

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y
MONITOREO PARA DESARENADOR LONGITUDINAL DE
CUATRO CANALES

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por
Douglas Gonzalo Dávila Milián
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala

2017

MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y
MONITOREO PARA DESARENADOR LONGITUDINAL DE
CUATRO CANALES

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



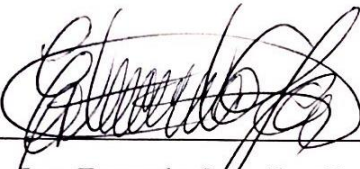
MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y
MONITOREO PARA DESARENADOR LONGITUDINAL DE
CUATRO CANALES

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por
Douglas Gonzalo Dávila Milián
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala

2017

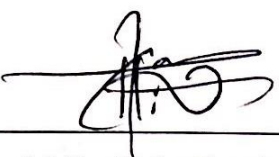
Vo. Bo:

(f) 
Ing. Estuardo González Godoy

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Estuardo González Godoy

(f) 
Ing. Gerardo Martínez

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Fecha de Aprobación: Guatemala 16 de Junio de 2017. ✓

ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| Lista de cuadros..... | vi |
| Lista de figuras | vii |
| Resumen | ix |
| I. Introducción | 1 |
| II. Objetivos..... | 2 |
| III. Justificación | 3 |
| IV. Marco teórico..... | 4 |
| A. Desarenado..... | 4 |
| B. Elementos mecánicos | 6 |
| C. Elementos de control y monitoreo. | 10 |
| D. Elementos para comunicación..... | 14 |
| V. Metodología..... | 16 |
| VI. Resultados..... | 37 |
| VII. Análisis de resultados | 54 |
| VIII. Conclusiones..... | 60 |
| IX. Recomendaciones | 61 |
| X. Bibliografía..... | 62 |
| XI. Anexos | 63 |

LISTA DE CUADROS

| | Página |
|--|--------|
| 1. Comparación entre sistemas de automatización..... | 11 |
| 2. Validación del diagrama de bloques de sistema de control y monitoreo respecto a los requerimientos del sistema..... | 20 |
| 3. Listado de señales conectadas a primer módulo de dieciséis salidas digitales..... | 21 |
| 4. Listado de señales conectadas a segundo módulo de dieciséis salidas digitales. | 22 |
| 5. Listado de señales conectadas a primer módulo de dieciséis entradas digitales. | 22 |
| 6. Listado de señales conectadas a segundo módulo de dieciséis entradas digitales..... | 23 |
| 7. Listado de señales conectadas a primer módulo de ocho entradas analógicas de corriente. | 23 |
| 8. Listado de señales conectadas a segundo módulo de ocho entradas analógicas de corriente..... | 24 |
| 9. Módulos de expansión utilizados para interconexión de plc tm221ce24t. | 25 |
| 10. Tiempos de seguridad en rutina de limpieza de rejilla..... | 30 |
| 11. Tiempos de seguridad en rutina de limpieza de canal..... | 32 |
| 12. Tiempos de seguridad en rutina de regulación de nivel. | 34 |
| 13. Tiempos de seguridad en reposición de compuertas de entrada..... | 36 |
| 14. Autoevaluación de cumplimiento de requerimientos del sistema de control y monitoreo. | 52 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| 1. Vista de planta y lateral de un desarenador..... | 4 |
| 2. Zonificación de un desarenador. | 5 |
| 3. Ejemplo de desarenador, canal de fondo para la liberación de sedimentos..... | 6 |
| 4. Reja de limpieza automática, con rastrillo de arrastre basado en una cadena tensada. | 6 |
| 5. Limpiarrejas hidráulico de rastrillo. | 7 |
| 6. Compuerta de movimiento vertical de tipo deslizante. | 8 |
| 7. Compuerta circular de tipo segmento..... | 9 |
| 8. Controlador Lógico Programable (PLC) y su funcionamiento. | 11 |
| 9. Estructura básica de un sistema de supervisión y mando. | 13 |
| 10. Trama para Modbus TCP..... | 15 |
| 11. Funciones utilizadas para el acceso de datos..... | 15 |
| 12. Diagrama de bloques del sistema de control y monitoreo, como representación general. | 19 |
| 13. PLC Schneider Electric TM221CE24T, más módulos de expansión..... | 24 |
| 14. Sensor de proximidad cilíndrico Autonics PR8. Ejemplo de ubicación en campo. | 26 |
| 15. Sensor de vibración Vegavib 62 contactless electronic switch. Ejemplo de ubicación en campo. | 27 |
| 16. Sensor de nivel sumergible AST4510. Ejemplo de ubicación en campo. | 27 |
| 17. Sensor de nivel ultrasónico Endress+Hauser FMU41. Ejemplo de ubicación en campo. | 28 |
| 18. Diagrama de estados para rutina de limpieza de rejilla. | 29 |
| 19. Interfaz de SoMachine Basic, captura con demostración de rutina de limpieza de rejilla. | 30 |
| 20. Diagrama de estados para rutina de limpieza de canal..... | 31 |
| 21. Interfaz de SoMachine Basic, captura con demostración de rutina de limpieza de canal. | 32 |
| 22. Diagrama de estados para rutina de regulación de nivel. | 33 |
| 23. Interfaz de SoMachine Basic, captura con demostración de rutina de regulación de nivel..... | 34 |
| 24. Diagrama de estados para reposición en compuertas de entrada..... | 35 |
| 25. Interfaz de SoMachine Basic, captura con demostración de reposición de compuertas de entrada. | 36 |
| 26. Vista panorámica del desarenador longitudinal de cuatro canales. | 37 |
| 27. Muestra del vertedero en la salida de un canal del desarenador longitudinal. | 37 |
| 28. Modernización, panel de control de desarenador longitudinal, en proceso de reconexión. | 38 |
| 29. Modernización, PLC Schneider Electric TM221CE24T, con arreglo de módulos completo, conectado y operando..... | 39 |

| | |
|---|----|
| 30. Modernización, escalamiento de sensores analógicos de tracción de hilo para peines hidráulicos y compuerta radial..... | 39 |
| 31. Modernización, escalamiento de sensores analógicos ultrasónico y de presión hidrostática para nivel de presa y nivel de canal, respectivamente..... | 40 |
| 32. Limpieza de rejillas, peines hidráulicos abajo y cerrados. | 41 |
| 33. Limpieza de rejillas, peines hidráulicos subiendo y cerrados con desechos retenidos en la rejilla. | 41 |
| 34. Limpieza de rejillas, peines hidráulicos en punto de vertedero de desechos limpiados. | 42 |
| 35. Limpieza de rejillas, peines hidráulicos nuevamente en posición inicial arriba y abiertos. | 42 |
| 36. Limpieza de canal, vaciado de canal luego de cierre de compuerta de entrada y apertura de compuerta de fondo..... | 43 |
| 37. Limpieza de canal, vistas de canal vacío con sedimentos sólidos en el fondo. | 44 |
| 38. Limpieza de canal, apertura de la compuerta de entrada al 1% para ingreso de agua a presión. | 44 |
| 39. Limpieza de canal, limpio y cerrando compuerta de fondo para rellenado de agua en canal..... | 45 |
| 40. Regulación de nivel, apertura de compuerta radial al 10%..... | 46 |
| 41. Regulación de nivel, apertura de compuerta radial al 40%..... | 46 |
| 42. Regulación de nivel, apertura de compuerta radial al 70%..... | 47 |
| 43. Interfaz de control y monitoreo, pantalla principal de desarenador. | 47 |
| 44. Interfaz de control y monitoreo, control panel para control del desarenador..... | 48 |
| 45. Interfaz de control y monitoreo, control panel para control manual asistido del desarenador. | 49 |
| 46. Interfaz de control y monitoreo, control panel para modo de control de limpieza de canal..... | 50 |
| 47. Interfaz de control y monitoreo, control panel para estados y alarmas del peine del desarenador.. | 51 |
| 48. Interfaz de control y monitoreo, control panel para secuencia de limpieza y alarma de canal. | 51 |
| 49. Interfaz de SoMachine Basic, captura con datos de consumos de memoria en PLC Schneider Electric TM221CE24T..... | 53 |
| 50. Interfaz de SoMachine Basic, captura con datos de consumos voltaje y corriente por módulos de expansión conectados al PLC TM221CE24T..... | 53 |

RESUMEN

El sistema de control y monitoreo que se describe en este trabajo fue aplicado a un desarenador longitudinal que posee cuatro canales, y una compuerta radial. Por cada canal dicho desarenador posee una rejilla, un peine hidráulico para la limpieza de la rejilla, una compuerta de entrada y una compuerta de salida.

