

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Rediseño del Sistema de Control de las Compuertas
de la Antecámara y Desarenador de la Central
Hidroeléctrica Canalete**

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

Edgar Jose Campos Duarte

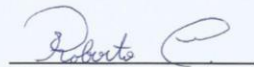
Cartago, Costa Rica

18 de junio del 2018

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 el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica

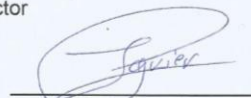
Miembros del Tribunal



Ing. Roberto Molina Robles
Profesor lector



Ing. Leonardo Rivas Arce
Profesor lector



Ing. Javier Pérez Rodríguez
Profesor asesor

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

Cartago, 18 de Junio 2018

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

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

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

Cartago, Costa Rica

Campos D

Edgar Jose Campos Duarte

Céd:503980996

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi pequeña sobrina, quién es una bendición en mi vida y desde su nacimiento ha sido una razón más para seguir esforzándome y culminar mi carrera. Los titos, tú madre y tus tíos siempre estaremos apoyándote y animándote.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios y a la Virgen de los Ángeles porque me brindaron sabiduría y fortaleza durante toda la carrera. A mis padres y mis hermanos por su apoyo incondicional y por sus palabras de aliento.

A mis compañeros en la carrera, en especial a Netzer, Beatriz, Isaac, Yendri, Michael y Geiner los cuales siempre me brindaron su ayuda y amistad. A los ingenieros Erick Herra, Julio Briceño, Jose Pablo Méndez, Mari Flor Juárez y Esteban Fajardo por sus consejos y el apoyo brindado.

Resumen

Coopeguanacaste R.L es una empresa que se encarga de generar energía eléctrica a distintos sectores de la provincia de Guanacaste, en la actualidad Coopeguanacaste R.L posee dos centrales eléctricas. Una de ellas es la Central Hidroeléctrica Bijagua y la otra es la Central Hidroeléctrica de Canaleta, ambas ubicadas en el cantón de Upala.

El proceso de expulsión de arena en la CH Canaleta es realizado manualmente, lo que requiere que un operador se traslade al desarenador para llevar a cabo el proceso de expulsión de arena. Este proyecto consiste en el diseño de un sistema que permita operar las compuertas de la antecámara y el desarenador local y remotamente.

Palabras claves: PLC, SCADA, compuertas, sensores inductivos, lógica de escalera y automatización.

Abstract

Coopeguanacaste R.L is a company responsible for generating electricity to different sectors of the province of Guanacaste, currently Coopeguanacaste R.L has two power plants. One of them is the Bijagua Hydroelectric Power Plant and the other is the Canalete Hydroelectric Power Plant both located in the canton of Upala.

The process of sand expelling in the Canalete H.P.P is done manually, which requires that an operator must move to the sand trap to carry out the process of sand expelling. This project consists on the modeling of the sluice gates of the desander section and the design of a system that allows to operate the antechamber gates both locally and remotely.

Keywords: PLC, SCADA, gates, inductive sensors, ladder logic y automation.

Índice general

Índice de figuras	10
Índice de tablas	11
Capítulo 1 : Introducción	12
1.1 Descripción del entorno	12
Capítulo 2 : Problema	13
2.1 Definición del problema	13
2.2 Síntesis del problema	17
2.3 Solución	17
Capítulo 3 : Meta y objetivos	18
3.1 Meta	18
3.2 Objetivo general	18
3.3 Objetivos específicos	18
Capítulo 4 : Marco teórico	18
4.1 Descripción del funcionamiento de una Central Hidroeléctrica	18
4.2 PLC	20
4.2.1 Lenguaje Ladder (Escalera)	21
4.3 Sensor inductivo	23
4.5 Compuerta plana rectangular	24
4.6 Cilindro hidráulico	25
Capítulo 5 : Metodología	27
5.1 Reconocimiento del problema	27
5.2 Obtención y análisis de la información	27
5.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	28
Capítulo 6 : Proceso de diseño	28
6.1 Descripción de la solución	28
6.2 Análisis de diseños.	29
6.3 Estructura del diseño seleccionado	31
6.4 Modelado del sistema de compuertas	33
6.4.1 Modelado del accionamiento de las compuertas.	34
6.4.2 Comportamiento del agua ubicada entre las compuertas de antecámara y la compuerta del desarenador.	42
6.5 Selección de componentes	48
6.5.1 Selección del controlador	48

6.5.2 Selección de los sensores de final de carrera	50
6.6 Diseño de la lógica programada en el PLC	50
6.6.1 Lógica de la selección del modo de operación	51
6.6.2 Encendido y apagado del sistema	52
6.6.3 Encendido y apagado del motor	53
6.6.4 Operación de las compuertas	54
6.6.5 Detención de las compuertas	57
6.7 Lógica programada en el PLC	58
6.7.1 Segmento de activación del sistema y selección de modo de operación.	58
6.7.2 Segmento de encendido y apagado del motor	59
6.7.3 Segmento de accionamiento de la compuerta 1	61
6.7.4 Segmento de detención de emergencia	63
Capítulo 7 : Resultados y análisis.	64
7.1 Simulación del modelo.	64
7.1.1 Simulación de la dinámica de las compuertas y del canal.	65
7.1.2 Simulación de la expulsión de la arena.	69
7.2 Simulación de la lógica programada en el PLC.	71
Capítulo 8 : Conclusiones	77
Capítulo 9 : Recomendaciones	77
Bibliografía	78
Apéndices y anexos	80
A.1 Glosario, abreviaturas y simbología.	80
A.2 Planos de distribución del gabinete.	81
A.3 Interfaz gráfica desarrollada para el proceso de pruebas.	94
A.4 Hoja de información del proyecto.	95

Índice de figuras

Figura 2.1 Toma de agua y embalse [5]	13
Figura 2.2 Arena acumulada.	14
Figura 2.3 Compuertas de la antecámara	14
Figura 2.4 Compuertas del desarenador.	15
Figura 2.5 Material acumulado entre las compuertas de la antecámara y el desarenador	16
Figura 2.6 Expulsión del material arenoso	16
Figura 4.1 Toma de agua y embalse [5]	19
Figura 4.2 Transporte del agua hacia casa máquinas. [5]	19
Figura 4.3 Regreso del agua al cauce del río [5]	20
Figura 4.4 Símbolo de contacto normalmente abierto	21
Figura 4.5 Símbolo de contacto normalmente cerrado	21
Figura 4.6 Símbolo de la bobina	22
Figura 4.7 Operación AND	22
Figura 4.8 Operación OR	22
Figura 4.9 Ejemplo de un programa con lógica de escalera	23
Figura 4.10 Operación de un sensor inductivo [6]	24
Figura 4.11 Diagrama de descarga de una compuerta plana rectangular. [10]	25
Figura 4.12 Sección transversal de un pistón. [15]	25
Figura 6.1 Diagrama de entradas y salidas del diseño #1	29
Figura 6.2 Diagrama de entradas y salidas del diseño #2	30
Figura 6.3 Interacción del sistema de control lógico con el proceso.	31
Figura 6.4 Diagrama general del sistema de control.	31
Figura 6.5 Vista superior del desarenador.	34
Figura 6.6 Diagrama de cuerpo libre de las compuertas	34
Figura 6.7 Fuerza ejercida por el agua sobre la compuerta de la antecámara.	36
Figura 6.8 Diagrama de bloques de la dinámica de la compuerta de la antecámara.	37
Figura 6.9 Fuerza ejercida por el agua sobre la compuerta del desarenador.	38
Figura 6.10 Diagrama de bloques de la dinámica de la compuerta del desarenador.	40
Figura 6.11 Electro válvula de 3 posiciones	41
Figura 6.12 Conexión entre el circuito hidráulico y la compuerta.	42
Figura 6.13 Vista superior del canal de uno de los canales.	43
Figura 6.14 Vista lateral de uno de los canales	43
Figura 6.15 Flujos presentes en el canal.	43
Figura 6.16 Vista lateral de la compuerta de la antecámara.	45
Figura 6.17 Vista lateral de la compuerta del desarenador.	46
Figura 6.18 Diagrama de bloques de la dinámica del canal.	48
Figura 6.19 PLC S7-1200 SIEMENS	49
Figura 6.20 Diagrama de flujo de la lógica de selección del modo de operación	52
Figura 6.21 Diagrama de flujo de la lógica de encendido y apagado del sistema	53
Figura 6.22 Diagrama de flujo de la lógica de encendido y apagado del motor	54

Figura 6.23 Diagrama de flujo de la lógica de accionamiento de las compuertas.	56
Figura 6.24 Diagrama de flujo de la lógica de detención de las compuertas.	57
Figura 6.25 Programación en escalera de la lógica de selección del modo de operación y encendido y apagado del sistema.	59
Figura 6.26 Programación en escalera de la lógica de encendido y apagado del sistema.	60
Figura 6.27 Programación en escalera de la lógica de accionamiento de las compuertas.	62
Figura 6.28 Programación en escalera de la lógica de detención de emergencia	63
Figura 7.1 Simulación de la dinámica del nivel de agua en el canal, de las compuertas de la antecámara y de la compuerta del desarenador.	66
Figura 7.2 Acercamiento a la sección de apertura de la compuerta de la antecámara #1.	67
Figura 7.3 Acercamiento a la sección de cierre de la compuerta de la antecámara #1.	67
Figura 7.4 Acercamiento a la sección de apertura de la compuerta del desarenador.	68
Figura 7.5 Acercamiento a la sección de cierre de la compuerta del desarenador.	68
Figura 7.6 Acercamiento a la sección de llenado del canal.	69
Figura 7.7 Acercamiento a la sección de vaciado del canal.	69
Figura 7.8 Comportamiento de la compuerta del desarenador, el nivel del agua, el nivel de arena y el nivel de canal.	70
Figura 7.9 Acercamiento a la sección de apertura de la compuerta del desarenador.	71
Figura 7.10 Simulación del encendido y apagado del sistema.	72
Figura 7.11 Simulación del encendido y apagado del motor	73
Figura 7.12 Simulación 1 del accionamiento de la compuerta.	74
Figura 7.13 Simulación 2 del accionamiento de la compuerta	75
Figura 7.14 Simulación 3 del accionamiento de la compuerta.	76

Índice de tablas

Tabla 6.1 Datos del PLC S7-1200 SIEMENS	49
Tabla 6.2 Datos del módulo de entrada del PLC S7-1200	49
Tabla 6.3 Datos del módulo de salidas del PLC S7-1200	50
Tabla 6.4 Datos de la fuente del PLC S7-1200 SIEMENS	50
Tabla 6.5 Variables de la figura 6.23	55
Tabla 7.1 Variables correspondientes a los pistones de las compuertas de la antecámara y el desarenador.	64
Tabla 7.2 Variables correspondientes al canal, las válvulas y otros.	65

Capítulo 1 : Introducción

1.1 Descripción del entorno

Coopeguanacaste R.L es una cooperativa fundada el 10 de enero de 1965, la cual se encarga de generar y distribuir electricidad a gran parte de la península de Nicoya, cubriendo un área de 48000 kilómetros cuadrados de la región Chorotega. La iniciativa de la creación de la cooperativa se debió a que en distintos lugares de la provincia de Guanacaste no se contaba con el acceso a la electricidad. En tres años se logró contar con el servicio eléctrico en comunidades de los cantones de Carrillo y Santa Cruz. Posteriormente, el servicio eléctrico llegó a los cantones de: Nicoya, Hojancha, Nandayure y a otras comunidades de la península de Nicoya: Jicaral, Lepanto y Paquera. En 1980 empezó la venta a bajo costo de artículos de línea blanca, soluciones para el hogar y materiales eléctricos, con facilidades de financiamiento y con condiciones de mercado muy favorables.

En la Central Hidroeléctrica de Canalete se cuenta con sistema de tomas de agua que conduce el agua hasta unos canales abiertos, y luego hasta un embalse de aproximadamente 5 hectáreas. Cuando el agua está ya almacenada en el embalse, se redirige mediante una tubería de presión hasta la casa de máquinas, en este punto se encuentran dos turbinas con una capacidad de generación de 17.5MW.

Capítulo 2 : Problema

2.1 Definición del problema

En la planta hidroeléctrica de Canalete se utilizan las aguas del río Zapote, las cuales se introducen a la represa mediante una toma de agua. Esto se puede observar en la figura 2.1

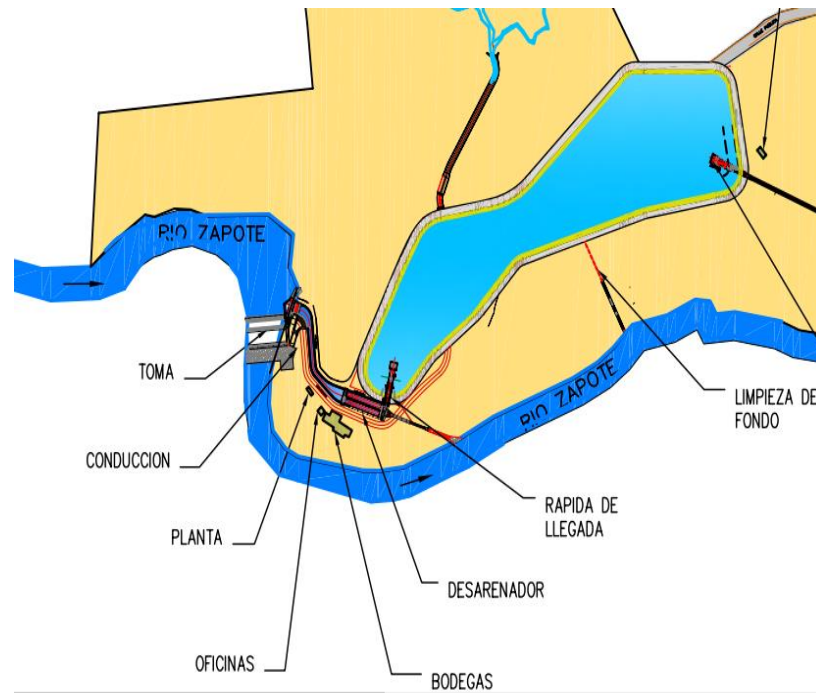


Figura 2.1 Toma de agua y embalse [5]

Cabe indicar que en ocasiones se introduce material no deseado del río, en este caso la arena. Tal como se muestra en la figura 2.2.



Figura 2.2 Arena acumulada.

La arena puede causar problemas en la turbina, por lo que es necesario extraerla. Para ello se utilizan las compuertas de la antecámara y desarenador.

En la siguiente figura se aprecian las compuertas de la antecámara las cuáles tienen la numeración 3, 4, 5 y 6. Estas compuertas se utilizan para permitir el paso de la toma hasta el embalse, por lo general permanecen abiertas, pero cuando es necesario realizar limpiezas u otras tareas de mantenimiento se cierran.

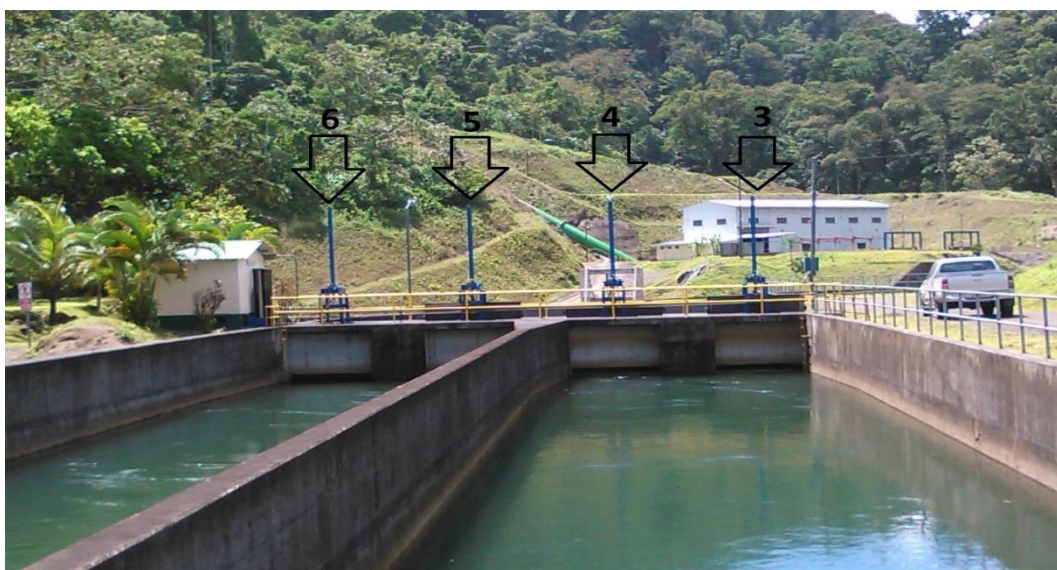


Figura 2.3 Compuertas de la antecámara

Para la expulsión de la arena se utilizan 2 ductos subterráneos, los cuales conectan la sección previa al embalse y el cauce del río Zapote. Las compuertas del desarenador, numeradas como 1 y 2 se encargan de habilitar la expulsión de tales materiales a través de los ductos. En la siguiente figura se muestra la ubicación de estas compuertas.



Figura 2.4 Compuertas del desarenador.

Estas compuertas se normalmente se encuentran cerradas. Cabe decir que las compuertas de la antecámara poseen un mayor tamaño en comparación a las compuertas del desarenador, esto se debe a que las compuertas de la antecámara bloquean el paso del agua que se dirige hasta el embalse y las compuertas del desarenador se encargan de bloquear el paso de materiales pesados.

El proceso para expulsar la arena es el siguiente:

- 1) Se cierran las compuertas de la antecámara para evitar el paso de agua proveniente de la toma, haciendo que entre las compuertas de la antecámara y el desarenador quede agua acumulada.

Esto último se puede observar en la figura 2.5.

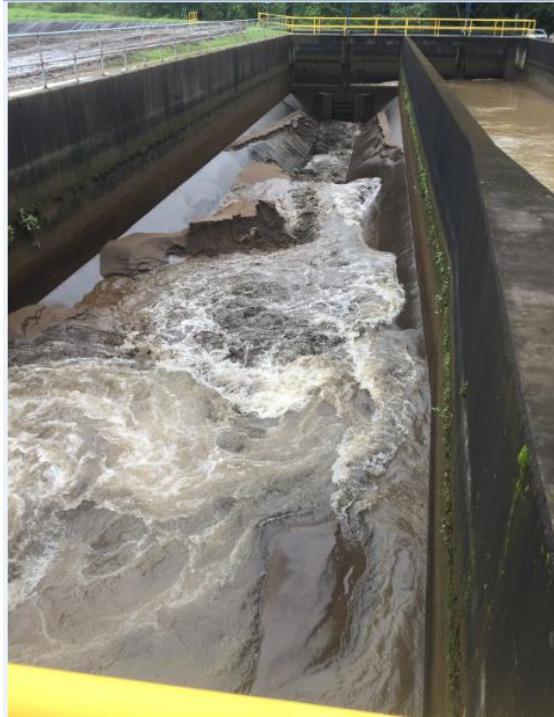


Figura 2.5 Material acumulado entre las compuertas de la antecámara y el desarenador

- 2) Se abren las compuertas del desarenador esto con el fin de que los materiales no deseados sean expulsados por los ductos subterráneos.



Figura 2.6 Expulsión del material arenoso

- 3) En caso de que todavía quede material arenoso, se abren un poco las compuertas de la antecámara, permitiendo que el agua expulse la arena restante.

El proceso de abrir y cerrar compuertas se realiza de forma manual, mediante el control que se ubica en el desarenador. El tablero cuenta con un PLC que previamente se encargaba de accionar las compuertas. Sin embargo, el PLC dejó de funcionar, por lo que para accionar las compuertas se utilizan cables que se conectan a las bobinas de los relés asociados a las electroválvulas. Esto último dificulta la tarea de expulsar la arena.

Se debe destacar que la distancia que hay entre casa de máquinas y el desarenador es de 4 kilómetros aproximadamente.

El proceso de expulsión no se puede realizar en horas de la noche ya que los operarios no pueden hacer este recorrido de noche. En estos casos se debe esperar hasta el amanecer para poder hacer la limpieza o alguna labor de mantenimiento, lo cual retrasa la entrada en funcionamiento de la central.

2.2 Síntesis del problema

La expulsión de la arena se dificulta debido a la distancia entre la casa de máquinas y el desarenador.

2.3 Solución

Se diseñará el prototipo de un sistema que permita al usuario el accionamiento de las compuertas ya sea de forma local o remota.

Capítulo 3 : Meta y objetivos

3.1 Meta

Contar con un sistema eficiente que permita la extracción de materiales no deseados en la Central Hidroeléctrica de Canalete.

3.2 Objetivo general

Rediseño del sistema de control lógico de las compuertas de la antecámara y el desarenador de la Central Hidroeléctrica Canalete.

3.3 Objetivos específicos

- a) Diseñar un sistema de control que permita el accionamiento de las compuertas tanto de forma local como remota a través de una conexión Ethernet.
- b) Desarrollar un modelo matemático teórico que permita emular el funcionamiento de las compuertas.
- c) Documentar el diseño para la empresa.

Capítulo 4 : Marco teórico

4.1 Descripción del funcionamiento de una Central Hidroeléctrica

La producción de la electricidad por parte de una central hidroeléctrica se basa en aprovechar la energía cinética del agua y convertirla en energía eléctrica mediante un generador. Como se puede apreciar en la figura 4.1, en el río se tiene una toma que desvía parte del flujo hacia el embalse, pasando a través del desarenador.

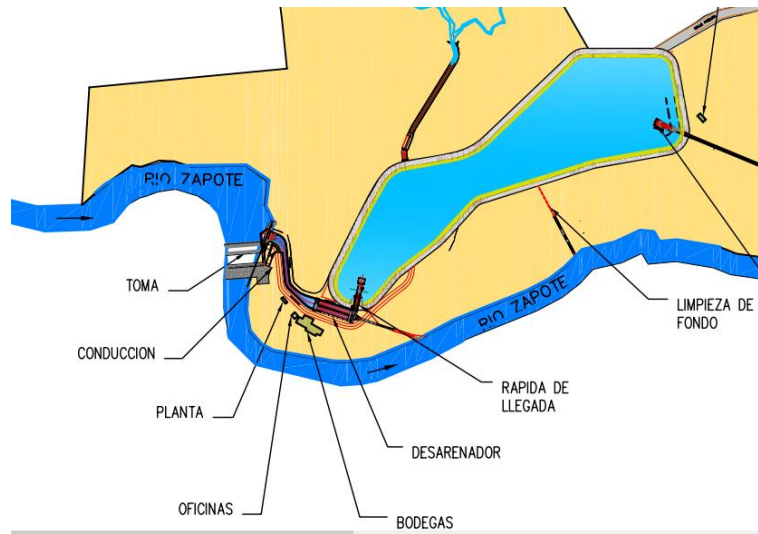


Figura 4.1 Toma de agua y embalse [5]

En este este último se deposita arena y materiales pesados provenientes del río, así evitando que lleguen hasta el embalse. El embalse se encuentra en un punto de mayor altura que la casa de máquinas. Así mismo, el agua almacenada en el embalse permite la generación de energía todo el año, ya que, aunque el cauce del río se reduzca, se podrá almacenar agua en el embalse, para introducirla en la turbina. Como ya se ha mencionado previamente, el agua pasa del embalse a la turbina mediante una tubería que conecta el embalse y la casa de máquinas, tal como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3.



Figura 4.2 Transporte del agua hacia casa máquinas. [5]



Figura 4.3 Regreso del agua al cauce del río [5]

Ya una vez en casa de máquinas, los generadores se encargarán de convertir la energía cinética del agua en energía eléctrica.

4.2 PLC

Los PLCs (Controladores Lógicos Programables) son dispositivos utilizados frecuentemente en la industria para la automatización de procesos. Esto debido a que tienen la capacidad de trabajar con voltajes de entre 24V y 120V. Otra de las ventajas de usar estos dispositivos es que se puede ampliar la cantidad de señales de entrada y de salidas, mediante la utilización de módulos.

Dependiendo del PLC se pueden utilizar distintos lenguajes de programación para el diseño de la lógica de control. A continuación, se listan algunos de los lenguajes disponibles.

- 1) Lenguaje de escalera: Este lenguaje está basado en la utilización de relés, de manera que emula contactos normalmente abiertos, normalmente cerrados y bobinas.
- 2) Texto estructurado: Lenguaje de programación de alto nivel muy similar a C.
- 3) Bloques de funciones: Este tipo de programación utiliza bloques para llevar a cabo las acciones de control, como por ejemplo *shift*, *move*, and *or* entre otros.

- 4) Lista de instrucciones: Lenguaje de tipo ensamblador con uso de acumuladores.

Cabe decir que los PLCs también poseen la capacidad de procesar entradas analógicas, las cuales pueden ser voltajes que rondan entre los 0-20V y corrientes que oscilan entre los 4mA-20mA

4.2.1 Lenguaje Ladder (Escalera)

El lenguaje escalera está fundamentado en la operación de los relés, los cuáles pueden operar como normalmente abiertos o normalmente cerrados, y una vez que se les energiza estos cambian su modo de operación. Es decir, un relé normalmente cerrado cuando es energizado pasa a funcionar como normalmente abierto y viceversa.

En la figura 4.4 y en la figura 4.5 se muestran los símbolos del contacto normalmente abierto y normalmente cerrado respectivamente.

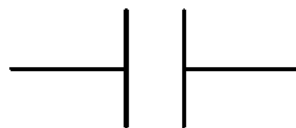


Figura 4.4 Símbolo de contacto normalmente abierto



Figura 4.5 Símbolo de contacto normalmente cerrado

En la figura 4.6 se muestra el símbolo de la bobina. Este funciona tanto como para activar o desactivar un contacto normalmente cerrado o abierto, o generar una salida de control.



Figura 4.6 Símbolo de la bobina

Los contactos pueden ser utilizados para emular el comportamiento de las compuertas lógicas. Por ejemplo, en la figura 4.7 se muestra la operación AND y en la figura 4.8 se muestra la operación OR.



Figura 4.7 Operación AND

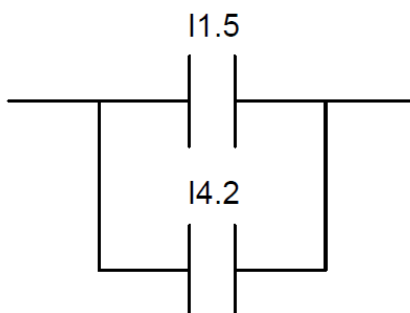


Figura 4.8 Operación OR

Es importante mencionar que el flujo de la señal va de izquierda a derecha y de arriba a abajo del diagrama, tal como se muestra en la figura 4.9.

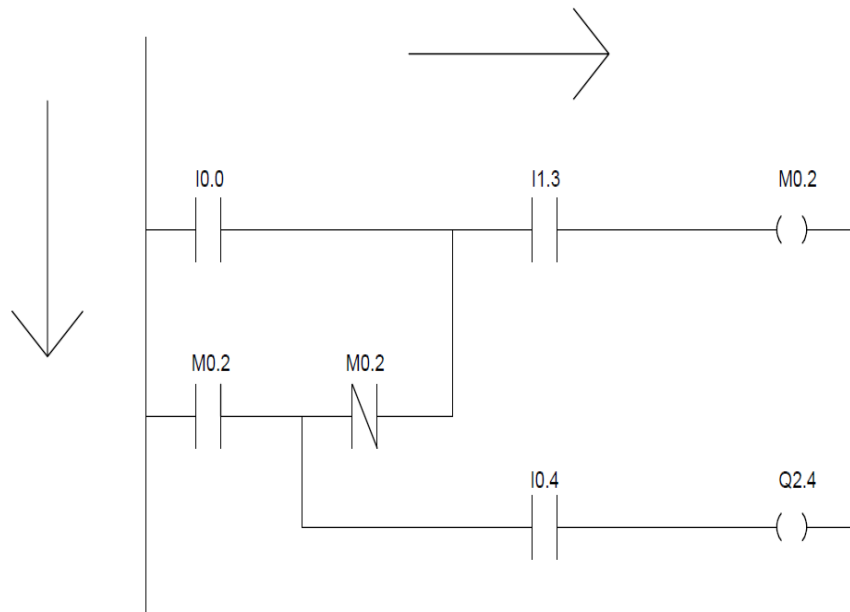


Figura 4.9 Ejemplo de un programa con lógica de escalera

4.3 Sensor inductivo

Un sensor inductivo consiste en un oscilador que genera un campo electromagnético de alta frecuencia. Este campo electromagnético es irradiado por la cara del sensor. Cuando este campo hace contacto con un metal conductor, una pequeña corriente es inducida dentro del metal conductor. Estas corrientes generaran su propio campo electromagnético que interfiere con el campo magnético del sistema original.

Esto causa un cambio en la amplitud de la oscilación de las señales del sistema. Entre más cerca este el sistema al metal, más corriente reaccionará con el campo, originando que la salida de voltaje del sistema sea más alta. Así que se puede utilizar el sensor inductivo para activar relés, contactores, entre otros.

En la figura 4.10 se puede observar un sensor inductivo y las partes que componen a este.

