sus siglas en inglés) o el llamado lenguaje en escalera. Este lenguaje presenta características de programación de lógica secuencial entre acciones y respuestas, de fácil uso e interfaz con el usuario, que permite la visualización de las acciones programadas para una sencilla interpretación. Este lenguaje se asemeja a la forma de un diagrama eléctrico.

Lenguaje SFC: Presenta una estructura semejante a un diagrama de flujo, en una forma de diagrama secuencial. En él la toma de acciones y rumbo de estas se darán según las condiciones y el posicionamiento de las entradas y su configuración.

Lenguaje ST: Llamado estructurado, es un lenguaje literal de alto nivel, semejante a C++ u otras estructuras en las que se describen las acciones y se da, de esta manera, el flujo al programa.

Mando local: Control de las compuertas de excedencia desde el vertedero de excedencias del embalse Sandillal.

Mando remoto: Control de las compuertas de excedencia desde un lugar alejado del vertedero de excedencias del embalse Sandillal.

Unity Pro: Nombre del software para programar los PLC, proveído por Schneider Electric.

A.1.2 Abreviaturas

C4: Refiérase a una de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal.

C5: Refiérase a una de las compuertas de excedencia del embalse Sandillal.

C.P.: Centro de producción.

Código IPXX: Grados de protección contra la penetración de cuerpos sólidos y la humedad.

CPU: Unidad central de procesos

Cx: Se refiere a las compuertas C4 ó C5.

I/O: Entrada/Salida (Input/Output)

m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar

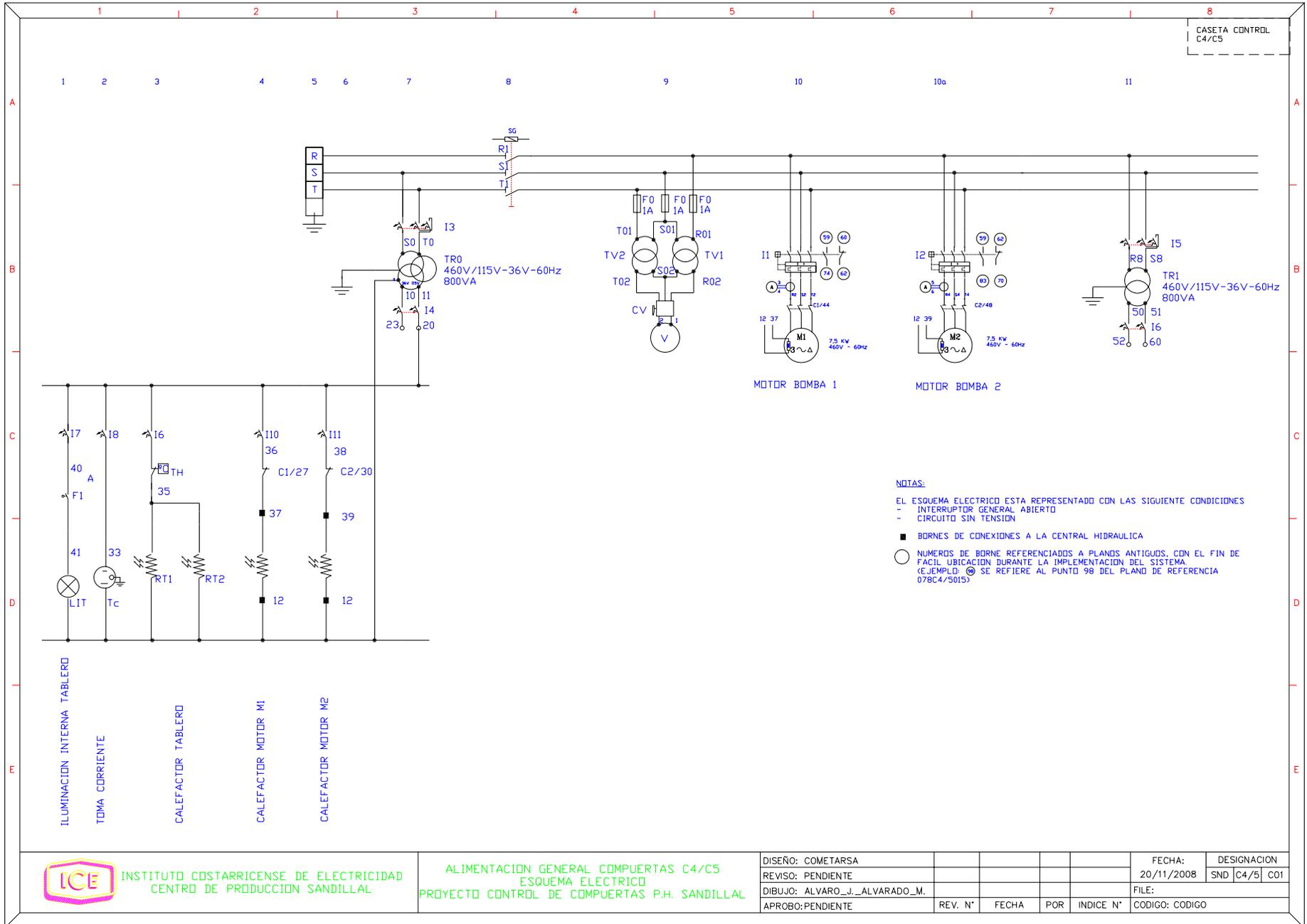
PLC: Controlador lógico programable

V AC: Corriente alterna

V DC: Corriente directa

A.2 Esquema eléctrico

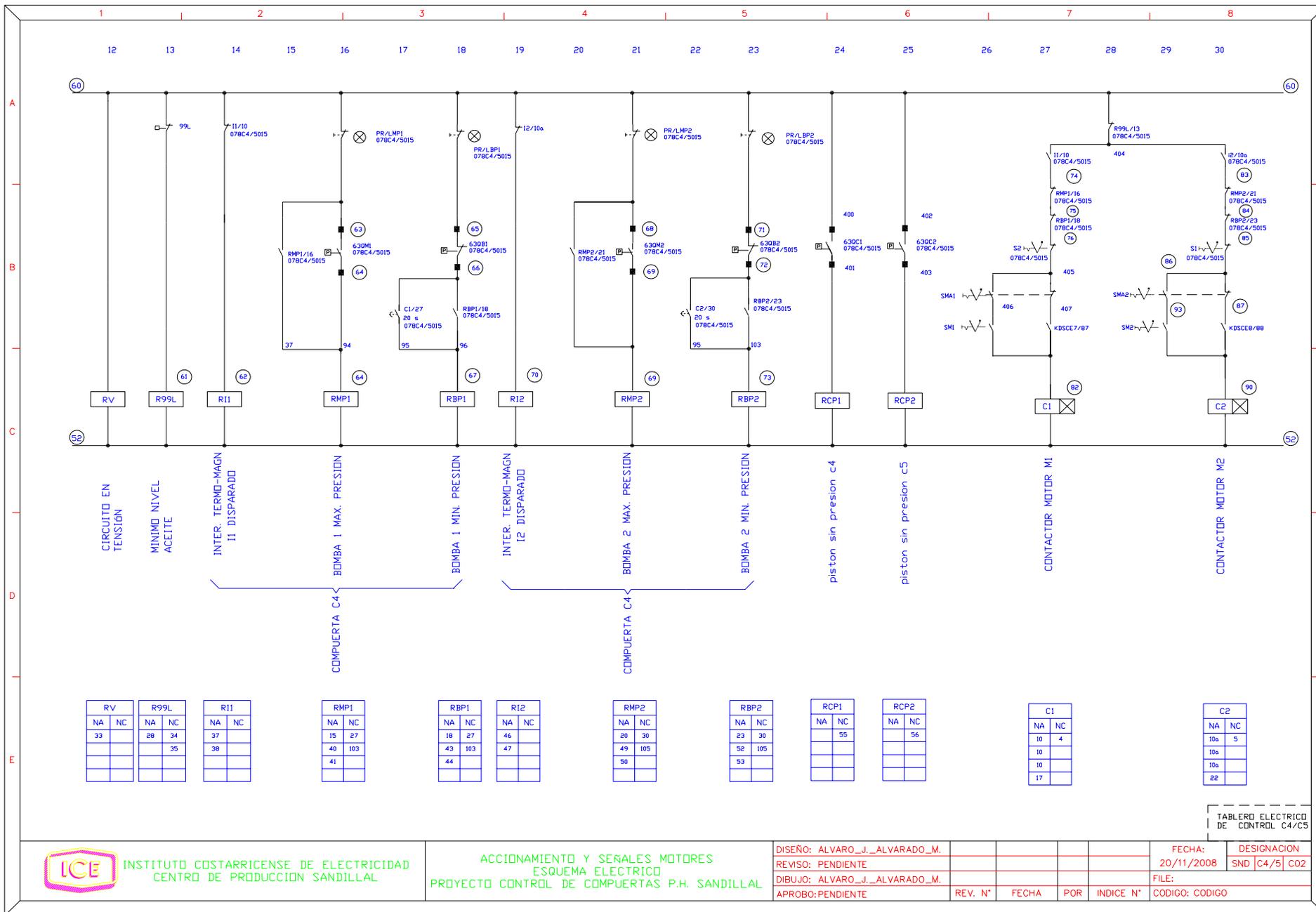
PROYECTO HIDROELÉCTRICO SANDILLAL VERTEDERO DE EXCEDENCIA COMPUERTAS DE EXCEDENCIA C4 –C5 ESQUEMA ELÉCTRICO