La modernización refiere al remplazo de equipos de control, cableado de señales faltantes e instalación de sensores adecuados para obtener información útil sobre el estado del desarenador. El sistema de control y monitoreo es consecuente al tener los nuevos equipos instalados y la creación de lógicas de control eficientes.

Entonces, la modernización del sistema de control y monitoreo para un desarenador longitudinal es una mejora que permite brindar la información necesaria para conocer el estado de cada elemento que lo componen, ejecutar rutinas automáticas de limpieza de rejillas y limpieza de canales para el mantenimiento del desarenador, regular de forma automática la cantidad de agua que ingresa al desarenador haciendo uso de la compuerta radial, y reposicionar sus compuertas de entrada por pérdida de posición a causa de la gravedad. Además, permite ejecutar apertura y cierre de cada elemento.

El sistema de control y monitoreo se realiza mediante el uso de un controlador lógico programable, PLC por sus siglas en inglés. Toda la información procesada por el PLC es transmitida continuamente mediante el protocolo de comunicación MODBUS a un sistema de supervisión, control y adquisición de datos, SCADA por sus siglas en inglés, el cual posee la interfaz gráfica para que el usuario pueda controlar y monitorear de forma remota el desarenador.

I. INTRODUCCIÓN

La modernización del sistema de control y monitoreo para un desarenador longitudinal de cuatro canales permite conocer el estado de cada elemento que lo componen. Ejecutar rutinas de limpieza, regulación y reposición de forma manual asistida según el criterio del operador o de manera automática si las condiciones percibidas por sensores específicos se cumplen. Además, permite operar de forma manual e independiente cada acción de los elementos del desarenador, sin embargo, algunas acciones son limitadas o bloqueadas debido a restricciones internas de las lógicas de control según el estado de otros elementos que pueden verse comprometidos. Toda la información puede ser transmitida continuamente en tiempo real a un sistema SCADA mediante el protocolo de comunicación MODBUS, de modo que exista una interfaz gráfica para monitorear y controlar de forma remota el desarenador.

El sistema de control y monitoreo se realiza mediante el uso de un PLC. Fue necesario utilizar siete módulos de expansión que interconectados al PLC cumplen la función de captar la retroalimentación de todas las señales provenientes de sensores digitales, analógicos, y salidas digitales que actúan sobre elementos electromecánicos. Siete módulos de expansión es la capacidad máxima que pueden interconectarse en el PLC utilizado.

Según la tarea o rutina que se desea ejecutar el sistema de control y monitoreo puede requerirse, o no, la intervención de un operador. Es decir, las lógicas de control para la rutina de limpieza de rejilla, o canal, no evaluarán escenarios intermedios en los que el peine, o compuertas puedan quedarse atorados, en dicho escenario cada movimiento ejecutado por el PLC sobre cada elemento de campo tiene un tiempo de operación de seguridad para detener la acción que se esté ejecutando y salir de la rutina, activando una señal de alarma.

Debido a la naturaleza del proyecto desarrollado, la total ejecución, pruebas y correcciones finales se realizaron en campo donde se encuentra el desarenador longitudinal de cuatro canales. Las categorías en que se puede resumir cada fase de la metodología implementada corresponden a una etapa de levantamiento del sistema existente, una etapa de remplazo de los equipos existentes por los nuevos, reconexión y verificación de todas las señales cableadas, una etapa de implementación de lógicas de control, pruebas en campo e identificación de áreas de mejora en las lógicas de control, esta última etapa requirió varias iteraciones con el fin de obtener lógicas control robustas. Fue necesario el apoyo de terceros para instalaciones eléctricas y mecánicas que no eran directamente relacionadas a la modernización del control y monitoreo.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Modernizar y desarrollar el sistema de control y monitoreo de un desarenador longitudinal de cuatro canales.

B. Objetivos específicos

- Reemplazar los equipos de control existentes a modo de actualización, cablear todas las señales de entradas digitales, entradas analógicas y salidas digitales hacia los nuevos equipos de control.
- Implementar una rutina que permita la limpieza de cada rejilla haciendo uso del peine hidráulico correspondiente, con modo de operación automático con base en una diferencia entre el nivel de la presa y el nivel del canal o ejecución manual asistida proveniente del sistema SCADA.
- Implementar una rutina que permita la limpieza de los sólidos sedimentados en cada canal, controlando la compuerta de entrada y compuerta de salida correspondientes, con modo de operación automático con base en un sensor de sólidos colocado al fondo del canal, o por contador tiempo periódico, o ejecución manual asistida proveniente del sistema SCADA.
- Implementar el control de la compuerta radial para regulación de la cantidad de agua que ingresa al desarenador, con modo de operación automático de acuerdo al nivel de agua en la presa previa al desarenador o apertura completa o porcentual proveniente del sistema SCADA.
- Implementar una rutina de reposición de las compuertas de entrada, con modo de operación automática con base en un tiempo definido después de detectar la pérdida de posición a causa de la gravedad.
- Implementar el control manual para operación remota de compuertas de entrada, compuertas de salida, peines hidráulicos y compuerta radial con base en comandos enviados por el sistema SCADA.

III. JUSTIFICACIÓN

La generación de energía tanto en Guatemala como en diversos países alrededor del mundo se ha convertido en una búsqueda para independizarse del uso absoluto del petróleo fomentando la generación de energía haciendo uso de recursos renovables. Siendo las centrales hidroeléctricas una de las formas más eficientes de generar energía limpia. Es por ello que el mantener en óptimas condiciones una central hidroeléctrica, desde sus obras hidráulicas hasta sus unidades de generación se convierte en un tema de suma importancia.

Los desarenadores que pueda contener una central hidráulica son el primer paso que el cauce de agua debe recorrer antes de poder generar energía. Su importancia reside en que estos permiten retener sólidos que el agua pueda traer en su cauce. Sin embargo, cada desarenador posee una capacidad limitada de retención que es directamente proporcional a la cantidad de sólidos que posee el cauce de agua. Por esa razón es necesario retirar dichos sólidos sedimentados en los canales o retenidos en las rejillas del desarenador de forma eventual.