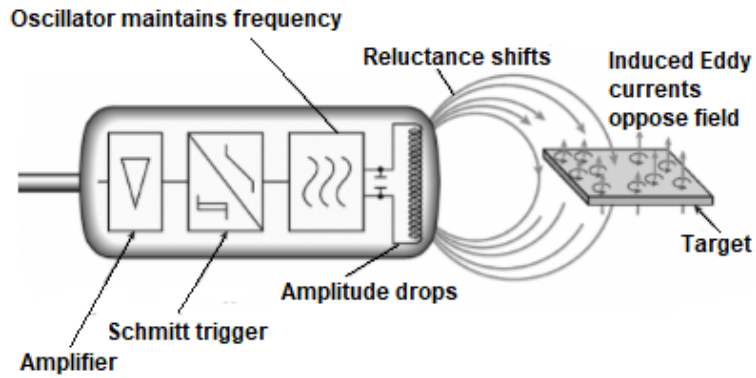


Figura 4.10 Operación de un sensor inductivo [6]

4.5 Compuerta plana rectangular

La compuerta rectangular es un tipo de compuerta que se utiliza para la regulación del flujo de agua. Así mismo se pueden utilizar como compuertas de guarda o de cierra que operan ya sea totalmente abiertas o cerradas.

En la figura 4.11 se puede observar como fluye el agua a través de la compuerta una vez que esta genera una apertura en el canal. Para lograr el movimiento de estas compuertas es necesario la utilización ya sea de equipo neumático, o hidráulico.

El flujo a través de una compuerta rectangular se puede calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q = C_d b L \sqrt{2g y_1} \quad (4.1) [10]$$

$$C_d = \frac{0.61}{\sqrt{[1 + 0.61(\frac{L}{y_1})]}} \quad (4.2)[10]$$

En donde b es el ancho de la compuerta, y_1 es el nivel del agua al lado derecho de la compuerta, L es la apertura de la compuerta y g es la gravedad.

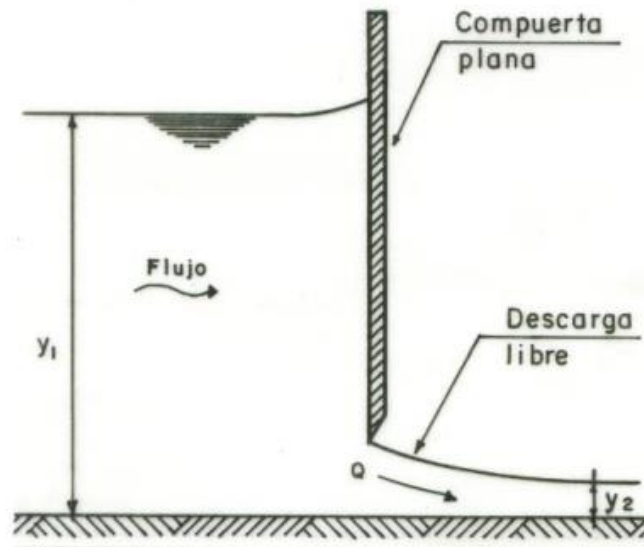


Figura 4.11 Diagrama de descarga de una compuerta plana rectangular. [10]

4.6 Cilindro hidráulico

Los cilindros hidráulicos son elementos que permiten llevar a cabo una fuerza horizontal o vertical mediante la utilización de un líquido contenido en las cámaras de estos. En la siguiente imagen se puede observar la sección transversal de un pistón.

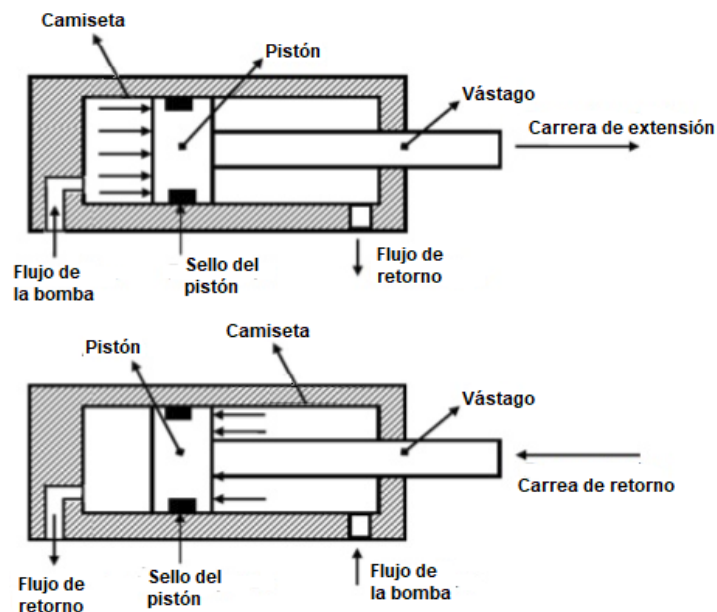


Figura 4.12 Sección transversal de un pistón. [15]

El cilindro hidráulico tiene la capacidad de convertir la presión ejercida por un fluido en desplazamiento.

Cuando introducimos el líquido a través de la cámara 1, este se encargará de generar una fuerza que empujará el pistón hacia la derecha. Haciendo que el líquido en la cámara 2 sea conducido a un depósito. Cuando se cambia la dirección del flujo de los líquidos se puede lograr un movimiento hacia la izquierda.

El cilindro genera 2 fuerzas, una de ellas es la fuerza de extensión o empuje (F_e), la cual, de acuerdo con la figura 4.12, es la que se genera cuando se mueve la carga hacia la derecha. La otra es la de retracción o retorno (F_r), que se genera con el movimiento hacia la izquierda.

La fuerza que ejerce el cilindro se representa con la ecuación 4.3.

$$F_p = F_e - F_r \quad (4.3)$$

Las fuerzas de empuje y retracción se pueden representar mediante la presión y el área de las cámaras del cilindro.

$$F_e = P_1 A_1 \quad (4.4)$$

$$F_r = P_2 A_2 \quad (4.5)$$

P_1 y P_2 son las presiones presentes en la cámara 1 y 2 del cilindro, y A_1 y A_2 son las áreas de la cámara 1 y 2 respectivamente.

La fuerza del cilindro (F_p) se puede representar a través de las presiones y las áreas de las cámaras.

$$F_p = P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (4.6)$$

El área de la cámara 1 es mayor al área de la cámara 2, y esto se debe a que de un lado se encuentra el vástago. El área de las cámaras se puede calcular mediante las ecuaciones 4.7 y 4.8.

$$A_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2 \quad (4.7)$$

$$A_2 = P_1 \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \quad (4.8)$$

Al sustituir las ecuaciones 4.7 y 4.8 en las ecuaciones 4.2 y 4.3 se obtiene como resultado las ecuaciones 4.9, 4.10 y 4.11.

$$F_e = P_1 \frac{\pi}{4} d_1^2 \quad (4.9)$$

$$F_r = P_2 \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \quad (4.10)$$

$$F_p = P_1 \frac{\pi}{4} d_1^2 - P_2 \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \quad (4.11)$$

Las variables d_1 y d_2 corresponden al diámetro de la camiseta del cilindro y al diámetro del vástago respectivamente.

Capítulo 5 : Metodología

5.1 Reconocimiento del problema

Para definir el problema se contactó con el el ingeniero Henry Palma, quién es el jefe de planta, el ingeniero eléctrico José Pablo Méndez y el técnico eléctrico de Hidro Mantenimiento Abrham Picado. Estos últimos dos se encargan del mantenimiento de la parte eléctrica de la central. Se realizaron visitas al lugar del desarenador para determinar el estado del equipo que se encontraba en el desarenador, y la condición del cableado eléctrico que llega hasta el lugar. Se conversó con el jefe de planta sobre el protocolo que tiene la expulsión de la arena mediante el desarenador. También se logró conversar con los operadores de la central de Canalete y Bijagua sobre cuáles son las funciones que desempeñan estos.

5.2 Obtención y análisis de la información

La central de Bijagua actualmente cuenta con un sistema que permite el accionamiento remoto de las compuertas del desarenador. Con ayuda del ingeniero eléctrico y el técnico eléctrico se recopiló información sobre el funcionamiento del sistema de control de la central de Bijagua. Así mismo, se analizaron los planos del panel de control que se encuentra actualmente en el desarenador. En lo que

respecta a la selección del PLC se consultó al técnico de CONELECTRICAS R.L que se encargará de programar el sistema SCADA.

5.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Entre las soluciones que se plantearon se tomaron en cuenta las restricciones y los alcances que debe tener el sistema. Se realizaron reuniones con los ingenieros eléctricos de Coopeguanacaste R.L y de Hidro Mantenimiento para evaluar limitaciones o errores de los diseños.

Capítulo 6 : Proceso de diseño

6.1 Descripción de la solución

El sistema debe permitir el accionamiento de las compuertas tanto de forma local como remota. La opción de manejo remoto hace que sea necesario la utilización de algún controlador que permita establecer la comunicación entre la casa de máquinas y el desarenador. Así mismo el controlador debe ser compatible con el software WinCC de Siemens, dado que el sistema SCADA utilizado actualmente en la Central es programado utilizando tal software. Por último, el controlador debe tener la capacidad de trabajar con los componentes que ofrece el mercado, tales como relés, sensores, entre otros.

Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema de compuertas es necesario tomar en cuenta las siguientes restricciones y condiciones:

- a) Si el nivel de aceite no es el adecuado para la operación de las compuertas, no se habilitará el funcionamiento del sistema de control y si el sistema se encuentra en funcionamiento se procederá a realizar el apagado de este.
- b) De existir sobrepresión no se podrán accionar las compuertas y en caso de que se encuentren realizando alguna acción (apertura o clausura) se procederá a realizar la detención inmediata.

c) Si se presenta una sobrecorriente en el motor no se permitirá el encendido del motor y el accionamiento de las compuertas.

d) La opción de detener las compuertas cuando el usuario lo indique.

Así mismo el sistema debe contar con indicadores que permitan conocer si existe:

a) Bajo nivel de aceite.

b) Sobrepresión.

c) Una sobrecorriente en el motor.

6.2 Análisis de diseños.

Ante lo mencionado en la sección anterior se propusieron 2 diseños los cuales se detallarán a continuación:

a) Propuesta de diseño #1:

En esta propuesta se plantea toda la implementación del control en el controlador, es decir: de la operación remota como la operación local, tal como se muestra en la figura 6.1.

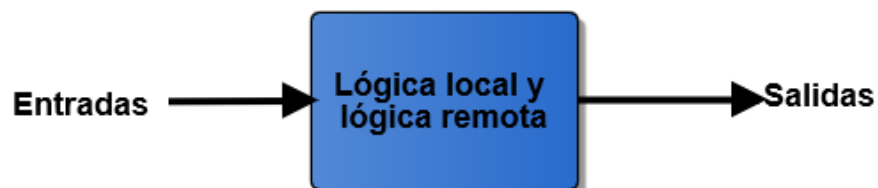


Figura 6.1 Diagrama de entradas y salidas del diseño #1

b) Propuesta de diseño #2:

En este diseño se plantea la utilización de 2 lógicas de control funcionando en paralelo. Una de ellas se encargaría del control local y funcionaría a base de relés. La otra lógica se encargaría del control remoto y se implementaría en el controlador. Lo anterior se puede observar en la figura 6.2.

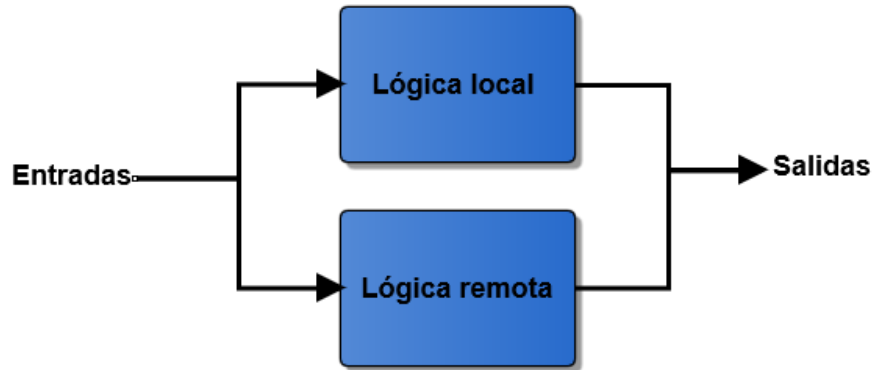


Figura 6.2 Diagrama de entradas y salidas del diseño #2

Para seleccionar la solución óptima se realizó el siguiente contraste entre ambos diseños:

a) Complejidad del diseño:

La complejidad está relacionada con la cantidad de componentes, por lo que, a mayor número de componentes, mayor es la complejidad del diseño. La complejidad repercute de forma negativa en el mantenimiento del sistema y en la detección de fallas.

El diseño #2 tiende a ser más complejo debido a la cantidad de relés que se necesitan. En lo que respecta al diseño #1 se necesitan menos relés aproximadamente la mitad de los que se necesitarían en el diseño #2.

b) Costo:

El costo del diseño #2 es de 3,021,6214.15 cólones y el costo del diseño #1 es de 2,675,576.74. La diferencia de precios se debe a que el diseño #2 requiere una mayor cantidad de materiales en comparación al diseño #1.

c) Tiempo de implementación:

El tiempo de espera de algunos materiales del diseño #2 es de 10 a 12 semanas y para el diseño #1 el tiempo de espera es de 6 a 8 semanas.

Por lo detallado anteriormente se determinó que la mejor opción es el diseño #1.

6.3 Estructura del diseño seleccionado

El diseño contempla la parte operativa la cual está constituida por las interfaces entre humanos y máquinas, sensores y actuadores. Y la parte de control, la cual recibe órdenes de mando en conjunto con los datos provenientes de los sensores y realiza las acciones de control para los actuadores, de acuerdo con las normas establecidas. En la figura 6.3 se observa una representación mediante diagramas de bloques de la interacción del sistema de control lógico con el proceso.

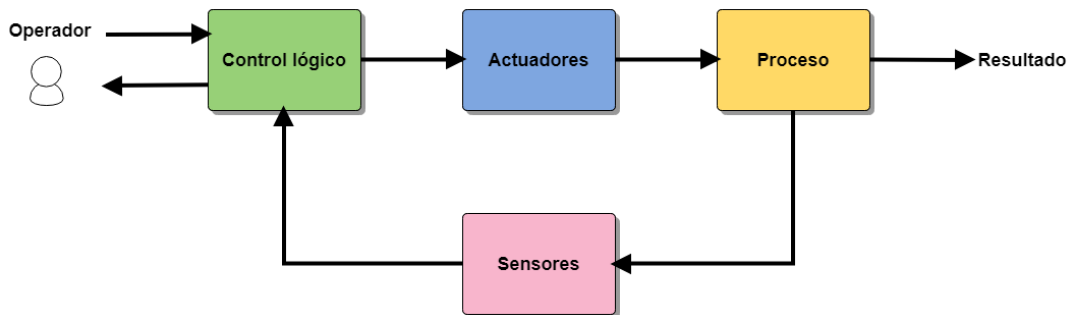


Figura 6.3 Interacción del sistema de control lógico con el proceso.

La figura 6.4 muestra el diagrama del sistema de control lógico del diseño. A continuación, se procederá a detallar cada uno de los elementos del diagrama.

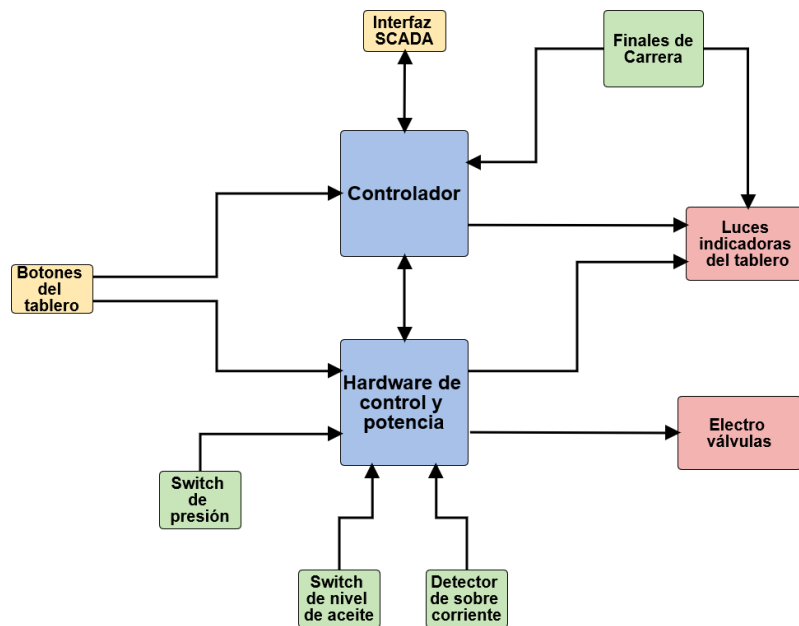


Figura 6.4 Diagrama general del sistema de control.

a) Botones del tablero:

El tablero ubicado en el desarenador es el que permitirá al usuario escoger las acciones de control que se desea que el sistema realice, ya sea por ejemplo subir alguna determinada compuerta.

b) Interfaz SCADA:

Las acciones de control remoto se realizarán mediante la interfaz gráfica que se implementará en el SCADA.

c) Finales de carrera:

Estos sensores se usarán para poder determinar cuando se ha abierto o cerrado por completo. Cada compuerta contará con dos de estos sensores. Uno para determinar cuando la compuerta está abierta y otro para determinar cuando la compuerta está cerrada.

d) Switch de presión:

El Switch de presión nos permitirá conocer si existe o no sobre presión. Este funciona con un contacto normalmente cerrado cuando no existe sobrepresión.

e) Switch de nivel de aceite:

El Switch de nivel de aceite indicará si el nivel de aceite es apto o no para la operación de las compuertas. Este funciona como un contacto normalmente abierto cuando el nivel de aceite es suficiente para operar las compuertas.

f) Detector de sobrecorriente:

Permitirá conocer si se produce una corriente que pueda afectar el funcionamiento del motor.

g) Luces indicadoras del tablero:

Cuando se trabaje de forma local estas luces permitirán conocer el estado de los procesos que se estén realizando, el estado de la presión, el nivel de aceite y el estado del motor.

h) Electroválvulas:

Para poder abrir o cerrar alguna de las compuertas es necesario activar la electroválvula correspondiente, ya que estas son las que permiten el accionamiento de las compuertas.

i) Hardware de control y de potencia:

En este bloque se encontrarán componentes electromecánicos tales como relés, contactores, breakers entre otros.

6.4 Modelado del sistema de compuertas

El sistema está compuesto por 6 compuertas y dos canales. En cada canal podemos encontrar dos compuertas de antecámara, las cuales permiten el paso del agua proveniente del río al embalse. En cada canal se encuentra una compuerta que permite la expulsión de la arena hacia el río.

Lo mencionado anteriormente se puede observar en la figura 6.5, las compuertas están numeradas como en las figuras 2.3 y 2.4.

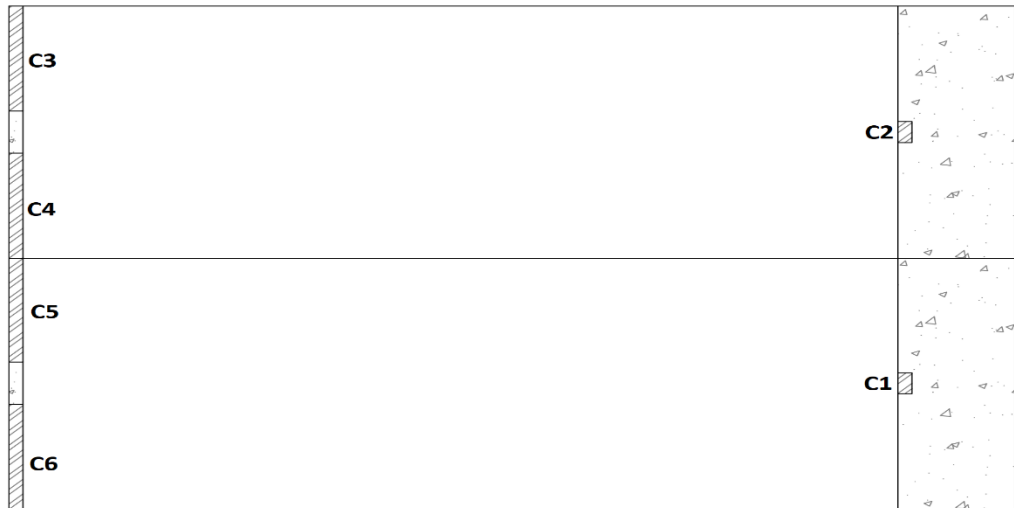


Figura 6.5 Vista superior del desarenador.

Para modelar este sistema es necesario tomar en cuenta el comportamiento del agua que entra y sale de la sección que se encuentra entre las compuertas de la antecámara y la compuerta del desarenador, además del propio del mecanismo de cierre y apertura de las compuertas.

6.4.1 Modelado del accionamiento de las compuertas.

Para esta sección se analizarán las fuerzas que interactúan con las compuertas en el eje y.

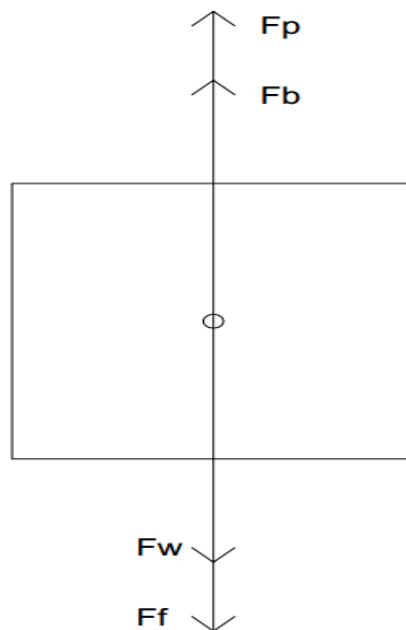


Figura 6.6 Diagrama de cuerpo libre de las compuertas

En la figura 6.6 se puede observar el diagrama de fuerzas para ambas compuertas. Las fuerzas que interactúan con las compuertas son las siguientes:

- a) Fuerza del cilindro hidráulico. (F_p)
- b) Fuerza boyante. (F_b)
- c) Peso de la compuerta. (F_w)
- d) Fricción (F_f)

Lo mencionado anteriormente se puede representar con la ecuación de la sumatoria de fuerzas.

$$\sum F = F_p + F_b - F_w - F_f \quad (6.1)$$

Sin embargo, la fuerza boyante y la fricción es distinta en ambas compuertas. A continuación, se mostrarán las ecuaciones para determinar tales fuerzas.

- 1) Compuerta de la antecámara:

Fuerza boyante:

La fuerza boyante es la que se genera cuando un cuerpo se encuentra sumergido en algún líquido. La siguiente ecuación permite conocer la fuerza boyante de un objeto sumergido.

$$F_b = Vg\rho_{agua} \quad (6.2)$$

V es el volumen desplazado por el cuerpo, g es la gravedad cuyo valor es de 9.8m/s^2 y ρ_{agua} es la densidad del agua la cual tiene un valor de 997 kg/m^3 .

Sin embargo, cuando se accione alguna de estas compuertas, parte de estas se encontrará sumergida y la otra parte se encontrará fuera del agua, por lo que es necesario modificar la ecuación 6.2 con el fin de que se pueda contemplar el proceso de accionamiento de las compuertas.

La ecuación toma en cuenta el volumen del cuerpo sumergido, pero dado a que la compuerta saldrá del agua, el volumen sumergido variará de acuerdo con la posición de la compuerta, haciendo que se obtenga la ecuación 6.3.

$$F_b = ap(H_1 - L)g\rho_{agua} \quad (6.3)$$

En la ecuación anterior H_1 y L son el nivel del agua y la medida de apertura de la compuerta respectivamente. La variable a es el ancho de la compuerta y p es la profundidad de esta.

Fuerza debida a la fricción:

El agua proveniente del río genera una fuerza sobre la compuerta, provocando así que se genere una fricción entre la compuerta y los soportes. La fuerza de fricción se puede calcular con la ecuación 6.4.

$$F_f = \mu_d F_N \quad (6.4)$$

En donde F_N es la fuerza generada por el agua y μ_d es el coeficiente dinámico de fricción.

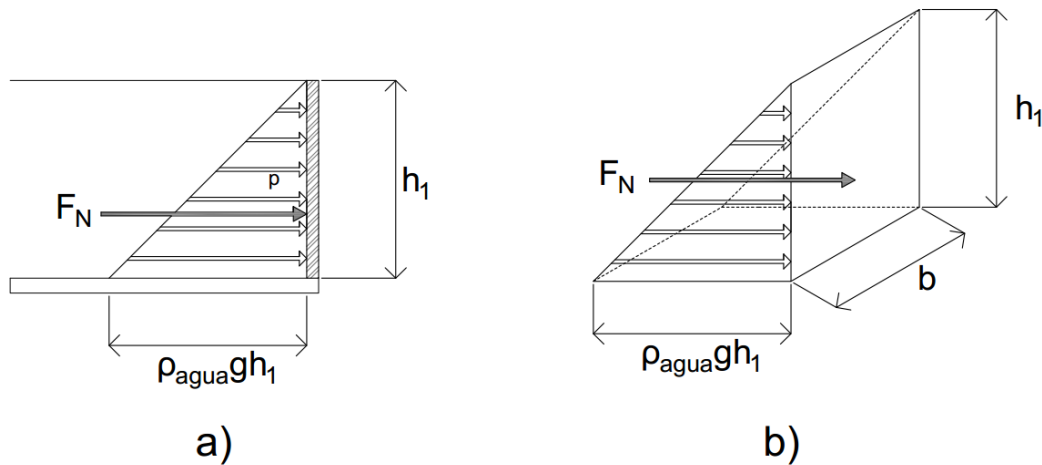


Figura 6.7 Fuerza ejercida por el agua sobre la compuerta de la antecámara.

a) Vista lateral. b) Vista tridimensional.

F_N se determina mediante el prisma de presión generado sobre la compuerta mostrado en la figura 6.7.

$$F_N = \rho_{agua} g \left(\frac{h_1^2}{2} \right) b \quad (6.5)$$

$$F_N = \rho_{agua} g \frac{(h_1 - L_a)^2 b}{2} \quad (6.6)$$

En donde L_a es la apertura de la compuerta y h_1 es el nivel del agua entrante. De forma que la fuerza de fricción viene dada por la ecuación 6.7

$$F_f = \mu_d \rho_{\text{agua}} g \frac{(h_1 - L_a)^2 b}{2} \quad (6.7)$$

Al sustituir las ecuaciones 4.6, 6.3 y 6.7 en la ecuación 6.1 se obtiene como resultado las ecuaciones 6.8 y 6.9. L_a es la posición de la compuerta y m es la masa de ésta.

$$m\ddot{L}_a = P_2 A_2 - P_1 A_1 + a(h_1 - L_a) \rho g \rho_{\text{agua}} - mg - \mu_d \rho_{\text{agua}} g \frac{(h_1 - L_a)^2 b}{2} \quad (6.8)$$

$$\ddot{L}_a = \frac{P_2 A_2}{m} - \frac{P_1 A_1}{m} + \frac{a(h_1 - L_a) \rho g \rho_{\text{agua}}}{m} - g - \mu_d \rho_{\text{agua}} g \frac{(h_1 - L_a)^2 b}{2m} \quad (6.9)$$

En la siguiente figura se muestra un diagrama con la interconexión de las ecuaciones que permiten obtener la posición de la compuerta de la antecámara.

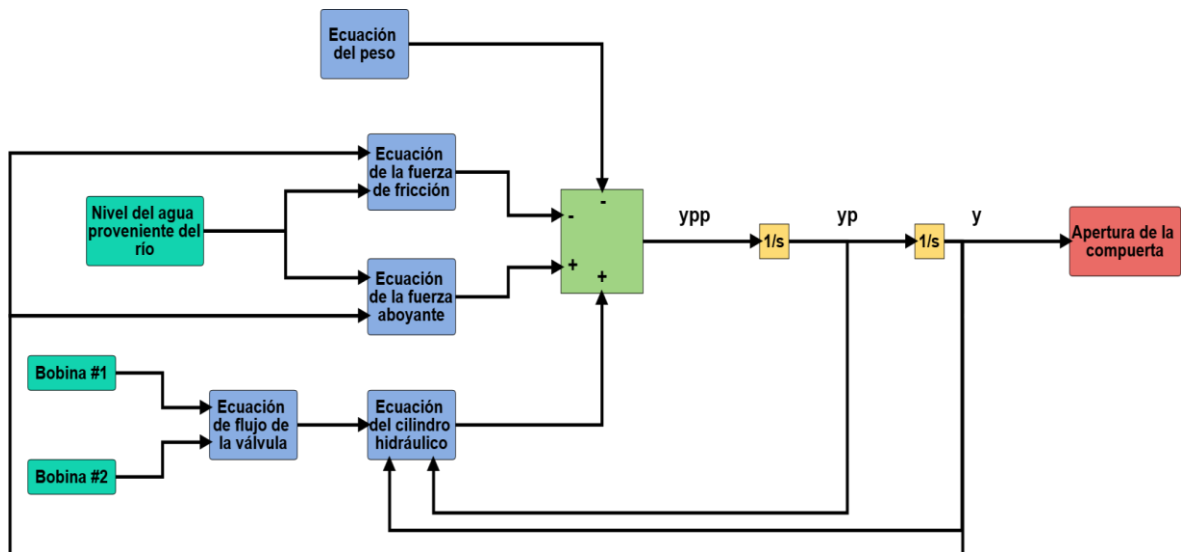


Figura 6.8 Diagrama de bloques de la dinámica de la compuerta de la antecámara.