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ALIMENTACION GENERAL COMPUERTAS C4/C5
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISEÑO: COMETARSA					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION SND C4/5 C01
REVISO: PENDIENTE					FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					APROBO: PENDIENTE	
	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO	



RV	
NA	NC
33	

R99L	
NA	NC
28	34
	35

R11	
NA	NC
37	
38	

RMP1	
NA	NC
15	27
40	103
41	

RBP1	
NA	NC
18	27
43	103
44	

R12	
NA	NC
46	
47	

RMP2	
NA	NC
20	30
49	105
50	

RBP2	
NA	NC
23	30
52	105
53	

RCP1	
NA	NC
	55

RCP2	
NA	NC
	56

C1	
NA	NC
10	4
10	
10	
17	

C2	
NA	NC
10a	5
10a	
10a	
22	

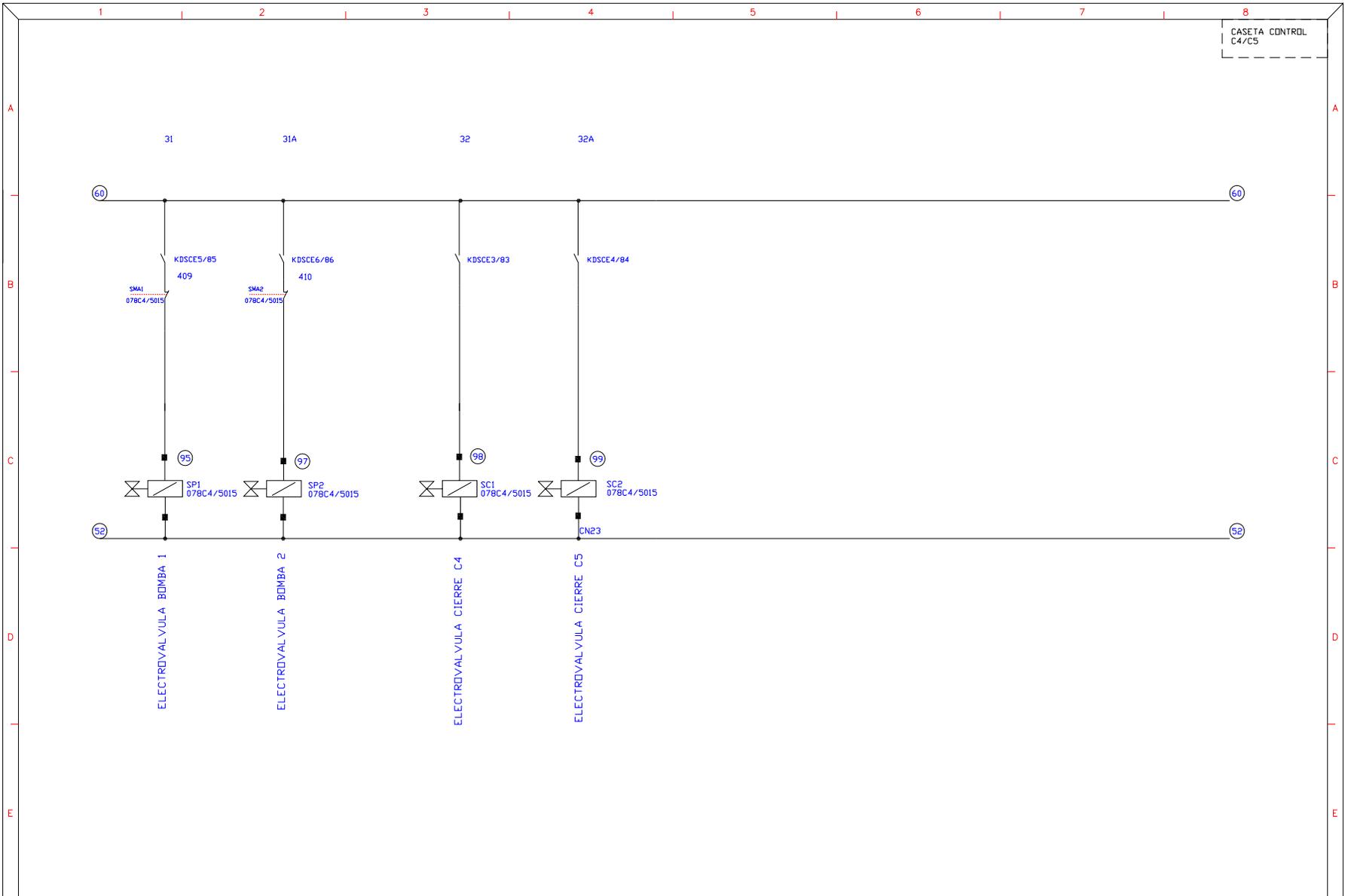
TABLERO ELECTRICO DE CONTROL C4/C5



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ACCIONAMIENTO Y SEÑALES MOTORES
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

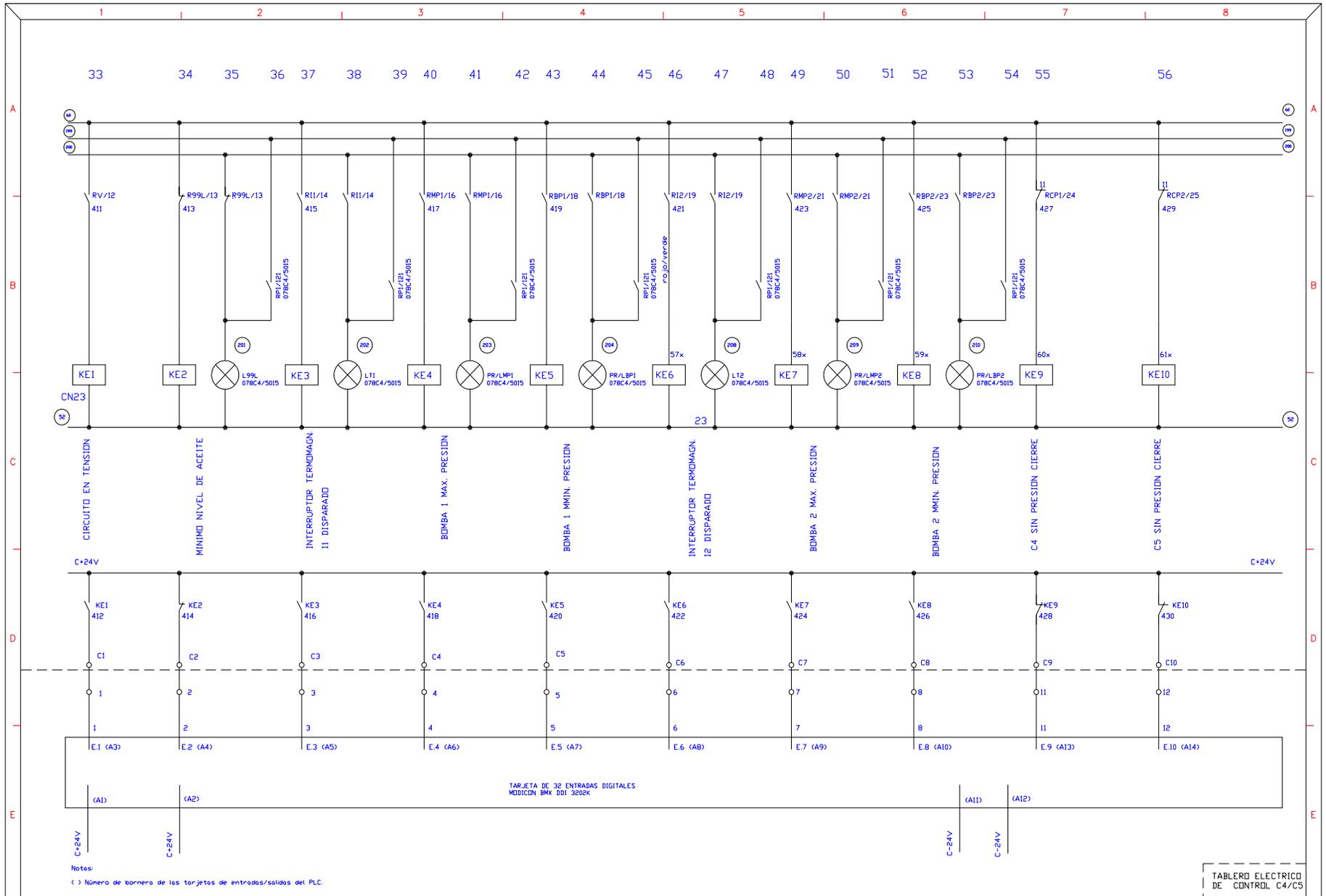
DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION
REVISO: PENDIENTE						SND C4/5 C02
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FILE:	
APROBO: PENDIENTE	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO	