La modernización del sistema de control y monitoreo para un desarenador longitudinal específico pretende ser de ayuda en la depuración de los sólidos sedimentados en los canales o retenidos en las rejillas mediante rutinas de limpieza que se activan de forma automática mediante sensores o de forma manual asistida desde un sistema SCADA. Controlar que el flujo de agua no sobrepase la capacidad del desarenador y reposicionar sus compuertas de entrada por pérdida de posición debido a la gravedad. Además de entregar en tiempo real toda la información procesada por el PLC hacia un sistema SCADA mediante el protocolo de comunicación MODBUS permitiendo que todas las operaciones sean monitoreadas y controladas de forma remota desde un cuarto de control de la central hidroeléctrica.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Desarenado

El desarenado consiste en un proceso en el que se produce una separación por decantación diferencial o selectiva, de todos aquellos sólidos en suspensión de densidad elevada (compuestos inorgánicos), impidiendo la sedimentación de la materia en suspensión de baja densidad (de naturaleza orgánica) (Sastre, 2005).

Las partículas de naturaleza inorgánica eliminadas en este proceso, son conocidas con el nombre genérico de arenas, incluyendo en dicha denominación otros productos presentes en el agua residual.

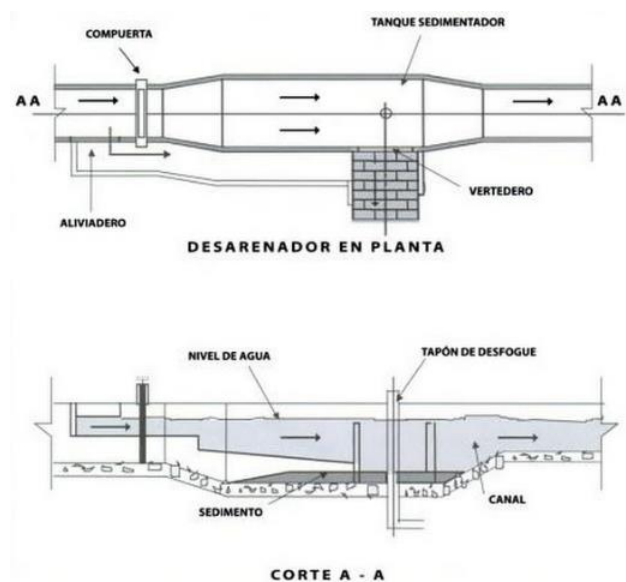
La característica fundamental de estos elementos inorgánicos separados en este proceso es que son totalmente estables, lo que conlleva que no se van a generar descomposiciones posteriores de los mismos.

Como parte de los objetivos del desarenado se puede mencionar (Sastre, 2005):

- Evitar problemas de abrasión en equipos mecánicos, al tratarse las arenas de compuestos de elevada dureza, aumentando con ello la vida de los diferentes equipos de la planta.
- Eliminar deposiciones en canales y tuberías.
- Evitar la presencia de sólidos inertes en la línea de tratamiento de fangos, tamizadoras.

1. Desarenador de flujo horizontal. Su función principal es sedimentar partículas de tierra y arena que son arrastrados a lo largo del canal y evitar su ingreso a la tubería de presión. Consiste en un tramo de canal o canales de gran sección en la que el agua circula a muy baja velocidad, quedando depositadas las partículas (Eduardo Briceño, 2008).

Figura 1. Vista de planta y lateral de un desarenador.

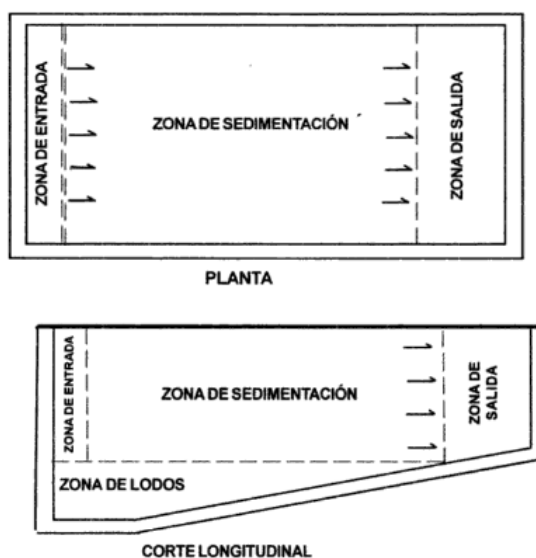


(Eduardo Briceño, 2008)

Un desarenador consta de cuatro zonas (Romero & Serna, 2005):

- **Zona de entrada:** es la cámara donde se disipa la energía del agua que llega con alguna velocidad de la captación. En esta zona se orientan las líneas de corriente hacia los canales del desarenador a fin de eliminar turbulencias en la zona de sedimentación.
- **Zona de sedimentación:** permite la remoción de los sólidos de agua. En esta zona se supone que la velocidad horizontal del fluido en el desarenador está por debajo de la velocidad de arrastre de los lodos, por lo tanto, una vez que una partícula llegue al fondo, permanece allí.
- **Zona de lodos:** almacena los sedimentos que se depositan en el fondo del desarenador. En la parte más profunda de su longitud queda almacenado la mayor cantidad de sedimentos.
- **Zona de salida:** distribuye de manera uniforme el flujo a la salida de la zona de sedimentación, logrando una velocidad uniforme. Existe una gran variedad de estructuras de salida, por ejemplo: vertederos de rebose, canaletas de rebose, orificios circulares o cuadrados.

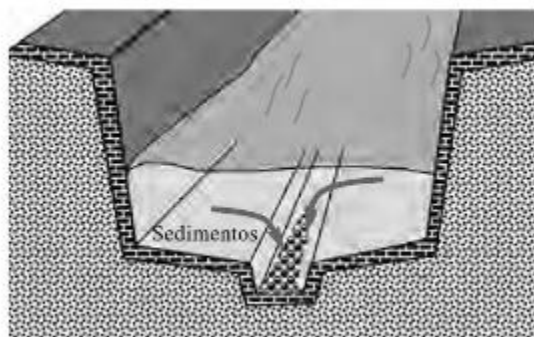
Figura 2. Zonificación de un desarenador.



(Romero & Serna, 2005)

El desarenador debe disponer de un sistema que permita su limpieza. Un método consiste en darle base a la forma de doble pendiente que acaba en un pequeño canal rectangular perpendicular a la sección del desarenador. Así, los sedimentos caen en este pequeño canal, que es fácil de limpieza (Osorio J. F., 2008).

Figura 3. Ejemplo de desarenador, canal de fondo para la liberación de sedimentos.

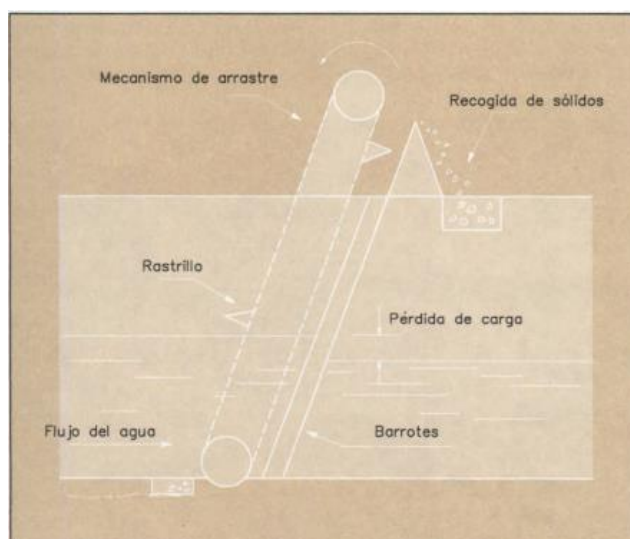


(Osorio J. F., 2008)

B. Elementos mecánicos

1. **Rejas.** A la entrada de las diversas conducciones de agua deben instalarse unas rejas para impedir la entrada de cuerpos sólidos (Osorio & Francisco, 2016). El objetivo es proteger los equipos mecánicos e instalaciones posteriores que podrían ser dañados u obstruidos con perjuicio de los procesos que tuviesen lugar. Se construyen con barras metálicas. Se limpian mediante rastrillos que pueden ser manejados manualmente o accionados automáticamente (Lapeña, 1989).