2) Compuerta del desarenador.

Fuerza boyante:

A diferencia de las compuertas de la antecámara, las compuertas del desarenador se encuentran sumergidas todo el tiempo por lo que el volumen

desplazado no variará. La ecuación que describe la fuerza boyante es la que se muestra a continuación.

$$F_b = a p l g \rho_{\text{agua}} \quad (6.10)$$

Las variables a , p y l son el ancho, la profundidad y el alto de la compuerta respectivamente.

Fuerza debida a la fricción:

De forma similar a la compuerta de la antecámara, el movimiento de la compuerta del desarenador se ve afectado por una fricción generada por el agua y la arena acumulada.

Para determinar la fuerza de fricción se utiliza el prisma de presión proyectado sobre la compuerta, tal como se muestra en la figura 6.9.

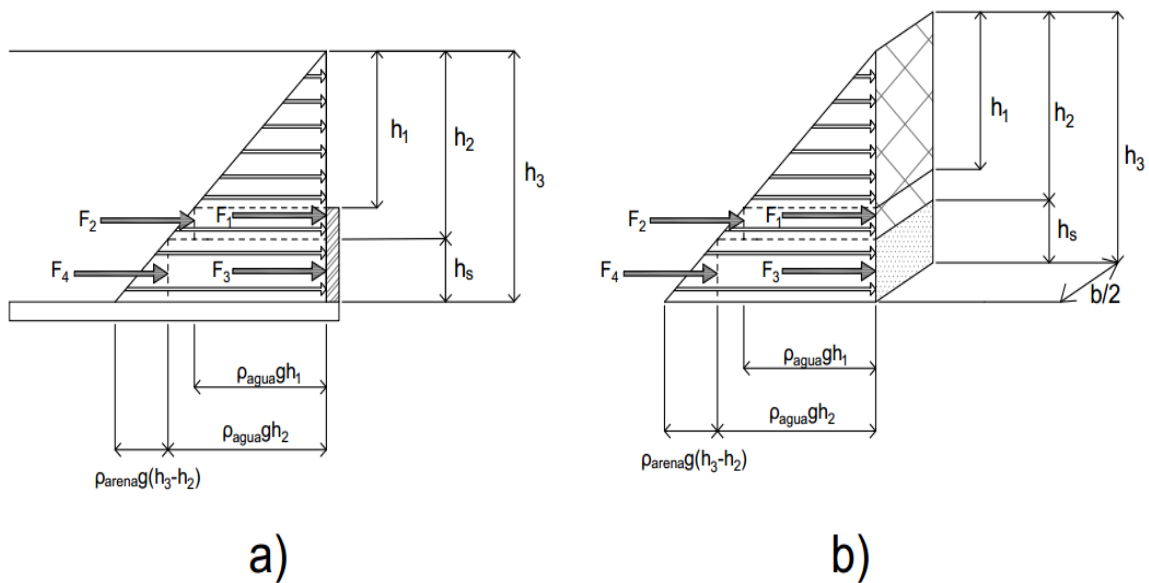


Figura 6.9 Fuerza ejercida por el agua y la arena sobre la compuerta del desarenador.

a) Vista lateral. b) Vista con corte transversal.

En este caso la fuerza normal está conformada por la suma de 4 fuerzas, estas fuerzas son calculadas mediante el cálculo del volumen de las figuras geométricas (triángulos y rectángulos) mostradas en la figura 6.9.

$$F_N = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (6.11)$$

Seguidamente se muestran las ecuaciones que describen cada una de las fuerzas.

$$F_1 = \rho_{agua} g h_1 p b \quad (6.12)$$

$$F_2 = \frac{\rho_{agua} g (h_2 - h_1) p b}{2} \quad (6.13)$$

$$F_3 = \rho_{agua} g h_2 q b \quad (6.14)$$

$$F_4 = \frac{(\rho_{arena} g h_3 - \rho_{agua} g h_2) q b}{2} \quad (6.15)$$

En donde p es la altura del rectángulo y el triángulo de las fuerzas F_1 y F_2 y b es la altura de las figuras geométricas de las fuerzas F_3 y F_4 .

Las ecuaciones anteriores se pueden reescribir en términos de la altura del total del canal (h_t), de la altura de la arena (h_s) y de la apertura de la compuerta (L_d), haciendo que se obtengan las siguientes ecuaciones:

$$F_1 = \rho_{agua} g (h_t - L_d - 1.5) (1.5 - L_d - h_s) b \quad (6.16)$$

$$F_2 = \frac{\rho_{agua} g (1.5 - h_s) (1.5 - L_d - h_s) b}{2} \quad (6.17)$$

$$F_3 = \rho_{agua} g (h_t - L_d - h_s) (h_s - L_d) b \quad (6.18)$$

$$F_4 = \frac{(\rho_{arena} g (h_t - L_d) - \rho_{agua} g (h_t - L_d - h_s)) (h_s - L_d) g b}{2} \quad (6.19)$$

Al sustituir las ecuaciones 6.10 y 6.11 en la ecuación 6.1 obtenemos las ecuaciones 6.20 y 6.21.

$$m \ddot{L}_d = P_2 A_2 - P_1 A_1 + a l p g \rho_{agua} - m g - \mu_d (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (6.20)$$

$$\ddot{L}_d = \frac{P_2 A_2}{m} - \frac{P_1 A_1}{m} + \frac{a l p g \rho_{agua}}{m} - g - \frac{\mu_d (F_1 + F_2 + F_3 + F_4)}{m} \quad (6.21)$$

En donde L_d es la posición de la compuerta del desarenador y m la masa de esta.

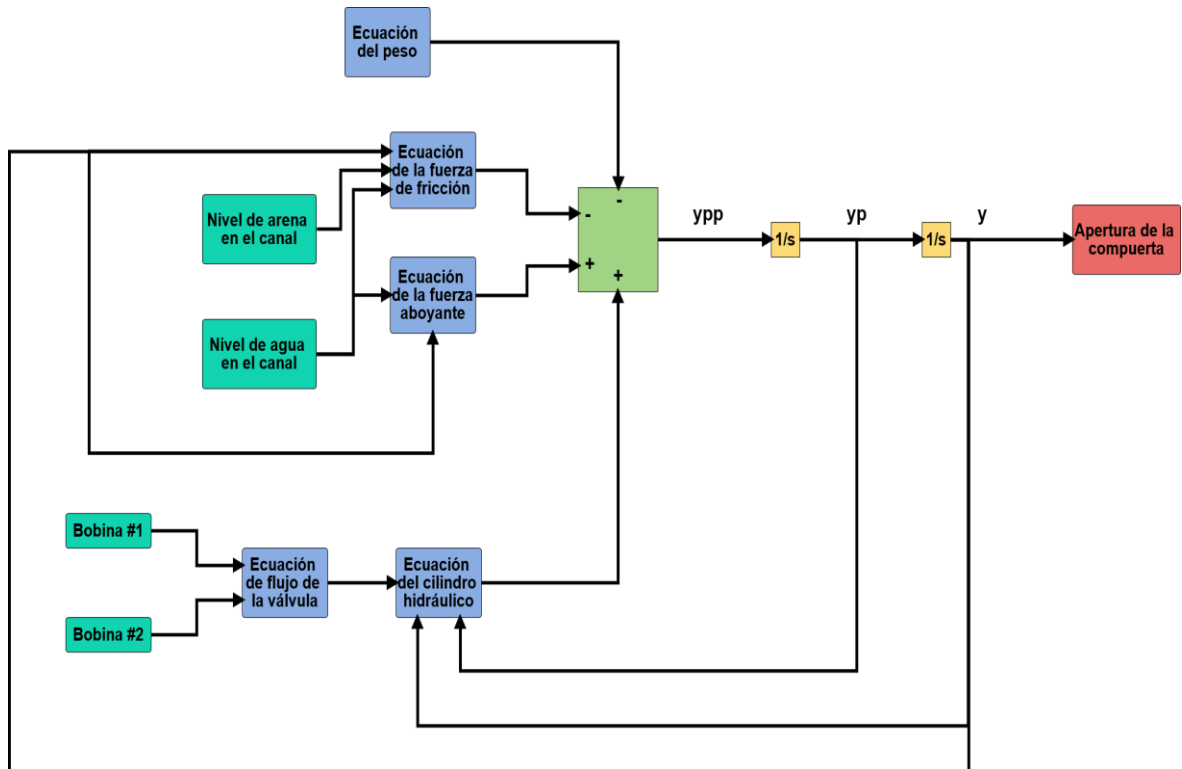


Figura 6.10 Diagrama de bloques de la dinámica de la compuerta del desarenador.

En la anterior figura se muestra una representación mediante bloques de las ecuaciones que nos permiten obtener la dinámica de la compuerta del desarenador.

Cabe decir que las ecuaciones 6.9 y 6.21 dependen de los valores de la presión del cilindro hidráulico. Estos valores de presión no son constantes ya que dependen de la velocidad con que se mueve la carga y del flujo de aceite que entra y sale de las cámaras del cilindro.

Es por lo que utilizaremos las ecuaciones 6.22, 6.23 y 6.24 para describir el comportamiento de la presión de los cilindros.

$$\dot{P}_1 = \frac{\beta_E}{V_{01} + A_1 L} (-A_1 \dot{L} + Q_1) \quad (6.22) \quad [16]$$

$$\dot{P}_2 = \frac{\beta_E}{V_{02} - A_2 L} (A_2 \dot{L} - Q_2) \quad (6.23) \quad [16]$$

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (6.24) \quad [16]$$

β_E es el módulo de compresibilidad, V_{01} y V_{02} son los volúmenes iniciales en las cámaras del cilindro, A_1 y A_2 son las áreas del pistón en la cámara 1 y la cámara

2 respectivamente, Q_1 y Q_2 son los flujos en cada cámara y L es la apertura de la compuerta.

Como se explicó previamente el cilindro hidráulico diferencial tiene la capacidad de realizar movimiento en dos direcciones, pero para esto es necesario introducir aceite en una cámara y extraer el aceite de la otra cámara. Es por esto que se utilizan válvulas que permiten variar la dirección en que fluye el aceite, mediante la polarización de dos bobinas, tal como se muestra en la figura 6.11.

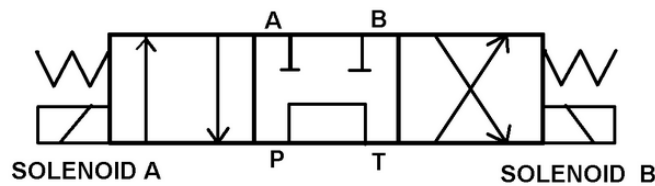


Figura 6.11 Electro válvula de 3 posiciones

La conexión entre la válvula y el cilindro es la mostrada en la figura 6.12, en donde P_s es la presión que ejerce la bomba y P_r es la presión del tanque.

El comportamiento de este tipo de válvulas se puede definir mediante las ecuaciones 6.25, 6.26 y 6.27.

$$Q_1 = c_v U_1 k_v x_d \sqrt{(P_s - P_1)} + c_v U_2 k_v x_d \sqrt{P_1 - P_r} \quad (6.25) [16]$$

$$Q_2 = c_v U_1 k_v x_d \sqrt{(P_2 - P_r)} + c_v U_2 k_v x_d \sqrt{P_s - P_2} \quad (6.26) [16]$$

$$c_v = \pi d_v \alpha_d \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (6.27) [16]$$

En donde U_x es el voltaje introducido a la válvula, k_v es una ganancia de la válvula, d_v es el diámetro de la válvula, ρ es la densidad del aceite, α_d es el coeficiente de descarga y x_d es el desplazamiento de la válvula.

En la figura 6.12 se muestra la conexión entre la compuerta y el circuito hidráulico conformado por una bomba, una válvula y un cilindro hidráulico. Al polarizar la bobina #1 la válvula direcciona el fluido proveniente de la bomba a la cámara #1 y el fluido de la cámara #2 al tanque y en el caso de polarizar la bobina #2 sucede lo contrario.

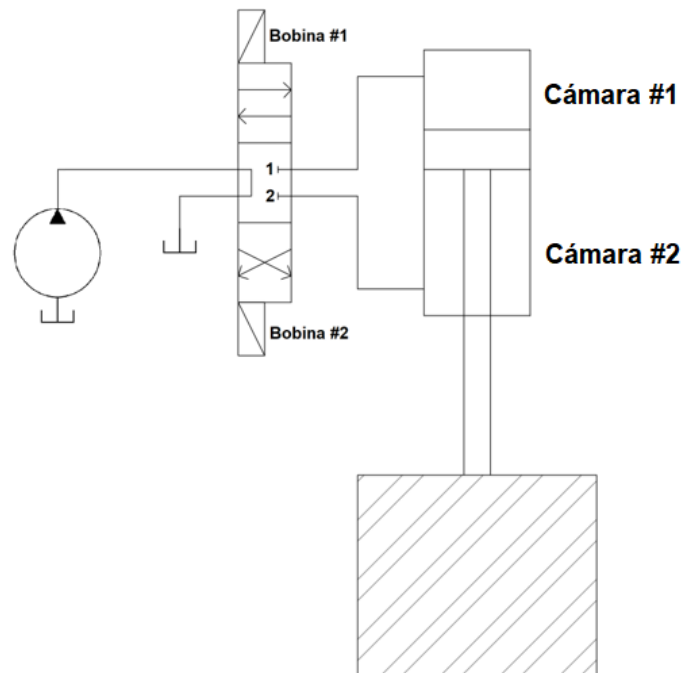


Figura 6.12 Conexión entre el circuito hidráulico y la compuerta.

6.4.2 Comportamiento del agua ubicada entre las compuertas de antecámara y la compuerta del desarenador.

Como se mencionó anteriormente, existen dos canales en los cuales se lleva a cabo el proceso de expulsión de arena, en la figura 6.13 se observa una vista superior de uno de los canales. De igual forma en la figura 6.14 se puede observar la vista lateral de uno de los canales.

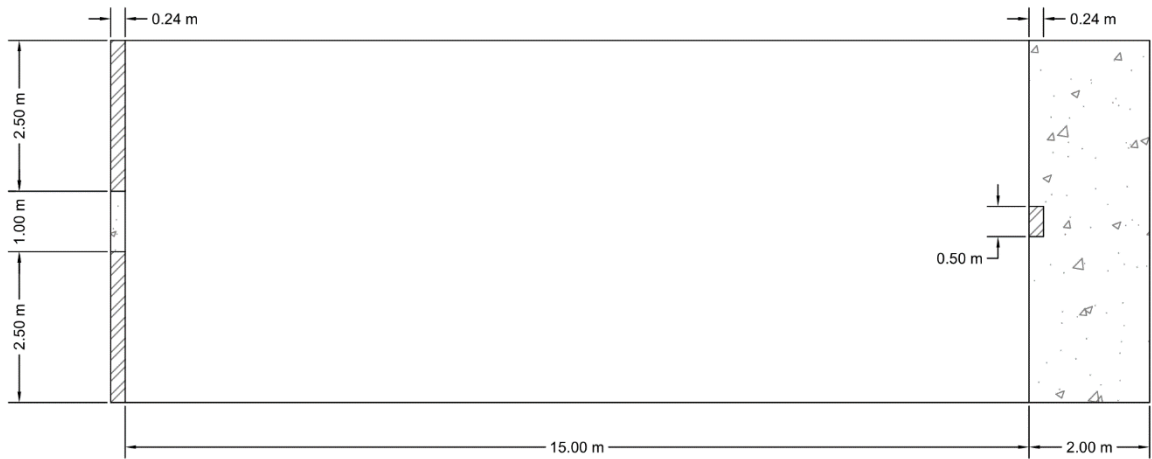


Figura 6.13 Vista superior del canal de uno de los canales.

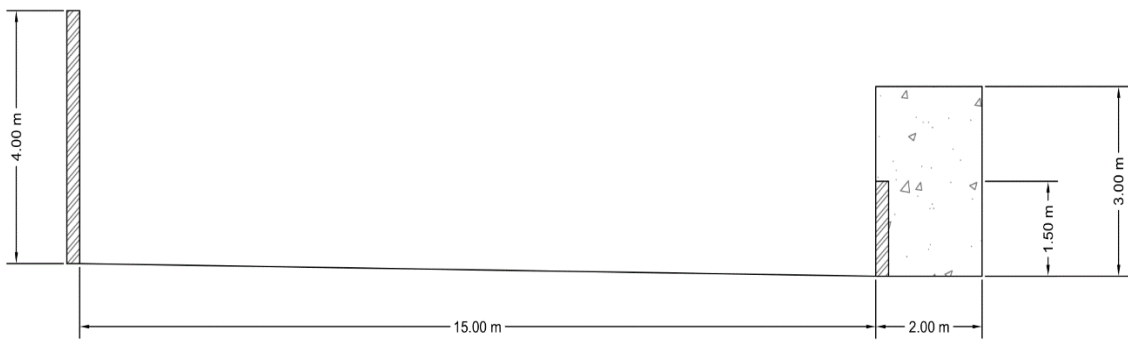


Figura 6.14 Vista lateral de uno de los canales

Para poder modelar el comportamiento de cada canal es necesario tomar en cuenta el flujo de entrada y de salida de esta sección.

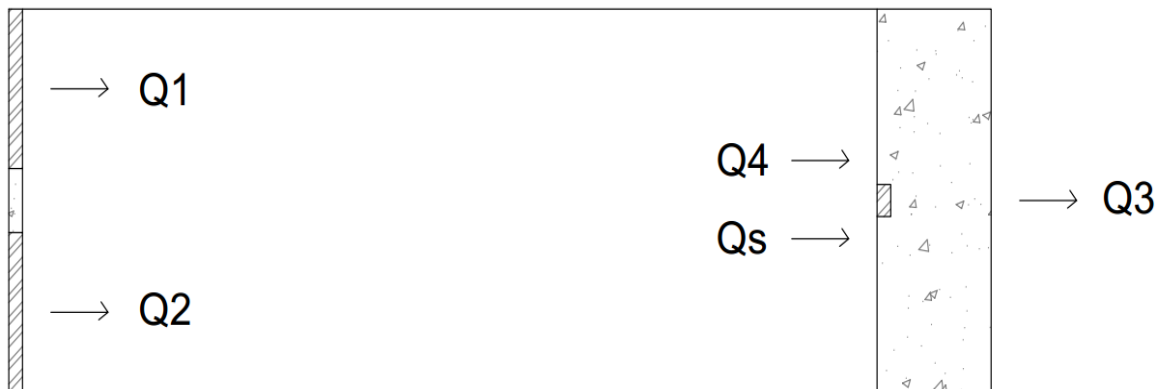


Figura 6.15 Flujos presentes en el canal.

En la figura anterior se puede constatar que están presentes cinco flujos. Q_0 y Q_1 son los flujos de entrada debido a las compuertas de la antecámara. Q_3 es el agua que es direccionada al embalse mediante el vertedero, Q_4 se genera cuando se abre la compuerta del desarenador y Q_s es el cambio del volumen de arena en el tiempo.

El cambio de altura en el canal es representado mediante la ecuación 6.28.

$$h_t = h_2 + h_s \quad (6.28)$$

En donde h_2 representa el nivel de agua y h_s el nivel de arena, en la siguiente sección se procede a la obtención de las ecuaciones que describen el comportamiento de estas dos variables en el tiempo.

a) Altura del agua.

Para poder determinar el cambio de altura del agua en el canal se deben tomar en cuenta el flujo de agua que entra a través compuertas de la antecámara, el agua que fluye sobre el muro y el flujo de agua que sale una vez abierta la compuerta del desarenador. El cambio de volumen del agua del canal en el tiempo se puede representar mediante la ecuación 6.29 y el cambio de altura en el tiempo la ecuación 6.30.

$$\frac{dV_2}{dt} = Q_0 + Q_1 - Q_3 - Q_4 \quad (6.29)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_{canal}} [Q_0 + Q_1 - Q_3 - Q_4] \quad (6.30)$$

Seguidamente se desarrollarán las fórmulas que describen los flujos de la ecuación 6.30.

1. Flujo a través de las compuertas de la antecámara:

Para determinar la ecuación de flujo de la compuerta de la antecámara es necesario contemplar la altura del nivel agua del lado izquierdo de la compuerta (h_l) y la apertura (L_a).

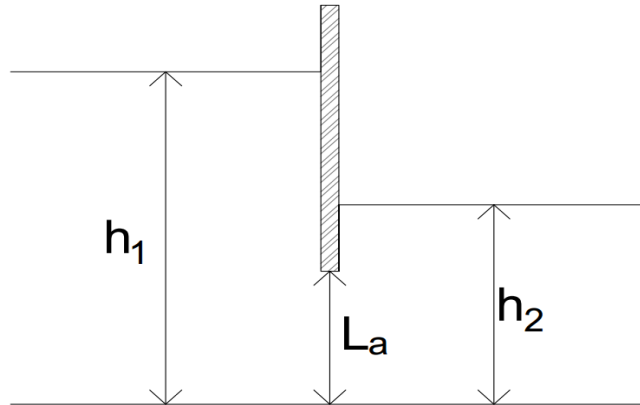


Figura 6.16 Vista lateral de la compuerta de la antecámara.

El flujo del agua a través de una compuerta se representa mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_{1,2} = C_d b L_a \sqrt{2gh_1} \quad (6.31)[10]$$

$$C_d = \frac{0.61}{\sqrt{[1+0.61(\frac{L_a}{h_1})]}} \quad (6.32)[10]$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga de la compuerta, b es el ancho de la compuerta, L_a es la apertura de la compuerta y h_1 es el nivel del agua entrante.

2. Flujo a través de una represa rectangular:

En la imagen 6.13 se pudo observar que además del flujo de salida que produce la compuerta del desarenador existe un flujo debido a un muro que limita el agua que pasa al embalse.

Este flujo de agua se representa mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_3 = \frac{2}{3} C_d B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (6.33) [10]$$

$$C_d = 0.602 + 0.083 \frac{H}{P} \quad (6.34) [10]$$

$$H = h_2 - P \quad (6.35)[10]$$

Donde H es el nivel máximo que alcanza el agua sobre el muro, B es el ancho del muro, g es la gravedad, C_d es el coeficiente de descarga y P es la altura del muro.

3. Flujo a través de la compuerta del desarenador.

Luego de cierto tiempo en el canal se encontrará cierta cantidad de arena (h_s) y agua (h_2), tal como se muestra en la figura 6.17.

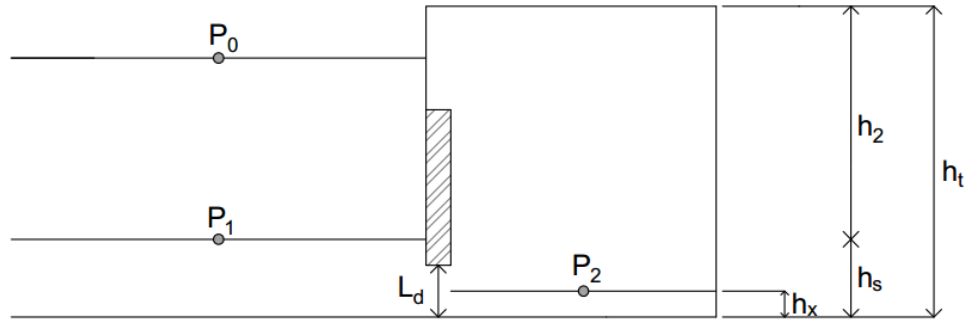


Figura 6.17 Vista lateral de la compuerta del desarenador.

Con el fin de simplificar el modelo se asume que el agua y la arena son ideales y que no se mezclan. La descripción del flujo de agua a través de la compuerta se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_4 = C_{d_des} b_d (L_d - h_s) \sqrt{2gh_1} \quad (6.36) [10]$$

$$C_{d_des} = \frac{0.61}{\sqrt{[1 + 0.61(\frac{L_d - h_s}{h_2})]}} \quad (6.37)[10]$$

Al sustituir las ecuaciones que describen los flujos del canal en la ecuación 6.30 se obtiene el siguiente resultado.

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_{canal}} \left[\frac{0.61}{\sqrt{[1 + 0.61(\frac{L_{a,1}}{h_1})]}} b_a L_{a,1} \sqrt{2gh_1} + \frac{0.61}{\sqrt{[1 + 0.61(\frac{L_{a,2}}{h_1})]}} b_a L_{a,2} \sqrt{2gh_1} - \left[0.602 + 0.083 \frac{(h_2 - P)}{P} \right] \left[\frac{2}{3} B \sqrt{2g} (h_2 - P)^{\frac{3}{2}} \right] - \frac{0.61}{\sqrt{[1 + 0.61(\frac{L_d - h_s}{h_2})]}} b_d (L_d - h_s) \sqrt{2gh_1} \right] \quad (6.38)$$

b) Altura de la arena.

Para describir el cambio del nivel de arena una vez abierta la compuerta se utilizó la ecuación de Bernoulli (6.32) y la ecuación de continuidad (6.33).

$$\frac{1}{2} \rho_s v_2^2 + \rho_s g h_x = \rho_s g (h_2 - H_s) + \frac{1}{2} v_1^2 \rho_s + \rho_s g h_s \quad (6.32)$$

$$Q_s = v_1 A_1 = v_2 A_2 \rightarrow v_1 = \frac{Q_s}{A_1} \text{ y } v_2 = \frac{Q_s}{A_2} \quad (6.33)$$

Al sustituir la ecuación 6.33 en 6.32 se obtiene la ecuación 6.34.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{Q_s}{A_2} \right)^2 + g h_x = g(h_2 - h_s) + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_s}{A_1} \right)^2 + g h_s \quad (6.34)$$

Seguidamente se realiza el despeje de Q_s .

$$Q_s = h_s h_x b \sqrt{\frac{2g(h_2 - h_x)}{h_s^2 - h_x^2}} \quad (6.35)$$

$$h_x = 0.61 L_d \quad (6.36)$$

$$Q_s = 0.61 h_s L_d b_d \sqrt{\frac{2g(h_2 - 0.61 L_d)}{h_s^2 - (0.61 L_d)^2}} \quad (6.37)$$

$$\frac{dh_s}{dt} = \frac{0.61 h_s L_d b_d}{A_{canal}} \sqrt{\frac{2g(h_2 - 0.61 L_d)}{h_s^2 - (0.61 L_d)^2}} \quad (6.38)$$

En la figura 6.18 se muestra una representación mediante diagramas de bloques de las ecuaciones previamente planteadas y las cuales se utilizarán en el proceso de simulación.

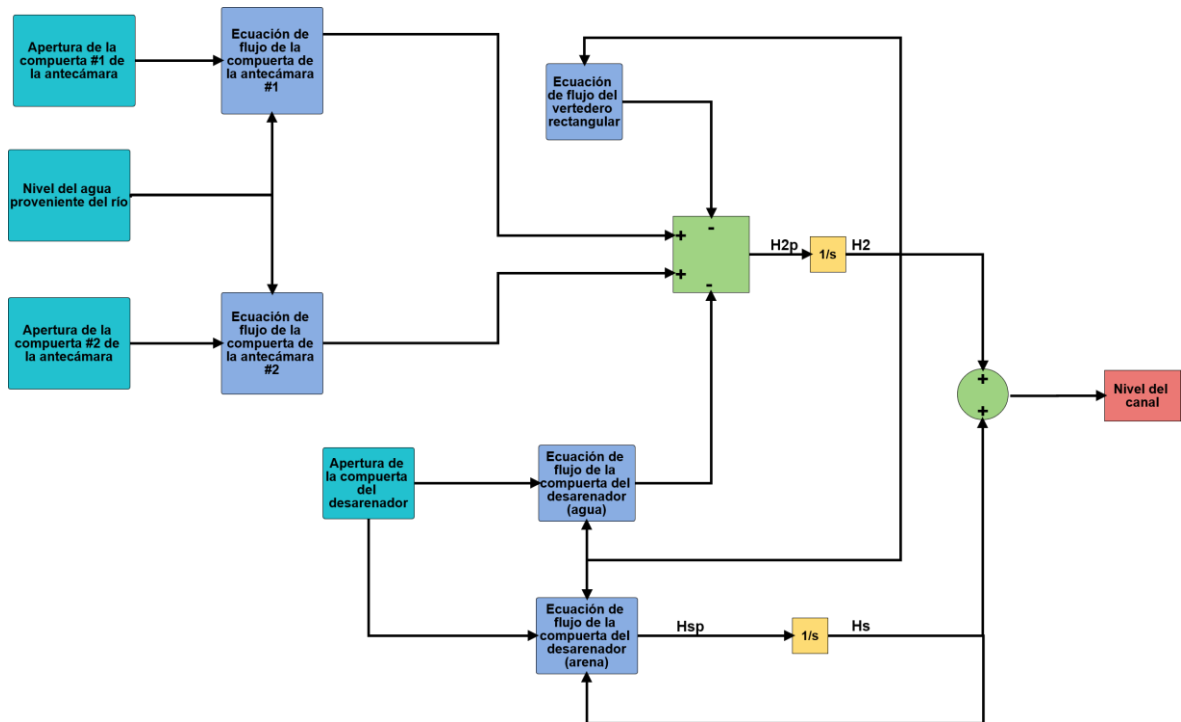


Figura 6.18 Diagrama de bloques de la dinámica del canal.