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ELECTROVALVULAS C4/C5
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION
REVISO: PENDIENTE					SND C4/5	C03
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FILE:	
APROBO: PENDIENTE	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO	



Notas:
 () Número de bornero de las tarjetas de entradas/salidas del PLC.

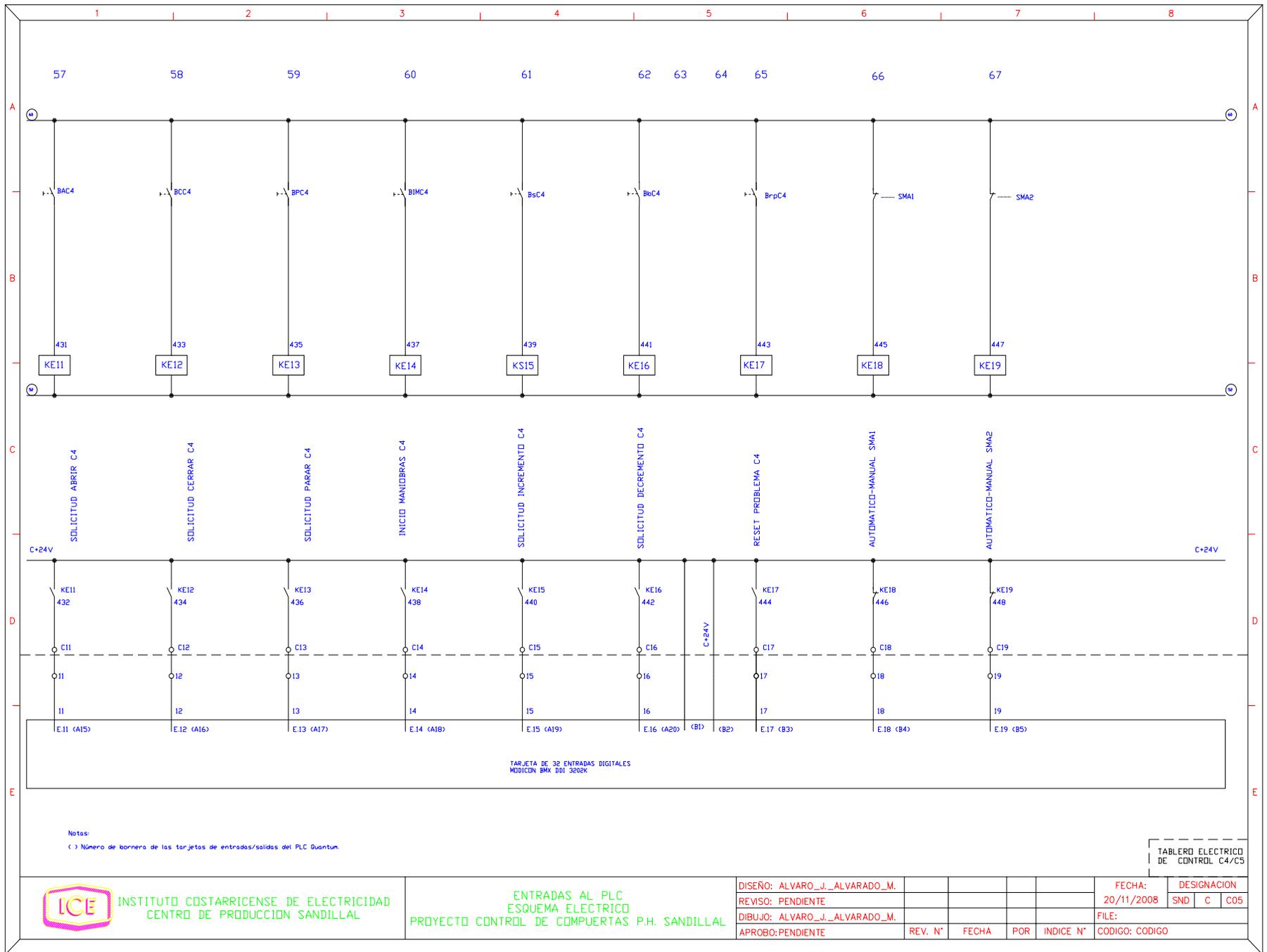
TABLERO ELECTRICO DE CONTROL C4/C5



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
 CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ENTRADAS AL PLC
 ESQUEMA ELECTRICO
 PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

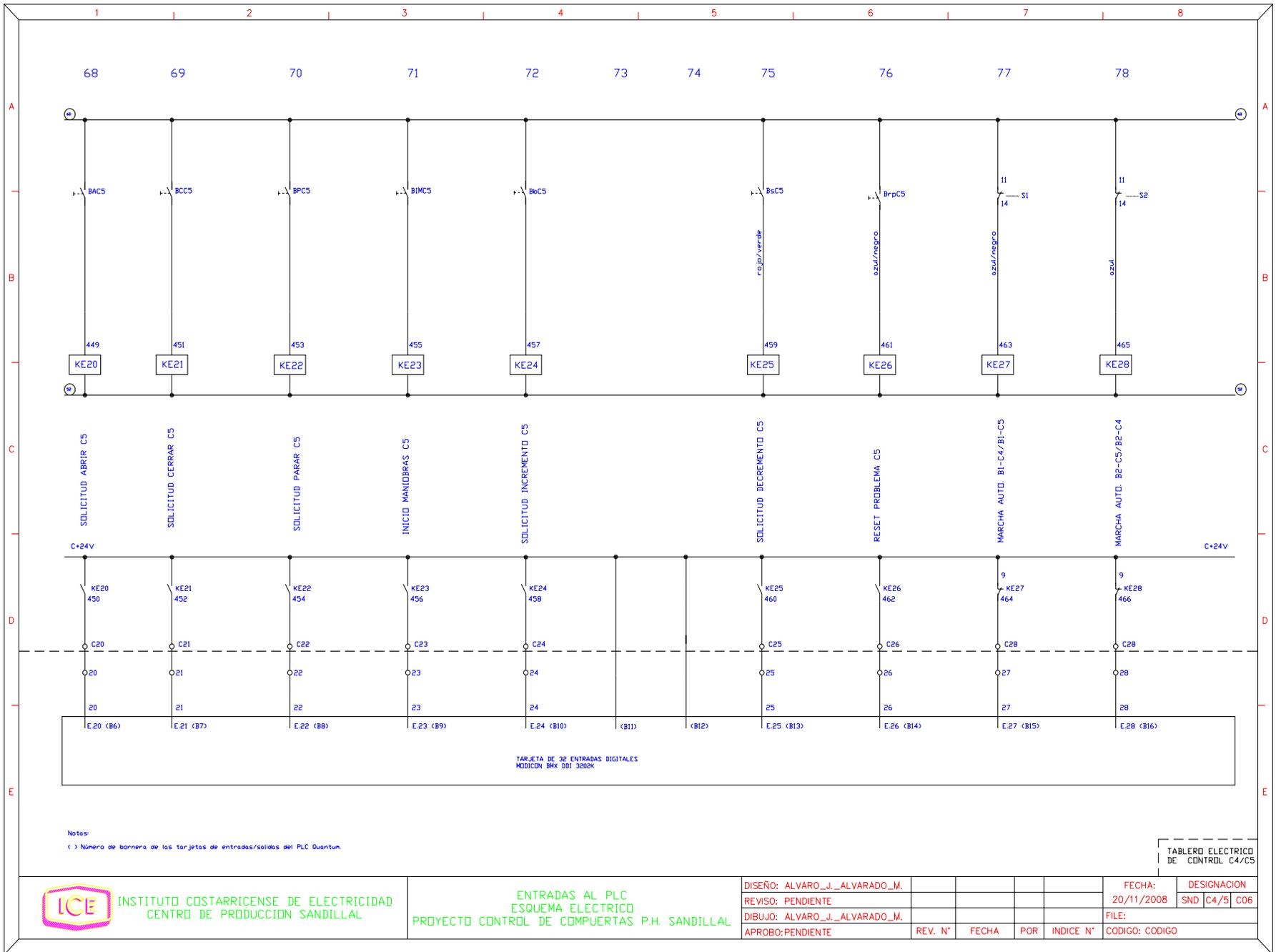
DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION: SND C4/5 C04
REVISO: PENDIENTE					FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					CODIGO: CODIGO	
APROBO: PENDIENTE	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°		