Figura 4. Reja de limpieza automática, con rastrillo de arrastre basado en una cadena tensada.



(Lapeña, 1989)

2. **Limpiarrejas.** Para evitar la acumulación de sólidos de la reja conviene hacer una limpieza frecuente de los objetos que quedan detenidos. Si la central es de muy poca potencia y es vigilada, lo más sencillo y barato es limpiarla manualmente con un rastrillo. En el resto de los casos es preferible la instalación de un limpiarrejas automático (Osorio & Francisco, 2016).

El limpiarrejas automático es también un rastrillo, que es arrastrado mediante un mecanismo, por la superficie de la reja volcando la suciedad acumulada en una pequeña canaleta ubicada en la parte superior de la cámara de carga. Una vez en la canaleta, se inyecta un chorro de agua presión que limpia la reja empujando la suciedad a otro recipiente o parte lateral.

El limpiarrejas puede ponerse en marcha de diferentes maneras (Osorio & Francisco, 2016):

- a. **Manual:** cuando el personal de mantenimiento da la orden de accionar el mecanismo de puesta en marcha.
- b. **Temporizado:** la orden la da un temporizador programado de acuerdo con la suciedad que transporta el agua.
- c. **Detección de nivel:** se detecta la diferencia de nivel del agua a la entra y a la salida de la reja. De esta forma se detecta en qué momento los desechos se acumulan en la reja, el limpiarrejas se pone en marcha.

Figura 5. Limpiarrejas hidráulico de rastrillo.



(Osorio & Francisco, 2016)

3. Elementos de apertura y cierre del paso de agua, compuertas. Las compuertas se instalan en conducciones de agua, tanto canales como tuberías. Pueden colocarse a la entrada de la obra de toma, a la entrada del canal, a la entrada de la cámara de carga, en los aliviaderos, en desagües de fondo y medio fondo, etc. Pueden abrir, cerrar e incluso regular el paso del agua mediante aperturas parciales (Osorio & Francisco, 2016).

Se clasificarán las compuertas en función de su movimiento:

a. Compuertas de movimiento vertical. Están formados por una o varias tablas de acero laminado, situadas de forma perpendicular al sentido de circulación de la corriente, que se abren desplazándose verticalmente hacia arriba (Osorio & Francisco, 2016). Según sea el mecanismo de movimiento respecto de las guías laterales, se distinguen diversos tipos de compuertas verticales:

1) Compuerta deslizante: Es la más simple, la compuerta se desliza directamente entre las guías, que suelen ser de teflón. Sirven para compuertas pequeñas, Se usan en puntos con esfuerzo, tales como a la entrada de las obras de toma de las centrales hidroeléctricas fluyentes o en canales de poco caudal.

2) Compuerta vagón: en el tablero se colocan unos rodillos para facilitar el movimiento en el interior de la guía. Permiten esfuerzos muchos mayores.

3) Compuerta Stoney: es similar a la compuerta vagón, pero en este caso los rodillos de deslizamiento están situados en las guías laterales.

Figura 6. Compuerta de movimiento vertical de tipo deslizante.



(Osorio & Francisco, 2016)

b. Compuertas de movimiento circular. Las compuertas radiales es la más utilizada para operaciones a superficie libre. Ofrece una gran ventaja al poder elevarse sin tener que vencer la resistencia que resulta de la fricción con las correderas, contra las cuales una compuerta deslizante resulta empujada por la presión del agua. Se trata de un dispositivo conformado en sector cilíndrico de eje horizontal que gira alrededor del eje mismo, el que a su vez apoya sus extremidades en soportes fijos a paredes (Lanza-Espino, 1999).

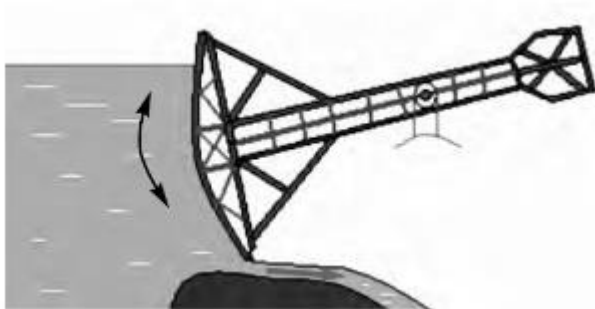
Se pueden considerar tres tipos (Osorio & Francisco, 2016):

1) **Segmento:** están hechas de acero laminado y tienen forma de segmento circular. La apertura se realiza girando de forma ascendente y cierran al descender. Disponen de unos contrapesos en el mismo eje de giro para equilibrar el peso de la compuerta.

2) **Sector:** también esta forma por un sector circular, la diferencia es que esta compuerta baja permitir el paso del agua, quedando encajada en la coronación de la presa, y sube para cerrar.

3) **Clapeta:** son compuertas rectangulares, cuyo movimiento es ahora pivotante sobre la base. Su estructura oscila alrededor de un eje horizontal hasta el fondo del curso del agua.

Figura 7. Compuerta circular de tipo segmento.



(Osorio & Francisco, 2016)

C. Elementos de control y monitoreo.

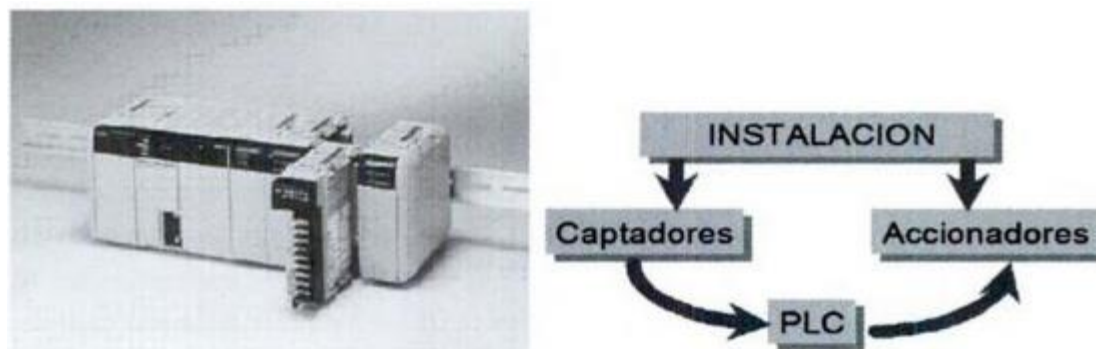
1. **Controlador Lógico Programable (PLC).** Un Controlador Lógico Programable, más conocido por sus siglas en inglés PLC (Programmable Logic Controller), Es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas. Los PLC son utilizados en muchas industrias y máquinas. A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Los programas para el control de funcionamiento de la máquina se suelen almacenar en baterías copia de seguridad o en memorias no volátiles. Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real, donde los resultados de salida deben ser producidos en respuesta a las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado (Bustamante, 2016).