6.5 Selección de componentes

6.5.1 Selección del controlador

Se eligió un PLC como controlador, esto se debe a que tiene la capacidad de trabajar con voltajes superiores a los 5V, y a que es diseñado para operar en ambientes de tipo industrial y a que su vida útil es de alrededor de 7 a 10 años.

Para la selección del PLC se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) La mayoría del equipo de control que se utiliza en la CH Canalete es de la empresa Siemens, por lo que se desea mantener esta homogeneidad.
- 2) El PLC debe ser compatible con el protocolo de comunicación utilizado por el software WinCC.
- 3) Debe trabajar con voltajes entre 24 y 120 voltios, debido a que gran parte de los componentes que ofrece el mercado trabajan con estos voltajes.

Luego de estudiar el catálogo de PLCs de la empresa Siemens, se consultó con el distribuidor y con los ingenieros de CONELECTRICAS y se llegó a la conclusión de que el PLC que mejor se adapta a el proyecto es el SIMATIC S7-1200. En la figura 6.19 se muestra una fotografía del PLC seleccionado.



Figura 6.19 PLC S7-1200 SIEMENS

En la tabla 6.1 se detallan algunas de las características de este PLC.

Tabla 6.1 Datos del PLC S7-1200 SIEMENS

Entradas digitales	14
Salidas digitales	10
Módulos de expansión	14
Tensión de alimentación	24V DC
Consumo, máx	1500 mA; CPU con todos los módulos de ampliación
Tiempo para operaciones de bits, típ.	0.008 μ s/instrucción
TCP/IP	Sí

En sí son necesarias 30 entradas y 20 salidas, pero dado a que es el doble de la capacidad del PLC, es necesario agregar módulos de entradas y salidas.

En las tablas 6.2 y 6.3 se muestran algunas de las características de los módulos de entradas y salidas respectivamente.

Tabla 6.2 Datos del módulo de entrada del PLC S7-1200

Entradas digitales	8
Tensión de alimentación	24V DC
Consumo, máx	105 mA
Tensión de entrada para señal "0"	5V DC, con 1mA
Tensión de entrada para señal "1"	15V DC, con 2.5mA

Tabla 6.3 Datos del módulo de salidas del PLC S7-1200

Salidas digitales	8
Tensión de alimentación	24V DC
Consumo, máx	120 mA
Tensión de salida para señal "0"	0.1V DC, con carga de 10k Ω
Tensión de salida para señal "1"	20V DC

Por último, para alimentar el PLC y sus módulos se utilizó una fuente con una salida de 24V en corriente directa. En la tabla 6.4 se detallan algunas de las características de la fuente.

Tabla 6.4 Datos de la fuente del PLC S7-1200 SIEMENS

Entrada	AC monofásica
Tensión de alimentación	120V AC
Fusible de entrada incorporado	T 3.15A/250V (no accesible)
Tensión de salida	24V DC estabilizada y aislada galvánicamente
Intensidad nominal la nom "1"	2.5A

6.5.2 Selección de los sensores de final de carrera

En lo que respecta a los sensores de final de carrera, se decidió utilizar unos de tipo inductivos, los XS630B2PAL01M12 de Schneider.

Estos sensores son adecuados para trabajar en un ambiente húmedo como el de las compuertas ubicadas en el desarenador. Otra de las razones para utilizarlos es que trabajan a 24V, de forma que son compatibles con el PLC seleccionado.

6.6 Diseño de la lógica programada en el PLC

En la programación del PLC se debieron tomar en cuenta varios aspectos, los cuales son descritos a continuación:

- 1) Debe haber dos modos de operación: local y remoto.

- 2) El modo local debe tener mayor prioridad, de manera que, si se está operando el sistema en modo local, no se debe permitir llevar a cabo ninguna acción mediante la interfaz gráfica.
- 3) Cuando se trabaje en modo remoto debe informar al usuario de las condiciones del sistema.
- 4) En caso de existir sobrepresión se deshabilitará el uso de las compuertas, tanto de forma local como remota, esto hasta que la presión vuelva a un nivel adecuado.
- 5) Si el nivel de aceite no es suficiente para la operación de las compuertas no se permitirá la activación del mismo.
- 6) En caso de existir una sobrecorriente se bloqueará la utilización de las compuertas y el encendido del motor.

A partir de los puntos señalados anteriormente se diseñó la siguiente lógica de control, la cual está dividida en distintas secciones.

6.6.1 Lógica de la selección del modo de operación

Para utilizar el sistema es necesario seleccionar un modo de operación. Una vez seleccionado el modo de operación se procederá a indicar al usuario que el sistema se puede operar ya sea desde la casa de máquinas o en el desarenador.

En la figura 6.20 se muestra el diagrama de flujo de la lógica de selección del modo de operación.

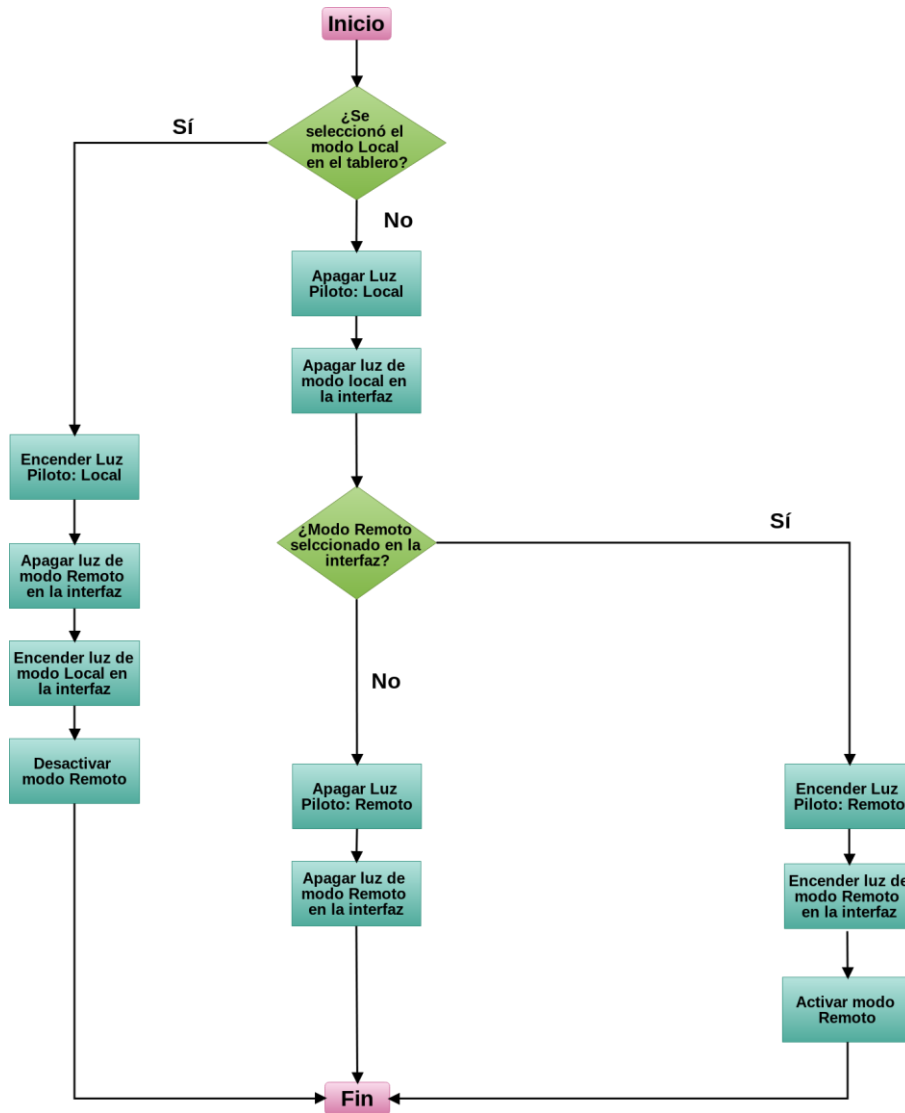


Figura 6.20 Diagrama de flujo de la lógica de selección del modo de operación

6.6.2 Encendido y apagado del sistema

Se puede observar en la figura 6.21 el diagrama de flujo de la lógica que se encargará de encender y apagar el sistema. Este se puede realizar de forma local gracias a la utilización de relés. Cabe decir que para poder encender el sistema el nivel de aceite debe ser suficiente para accionar las compuertas.

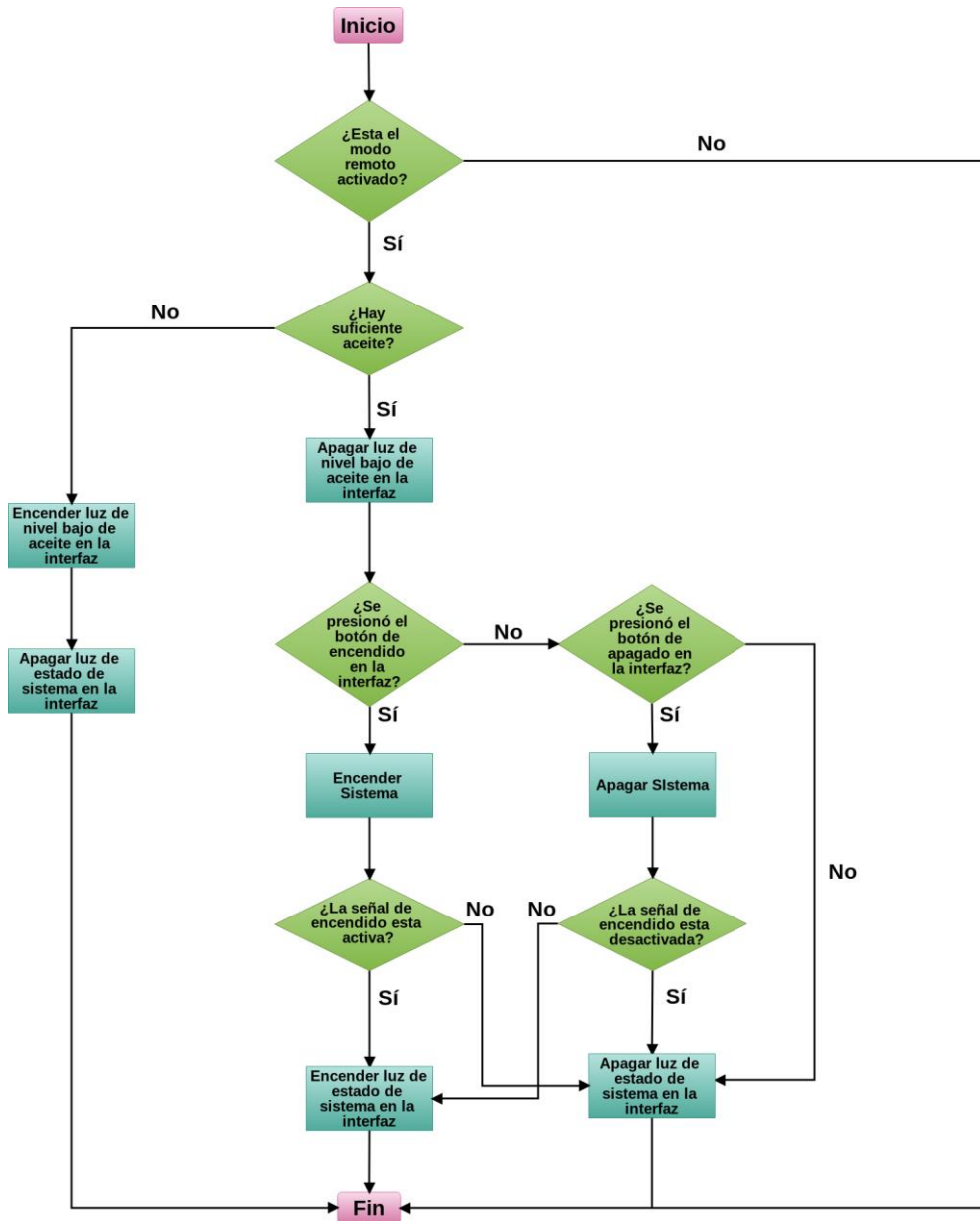


Figura 6.21 Diagrama de flujo de la lógica de encendido y apagado del sistema

6.6.3 Encendido y apagado del motor

Para poder encender y apagar el motor la lógica tendrá el formato del diagrama de flujo en la figura 6.22. La activación del motor desde la casa de máquinas requiere que el modo remoto esté activo, que el sistema se encuentre encendido y que no exista sobrecorriente. Así mismo esta sección se encarga de indicarle al usuario, tanto en la interfaz como en el tablero, el estado del motor y si se presentó una sobrecorriente.

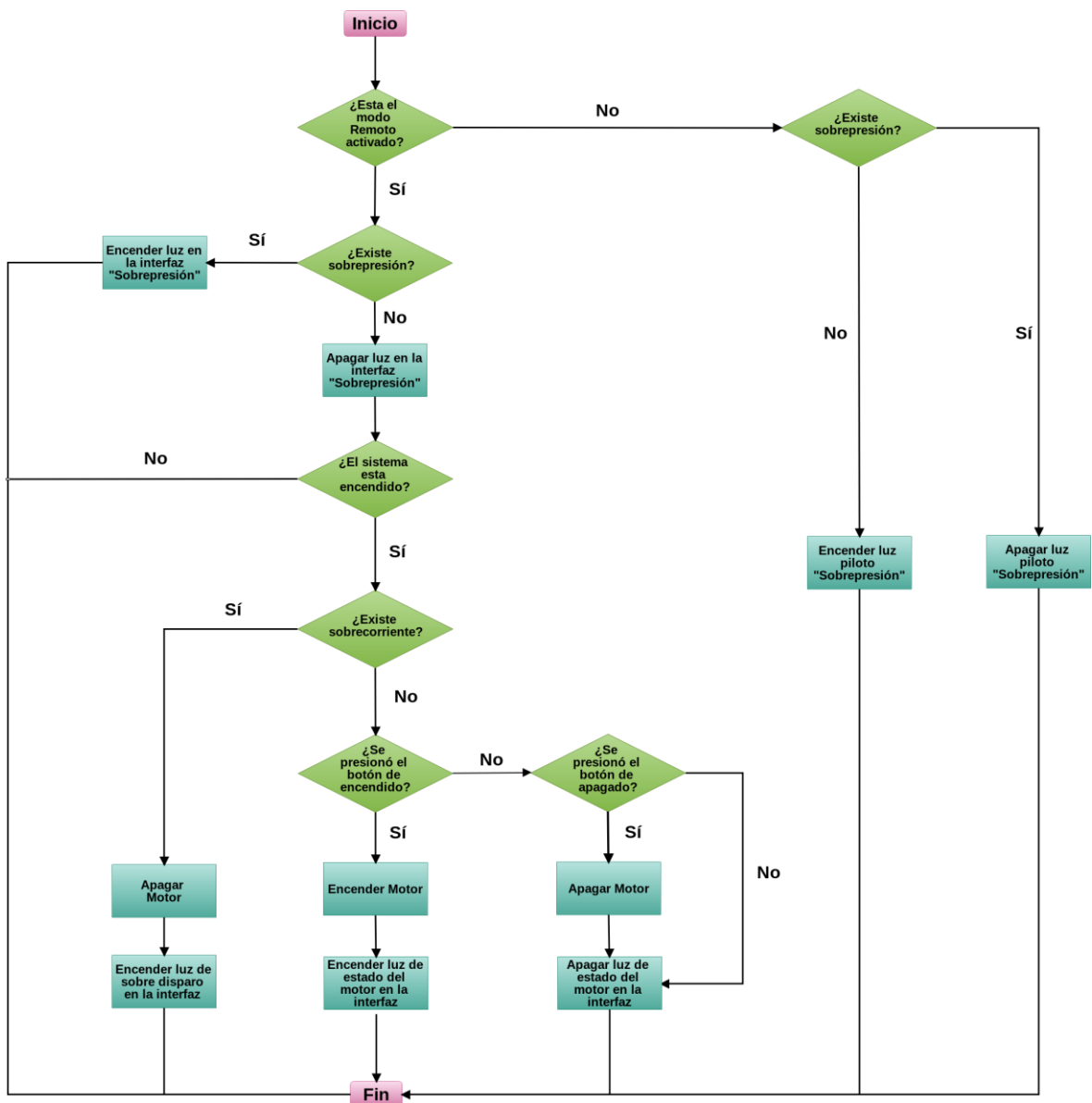


Figura 6.22 Diagrama de flujo de la lógica de encendido y apagado del motor

6.6.4 Operación de las compuertas

En la figura 6.23 se muestra el diagrama de flujo de la lógica que se encargará del accionamiento de las compuertas y en la tabla 6.5. se muestran las variables y sus funciones asociadas

Para operar las compuertas desde la casa de máquinas es necesario que el sistema se encuentre encendido, que el modo remoto esté activado y que no exista

sobrepresión. En el caso del modo local es necesario que el sistema se encuentre encendido, que en el tablero se haya seleccionado el modo local y que no exista sobrepresión.

Tabla 6.5 Variables de la figura 6.23

Variable del diagrama de flujo	Función asociada a la variable
A	¿Está el sistema activado?
B	¿Hay suficiente aceite?
C	¿Existe sobre corriente?
D	¿Existe sobre presión?
E	¿Está el motor activado?
F	¿Está el modo local activado?
G	¿Se presionó el botón de abrir la compuerta en la interfaz?
H	¿Se presionó el botón de cerrar la compuerta en la interfaz?
I	¿Está realizando la acción de cerrar la compuerta?
J	Abrir compuerta
K	Cerrar compuerta
L	Activar luz digital: Abriendo compuerta
M	Activar luz digital: Cerrando compuerta
N	¿Se presionó el botón de detención de emergencia?
O	¿La compuerta terminó su recorrido?
P	Activar luz digital: Compuerta abierta
Q	¿Está realizando la acción de abrir la compuerta?
R	Activar luz digital: Compuerta cerrada
S	¿Está el modo remoto activado?
T	¿Se presionó el botón de cerrar en el tablero?
U	¿Se presionó el botón de abrir en el tablero?

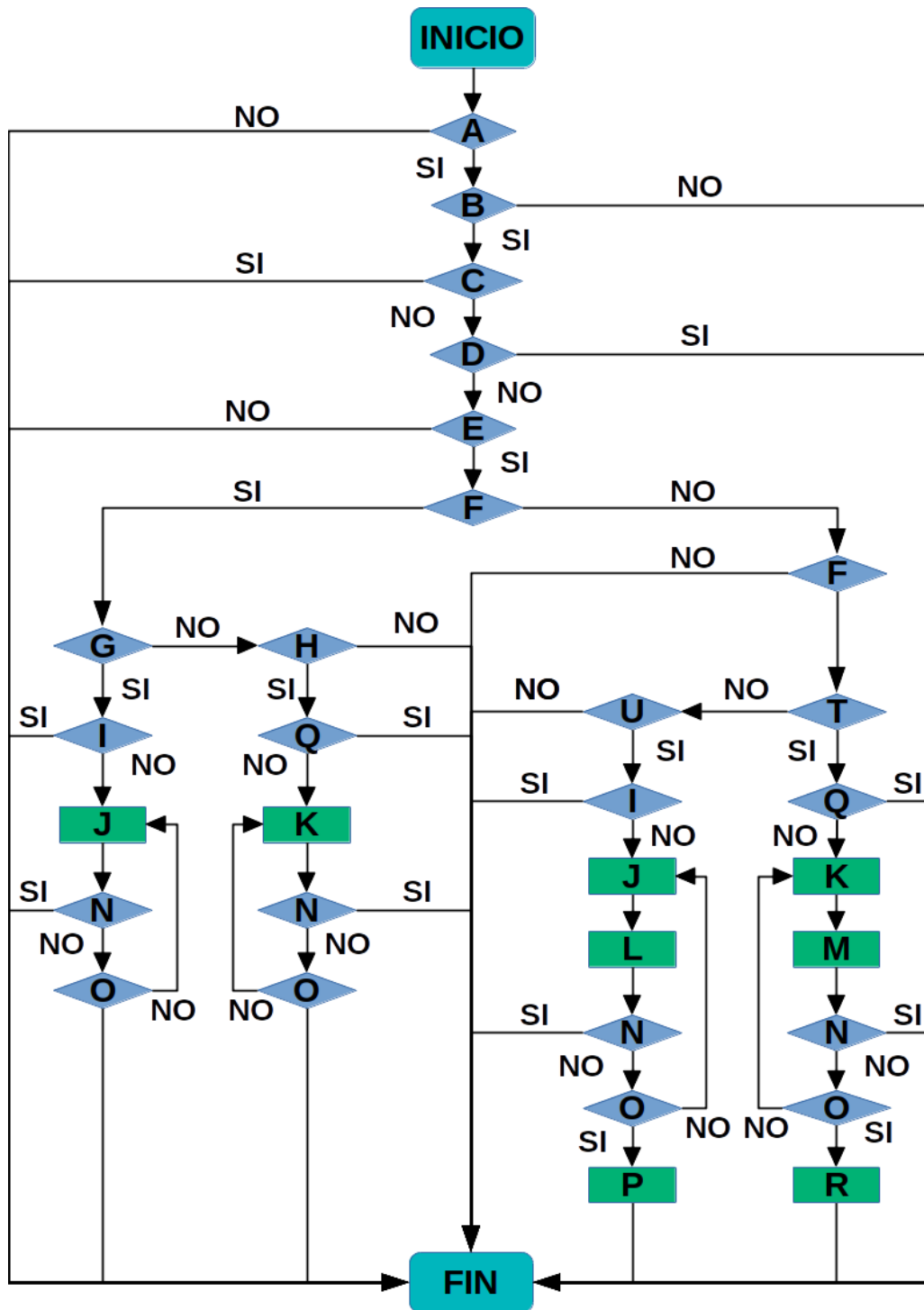


Figura 6.23 Diagrama de flujo de la lógica de accionamiento de las compuertas.

6.6.5 Detención de las compuertas

En la figura 6.24 se muestra el diagrama de flujo que se encarga de llevar a cabo la detención de emergencia. Como se puede observar toma en cuenta los 2 modos de operación (local y remoto).

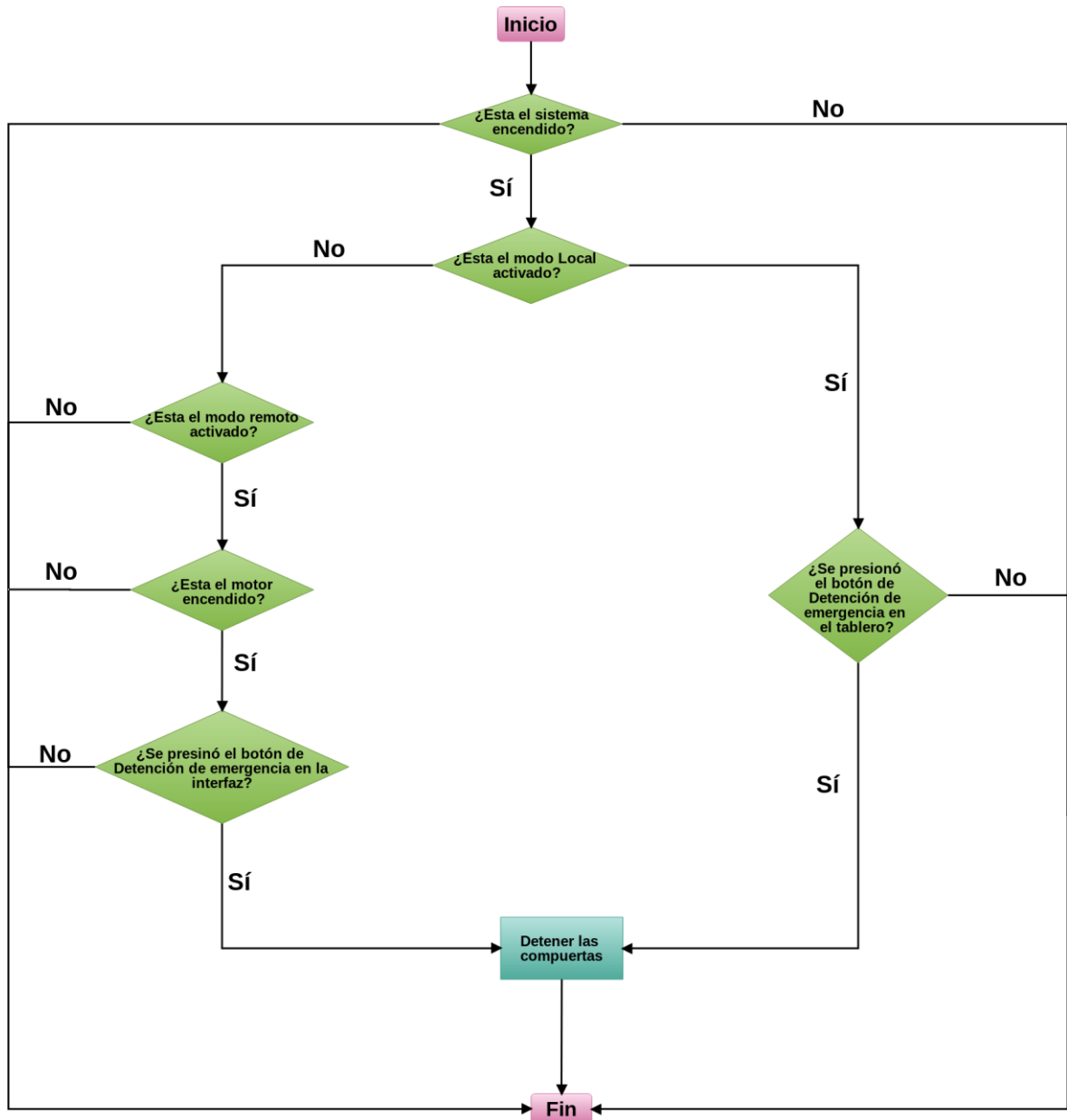


Figura 6.24 Diagrama de flujo de la lógica de detención de las compuertas.

6.7 Lógica programada en el PLC

La programación del PLC se realizó utilizando lógica de escalera, la cual permite crear programas de control en segmentos. Dado a lo anterior, se decidió programar el control lógico en varios segmentos. A continuación, se muestra cada uno de los segmentos programados en el PLC.

6.7.1 Segmento de activación del sistema y selección de modo de operación.

Como se observa en la figura 6.25, en este segmento se encuentra la lógica que permite seleccionar en qué modo de operación se desea operar. Así mismo se encuentra la lógica que lleva a cabo el encendido y el apagado del sistema.

En este segmento la variable “M_Ta_Modo” indica si ha sido seleccionado el modo de operación local en el tablero. De no ser así, será posible utilizar el modo remoto, esto cuando la señal “B_In_Modo _Remoto” se encuentre activa.

La variable “Modo_Remoto_Activado” es la encargada de regular las acciones que se pueden realizar de forma remota. La señal de entrada “Switch_Nivel” indica si la cantidad de aceite es suficiente o no, de manera que esta variable se encarga de validar la activación del sistema. En el caso de que la cantidad de aceite sea óptima, y el modo remoto esté desbloqueado el usuario podrá llevar a cabo la acción de encendido del sistema, mediante la variable “B_In_Encender_Sistema”. Esto hace que la salida “Encender_Sistema” polarice la bobina del relé ubicado en el gabinete.

También se tiene la acción de apagar el sistema, la cual se realiza mediante la variable “B_In_Apagar_Sistema”. “Estado_Sistema” es una señal proveniente del gabinete, la cual permite conocer si el sistema se encuentra encendido o apagado.