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ENTRADAS AL PLC
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.				FECHA:	DESIGNACION
REVISO: PENDIENTE				20/11/2008	SND C C05
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.				FILE:	
APROBO: PENDIENTE	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO



Notas:
 () Número de bornera de las tarjetas de entradas/salidas del PLC Quantun.

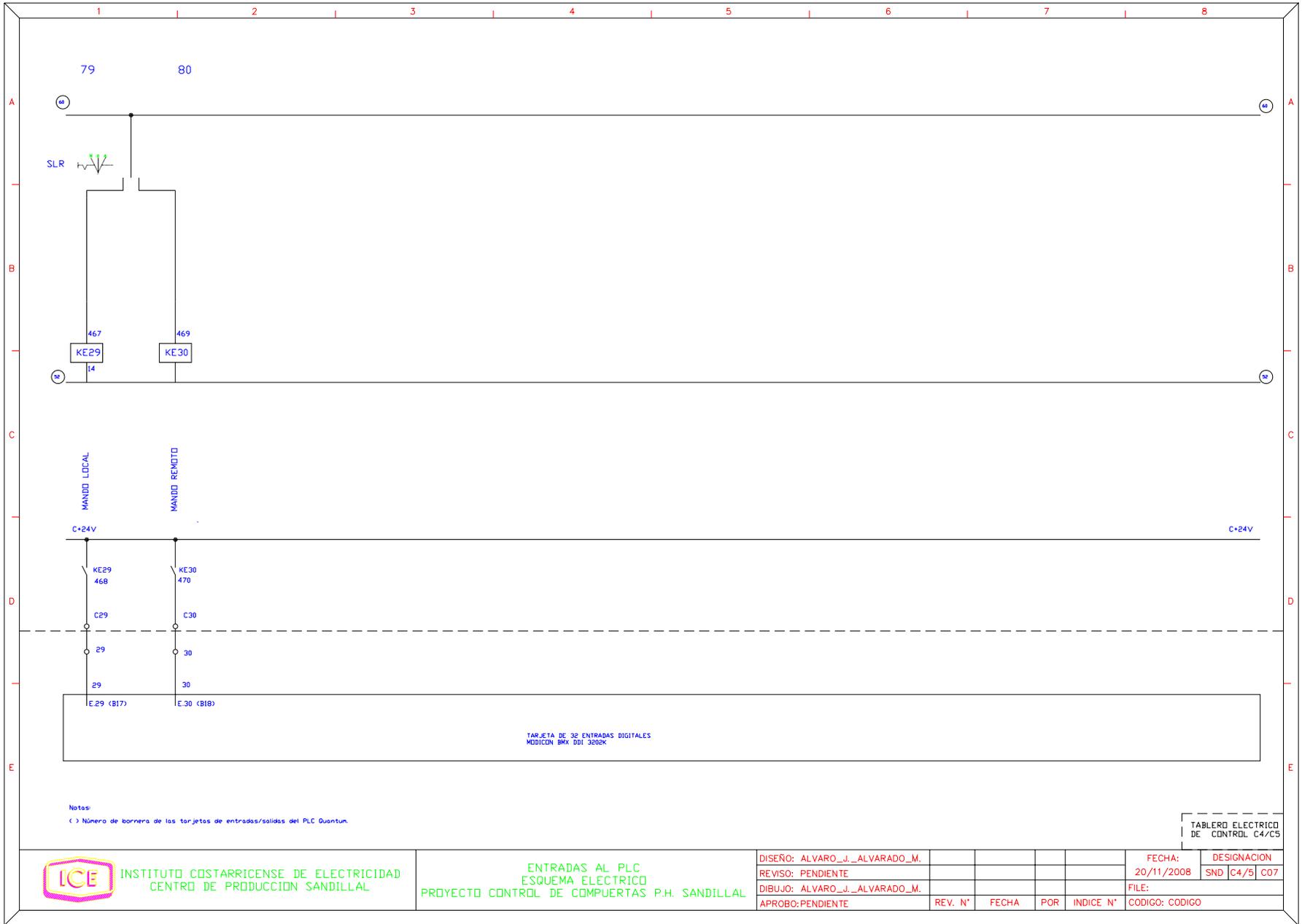
TABLERO ELECTRICO DE CONTROL C4/C5



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
 CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ENTRADAS AL PLC
 ESQUEMA ELECTRICO
 PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

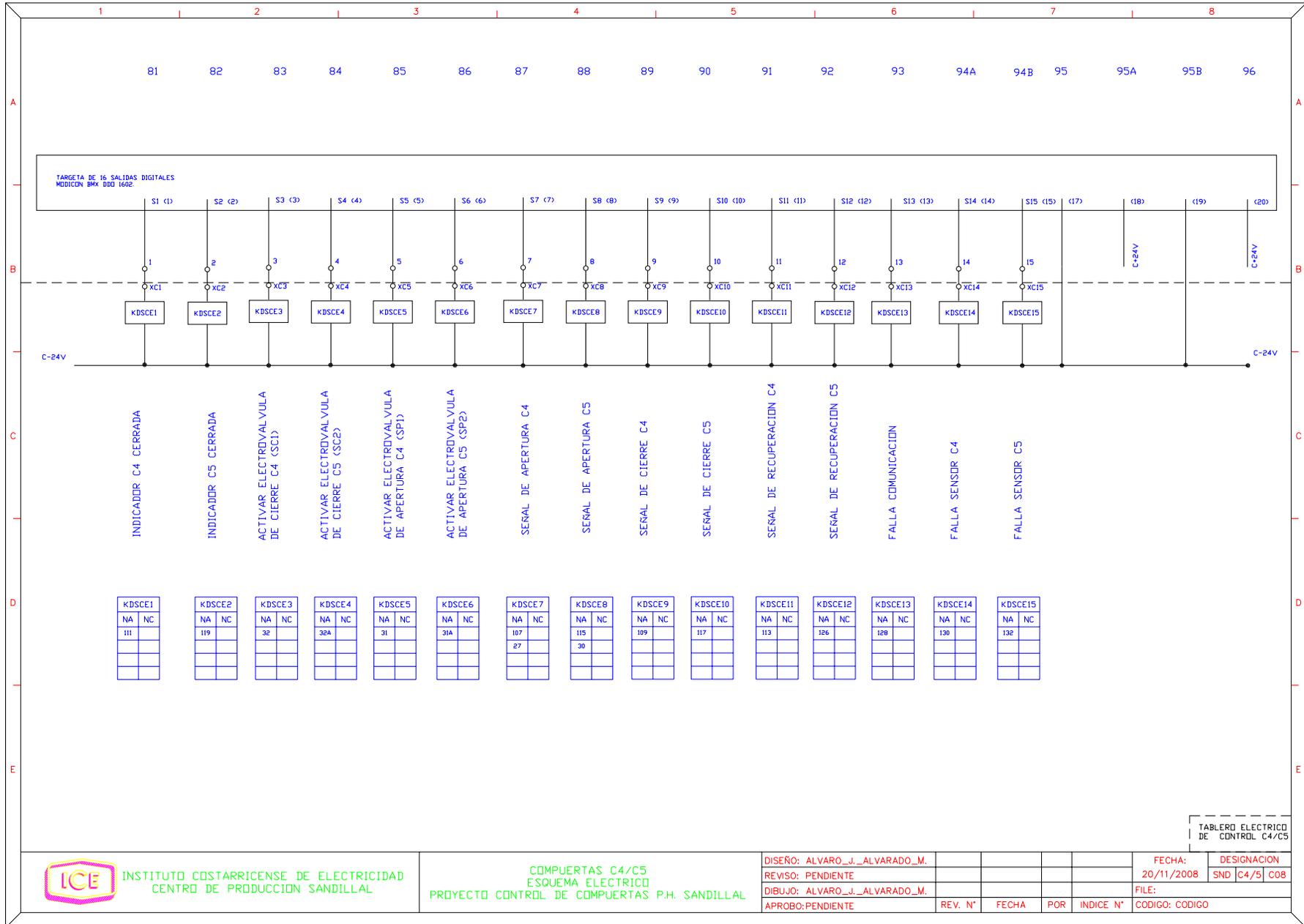
DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION: SND C4/5 C06
REVISO: PENDIENTE					FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					APROBO: PENDIENTE	
	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO	