Es un sistema basado en microprocesador orientado al control industrial. Como los primeros sistemas de automatización industrial se realizaban con lógica de relés, los PLC se diseñaron para emular este funcionamiento. Pueden trabajar con entradas y salidas digitales, además pueden tener entradas y salidas analógicas, sistemas de comunicación para conectarse a otros dispositivos, etc. (Frías, 2009)

Con los avances en la electrónica digital y la informática industrial, los reguladores han pasado a ser controladores digitales autónomos, polivalentes desde el punto de vista de que se adaptan a un rango de tensiones y corrientes habituales en la automatización industrial, por lo que un mismo controlador está condicionado para la regulación de diversas variables. Además, hoy en día disponen de bloques lógicos de programación de forma que también pueden hacer frente al manejo de sistemas secuenciales. Una arquitectura abierta de estos controladores facilita la implementación de estructuras de control tipo cascada, o arquitectura de control distribuida mediante un bus de campo orientado al control de procesos, como por ejemplo el bus MODBUS (Asensio, Vilanova, & Arbós, 2006).

Los autómatas programables se complementan con periféricos denominados genéricamente interfaces hombre-máquina HMI. El operario interactúa con el proceso controlado y puede ejercer tareas rutinarias de vigilancia sin intervención, tareas de inicio o paro del ciclo, o interrupciones para modificar los parámetros del algoritmo de control (Asensio, Vilanova, & Arbós, 2006).

Figura 8. Controlador Lógico Programable (PLC) y su funcionamiento.



(Higuera & García, 2007)

Cuadro 1. Comparación entre sistemas de automatización.

| Sistema de control | Ventajas | Desventajas |
|--------------------|---|---|
| Lógica cableada | -Económico si no hay previsión de cambio | -Poca flexibilidad a modificaciones. |
| PLC | -Flexibilidad en cambios de lógica de control con frecuencia o necesidad temprana. -Fácilmente ampliable. -Alta fiabilidad (robustos). -Trabajan en condiciones adversas. | -Excesivo en instalaciones pequeñas. -Solo se pueden ejecutar un programa a la vez en orden secuencial. -Capacidad de almacenamiento limitada frente al disco duro de un PC industrial. |
| PC industrial | -Entorno tipo Windows. Es cómodo, fácil y accesible para el técnico. -Mayor capacidad que los PLCs, mejor respuesta a manejar eventos reales al realizar tareas simultaneas. -Flexible y potente. -Gran capacidad de almacenamiento. | -Precio más elevado que los PLCs. -Conexión de E/S no es sencilla como en un PLC. -Limitación en número de tarjetas de expansión. -En tiempo real tiende problemas, bloqueándose. |

(Julián Rodríguez Fernández & Sánchez-Homeros, 2014).

2. **Sistemas SCADA.** Se le da el nombre de SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) a cualquier software que permita el acceso a datos remotos de un proceso y permita, utilizando las herramientas de comunicación necesarias en cada caso, el control del mismo (Penin, 2012).

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

Los sistemas SCADA se conciben principalmente como una herramienta de supervisión y mando. Entre sus objetivos se pueden destacar (Penin, 2012):

- **Economía:** es más fácil ver qué ocurre en la instalación desde la oficina que enviar a un operario a realizar la tarea. Ciertas revisiones se convertirán innecesarias.
- **Accesibilidad:** hace posible modificar los parámetros de funcionamiento de cada elemento involucrado en el proceso, consultar estados, ejecutar comandos, etc.
- **Mantenimiento:** la adquisición de datos materializa la posibilidad de obtener datos de un proceso, almacenarlos y presentarlos de manera inteligible para un usuario no especializado. La misma aplicación se puede programar de manera que reporte cuando se aproximan fechas de revisión o una máquina tenga más fallos de los considerados normales.
- **Gestión:** todos los datos recopilados pueden ser valorados de múltiples maneras mediante herramientas estadísticas, gráficas, valores tabulados, etc., que permitan explotar el sistema con el mejor rendimiento posible.
- **Conectividad:** se buscan sistemas abiertos. La documentación de los protocolos de comunicación actuales permite la interconexión de sistemas de diferentes proveedores y evita la existencia de lagunas informativas que puedan causar fallos en el funcionamiento o en la seguridad.

Entre las prestaciones de una herramienta de este tipo destacan (Penin, 2012):

a. **Monitorización.** Representación de datos en tiempo real a los operadores de planta. Se leen los datos de los autómatas (temperaturas, velocidades, detectores...). Una máquina simple, una instalación hidroeléctrica, un parque eólico, pueden ser vigilados desde muchos kilómetros de distancia.

b. **Supervisión.** Supervisión, mando y adquisición de datos de un proceso y herramientas de gestión para la toma de decisiones (mantenimiento predictivo, por ejemplo). Tienen además la capacidad de ejecutar programas que puedan supervisar y modificar el control establecido y, bajo ciertas condiciones, anular o modificar tareas asociadas a los autómatas. Evita una continua supervisión humana.

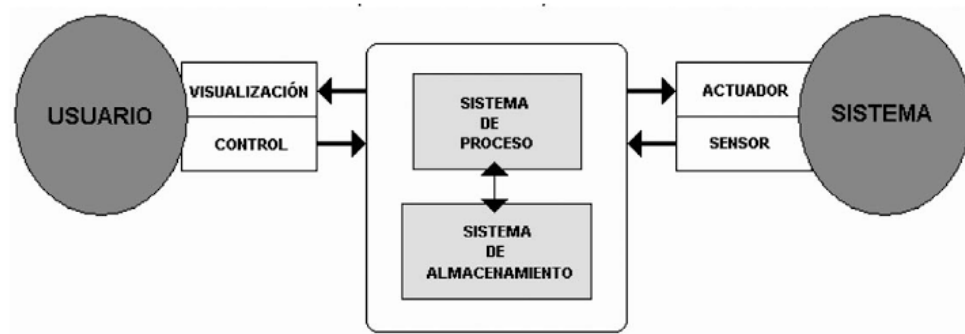
c. **Visualización de los estados de las señales del sistema (alarmas y eventos).** Reconocimiento de eventos excepcionales acaecidos en la planta y su inmediata puesta en conocimiento a los operarios para efectuar las acciones correctoras pertinentes. Además, los paneles de alarma pueden exigir alguna acción de reconocimiento por parte del operario, de forma que queden registradas las incidencias.

d. **Mando.** Posibilidad de que los operadores puedan cambiar consignas u otros datos claves del proceso directamente desde el ordenador (marcha, paro, modificación de parámetros...) Se escriben datos sobre los elementos de control.

La arquitectura para poder implementar un sistema SCADA puede ser dividido en tres bloques principales (Penin, 2012):

- Software de adquisición de datos y control (Scada)
- Sistemas de adquisición y mando (sensores y actuadores).
- Sistema de interconexión (comunicaciones).

Figura 9. Estructura básica de un sistema de supervisión y mando.



(Penin, 2012)

D. Elementos para comunicación.

1. **Modbus TCP.** Una red Modbus TCP consiste de múltiples dispositivos conectados a través a una red TCP/IP, que interactúan siguiendo el modelo servidor-cliente. Un cliente envía una solicitud a un servidor, el cual a su vez responde al cliente con los datos solicitados. Esta transacción (intercambio solicitud/respuesta) se realiza mediante el envío de tramas Modbus TCP a través de una conexión TCP establecida previamente entre el cliente y el servidor (Wilamowski & Irwin, 2016).

El establecimiento y gestión de conexiones se maneja mediante el protocolo TCP/IP y ocurre independientemente del protocolo Modbus. Un servidor Modbus escucha en el puerto 502 las solicitudes de clientes que desean establecer una nueva conexión con el servidor. Este puerto es actualmente reservado (y registrado) para aplicaciones Modbus (Wilamowski & Irwin, 2016).