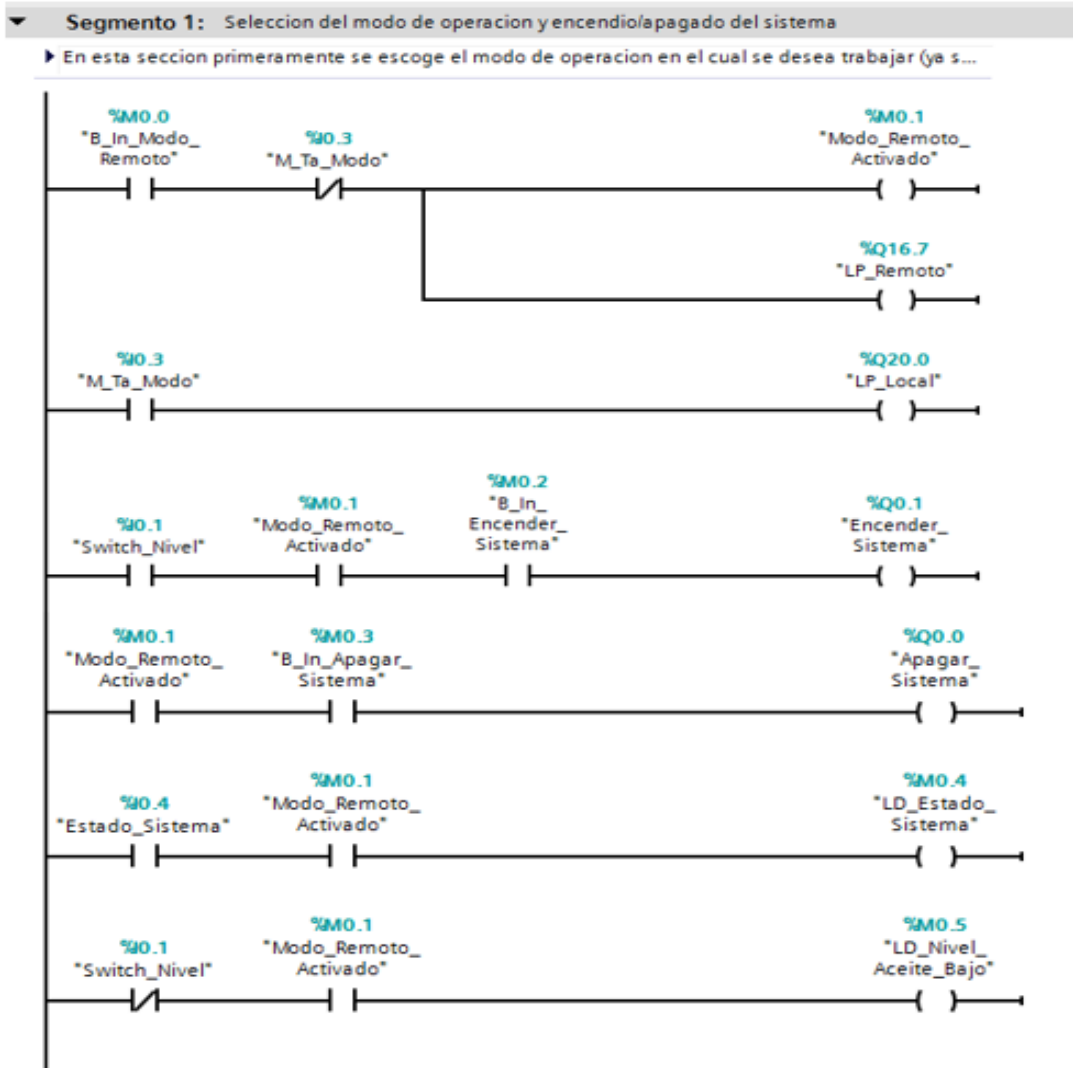


Figura 6.25 Programación en escalera de la lógica de selección del modo de operación y encendido y apagado del sistema.

6.7.2 Segmento de encendido y apagado del motor

La activación del motor se realizará en este segmento, sin embargo, para poder llevarla a cabo es necesario que el sistema se encuentre encendido y que no se haya disparado la protección del guardamotor a causa de una sobre corriente. Esto es indicado por la variable “Sobre_Corriente”.

Una vez que se cumplan todas las condiciones para la operación del motor, se puede realizar la activación del motor mediante la variable “B_In_Encender_Motor”, haciendo que la señal de salida “Encender_Motor” active el relé ubicado en el gabinete. Así mismo, el apagado del motor se lleva a cabo

mediante la bandera “B_In_Apagar_Motor”. Una vez que se detecte que la protección del guardamotor se ha activado, se procederá a apagar el motor.

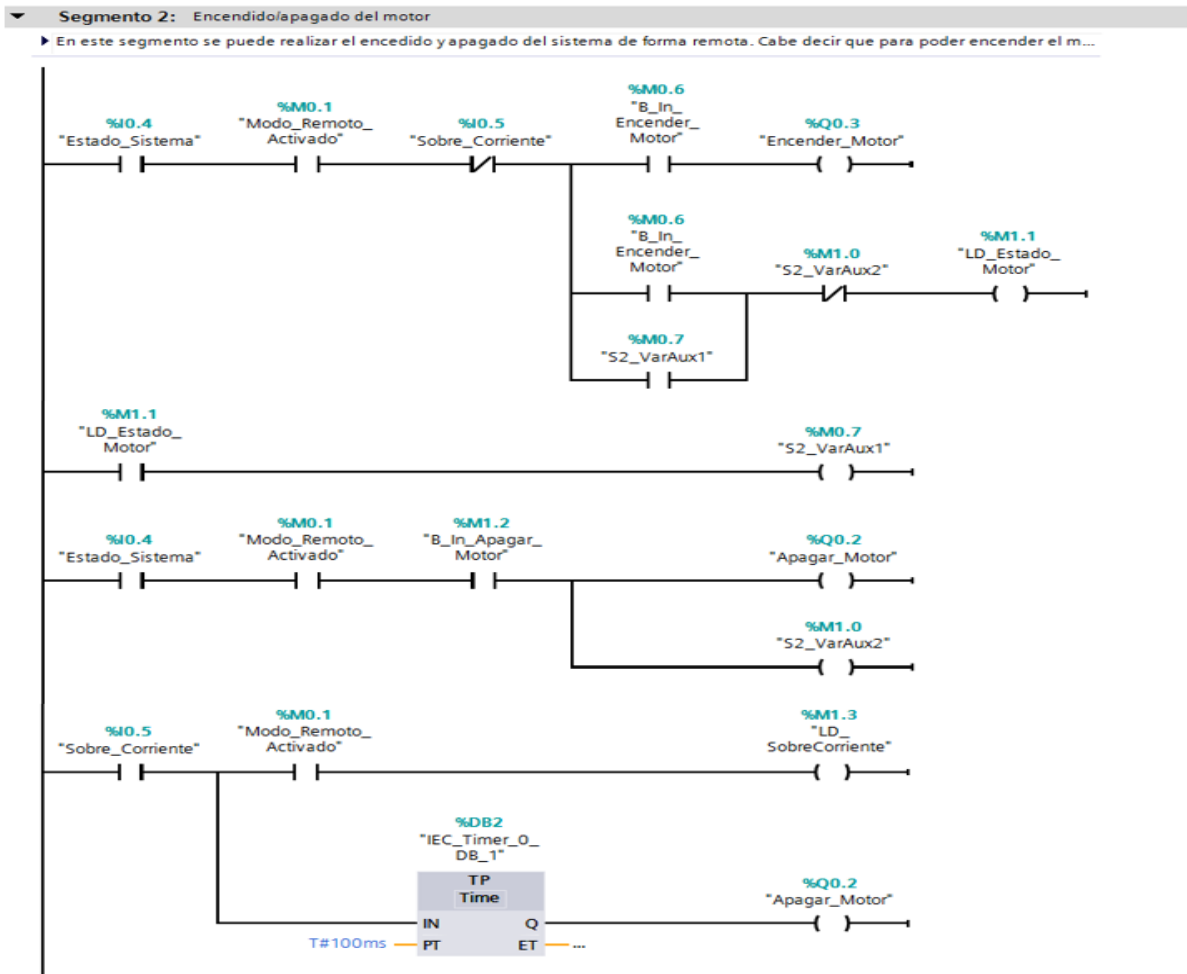


Figura 6.26 Programación en escalera de la lógica de encendido y apagado del sistema.

6.7.3 Segmento de accionamiento de la compuerta 1

La lógica que se encarga de realizar las acciones de abrir y cerrar las compuertas se muestra en la 6.27. En esta se aprecia la programación para la compuerta 1, sin embargo, la lógica es igual para las otras compuertas sólo que con otras variables.

El sistema debe estar activado (“Estado_Sistema”), no debe haber una sobrecorriente (“Sobre_Corriente”) y la presión se adecuada para la operación de las compuertas (“Switch_Presión”). En caso de cumplirse las condiciones anteriores se podrá llevar a cabo la operación de las compuertas.

Las entradas para la operación de la compuerta en el modo local son “B_Ta_Abrir_COM1” y “B_Ta_Cerrar_COM1”, se encargan de abrir y cerrar la compuerta respectivamente. De forma similar, para accionar las compuertas desde la casa de máquinas es necesario que el modo remoto se encuentre activado y que el motor haya sido encendido desde la casa de máquinas. Luego se podrán realizar las acciones mediante las variables “B_In_Abrir_COM1” y “B_In_Cerrar_COM1”, las cuales se ajustan por medio de botones que se encuentran en la interfaz gráfica.

Se utilizan variables auxiliares con el fin de mantener la acción de apertura o clausura hasta que el final de carrera indique la apertura o cierre completo o se haya presionado el botón de detención.

▼ Segmento 3: Accionamiento de la compuerta 1

► En el presente se lleva a cabo el accionamiento de una de las compuertas. Para poder abrir la compuerta 1 por ejemplo es necesario que el sistema se encuentre encendido y que no exista sobrepresión. Luego uno de los ...

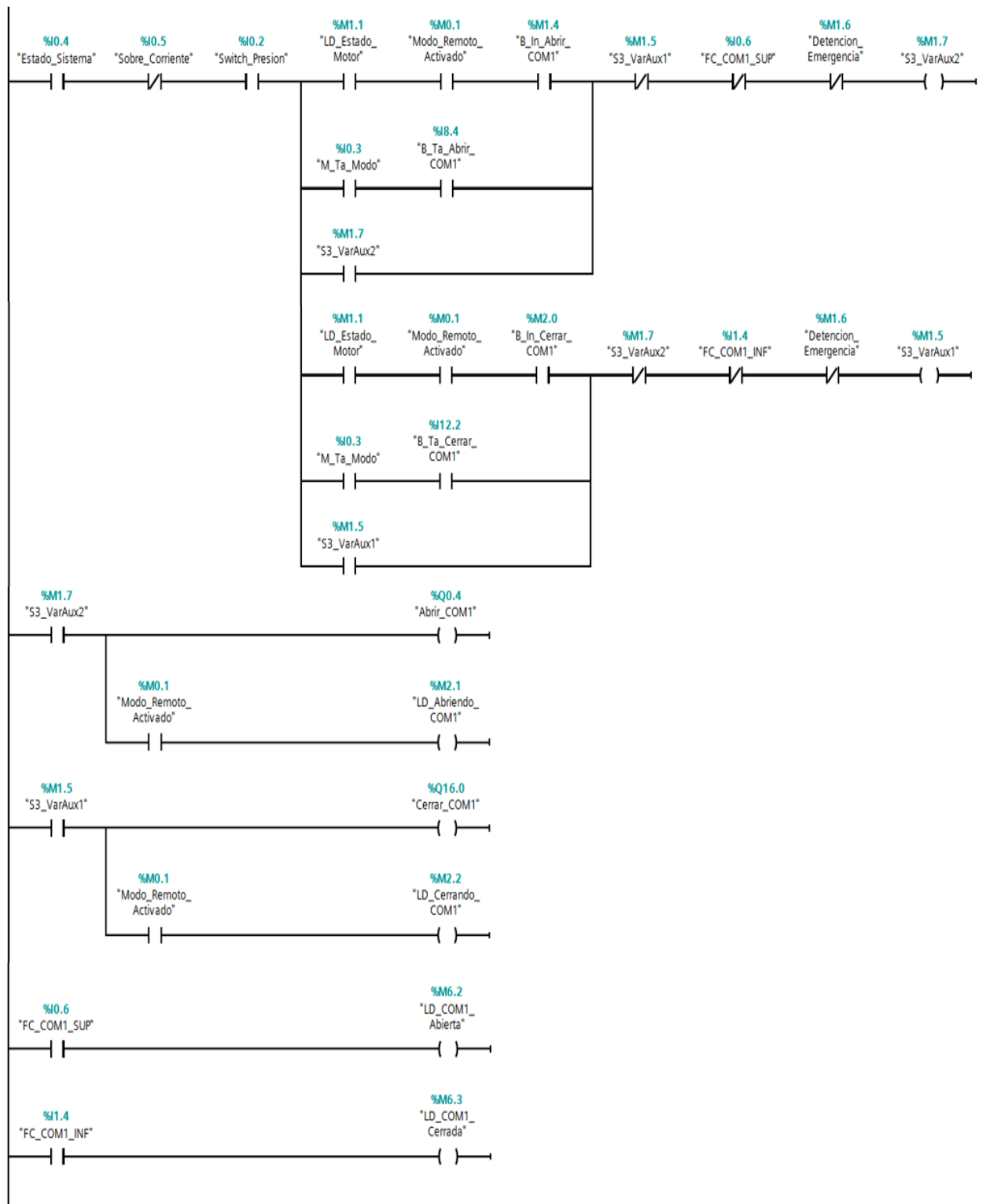


Figura 6.27 Programación en escalera de la lógica de accionamiento de las compuertas.

6.7.4 Segmento de detención de emergencia

Este se encarga de la detención de las compuertas. En la figura 6.27 se puede observar la programación realizada. En sí se contará con dos formas de detener las compuertas. Una es mediante el botón ubicado en el tablero y la otra mediante el botón de la interfaz gráfica.

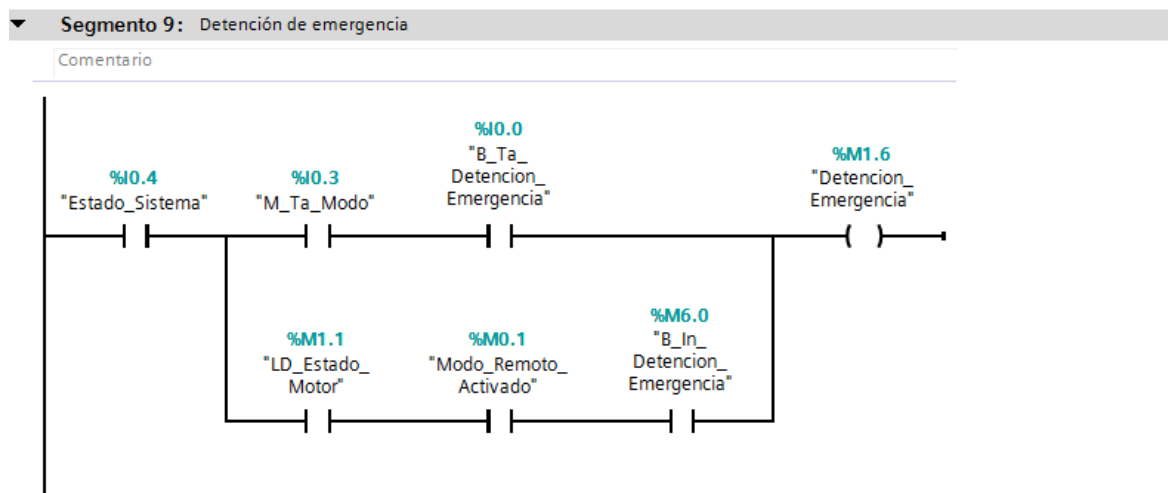


Figura 6.28 Programación en escalera de la lógica de detención de emergencia

Capítulo 7 : Resultados y análisis.

7.1 Simulación del modelo.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del modelo planteado con su respectivo análisis, para llevar a cabo las simulaciones se utilizó la herramienta Simulink del software MATLAB. Los valores utilizados en las simulaciones se muestran en las tablas 7.1 y 7.2.

Tabla 7.1 Variables correspondientes a los pistones de las compuertas de la antecámara y el desarenador.

	Variable de la simulación	Valor	Unidad
Datos del pistón antecámara	Diámetro de la camisa del pistón	0,17145	m
	Diámetro del vástago	0,0635	m
	Área cámara #1 del cilindro	0,023075155	m ²
	Área cámara #2 del cilindro	0,019909839	m ²
	Carrera del pistón	4,2418	m
	Volumen inicial cámara #1	0,097880194	m ³
	Volumen inicial cámara #2	0,084453556	m ³
	Masa de la compuerta	18840	kg
	Ancho de la compuerta	2,5	m
	Profundidad de la compuerta	0,24	m
	Módulo volumétrico de compresión	1,50E+09	Pa
Datos del pistón desarenador	Diámetro de la camisa del pistón	0,127	m
	Diámetro del vástago	0,1016	m
	Área cámara #1 del cilindro	0,012661265	m ²
	Área cámara #2 del cilindro	0,004558055	m ²
	Carrera del pistón	2,159	m
	Volumen inicial cámara #1	0,027335671	m ³
	Volumen inicial cámara #2	0,009840842	m ³
	Masa de la compuerta	1413	kg
	Ancho de la compuerta	0,5	m
	Profundidad de la compuerta	0,24	m
	Módulo volumétrico de compresión	1,50E+09	Pa

Tabla 7.2 Variables correspondientes al canal, las válvulas y otros.

	Variable de la simulación	Valor	Unidad
Datos del canal	Ancho del canal	6	m
	Largo del canal	15	m
	Área del canal	90	m ²
	Altura del vertedero	3	m
Datos de las válvulas	Coefficiente de descarga	0,029228094	S. U
	Constante de la válvula	0,0083333333	1/V
	Presión del tanque	0	MPa
	Presión de bombeo	82,7	MPa
	Desplazamiento de la válvula	0,0321	m
	Densidad del aceite	874	kg/m ³
	Diámetro del agujero de la válvula	0,013462	m
Otros	Coefficiente de fricción	0,18	S. U
	Densidad del agua	997	kg/m ³
	Densidad de la arena	1500	kg/m ³
	Gravedad	10,8	m/s ²

7.1.1 Simulación de la dinámica de las compuertas y del canal.

En la figura 7.1 se muestra una simulación que integra el cambio del nivel de agua en el canal y del desplazamiento de las compuertas. Para esta simulación se realizaron las siguientes acciones:

- 1) La apertura de la compuerta #1 de la antecámara en el segundo 5.
- 2) En el minuto 3 se abrió la compuerta #2 de la antecámara.
- 3) El cierre de la compuerta #1 en el minuto 7 con 45 segundos.
- 4) El cierre de la compuerta #2 en el minuto 10.
- 5) La apertura de la compuerta del desarenador en el minuto 13.
- 6) En el minuto 26 se cerró la compuerta del desarenador.

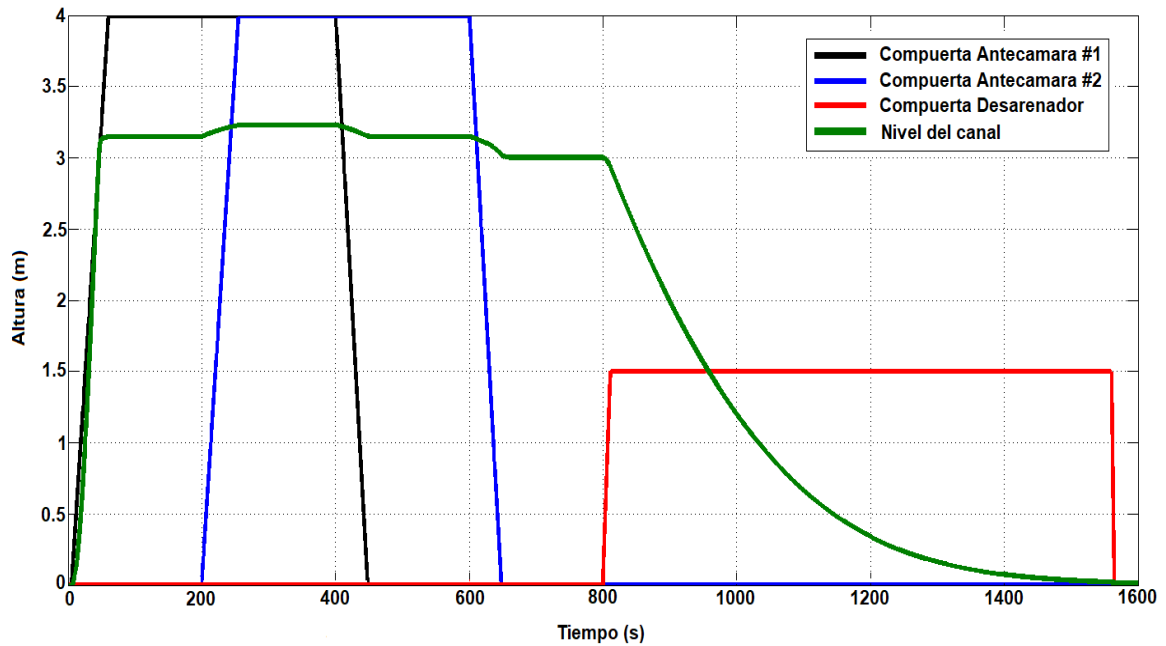


Figura 7.1 Simulación de la dinámica del nivel de agua en el canal, de las compuertas de la antecámara y de la compuerta del desarenador.

En la figura 7.2 se muestra la apertura de la compuerta #1 de la antecámara y en la figura 7.3 el cierre de esta. De la figura 7.2 se extrae que el tiempo necesario para abrir la compuerta por completo es de 1 minuto aproximadamente. Y en la figura 7.3 se observa que el tiempo de cierre de la compuerta es de aproximadamente 47 segundos.

La diferencia de tiempos entre la apertura y el cierre de la compuerta es acorde a lo esperado ya que la fuerza que ejerce el pistón cuando cierra la compuerta es mayor a la fuerza de apertura y a que cuando se cierra la compuerta el peso de esta genera una fuerza a favor, haciendo así que el tiempo de apertura sea mayor al de cierre.

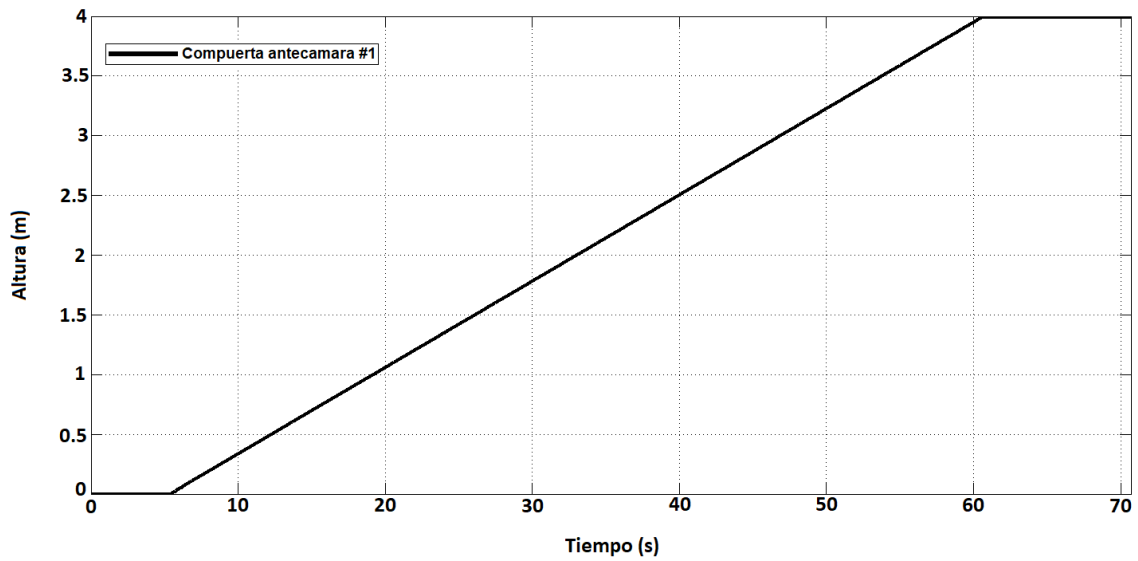


Figura 7.2 Acercamiento a la sección de apertura de la compuerta de la antecámara #1.

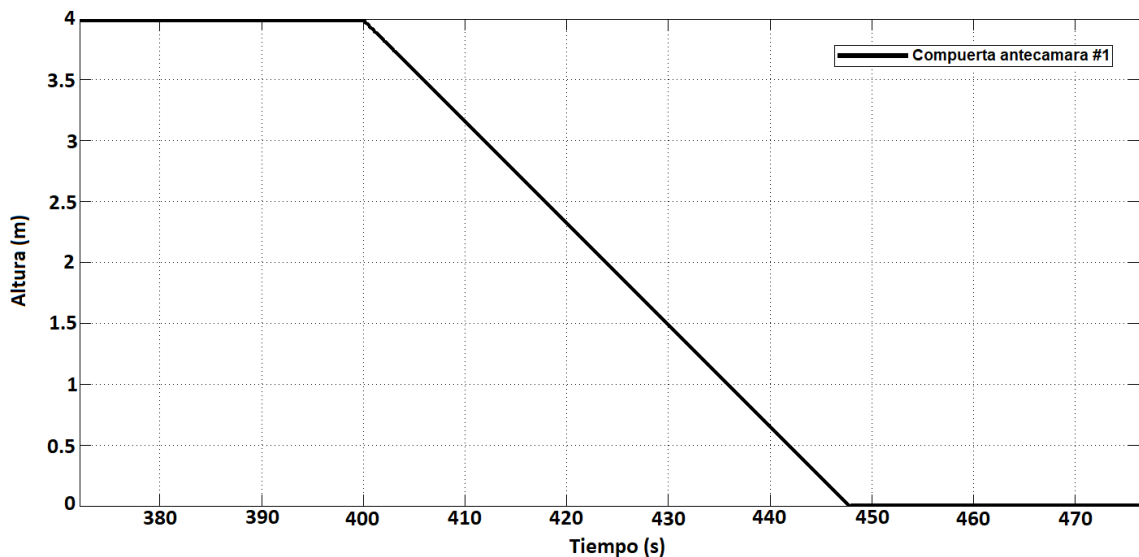


Figura 7.3 Acercamiento a la sección de cierre de la compuerta de la antecámara #1.

La apertura y el cierre de la compuerta del desarenador se muestran en las figuras 7.4 y 7.5, respectivamente. En la figura 7.4 se puede observar que el tiempo que tarda la compuerta en abrir es de 21 segundos y en la figura 7.5 se muestra que el tiempo de cierres es de 4 segundos.

El tiempo de cierre es menor en comparación al tiempo de apertura debido a que, al no haber elementos que generen presión sobre la compuerta la fuerza de fricción es nula, la fuerza de cierre es mayor a la fuerza de apertura y a que el peso de la compuerta genera una fuerza a favor del desplazamiento.

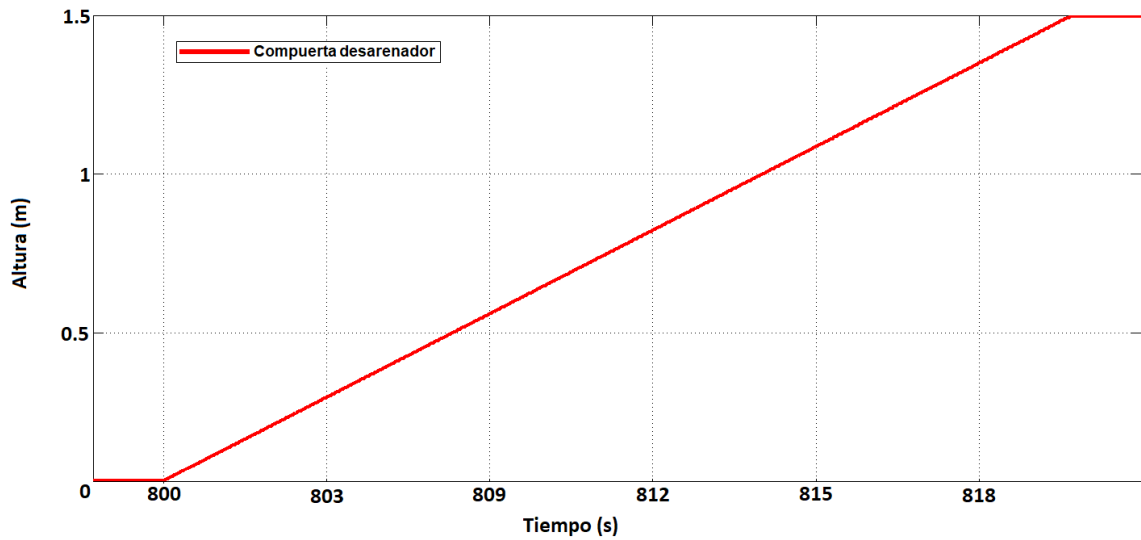


Figura 7.4 Acercamiento a la sección de apertura de la compuerta del desarenador.

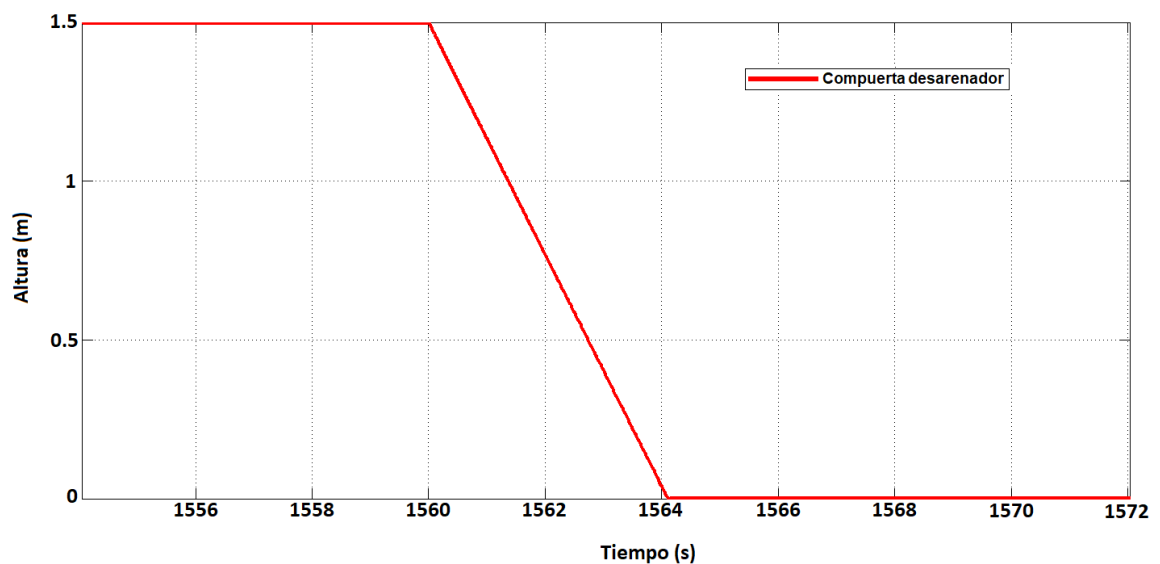


Figura 7.5 Acercamiento a la sección de cierre de la compuerta del desarenador.