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ENTRADAS AL PLC
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION: SND C4/5 C07
REVISO: PENDIENTE					FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					REV. N°	FECHA
APROBO: PENDIENTE					POR	INDICE N°
						CODIGO: CODIGO



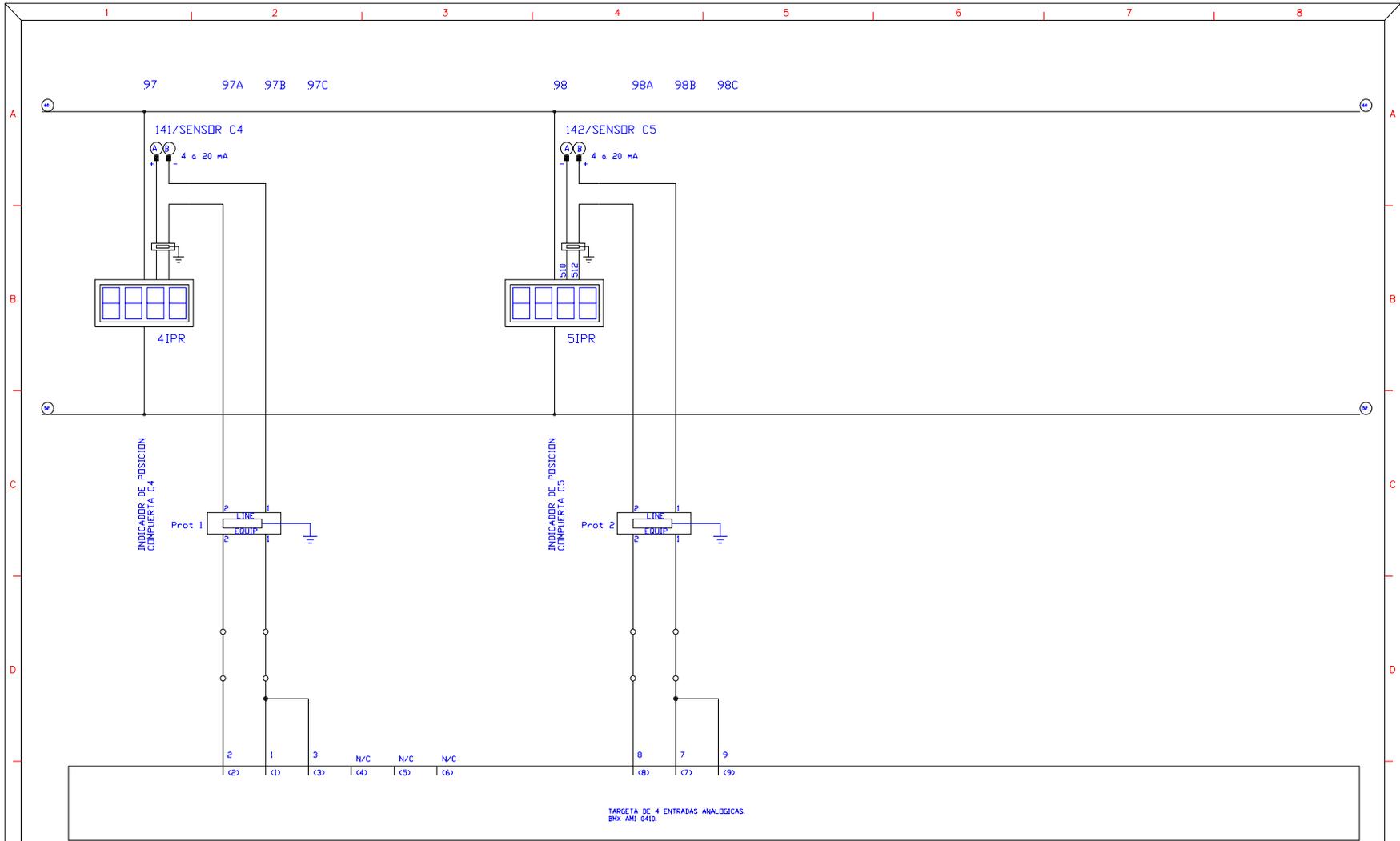
TABLERO ELECTRICO DE CONTROL C4/C5



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

COMPUERTAS C4/C5
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISENO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION: SND C4/5 C08
REVISO: PENDIENTE					FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					APROBADO: PENDIENTE	REV. N°
					FECHA	POR
					INDICE N°	CODIGO: CODIGO



Notas:
 N/C No se conecta
 () Número de bornera de los tarjetos de entradas/salidas del PLC.
 O Bornera del PLC
 Protección de lazo