Algunos dispositivos de servidor Modbus pueden admitir múltiples conexiones de clientes distintos de forma simultánea. De igual forma, los clientes pueden establecer múltiples conexiones a distintos servidores. Adicionalmente, El protocolo Modbus TCP permite a un cliente enviar múltiples solicitudes Modbus al mismo servidor sobre la misma conexión, incluso antes de que las respuestas de las solicitudes anteriores lleguen. Un dispositivo puede ser tanto un cliente como un servidor al mismo tiempo (Wilamowski & Irwin, 2016).

a. **Tramas Modbus.** Las tramas Modbus TCP (solicitud y respuesta) consisten en un encabezado MBAP (encabezado Modbus Application Protocol) más la capa de aplicación APDU. Los encabezados MBAP comprenden de varios campos (Wilamowski & Irwin, 2016):

1) **Identificador de la transacción:** dado que un cliente puede emitir varias transacciones simultáneas a través de la misma conexión TCP, no se garantiza que las respuestas lleguen en el mismo orden en que se envió la solicitud. Por lo tanto, es necesario disponer de un identificador para cada transacción con el fin de coincidir con las tramas de solicitud y respuesta.

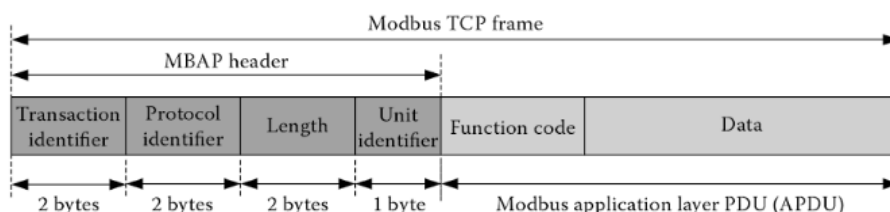
2) **Identificador del protocolo:** se utiliza para identificar el protocolo; La mayoría de las veces siempre tiene un valor de cero.

3) **Longitud:** este campo indica el tamaño (en bytes) del campo identificador de unidad más la APDU. La transferencia de datos en una conexión TCP se realiza como un flujo de bytes, lo que podría conducir a una situación en la que varias tramas estén esperando para ser leída en el buffer de recepción. Para identificar los límites de las tramas en estas situaciones, se debe conocer la longitud de la trama.

4) **Identificador de la unidad:** Este campo se utiliza para identificar el dispositivo de destino (un esclavo). Se utiliza principalmente por *gateways* entre las redes Modbus/TCP y Modbus serial, donde el *gateway*, al recibir una trama Modbus/TCP, necesita reconocer la identificación del esclavo en la red Modbus serial que debería recibir esa trama. Los dispositivos que no son *gateways* usualmente ignoran este campo.

A diferencia del protocolo Modbus serial, las tramas Modbus TCP no tienen mecanismos de detección de errores. Esto se consideró innecesario ya que la pila TCP/IP ya incluye varios mecanismos de detección de errores.

Figura 10. Trama para Modbus TCP.



(Wilamowski & Irwin, 2016)

El protocolo Modbus define una larga lista de funciones. Las funciones más utilizadas son aquellas asociadas con el acceso a las áreas de memoria.

Figura 11. Funciones utilizadas para el acceso de datos.

| Memory Area | Function Name | Function Code (Hex) | Addressable Elements | Possible Response Error Codes |
|-------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Discrete Inputs | Read discrete inputs | 0x02 | 1–2000 | 01, 02, 03, 04 |
| Coils | Read coils | 0x01 | 1–2000 | 01, 02, 03, 04 |
| Coils | Write single coil | 0x05 | 1 | 01, 02, 03, 04 |
| Coils | Write multiple coils | 0x0F | 1–1976 | 01, 02, 03, 04 |
| Input registers | Read input registers | 0x04 | 1–125 | 01, 02, 03, 04 |
| Holding registers | Read holding registers | 0x03 | 1–125 | 01, 02, 03, 04 |
| Holding registers | Write single register | 0x06 | 1 | 01, 02, 03, 04 |
| Holding registers | Write multiple registers | 0x10 | 1–123 | 01, 02, 03, 04 |
| Holding registers | Read/write multiple registers | 0x17 | 1–121 (write) 1–125 (read) | 01, 02, 03, 04 |
| Holding registers | Mask write register | 0x16 | 1 | 01, 02, 03, 04 |
| Holding registers | Read FIFO queue | 0x18 | 1–32 | 01, 02, 03, 04 |
| Files | Read file record | 0x14 | | 01, 02, 03, 04, 08 |
| Files | Write file record | 0x15 | | 01, 02, 03, 04, 08 |

(Wilamowski & Irwin, 2016)

V. METODOLOGÍA

Debido a la naturaleza del proyecto a desarrollar la total ejecución, pruebas y correcciones finales se deberán realizar en campo, donde se encuentra el desarenador longitudinal de cuatro canales.

- Se estará viajando a la finca donde se encuentra el desarenador de la central hidroeléctrica de lunes a viernes para ejecutar las tareas semanales.
- Se realizará una visita inicial para hacer un levantamiento del sistema existente que se desea reemplazar. Se desea lograr con este levantamiento inicial identificar todas aquellas señales que puedan agregarse y no se encuentren cableadas al sistema existente, determinar el funcionamiento de todos los sensores ya instalados e identificar los sensores que se deberán instalar.
- Se reemplazarán los equipos existentes por los nuevos, asegurando mediante una prueba punto a punto la retroalimentación adecuada de todas las señales cableadas.
- Se implementarán las lógicas de control tomando en cuenta todas las delimitaciones planteadas, aplicando las mejores prácticas de programación y manteniendo un historial de versiones.
- Se ejecutarán pruebas directamente en los elementos de campo, con el objetivo de observar su comportamiento real e identificar áreas de mejora en las lógicas de control.
- Se pedirá apoyo en instalaciones eléctricas y mecánicas que no sean directamente relacionadas a la modernización del sistema de control y monitoreo.

A. Cronograma

| | | Año 2016 | | | | |
|-----|--|----------|-------|------|------|------|
| No. | Actividad – Descripción | Ago. | Sept. | Oct. | Nov. | Dic. |
| 0 | Visita a campo para levantamiento de sistema existente. | | | | | |
| 1 | Reemplazo y cableado de nuevos equipos de control. | | | | | |
| 2 | Prueba punto a punto de entradas y salidas del PLC, sensores digitales, y ajuste de sensores analógicos. | | | | | |
| 3 | Elaboración, pruebas y mejoras de lógicas de control para rutina de limpieza de cada rejilla. | | | | | |
| 4 | Elaboración, pruebas y mejoras de lógicas de control para rutina de limpieza de cada canal. | | | | | |
| 5 | Elaboración, pruebas y mejoras de lógica de control para compuerta radial. | | | | | |
| 6 | Elaboración, pruebas y mejoras de lógica de reposición de compuertas de entrada. | | | | | |
| 7 | Elaboración y pruebas de controles manuales de cada elemento del desarenador. | | | | | |

B. Delimitación del sistema de control y monitoreo.

Para la rutina de limpieza de cada rejilla se deberán considerar las siguientes condiciones: la posición inicial del peine hidráulico será cuando el peine se encuentre totalmente arriba y abierto, si no se encuentra en su posición inicial no se debe ejecutar la rutina de limpieza. La secuencia para hacer la limpieza de la rejilla será: bajar el peine, cerrar el peine, subir el peine, abrir el peine. Las lógicas de control para la rutina de limpieza no evaluarán escenarios intermedios en los que el peine pueda quedarse atorado, en dicho escenario cada movimiento ejecutado por el controlador sobre el peine hidráulico tendrá un tiempo de operación de seguridad para detener la acción que se esté ejecutando y salir de la rutina, activando una señal de alarma.