En la figura 7.6 se muestra

En la figura 7.6 se observa que el nivel del agua en el canal alcanza una altura de alrededor de 3.3 metros en un tiempo de aproximadamente de 1 minuto. Y de la figura 7.7 se extrae que el tiempo de vaciado del canal es de aproximadamente 13 minutos.

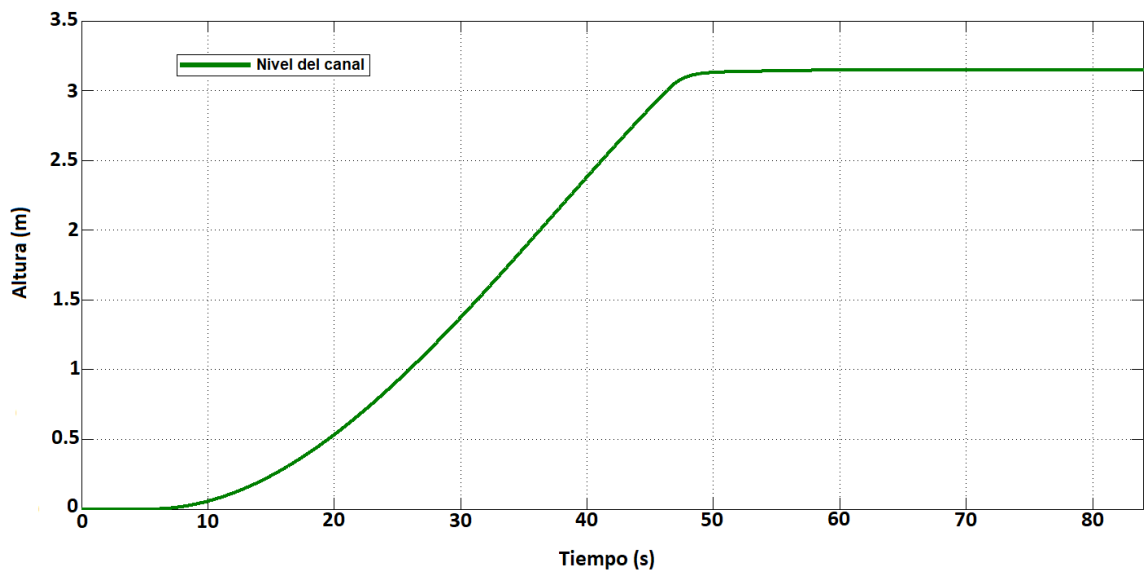


Figura 7.6 Acercamiento a la sección de llenado del canal.

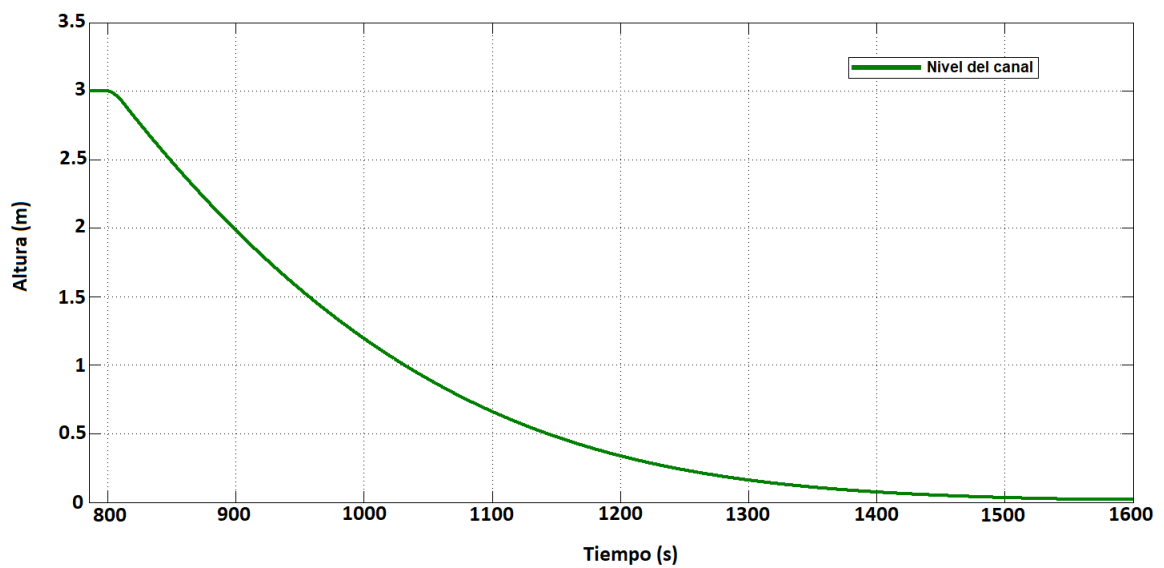


Figura 7.7 Acercamiento a la sección de vaciado del canal.

7.1.2 Simulación de la expulsión de la arena.

En la figura 7.8 se muestra la simulación en donde se lleva a cabo la expulsión del material acumulado en el canal, en este caso agua y arena.

En la simulación se realiza la apertura de la compuerta del desarenador durante un largo periodo, esto con el propósito de que el contenido expulsado sea

el mayor posible. De la figura 7.8 se extrae que el tiempo de expulsión de la arena es de 5 minutos y del agua aproximadamente 7 minutos y medio. En esta simulación el tiempo de descarga del nivel de canal es de aproximadamente 8 minutos y medio, este tiempo es menor en comparación al caso en donde se presenta agua en el canal. La diferencia de tiempos se debe a que la ecuación de expulsión de arena no toma en cuenta factores como el tamaño de la partícula, turbulencia y la pendiente de fondo haciendo que el flujo de expulsión de la arena sea mayor a lo esperado y con ello el tiempo de vaciado del canal sea menor.

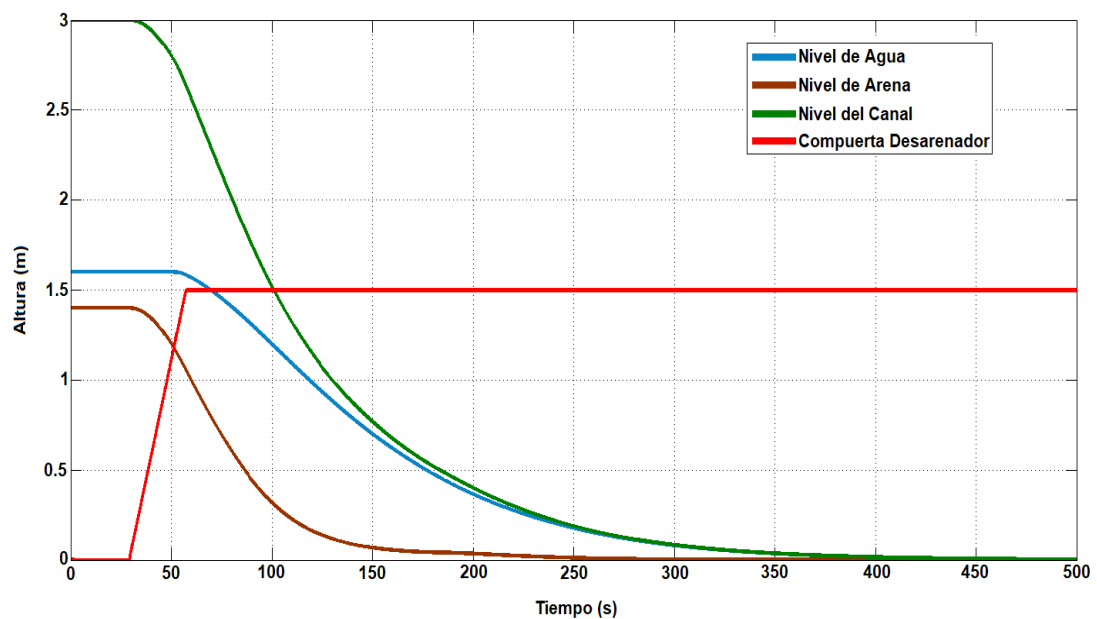


Figura 7.8 Comportamiento de la compuerta del desarenador, el nivel del agua, el nivel de arena y el nivel de canal.

En la figura 7.9 se muestra el comportamiento de la compuerta al realizar la apertura, de la figura se puede observar que el tiempo de esta acción es de aproximadamente 27 segundos. El tiempo de apertura es mayor al caso presentado en la figura 7.4 debido a que el sedimento acumulado y el agua en el canal generan una fuerza de fricción mayor sobre la compuerta del desarenador.

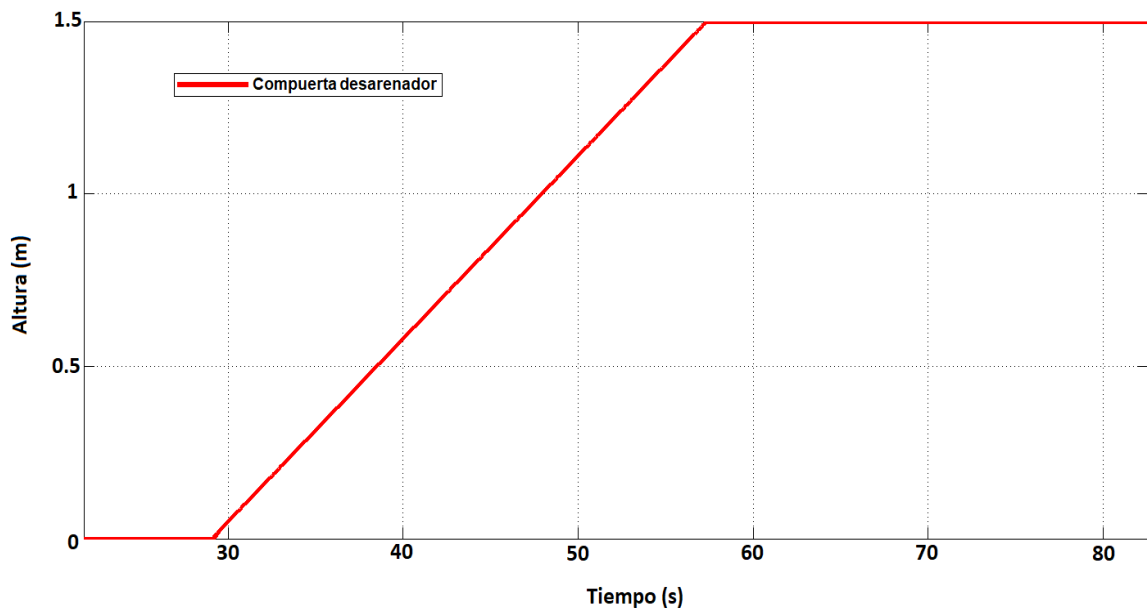


Figura 7.9 Acercamiento a la sección de apertura de la compuerta del desarenador.

7.2 Simulación de la lógica programada en el PLC.

En esta sección se presentan las simulaciones de la lógica de control programada en el controlador. Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software TIA Portal de Siemens.

En la figura 7.10 se muestra la simulación del segmento de activación del sistema y selección de modo. En la simulación se selecciona el modo remoto para activar el sistema desde la casa de máquinas y en la interfaz gráfica se presiona el botón que enciende el sistema. Sin embargo, la lógica no procede a encender el sistema debido a que el nivel de aceite no es el suficiente.

Una vez que el nivel de aceite es adecuado para la operación del sistema, se presiona el botón de encendido en la interfaz gráfica obteniendo como resultado la activación del sistema. Por último, se realizó la desactivación del sistema.

De esta simulación se destaca que el sistema cumple con la condición del nivel de aceite, el cuál debe ser adecuado para la operación para la operación del sistema. También, se comprueba la operación remota desde casa de máquinas.

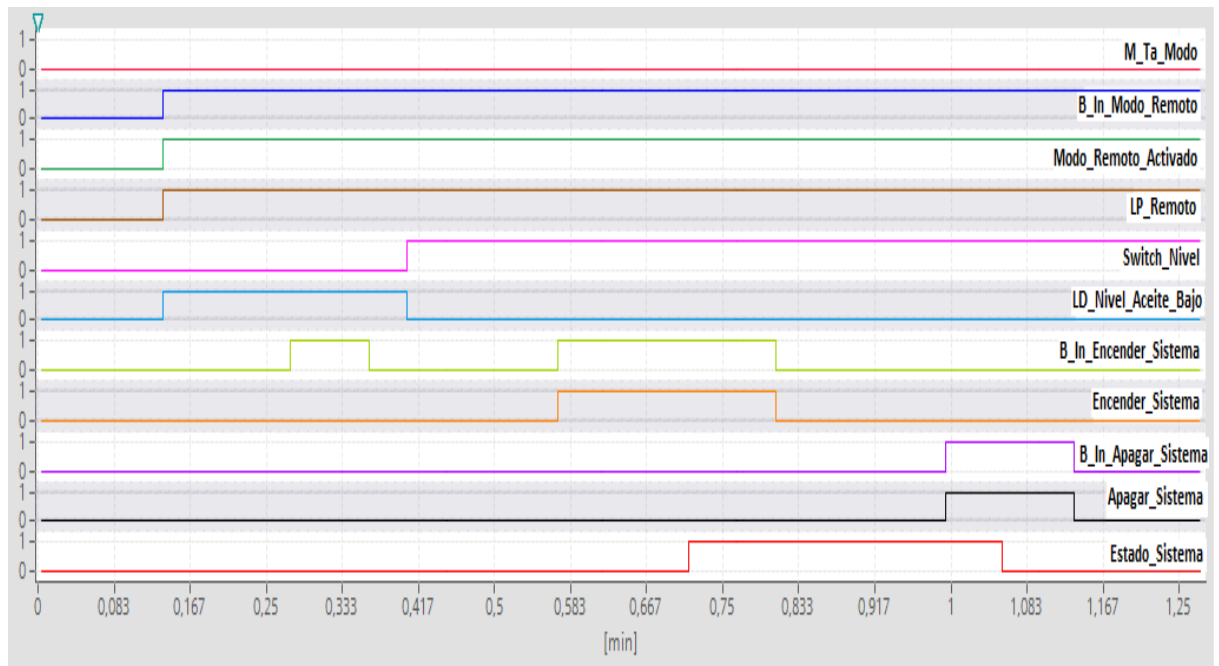


Figura 7.10 Simulación del encendido y apagado del sistema.

En la figura 7.11 se muestra la simulación del segmento de encendido y apagado del motor. Para llevar a cabo el encendido del motor desde la casa de máquinas se selecciona el modo remoto y se enciende el sistema.

En la simulación se intentó realizar el encendido del motor, pero, debido a que la señal de sobrecorriente se encontraba activa no se pudo encender el motor. Una vez desactivada la señal de sobrecorriente fue posible realizar el encendido del motor y luego se procedió a apagarlo.

En la sección final de la simulación se observa que si el modo estar encendió y se presenta una sobrecarga el sistema procederá a desactivar el motor.

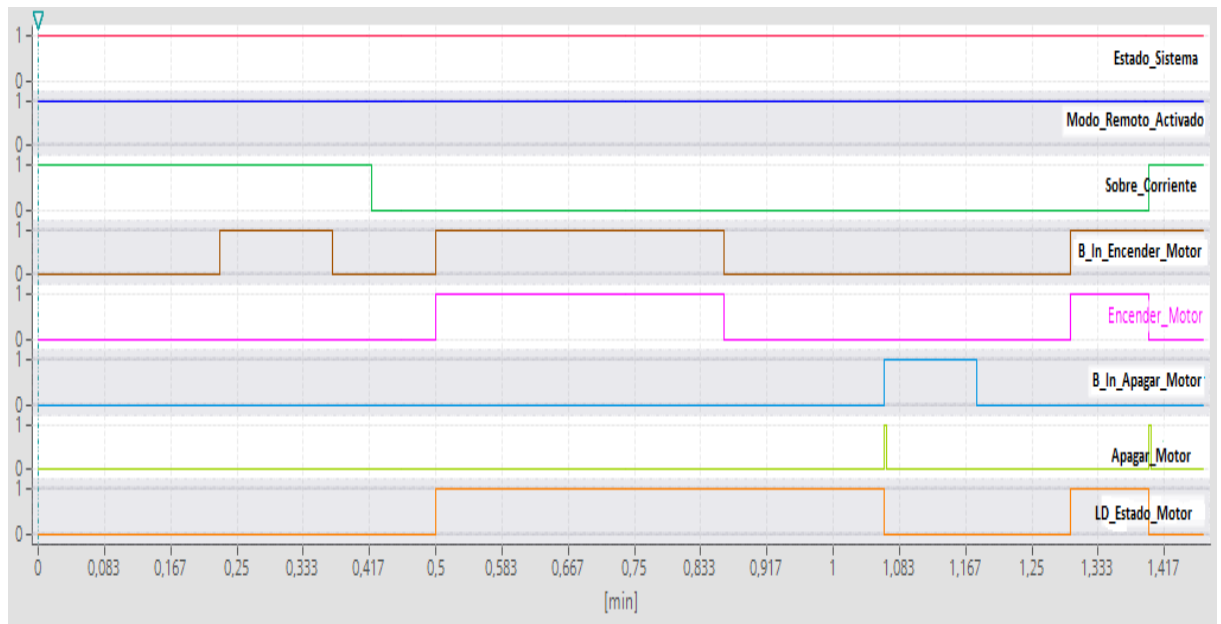


Figura 7.11 Simulación del encendido y apagado del motor

Seguidamente en la figura 7.12 se presenta la simulación del segmento de accionamiento de una de las compuertas.

Primero se realizó la apertura de la compuerta número 1, se puede observar que mientras la compuerta se estaba abriendo se presionó el botón de cerrar la compuerta en dos ocasiones, pero, la compuerta se siguió abriendo hasta que el sensor de final de carrera se activó.

Así mismo en la simulación se ejecutó la orden de cerrar la compuerta # 1 y posteriormente se presionó el botón de detención de emergencia la compuerta ocasionado la detención inmediata de la compuerta.

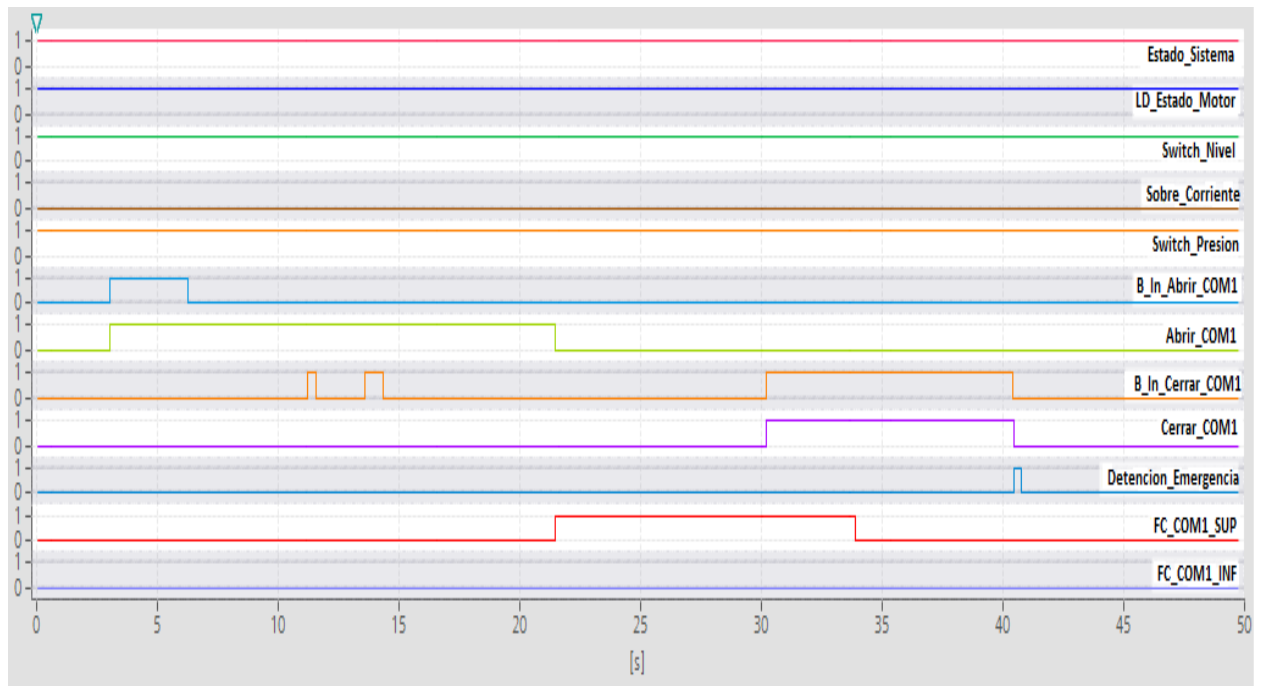


Figura 7.12 Simulación 1 del accionamiento de la compuerta.

En la simulación mostrada en la figura 7.13 se procedió a ejecutar el cierre de la compuerta número 3 y una vez que el sensor de final de carrera se activó, la instrucción de abrir se cancela. Luego se procedió a realizar la apertura de esta misma compuerta. No obstante, durante el proceso se presenta una sobrepresión, lo cual ocasiona que se cancele la acción de apertura.

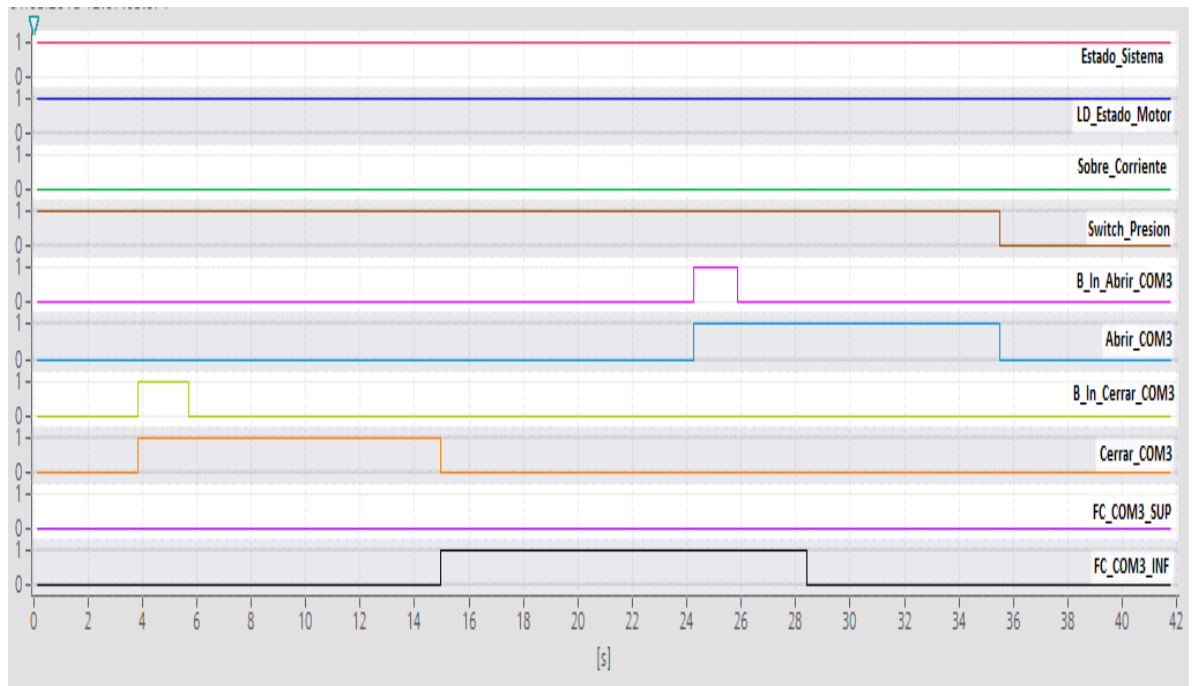


Figura 7.13 Simulación 2 del accionamiento de la compuerta

En la simulación de la figura 7.14 el modo local se encuentra seleccionado y se realiza la apertura de la compuerta número 5 mediante el tablero. Instantes después en la interfaz gráfica se presiona el botón de abrir la compuerta número 6 y luego se presiona el botón de detención de emergencia.

Pero se logra observar que dado a que el sistema se encuentra en modo local las órdenes dadas por la interfaz son ignoradas.

Seguidamente se procede a cerrar la compuerta número 6 pero durante el proceso se activa la señal de detención de emergencia, ocasionado que la compuerta se detenga.

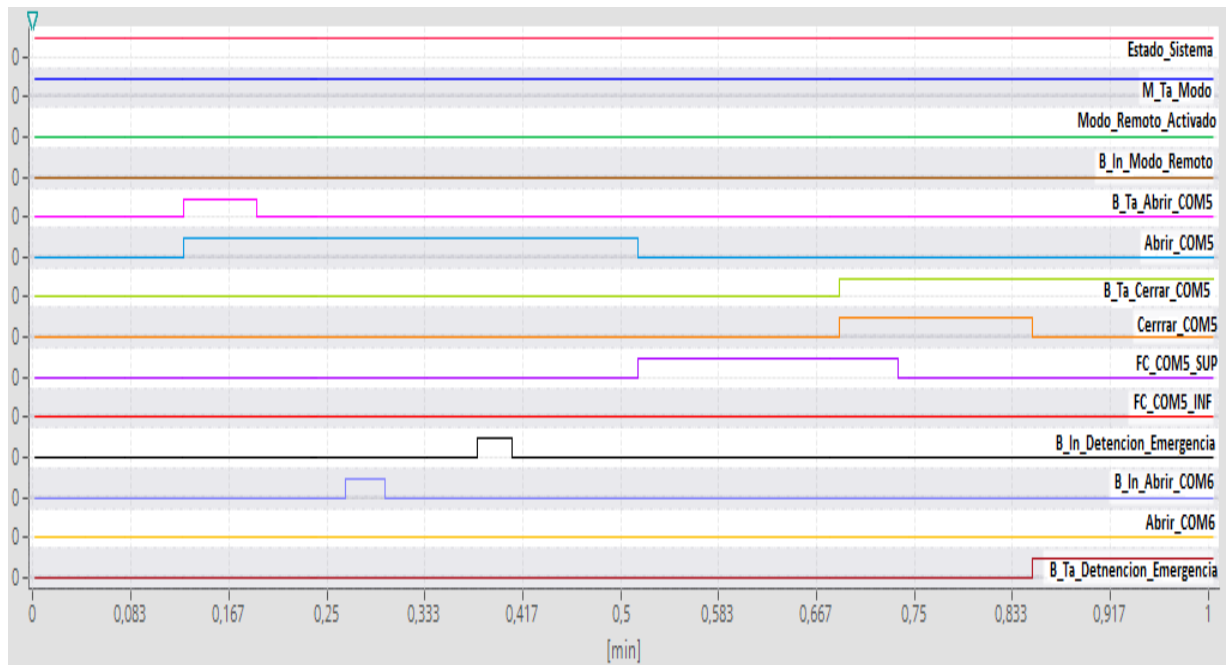


Figura 7.14 Simulación 3 del accionamiento de la compuerta.

Capítulo 8 : Conclusiones

Se llevó a cabo el diseño del software y del hardware del sistema de control remoto y local de las compuertas de la antecámara y el desarenador. Para el diseño del software se utilizó el lenguaje de escalera y se desarrolló mediante la herramienta TIA Portal.

Se desarrolló un modelo matemático teórico que permite emular el comportamiento de las compuertas. El modelo matemático se evaluó mediante el software matemático MATLAB, el cual cuenta con una herramienta de simulación de sistemas en tiempo continuo.

Se elaboró la documentación del diseño del hardware y del software para la empresa.

Capítulo 9 : Recomendaciones

En el desarenador se colocarán cámaras para monitorear el canal y las compuertas. Ante esto se recomienda utilizar fibra óptica de 12 hilos, ya que 2 hilos se utilizarían para la comunicación entre el sistema SCADA y el PLC y el restante de hilos se utilizarían para la comunicación de las cámaras con el sistema de monitoreo de la central.

Es recomendable cambiar el cableado de la conexión de los sensores de final de carrera y el gabinete, ya que algunas secciones se encuentran oxidadas o presentan algún tipo de daño.

A futuro se puede automatizar el proceso mediante la utilización de sensores que determinen el nivel de sedimento en el canal, de modo que la limpieza de este se realice una vez que el sedimento supere el límite recomendado.