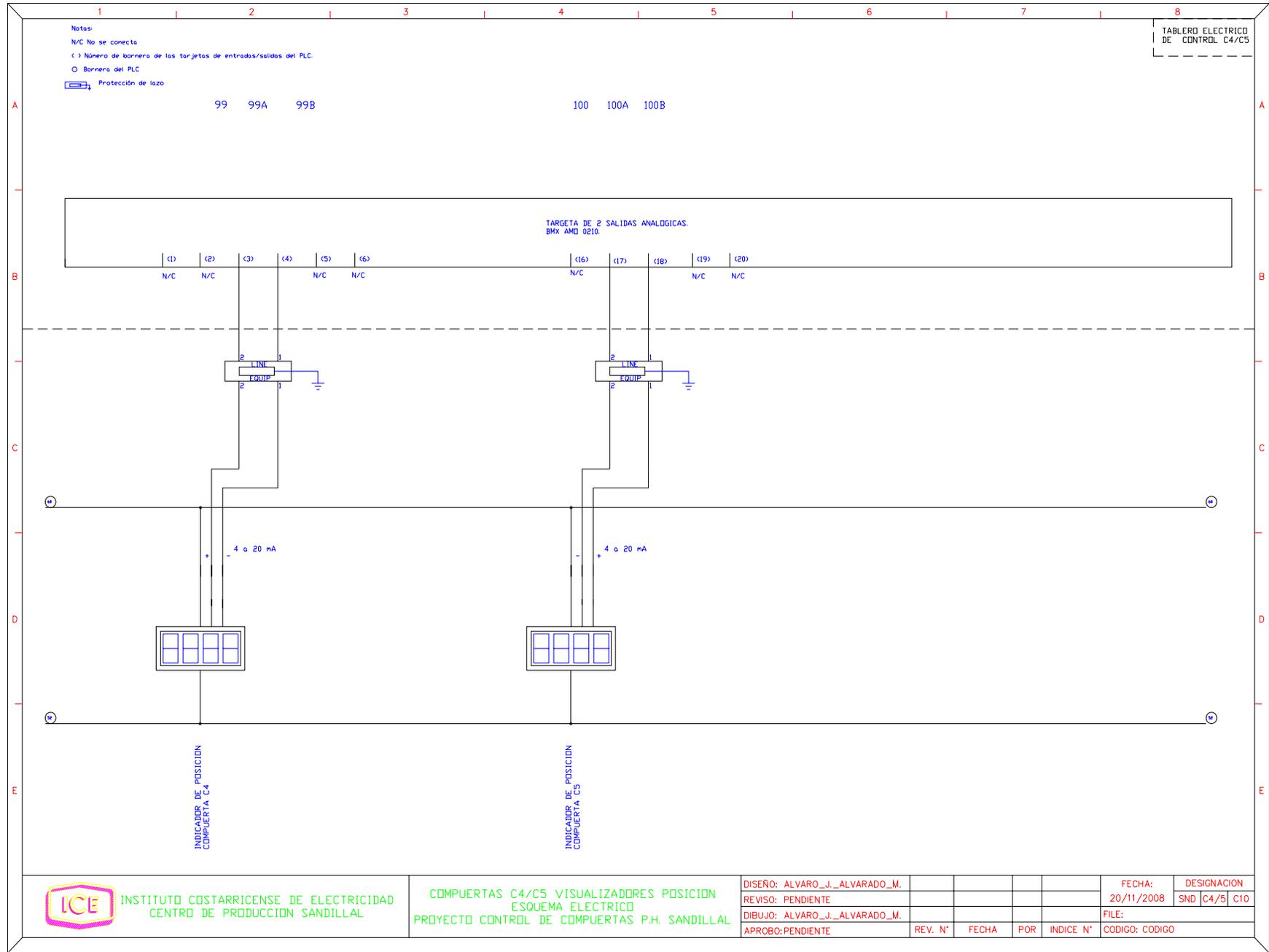
TABLERO ELECTRICO DE CONTROL C4/C5



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
 CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ENTRADAS ANALOGICAS COMPUERTAS C4/C5
 ESQUEMA ELECTRICO
 PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISENO: ALVARO_J._ALVARADO_M.				FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION: SND [C4/5] C9
REVISO: PENDIENTE				FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					
APROBO: PENDIENTE	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO

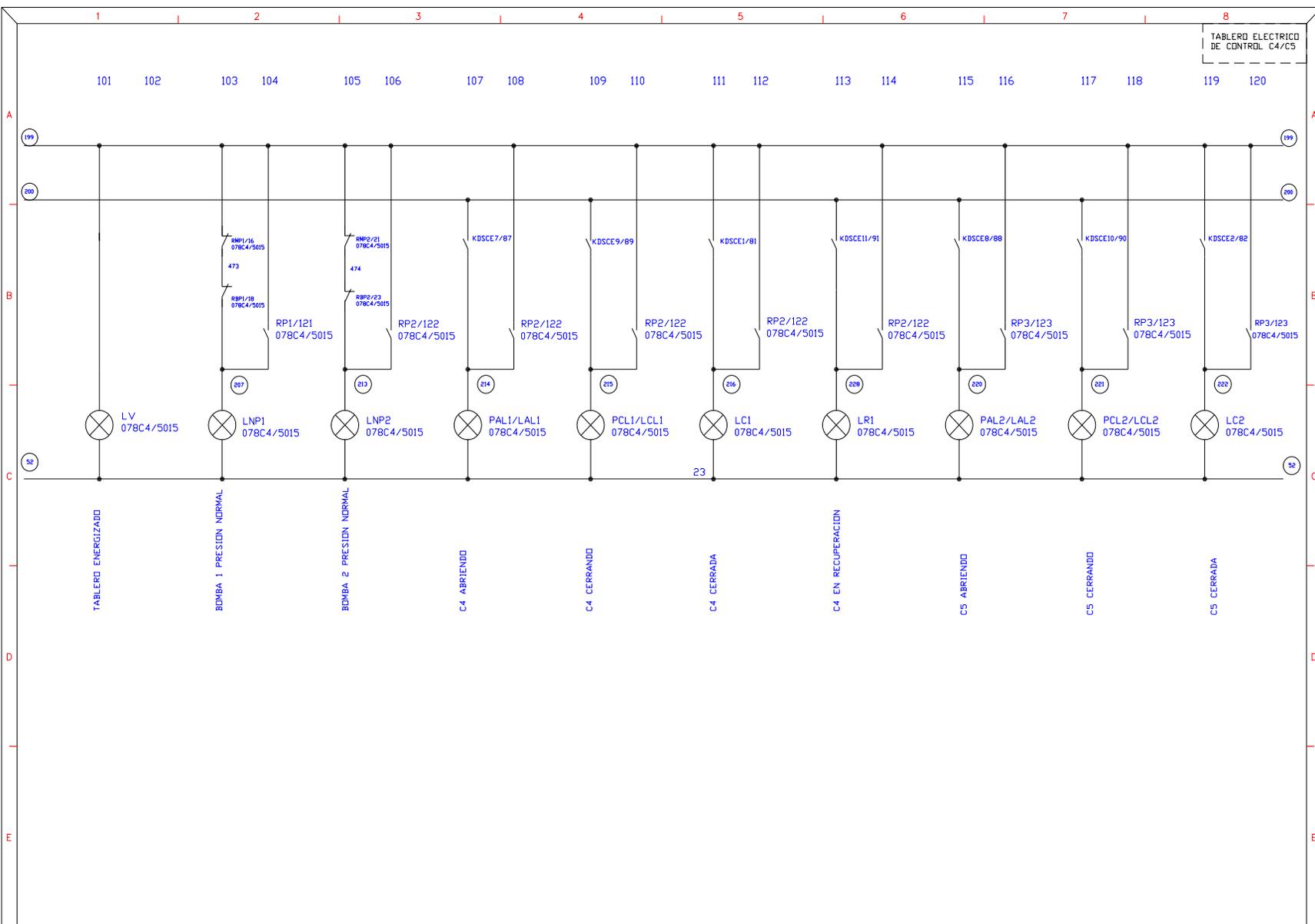


INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
 CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

COMPUERTAS C4/C5 VISUALIZADORES POSICION
 ESQUEMA ELECTRICO
 PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA:	DESIGNACION
REVISO: PENDIENTE					20/11/2008	SND C4/5 C10
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FILE:	
APROBO: PENDIENTE	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO	