Para la rutina de limpieza de cada canal se deberán considerar las siguientes condiciones: para poder iniciar la rutina la compuerta de entrada deberá estar totalmente abierta y la compuerta de fondo totalmente cerrada, si no se cumplen estas condiciones no debe ejecutar la rutina. La secuencia para hacer la limpieza del canal será: cerrar compuerta de entrada, abrir compuerta de fondo, esperar hasta que el canal este totalmente vacío, abrir la compuerta de entrada de manera eficiente para que entre agua a presión y lave los sedimentos en el canal, cerrar nuevamente la compuerta de entrada, cerrar totalmente la compuerta de fondo, abrir totalmente la compuerta de entrada. Todas las acciones de las compuertas deberán tener un tiempo de seguridad para evitar forzar las compuertas en caso se atoren, que deberá detener la rutina de limpieza activando una señal de alarma.

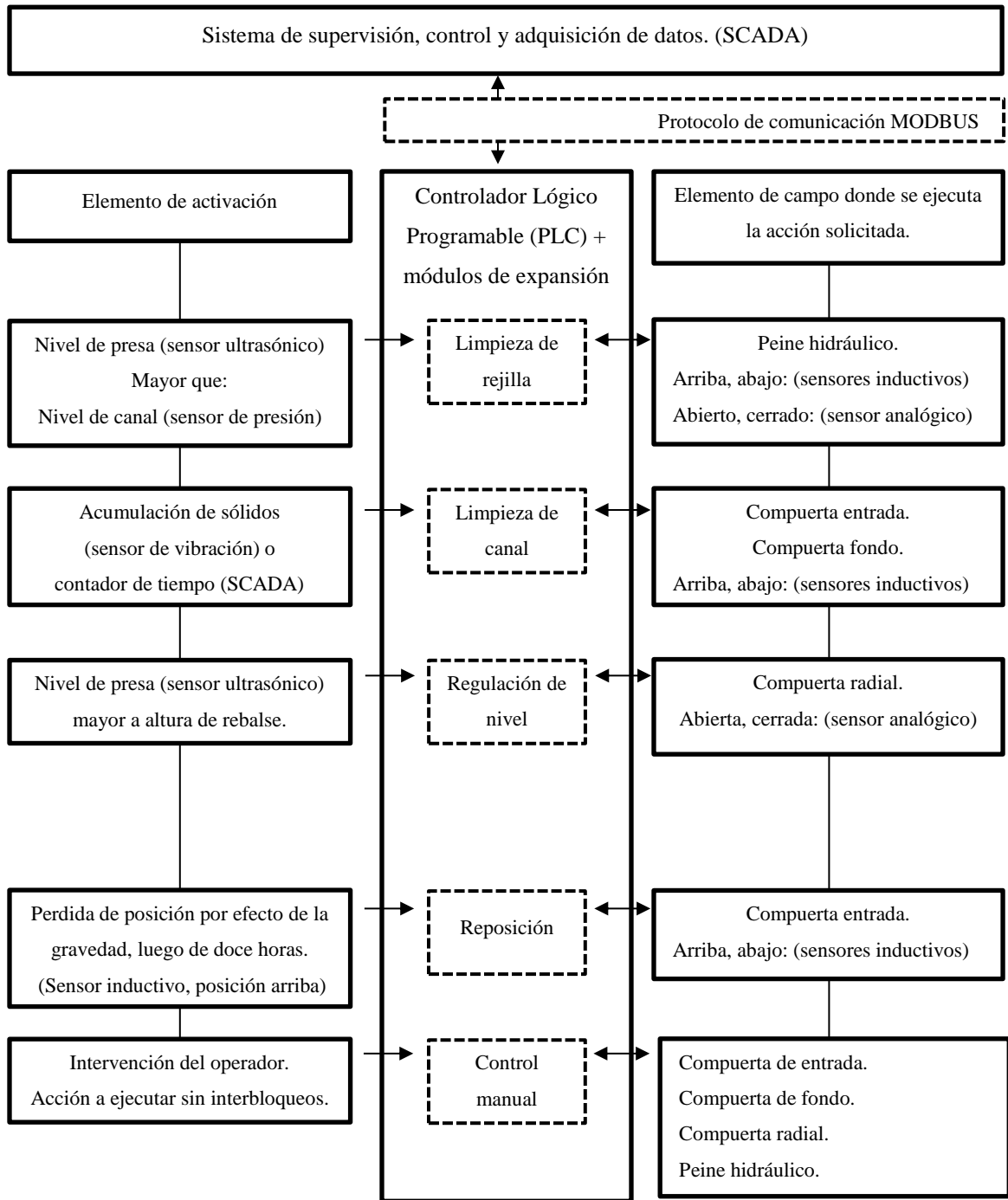
Para el control de la compuerta radial se deberán considerar las siguientes condiciones: la apertura deberá ser proporcional al nivel de agua de la presa conforme este supere la capacidad del desarenador.

Para la reposición de las compuertas de entrada evitando consumos improductivos de esfuerzo en la unidad hidráulica que permite las maniobras sobre esta, se deberá ejecutar la reposición como máximo una vez al día.

C. Abstracción del sistema de monitoreo y control para el desarenador.

Debido a las diversas tareas que el controlador debe ejecutar fue necesario abstraer las funciones que desempeñaría el sistema de control y monitoreo. Se identificó qué elementos mecánicos se verían involucrados en cada rutina, los sensores que retroalimentarían la posición de dichos elementos para conocer su posición física, así como la causa que accionaría de forma automática cada rutina y los sensores necesarios para lograr detectar la causa de activación. La activación manual de cada rutina y de cada movimiento de los elementos de campo es libre y quedó según intervenga el operador, sin embargo, se tomaron en cuenta restricciones para realizar interbloqueos en los controles manuales y evitar un mal funcionamiento en las rutinas y/o daño de los elementos de campo por una operación que comprometa dichos elementos.

Figura 12. Diagrama de bloques del sistema de control y monitoreo, como representación general.



Cuadro 2. Validación del diagrama de bloques de sistema de control y monitoreo respecto a los requerimientos del sistema.

| Requerimiento | Capacidad de cumplir requerimiento | Notas |
|--|------------------------------------|--|
| <p>Rutina de limpieza de cada rejilla usando peine hidráulico por canal.</p> <p>Modo automático: Diferencia entre el nivel de la presa y el nivel del canal.</p> <p>Modo manual: forma asistida proveniente desde SCADA.</p> | Sí | <p>Con la calibración o ajuste adecuado en los sensores de nivel de presa y nivel de cada canal. Con la retroalimentación del estado (abierto/cerrado) y la ubicación (arriba/abajo) de cada peine hidráulico.</p> <p>Con la elaboración de lógica de control capaz de ejecutar la secuencia descrita en las delimitaciones del sistema.</p> |
| <p>Realizar de limpieza de canal de los sólidos sedimentados en cada canal. Usando compuertas de entrada y fondo.</p> <p>Modo automático: sensor de sólidos o contador de tiempo periódico.</p> <p>Modo manual: forma asistida proveniente desde SCADA.</p> | Sí | <p>Con la operación adecuada del sensor de sólidos. Con la retroalimentación del estado de las compuertas de entrada y fondo (abierta/cerrada).</p> <p>Con la elaboración de lógica de control capaz de ejecutar la secuencia descrita en las delimitaciones del sistema.</p> |
| <p>Regulación de la cantidad de agua que ingresa al desarenador, usando compuerta radial.</p> <p>Modo automático: Nivel de agua en la presa previa al desarenador mayor a rebalse.</p> <p>Modo manual: apertura completa o porcentual proveniente desde SCADA.</p> | Sí | <p>Con la calibración adecuada en sensor de nivel de presa. Con la distancia que existe entre el sensor de nivel de presa y el rebalse del desarenador. Con el ajuste adecuado del sensor analógico para determinar la ubicación de la compuerta radial (porcentaje de apertura).</p> |
| <p>Reposición de compuertas de entrada. Modo automático: Tiempo definido después de detectar la pérdida de posición a causa de la gravedad</p> | Sí | <p>Con la retroalimentación del estado de las compuertas de entrada (abierta/cerrada). Con lógica que discrimine si la compuerta perdió posición por gravedad u otra razón.</p> |
| <p>Control manual según intervención del operador proveniente desde SCADA, sobre todas las acciones de los elementos del desarenador.</p> | Sí | <p>Con los bloqueos internos necesarios para que no afecten la ejecución de rutinas o acciones que comprometan los elementos de campo.</p> |