Bibliografía

- [1] Bin, Y., Bu, F., Reedy, J., & Chiu, G.-C. (2000). *Adaptive Robust Motion Control of Single-Rod*. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics.
- [2] Caipa Roldán, J., Salamanca, J., & Rodríguez Herrera, J. (2010). *Control Digital De Nivel Para Sistema De Tanques Interconectados Mediante Servo-Válvula*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- [3] Castro Castro, A. (2008). *Modelado y simulación de sistemas dinámicos para estudios de control*. Universidad de Costa Rica.
- [4] Dae-Geun, K. (2007). *Numerical Analysis of Free Flow Past a Sluice Gate*. Journal of Civil Engineering.
- [5] Edificadora Beta. (s.f.). P.H Canalete Esquema General.
- [6] Electro Schematics. (s.f.). *Electro Schematics*. Recuperado el 28 de agosto de 2017, de <https://www.electroschematics.com/12295/inductive-proximity-switch-w-sensor/>
- [7] Escalante Tomalá, M. C., Villacreses Mendieta, W. J., & Phd.Plaza, D. (s.f.). *Modelamiento y Simulación de un Sistema de Llenado de Dos Tnaques en Serie*. Campus Gustavo Galindo.
- [8] Gambao, E., & Barrientos, A. (2014). *Sistemas de Producción Automatizados*. Madrid: Dextra.
- [9] Horváth, K., Galvis, E., Gómez Valentín, M., & Rodellar Benedé, J. (2014). *Is It Better to Use Gate Opening as Control Variable than Discharge to Control Irrigation Canals?* American Society of Civil Engineers.
- [10] Saleh, J. M. (2002). *Fluid Flow Handbook*. New York: McGraw-Hill Education.
- [11] Schneider. (s.f.). *Schneider*. (Schneider: Technical FAQs) Recuperado el 05 de septiembre de 2017, de <https://www.schneider-electric.co.in/en/faqs/FA142566/>
- [12] SIEMENS. (s.f.). *SIEMENS*. Recuperado el 2 de octubre de 2017, de <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>
- [13] SIEMENS. (s.f.). *SIEMENS: WinCC/Server*. Recuperado el 24 de abril de 2018, de <https://w3.siemens.com/mcms/human-machine-interface/en/visualization-software/scada/wincc-options/wincc-server/pages/default.aspx>
- [14] Sukan. (s.f.). *Sukan Industrial Marketing*. Recuperado el 15 de abril de 2018, de <http://www.sukanmarketing.com/blog/hydraulic/cnc-repair-and-troubleshooting-hydraulic-solenoid-valves-and-simple-circuit-diagram>
- [15] VComp Inc. (14 de abril de 2018). *Medium*. Obtenido de <https://medium.com/@vcompmississauga/what-are-single-acting-double-acting-hydraulic-cylinders-817d6e6f30a8>

- [16] Yao, J., Yang, G., Ma, D., & Wang, J. (2014). *Adaptive Robust Control For Unknown Nonlinear Parameters of Single-Rod Hydraulic Actuators*. Nanjing, China: Chinese Control Conferenc.
- [17] Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física Universitaria* (Decimosegunda ed., Vol. 1). México: Pearson Educación.
- [18] Zhao, Y. (2010). *Research on Application of Fuzzy PID Controller in Two-container Water Tank System Control*. Shaanxi University of Science & Technology.

Apéndices y anexos

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología.

PLC: Programador lógico programable

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition

HMI: Human Machine Interface

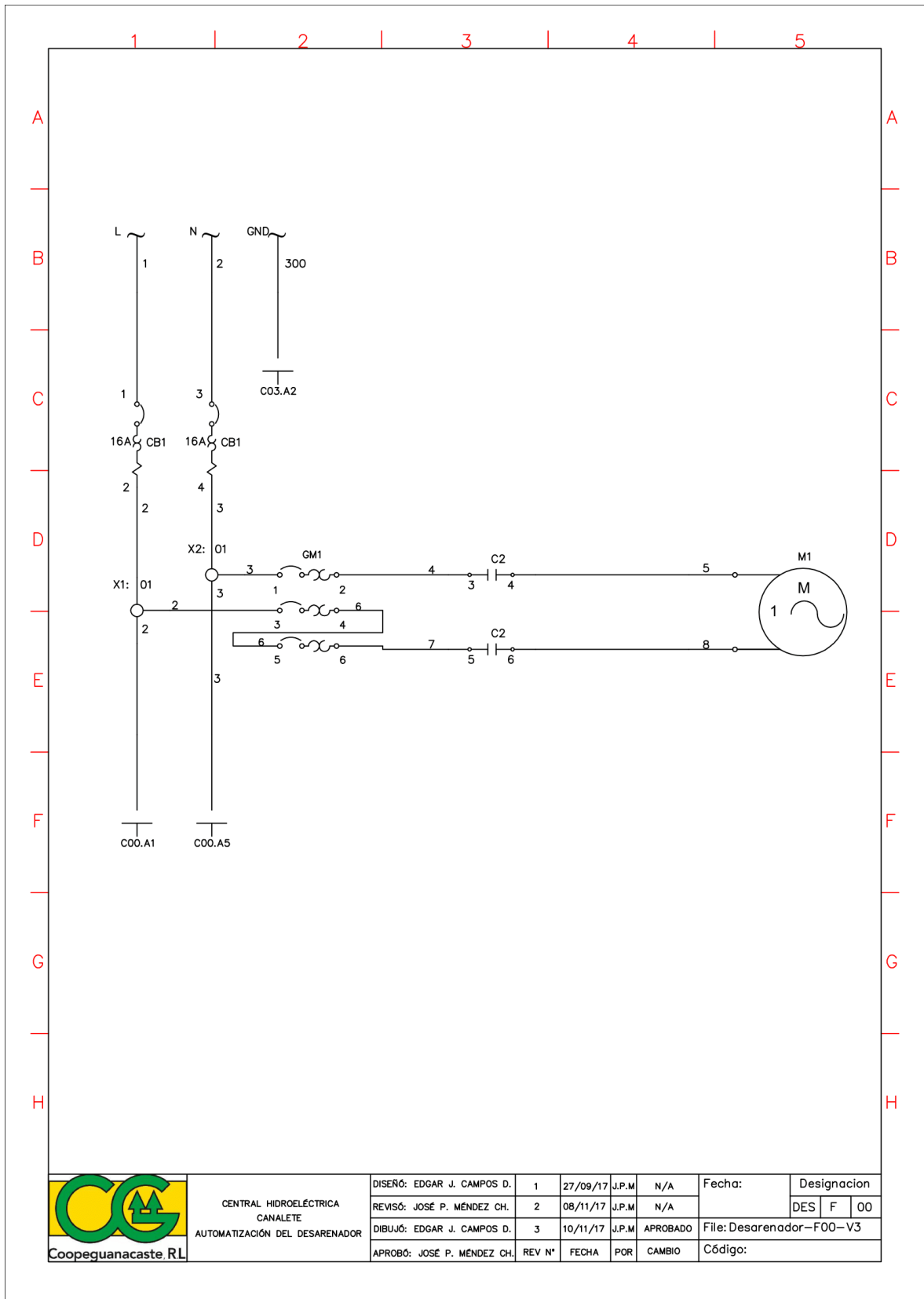
C.H: Central Hidroeléctrica

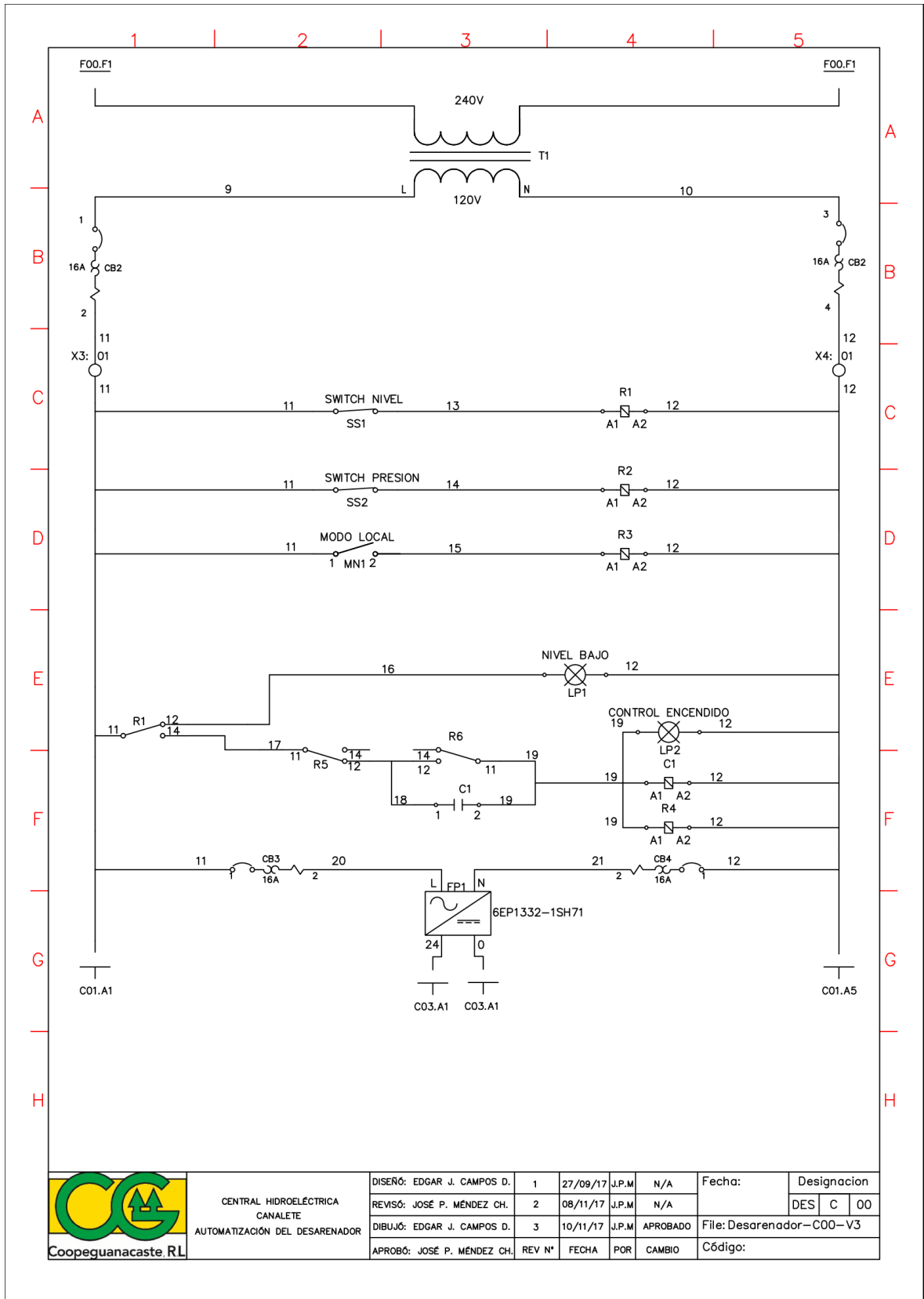
LD: Luz digital

LP: Luz piloto

Electroválvula: Válvula en la cual el flujo del líquido a través de ella depende de la polarización de la(s) bobina(s) que esta posea.

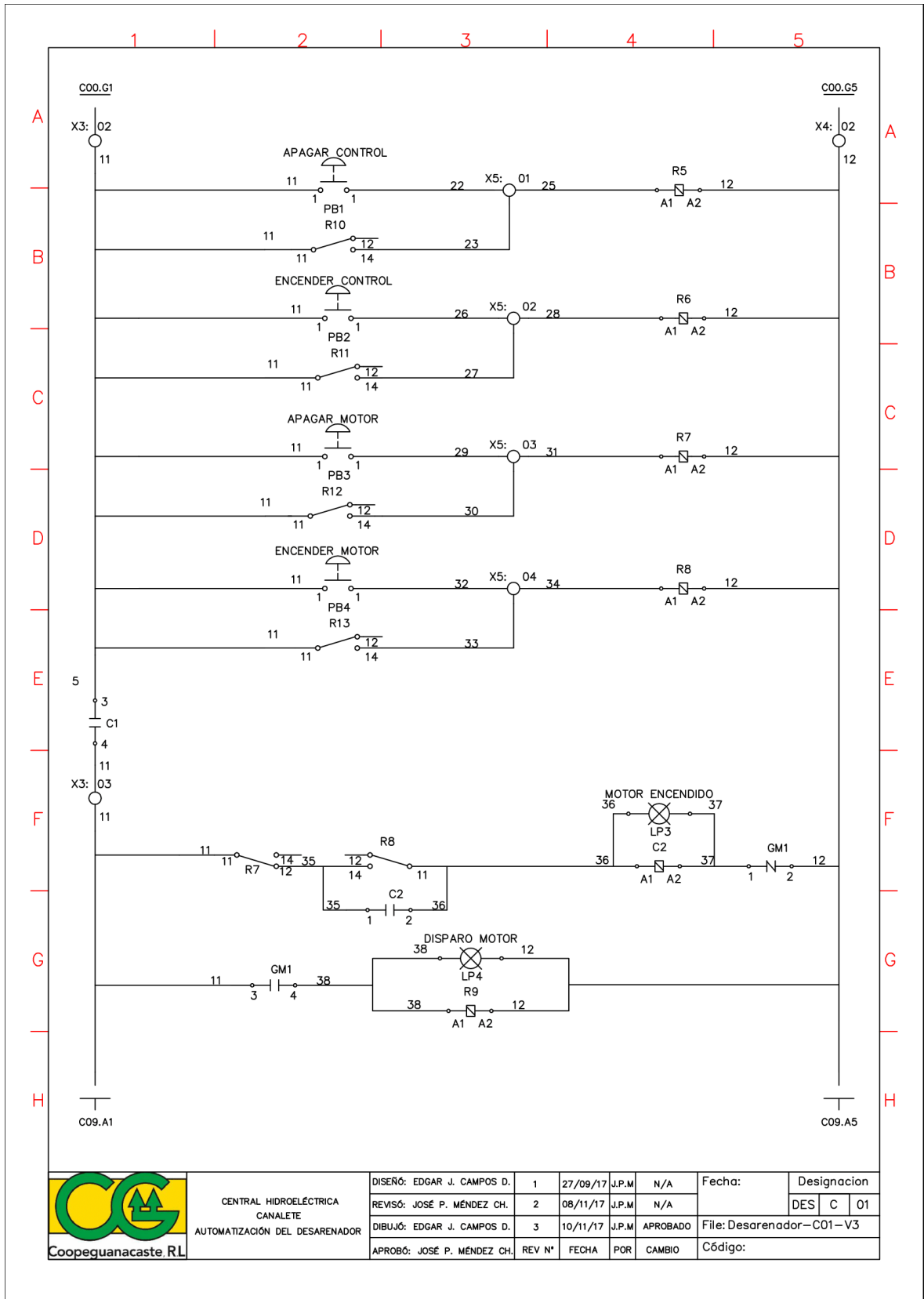
A.2 Planos de distribución del gabinete.





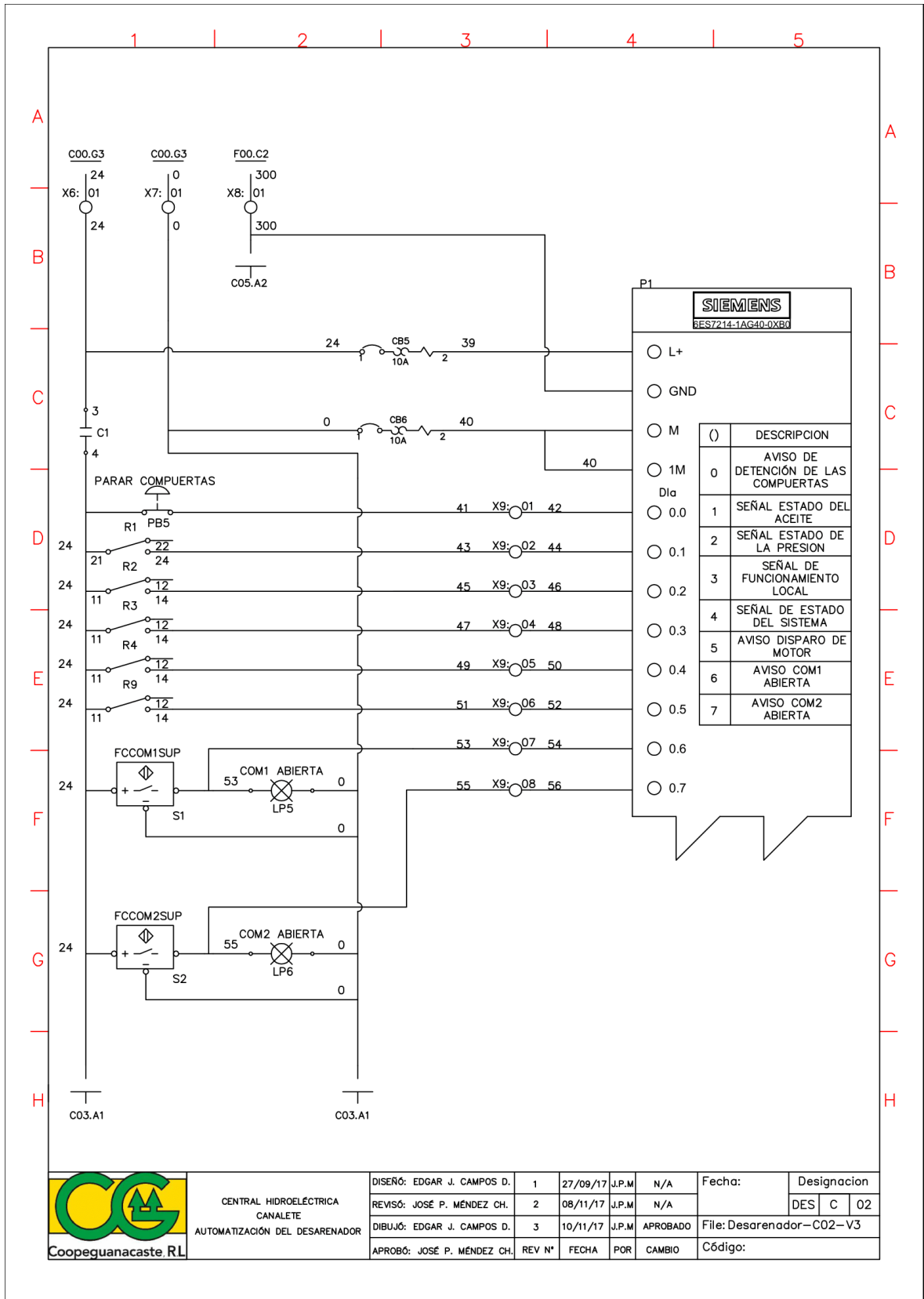
CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

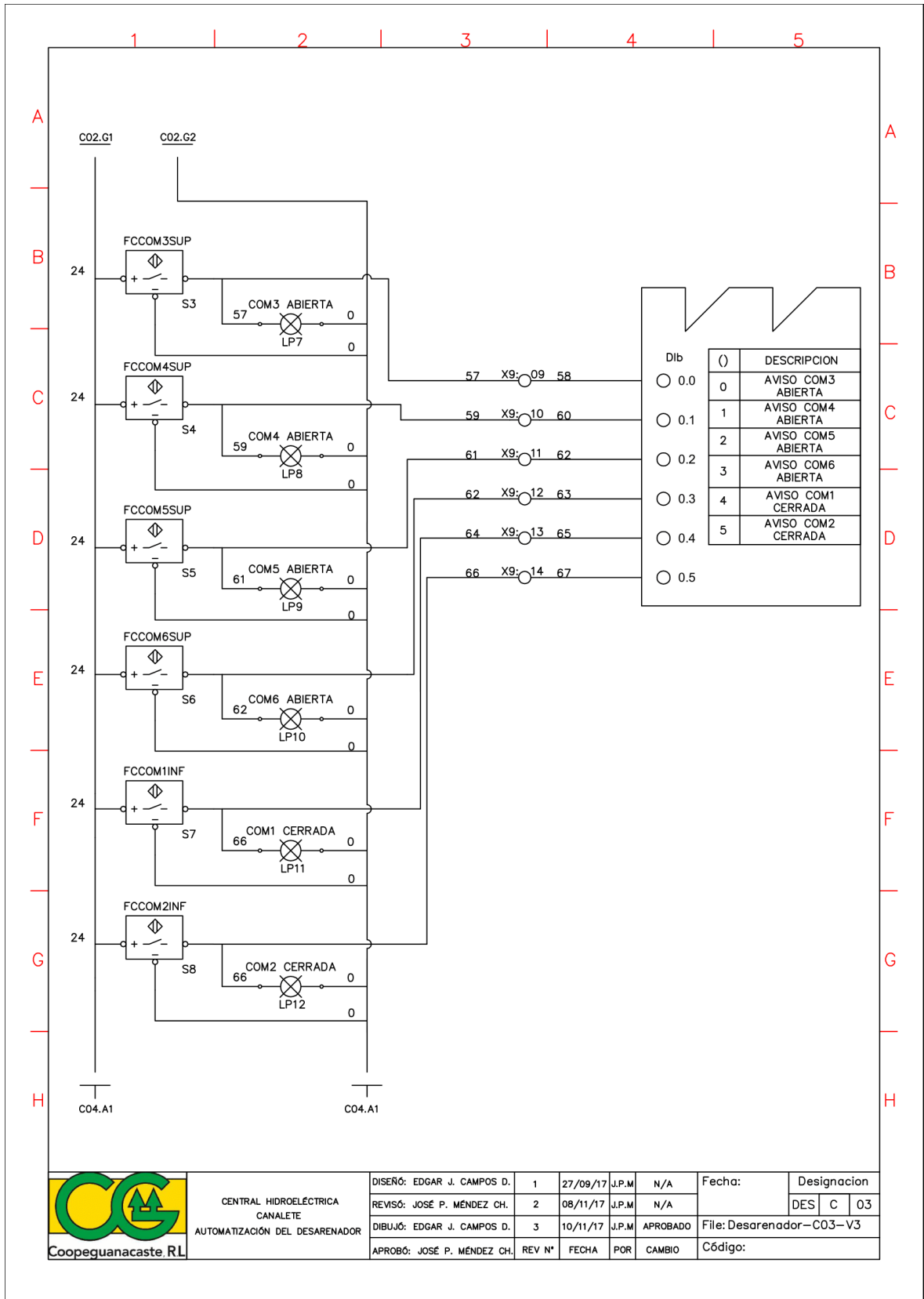
DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	27/09/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	08/11/17	J.P.M	N/A		DES C 00
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.	3	10/11/17	J.P.M	APROBADO	File: Desarenador-C00-V3	
APROBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:	



CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

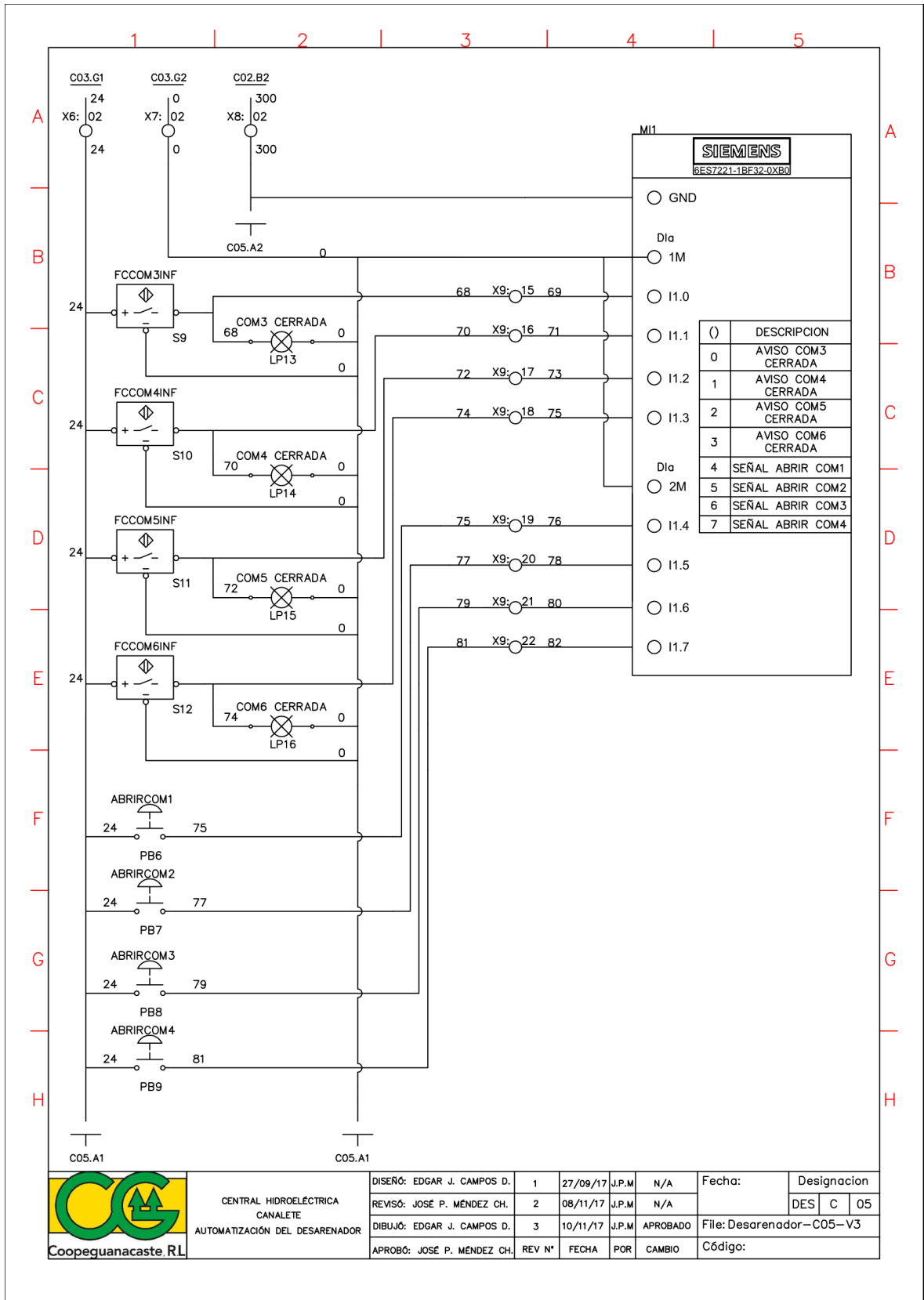
DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	27/09/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	08/11/17	J.P.M	N/A		DES C 01
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.	3	10/11/17	J.P.M	APROBADO	File: Desarenador-C01-V3	
APROBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:	





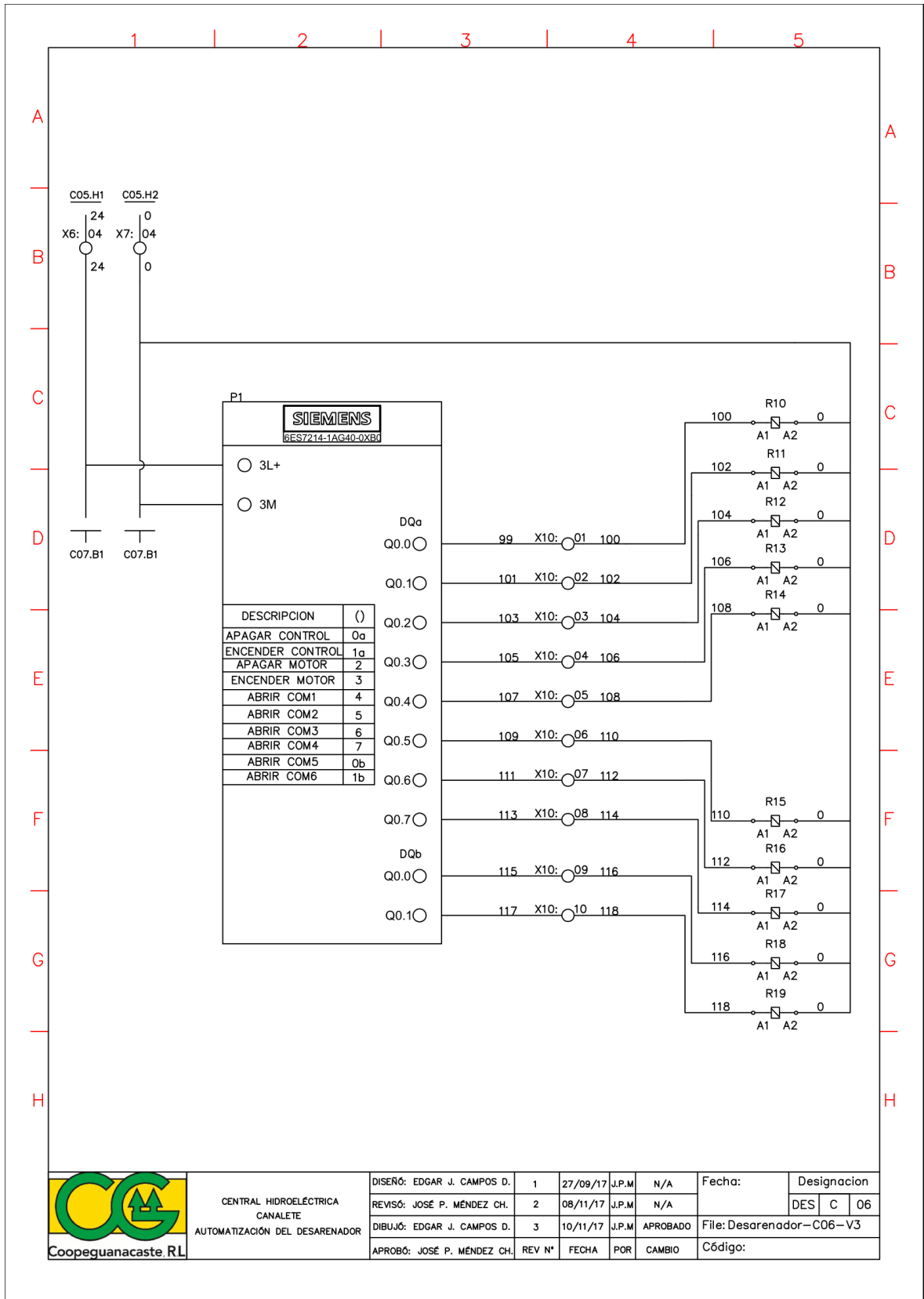
CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	27/09/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	08/11/17	J.P.M	N/A		DES C 03
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.	3	10/11/17	J.P.M	APROBADO	File: Desarenador-C03-V3	
APROBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:	