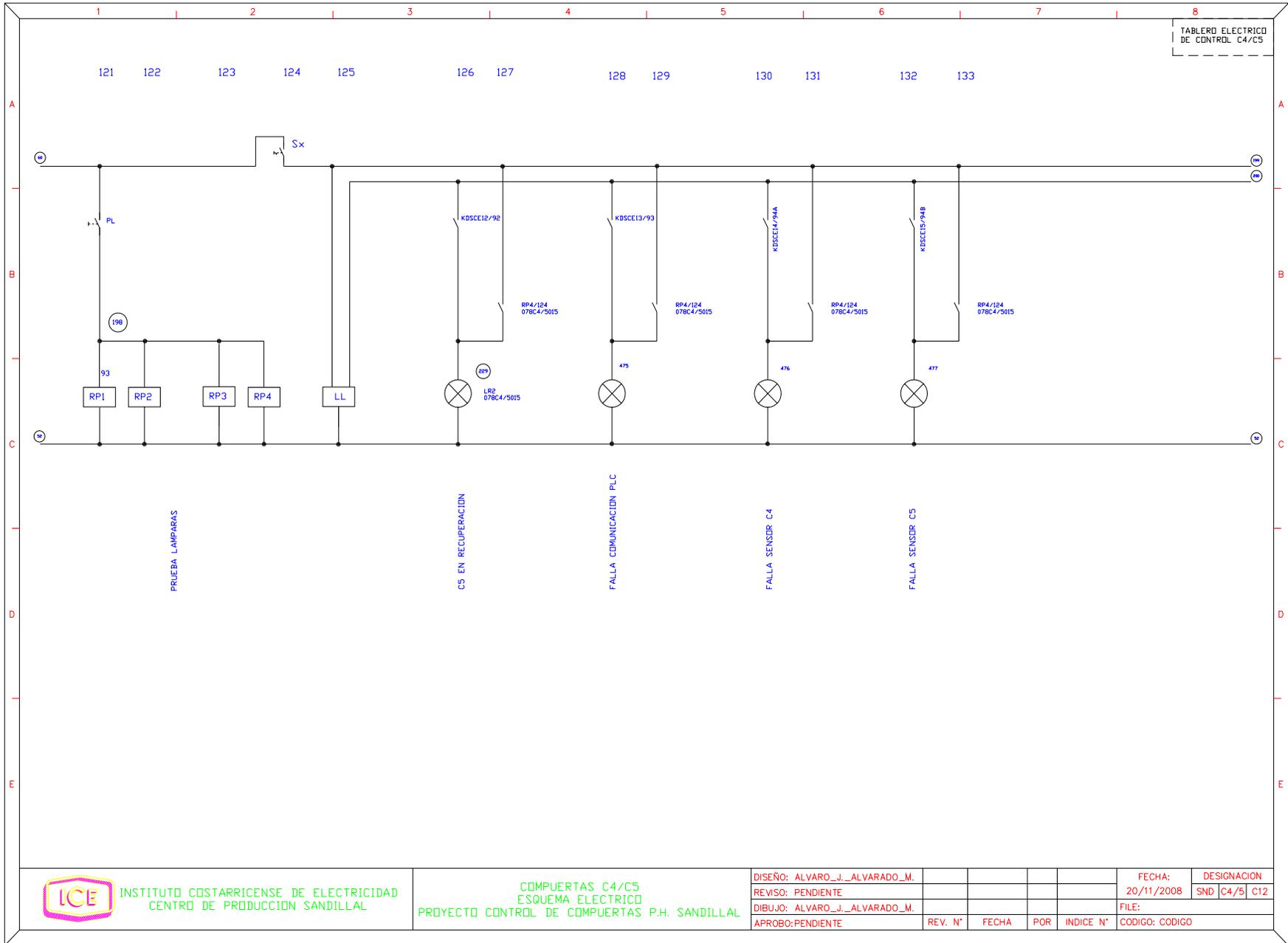
TABLERO ELECTRICO DE CONTROL C4/C5



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

COMPUERTAS C4/C5
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

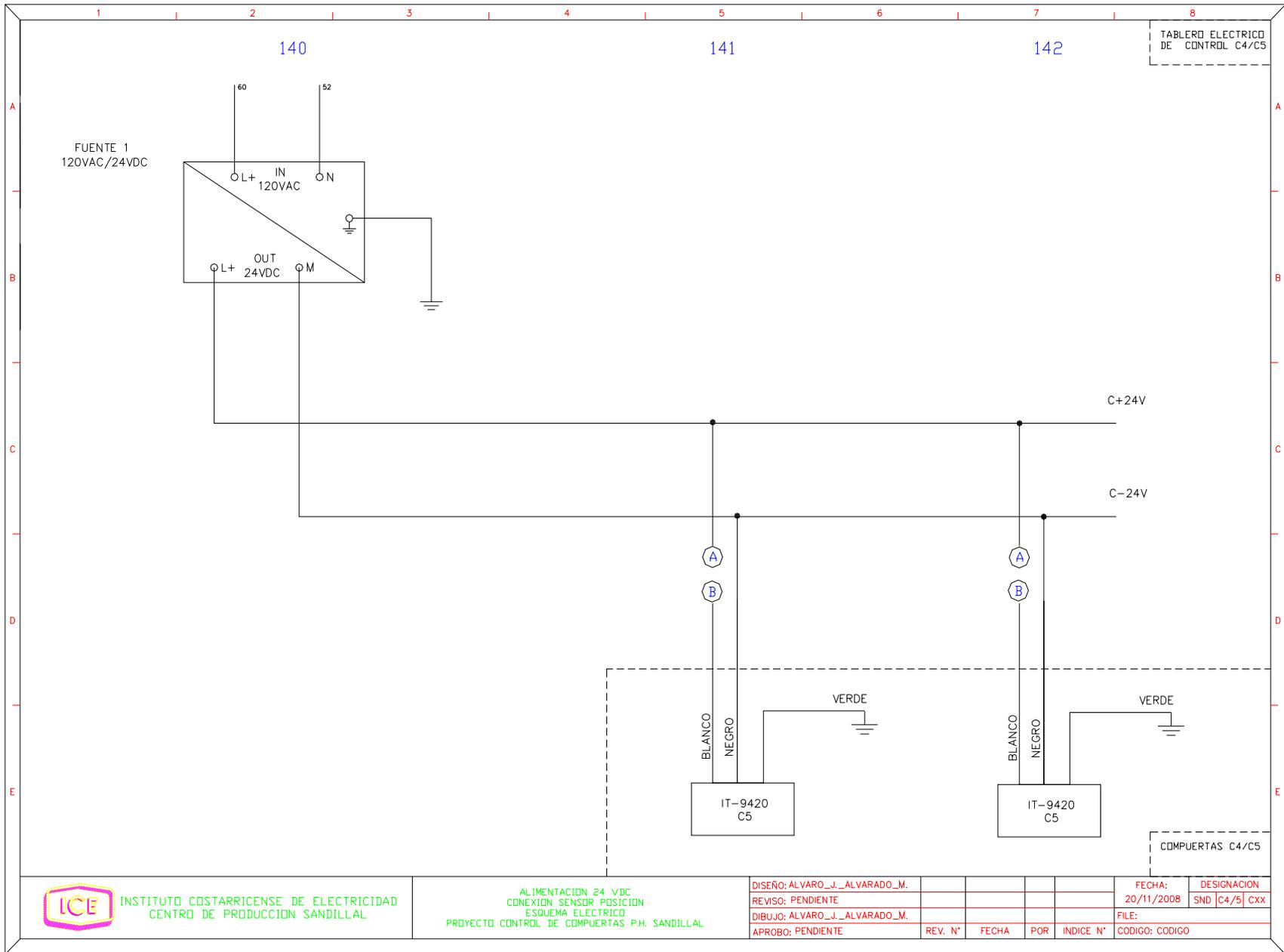
DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION: SND C4/5 C11
REVISO: PENDIENTE					FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					REV. N°	FECHA
APROBO: PENDIENTE					POR	INDICE N°
						CODIGO: CODIGO



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

COMPUERTAS C4/C5
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION: SND C4/5 C12
REVISO: PENDIENTE					FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.					APROBO: PENDIENTE	
	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO	



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
CENTRO DE PRODUCCION SANDILLAL

ALIMENTACION 24 VDC
CONEXION SENSOR POSICION
ESQUEMA ELECTRICO
PROYECTO CONTROL DE COMPUERTAS P.H. SANDILLAL

DISEÑO: ALVARO_J._ALVARADO_M.						FECHA: 20/11/2008	DESIGNACION SND C4/5 CXX
REVISO: PENDIENTE						FILE:	
DIBUJO: ALVARO_J._ALVARADO_M.						APROBADO:	
APROBO: PENDIENTE	REV. N°	FECHA	POR	INDICE N°	CODIGO: CODIGO		

A.3 Información sobre la empresa

En esta sección se muestra información sobre las características de la empresa en la que se realiza el proyecto y sobre proyectos que han sido desarrollados para el manejo de las compuertas del embalse Sandillal.

A.3.1 Descripción de la empresa

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) es la principal compañía encargada de la generación y distribución de electricidad en Costa Rica. Utiliza para la generación de estas plantas hidroeléctricas, proyectos geotérmicos y eólicos en distintos lugares del país. Además de los servicios de electricidad, la institución tiene sectores dedicados al área de telecomunicaciones.

A.3.2 Descripción del departamento o sección donde se realizó el proyecto

El proyecto fue realizado en el centro de producción Sandillal, el cual inicia operación el 8 de diciembre de 1992. Se ubica 4 km al norte de Cañas, Guanacaste, y aprovecha las aguas de Arenal y Santa Rosa.

Cuenta con un embalse con un volumen útil de 5,15 hm³, formado mediante una presa de enrocamiento con núcleo impermeable vertical y una altura de 45 m, con nivel máximo de operación a 93 msnm y nivel mínimo de operación a 80 msnm. Cuenta con dos turbinas Kaplan de eje vertical de 16 MW cada una. Su embalse le permite regular los caudales semanalmente para su uso en el proyecto de riego Arenal-Tempisque.

A.3.3 Antecedentes Prácticos

Como parte de la modernización del ICE y del deseo de crear una red institucional de control de procesos, el Centro de Producción Sandillal desarrolla el cambio de lógicas de control mecánicas o antiguas a controles capaces de comunicarse con otros dispositivos, manteniendo la funcionalidad y operabilidad de los equipos presentes en la planta, por medio de sistemas programables capaces de asignárseles tareas por realizar más amplias que los antiguos sistemas de control, y así se logra quitar responsabilidades al personal menos calificado. Se deja el control del equipo a sistemas que estén en capacidad de tomar decisiones predefinidas, en caso de errores.

En lo que se refiere al desarrollo del presente proyecto, se tiene un sistema de control desarrollado antes del inicio del proyecto realizado, al cual se hace referencia.

El proyecto desarrollado para el manejo de las compuertas corresponde a: Control de compuertas de la planta Sandillal, código de registro 4601-1035-09-004, desarrollado por el Instituto Costarricense de Electricidad, UEN proyectos y servicios asociados.

El proyecto mencionado corresponde a una interfaz gráfica de manejo remoto de las compuertas del embalse Sandillal. La actividad de información sobre el proyecto desarrollado fue realizada por el autor de este estudio como parte del grupo que aprobó la actividad de capacitación sobre “OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE COMPUERTAS C.P. SANDILLAL”, realizado del 29 de octubre al 30 de octubre del 2008.

El desarrollo del proyecto se basó en la generación de una interfaz gráfica amigable con el usuario, la cual se encuentra en capacidad de mostrar las señales

provenientes del sistema de control de las compuertas presentes en el embalse. En el proyecto elaborado por el investigador se propone un manejo alternativo de las compuertas de excedencia C4 y C5. En el proyecto desarrollado por parte del personal del ICE se colocan señales que activan los actuadores para el movimiento de las compuertas. En pocas palabras, se introducen las señales al PLC y se mantiene la anterior lógica de control, y para la activación se colocan actuadores en paralelo a los ya presentes en el centro de operaciones de toma de agua.

En vista de que la interfaz gráfica fue desarrollada por los encargados del proyecto de manejo de compuertas, el actual proyecto mejorará el desarrollado por personal del ICE, en el cambio de sensores de posición, toma de decisiones (en caso de falla no queden inoperables las compuertas), lógica de control, comunicación con otros dispositivos y cambio de lógica de control (relés y botones) por actuadores de señales generadas por un controlador programable, capaz de tomar decisiones según las condiciones de las compuertas.

La interacción entre los dispositivos vendrá desarrollada mediante de una comunicación por medio de una red Ethernet, con el método de IO Scanning para el intercambio de información entre dispositivos, que están en capacidad de tomar decisiones no consideradas en la anterior lógica de control de las compuertas.

Anexo A.1 Diagrama del sistema hidráulico

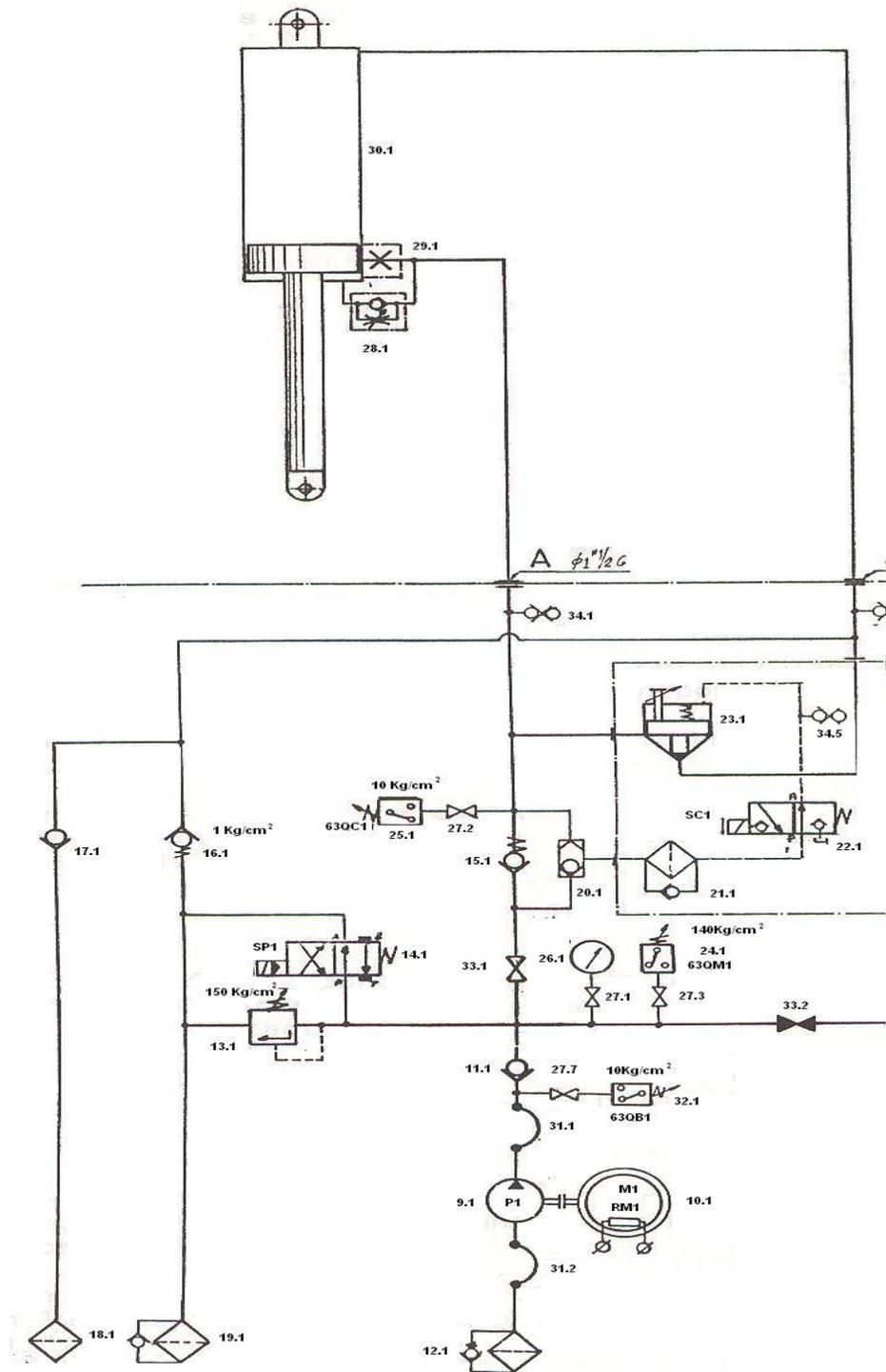


Figura A.1 Esquema Hidráulico.

HOJA DE INFORMACIÓN

Información del estudiante

Nombre: Alvaro José Alvarado Martínez

Cédula: 503370223

Carné ITCR: 200124802

Dirección de su residencia en época lectiva: Cartago

Dirección de su residencia en época no lectiva: Liberia, Guanacaste

Teléfono en época lectiva: 88281669

Teléfono época no lectiva: 26653611

Email: alvaro3184@yahoo.com

Información del Proyecto:

Nombre del Proyecto: Diseño de control automático para apertura de compuertas de excedencia del embalse Sandillal.

Profesor Asesor: Ing. Marvin Hernández Cisneros

Horario de trabajo del estudiante: Lunes 06:00 a 16:00, Martes 06:00 a 16:00, Miércoles 06:00 a 16:00, Jueves 06:00 a 16:00, Viernes 06:00 a 14:00

Información de la Empresa:

Nombre: Instituto Costarricense de Electricidad

Zona: Sandillal, Cañas, Guanacaste, Costa Rica

Dirección: Cañas, Guanacaste, 3 Km al Este del puente sobre el río Sandillal.

Teléfono: 2669-6222

Fax: 2669-6108

Actividad Principal: Generación Energía Eléctrica