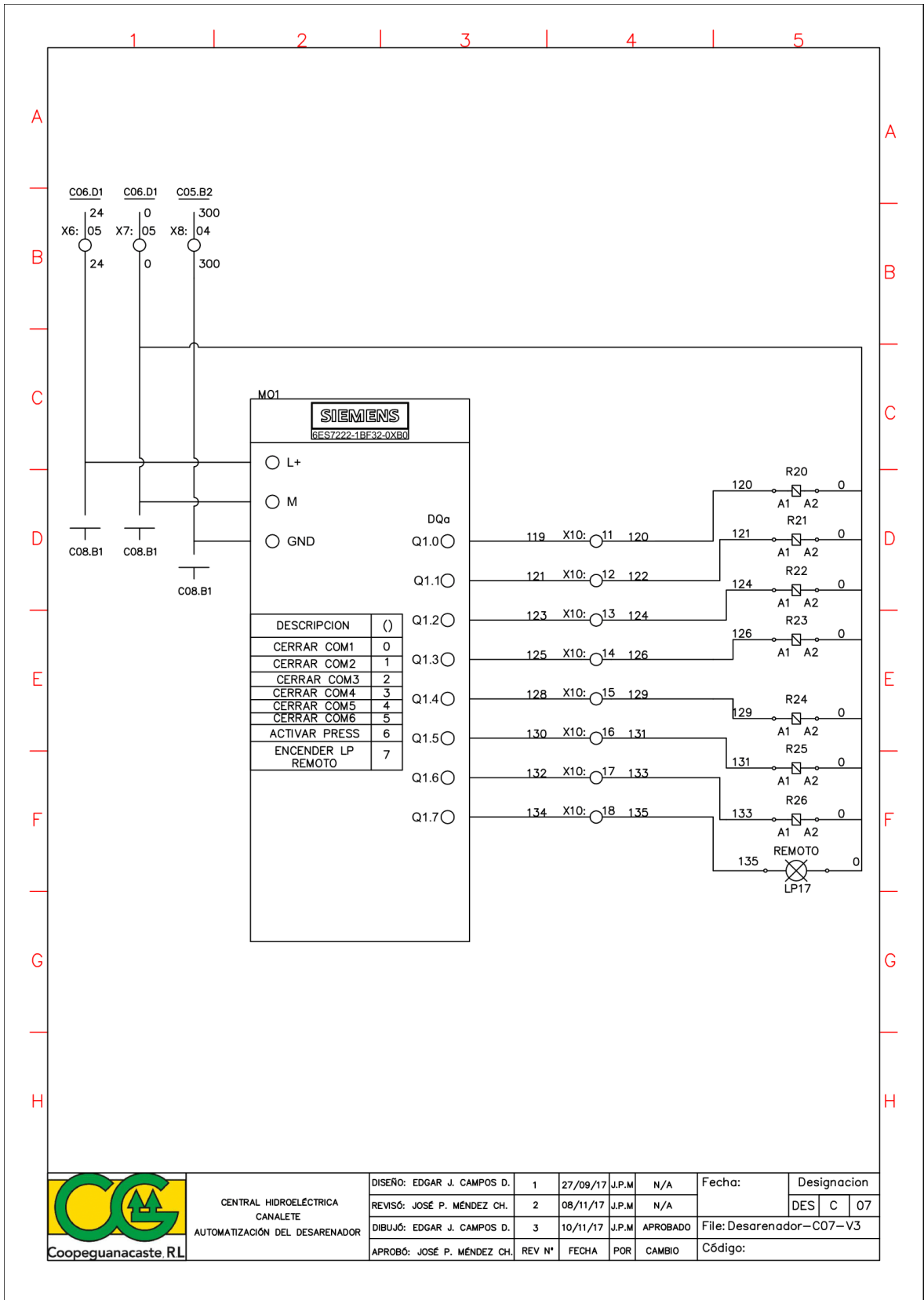
CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

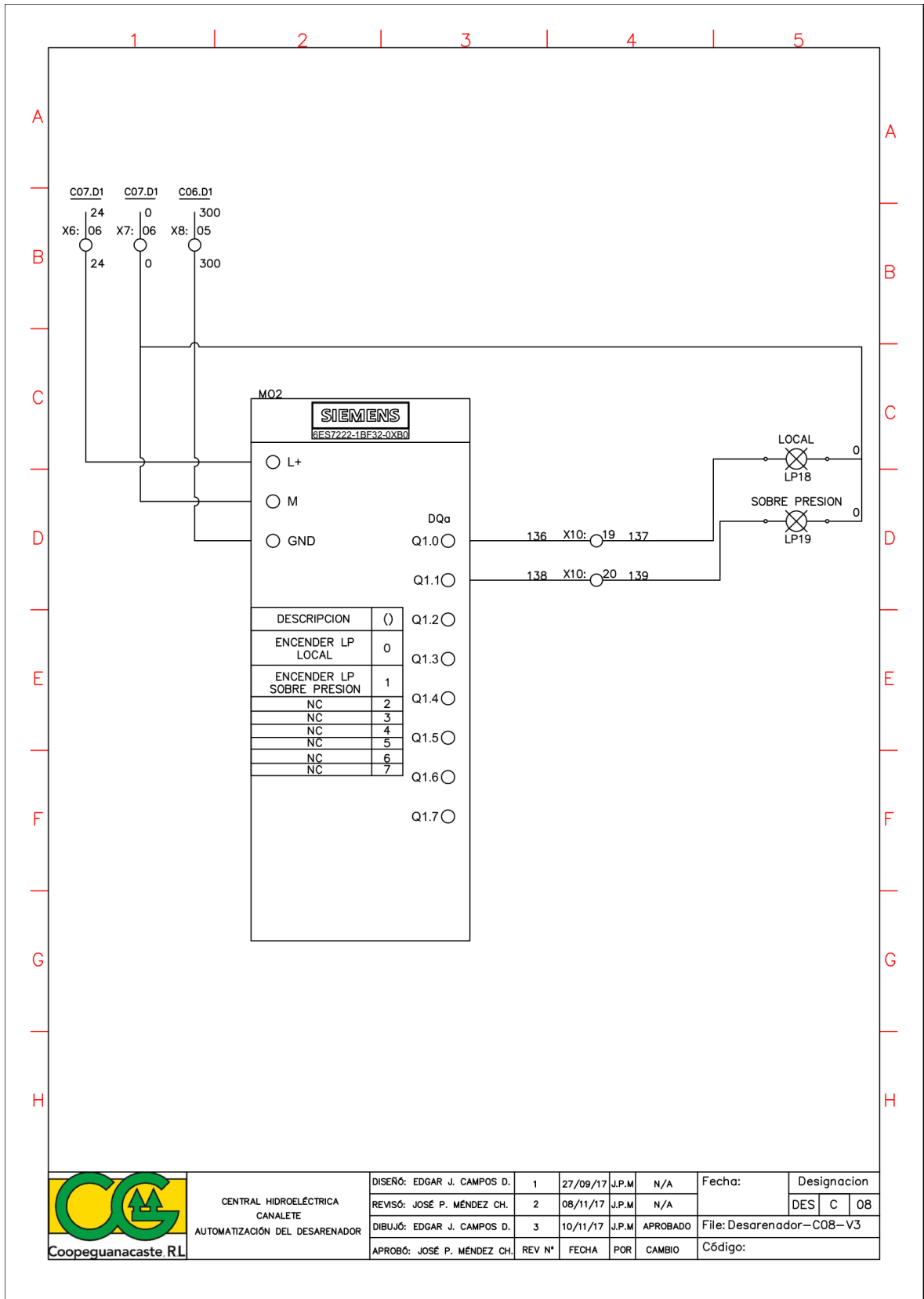
DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	27/09/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	08/11/17	J.P.M	N/A		DES C 05
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.	3	10/11/17	J.P.M	APROBADO	File: Desarenador-C05-V3	
APROBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:	



CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

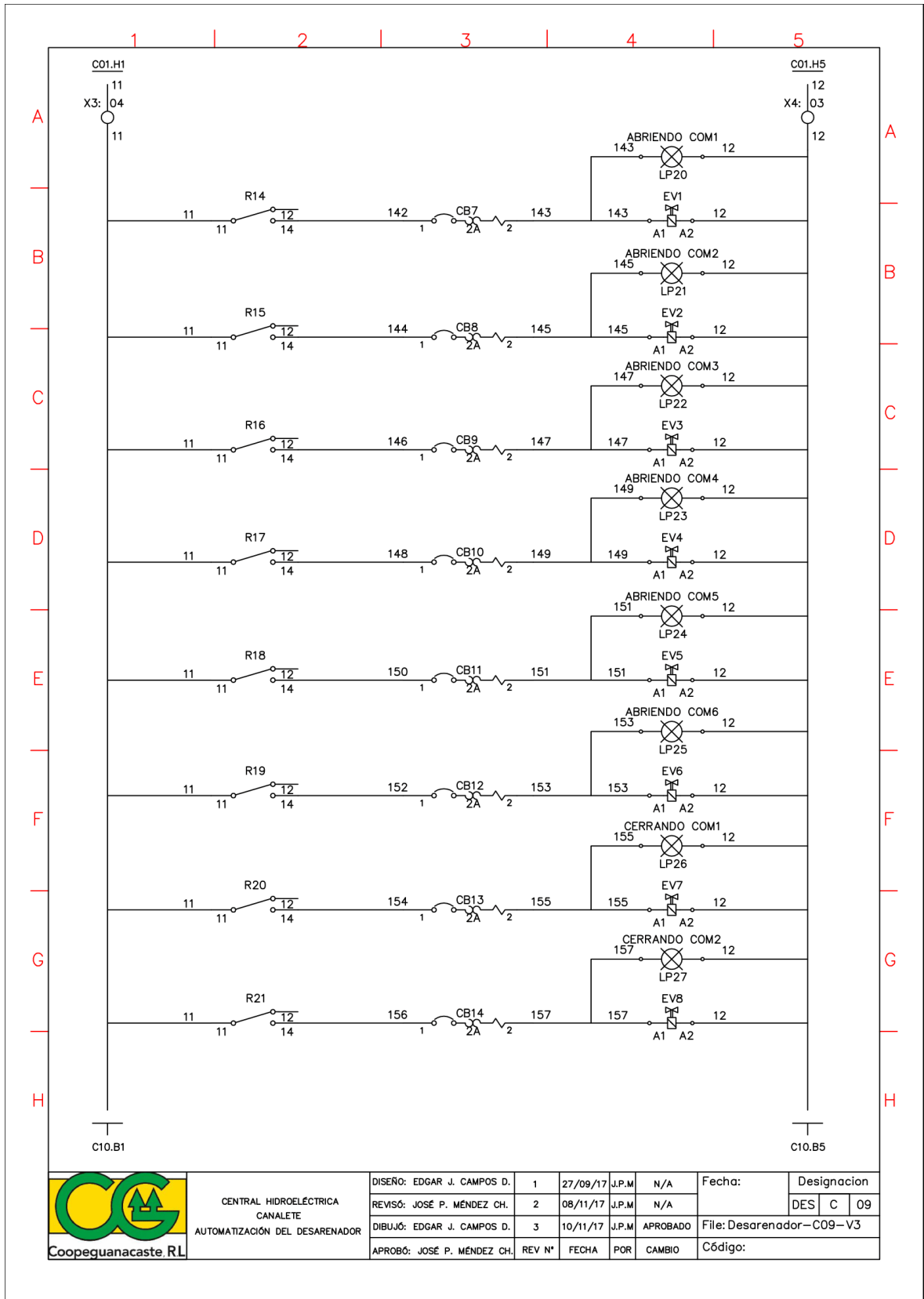
DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	27/09/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion		
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	08/11/17	J.P.M	N/A		DES	C	06
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.	3	10/11/17	J.P.M	APROBADO	File: Desarenador-C06-V3			
APROBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:			





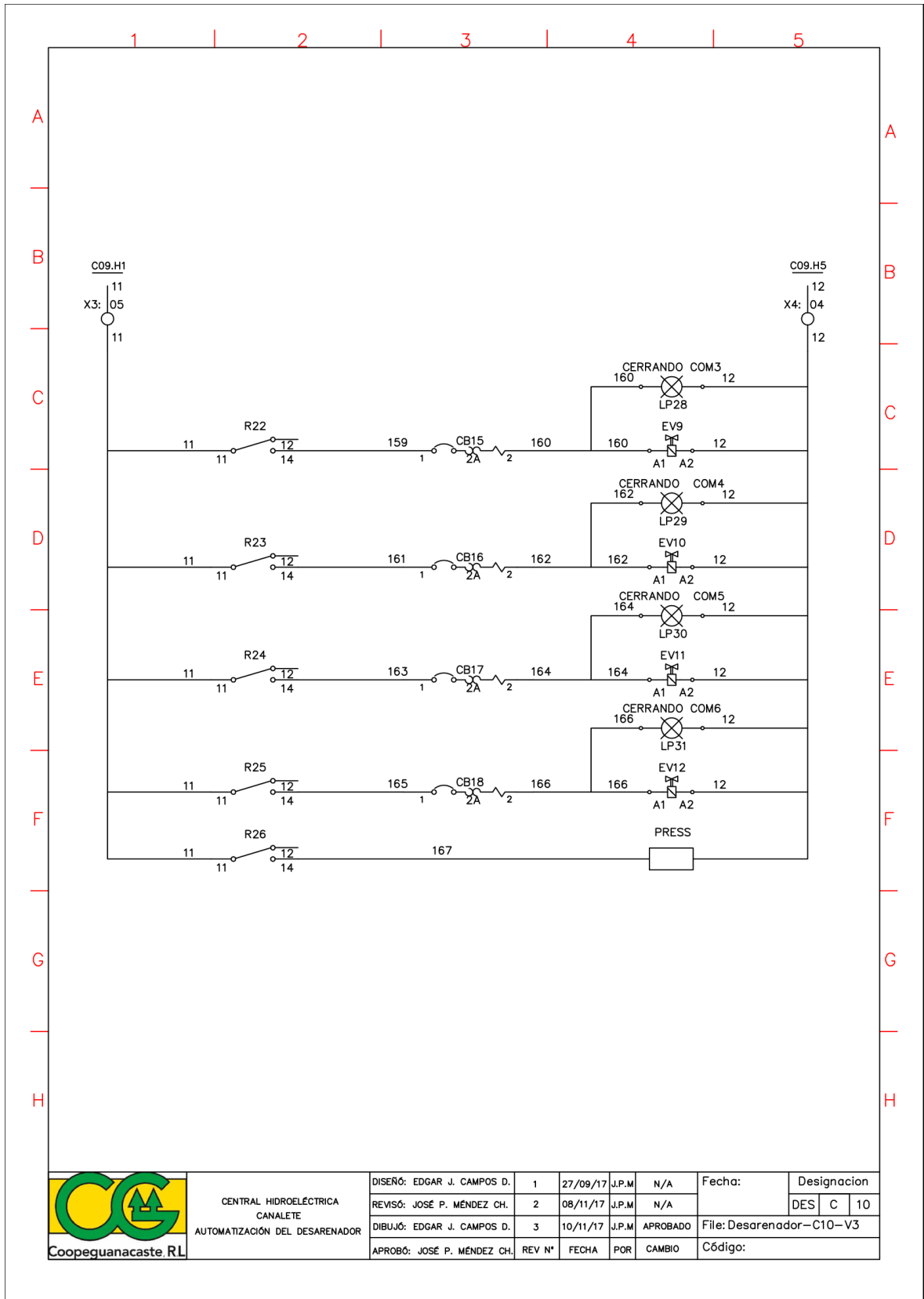
CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	27/09/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	08/11/17	J.P.M	N/A		DES C 08
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.	3	10/11/17	J.P.M	APROBADO	File: Desarenador-C08-V3	
APROBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:	



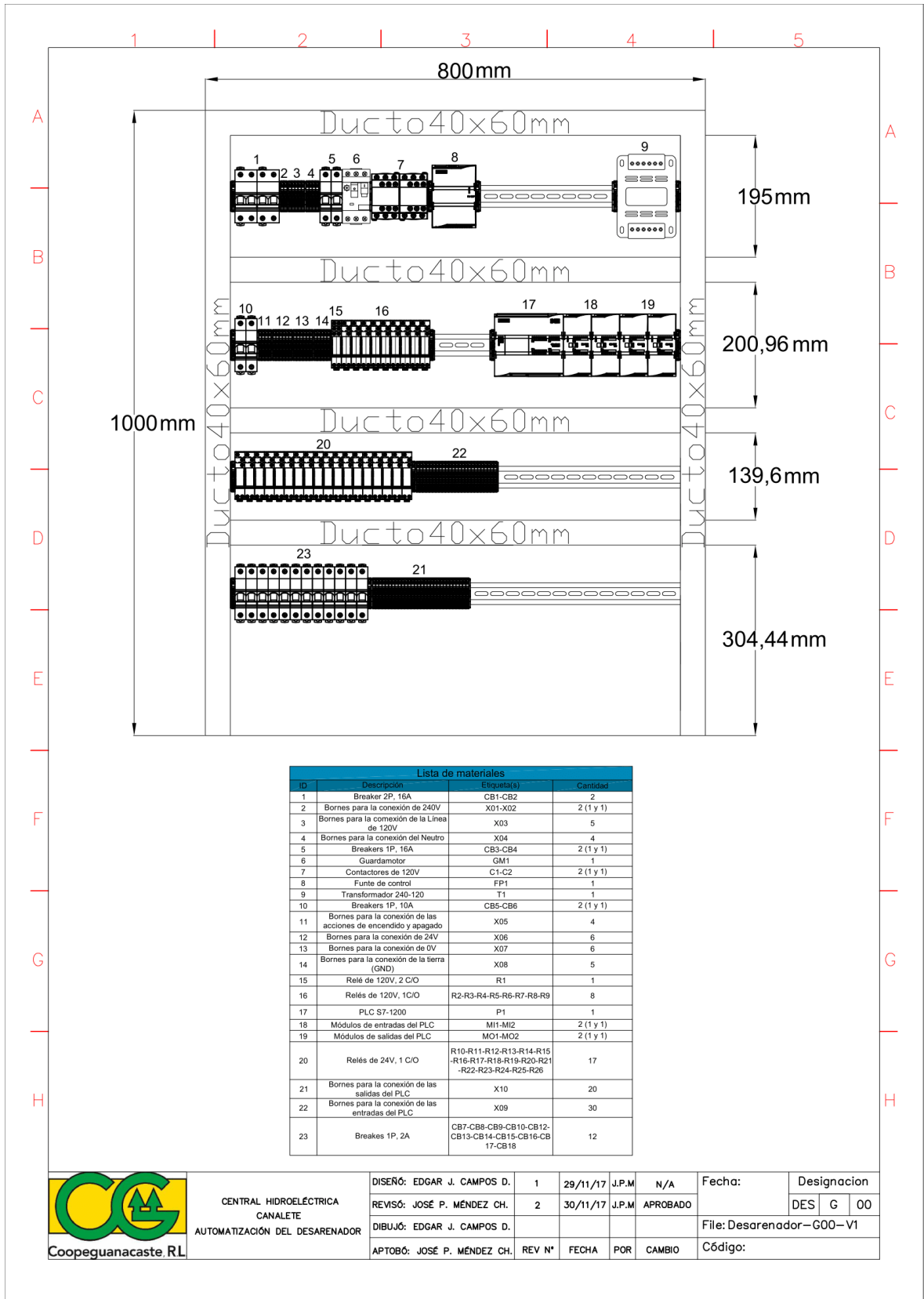
CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

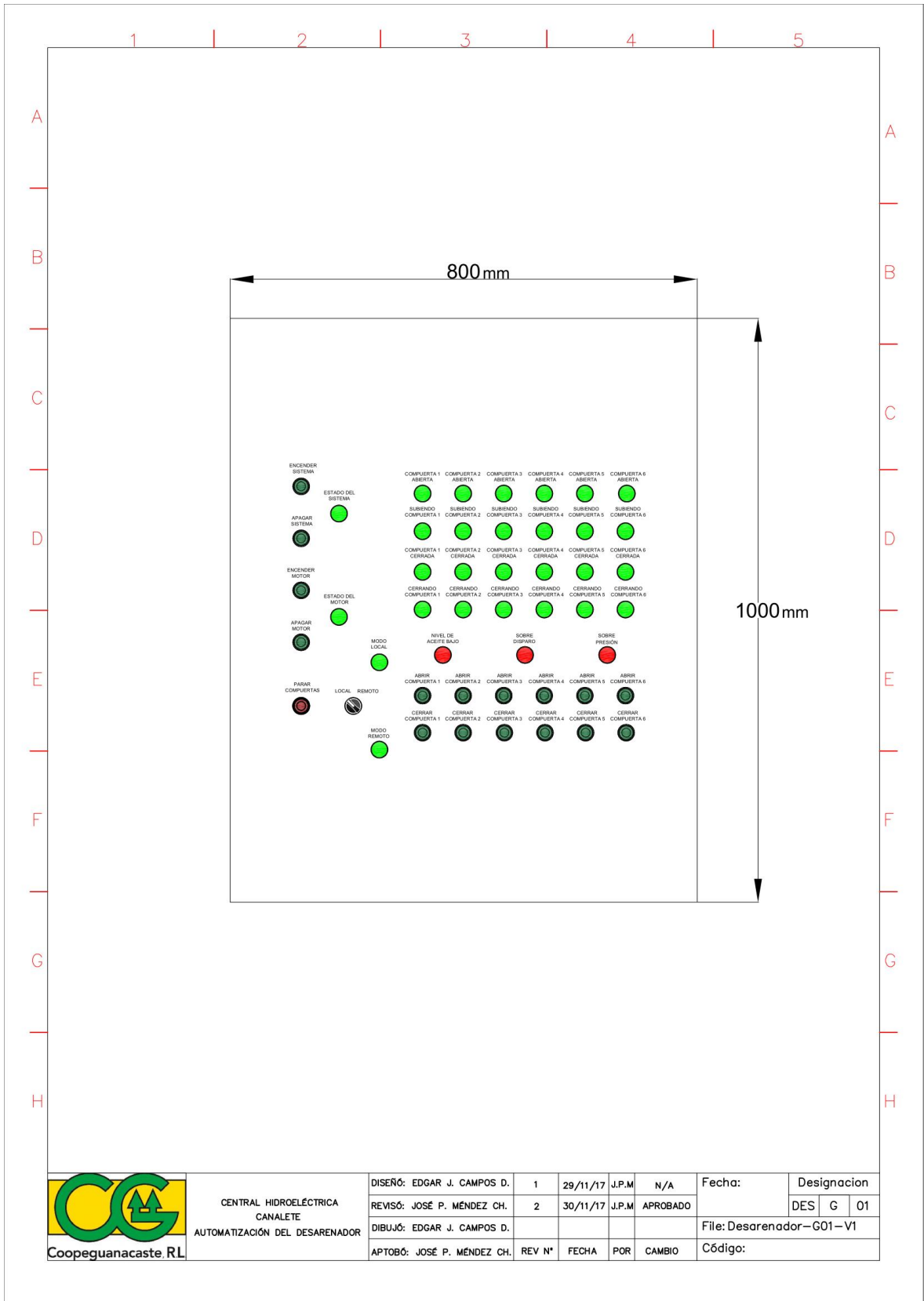
DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	27/09/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	08/11/17	J.P.M	N/A		DES C 09
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.	3	10/11/17	J.P.M	APROBADO	File: Desarenador-C09-V3	
APROBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:	



CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	27/09/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	08/11/17	J.P.M	N/A		DES C 10
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.	3	10/11/17	J.P.M	APROBADO	File: Desarenador-C10-V3	
APROBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:	

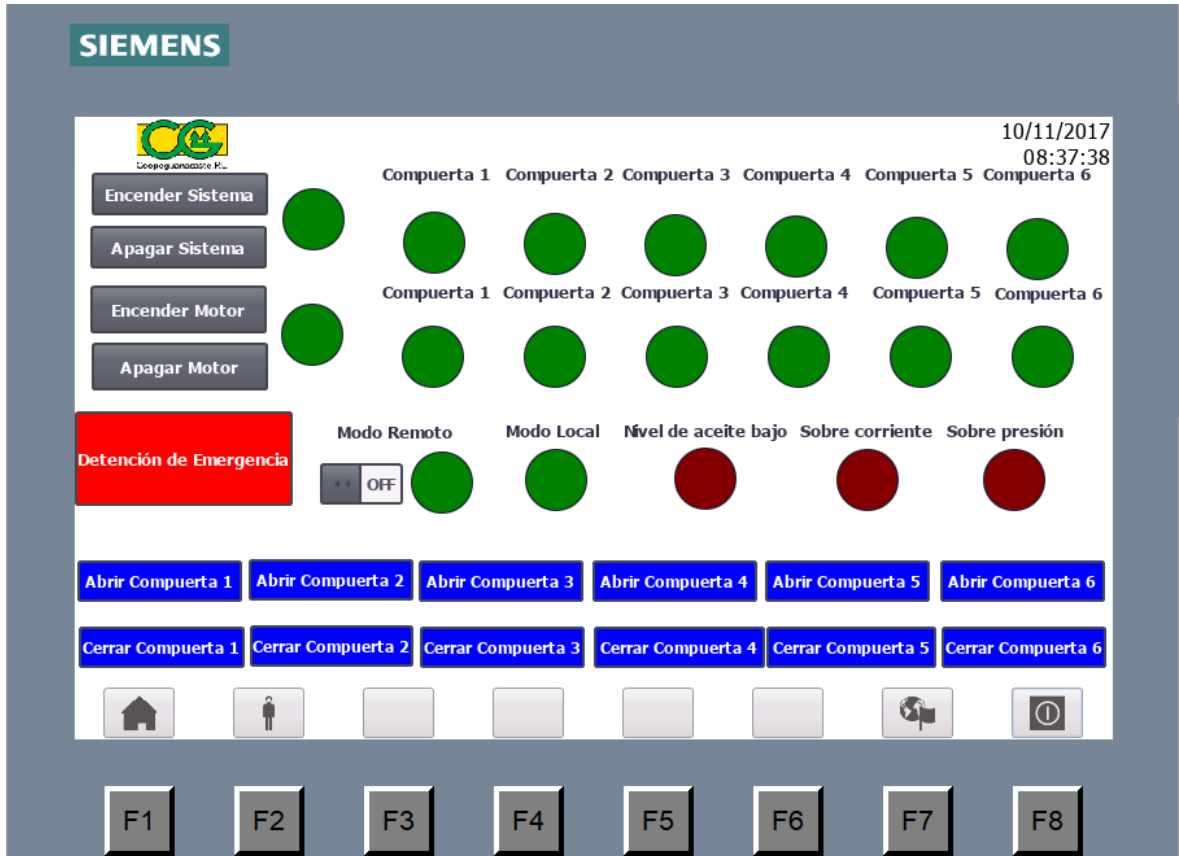




CENTRAL HIDROELÉCTRICA
CANALETE
AUTOMATIZACIÓN DEL DESARENADOR

DISEÑO: EDGAR J. CAMPOS D.	1	29/11/17	J.P.M	N/A	Fecha:	Designacion		
REVISÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	2	30/11/17	J.P.M	APROBADO		DES	G	01
DIBUJÓ: EDGAR J. CAMPOS D.					File: Desarenador-G01-V1			
APTÓBÓ: JOSÉ P. MÉNDEZ CH.	REV N°	FECHA	POR	CAMBIO	Código:			

A.3 Interfaz gráfica desarrollada para el proceso de pruebas.



A.4 Hoja de información del proyecto.

Información del estudiante:

Nombre: Edgar Jose Campos Duarte.

Cédula: 5 0398 0996 **Carné ITCR:** 201249248

Dirección de su residencia en época lectiva: Oriental, Cartago.

Teléfono: 88473578 **Email:** edjose182@gmail.com

Información del proyecto:

Nombre del proyecto: Rediseño del sistema de control de las compuertas de la antecámara y desarenador de la Central Hidroeléctrica Canalete.

Área del proyecto: Control.

Información de la empresa:

Nombre: Coopeguanacaste R.L.

Zona: Santa, Guanacaste.

Dirección: Diagonal a gasolinera Santa Cruz.

Teléfono: 26814747

Actividad principal: Generación de energía.

Información del asesor en la empresa:

Nombre: Julio Alberto Briceño Mena

Puesto que ocupa: Coordinador de Operación y Mantenimiento de proyectos.

Departamento: Generación de proyectos.

Profesión: Ingeniero Mecánico. **Grado académico:** Máster.

Teléfono: 2680 92 92 Ext:230

Email: jbriceno@coopeguanacaste.com