D. Levantamiento del sistema existente.

Debido a que se realizó una modernización del sistema de control y monitoreo, fue indispensable realizar una primera visita al desarenador para observar el estado de todos los elementos de campo que se deseaban controlar. En cada elemento de campo se identificó la cantidad de sensores que poseía y si estos funcionaban apropiadamente para retroalimentar la ubicación o estado del elemento. Habiendo evaluado cada elemento de campo, según era requerido se solicitó la instalación de nuevos sensores, o bien, mover la ubicación original a un lugar donde fuera de mayor utilidad para el nuevo sistema de control y monitoreo.

Una limitante en el desarrollo del proyecto fue el no poder intervenir en la selección de sensores, ya que la mayoría se encontraban instalados en el desarenador antes de iniciar el proyecto, y los sensores faltantes instalados fueron a especificación y conveniencia de la entidad encargada del desarenador.

En los cuadros siguientes se muestran las señales necesarias para realizar la propuesta de la modernización del sistema de control y monitoreo, y su distribución en los módulos de expansión. No se incluyen las señales que no se ven involucradas en las lógicas de control descritas en los requerimientos de este trabajo, sin embargo, fueron cableadas y tomadas en cuenta para la elección de la cantidad de módulos de expansión necesarios del sistema completo.

Cuadro 3. Listado de señales conectadas a primer módulo de dieciséis salidas digitales.

| Tipo de señal / No. | Nombre de señal | Elemento que acciona |
|---------------------|-------------------------------|----------------------|
| Salida digital 0 | Abrir compuerta de entrada 1 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 1 | Cerrar compuerta de entrada 1 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 2 | Abrir compuerta de entrada 2 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 3 | Cerrar compuerta de entrada 2 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 4 | Abrir compuerta de entrada 3 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 5 | Cerrar compuerta de entrada 3 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 6 | Abrir compuerta de entrada 4 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 7 | Cerrar compuerta de entrada 4 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 8 | Abrir compuerta de fondo 1 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 9 | Cerrar compuerta de fondo 1 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 10 | Abrir compuerta de fondo 2 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 11 | Cerrar compuerta de fondo 2 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 12 | Abrir compuerta de fondo 3 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 13 | Cerrar compuerta de fondo 3 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 14 | Abrir compuerta de fondo 4 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 15 | Cerrar compuerta de fondo 4 | Bobina de relé 24VDC |

Cuadro 4. Listado de señales conectadas a segundo módulo de dieciséis salidas digitales.

| Tipo de señal / No. | Nombre de señal | Comentario |
|---------------------|-----------------|----------------------|
| Salida digital 0 | Abrir peine 1 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 1 | Cerrar peine 1 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 2 | Abrir peine 2 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 3 | Cerrar peine 2 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 4 | Abrir peine 3 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 5 | Cerrar peine 3 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 6 | Abrir peine 4 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 7 | Cerrar peine 4 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 8 | Subir peine 1 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 9 | Bajar peine 1 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 10 | Subir peine 2 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 11 | Bajar peine 2 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 12 | Subir peine 3 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 13 | Bajar peine 3 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 14 | Subir peine 4 | Bobina de relé 24VDC |
| Salida digital 15 | Bajar peine 4 | Bobina de relé 24VDC |

Cuadro 5. Listado de señales conectadas a primer módulo de dieciséis entradas digitales.

| Tipo de señal / No. | Nombre de señal | Procedencia de campo |
|---------------------|---------------------------|------------------------------|
| Entrada digital 0 | Peine 1 abierto | Sensor inductivo |
| Entrada digital 1 | Peine 1 cerrado | Sensor inductivo |
| Entrada digital 2 | Peine 2 abierto | Sensor inductivo |
| Entrada digital 3 | Peine 2 cerrado | Sensor inductivo |
| Entrada digital 4 | Peine 3 abierto | Sensor inductivo |
| Entrada digital 5 | Peine 3 cerrado | Sensor inductivo |
| Entrada digital 6 | Peine 4 abierto | Sensor inductivo |
| Entrada digital 7 | Peine 4 cerrado | Sensor inductivo |
| Entrada digital 8 | Tablero en control remoto | Selector en panel de control |

Cuadro 6. Listado de señales conectadas a segundo módulo de dieciséis entradas digitales.

| Tipo de señal / No. | Nombre de señal | Procedencia de campo |
|---------------------|--------------------------------|----------------------|
| Entrada digital 0 | Compuerta de entrada 1 abierta | Sensor inductivo |
| Entrada digital 1 | Compuerta de entrada 1 cerrada | Sensor inductivo |
| Entrada digital 2 | Compuerta de entrada 2 abierta | Sensor inductivo |
| Entrada digital 3 | Compuerta de entrada 2 cerrada | Sensor inductivo |
| Entrada digital 4 | Compuerta de entrada 3 abierta | Sensor inductivo |
| Entrada digital 5 | Compuerta de entrada 3 cerrada | Sensor inductivo |
| Entrada digital 6 | Compuerta de entrada 4 abierta | Sensor inductivo |
| Entrada digital 7 | Compuerta de entrada 4 cerrada | Sensor inductivo |
| Entrada digital 8 | Compuerta de fondo 1 abierta | Sensor inductivo |
| Entrada digital 9 | Compuerta de fondo 1 cerrada | Sensor inductivo |
| Entrada digital 10 | Compuerta de fondo 2 abierta | Sensor inductivo |
| Entrada digital 11 | Compuerta de fondo 2 cerrada | Sensor inductivo |
| Entrada digital 12 | Compuerta de fondo 3 abierta | Sensor inductivo |
| Entrada digital 13 | Compuerta de fondo 3 cerrada | Sensor inductivo |
| Entrada digital 14 | Compuerta de fondo 4 abierta | Sensor inductivo |
| Entrada digital 15 | Compuerta de fondo 4 cerrada | Sensor inductivo |

Cuadro 7. Listado de señales conectadas a primer módulo de ocho entradas analógicas de corriente.

| Tipo de señal / No. | Nombre de señal | Procedencia de campo |
|---------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Entrada análoga 0 | Nivel de agua canal 1 | Sensor de presión hidrostática |
| Entrada análoga 1 | Nivel de agua canal 2 | Sensor de presión hidrostática |
| Entrada análoga 2 | Nivel de agua canal 3 | Sensor de presión hidrostática |
| Entrada análoga 3 | Nivel de agua canal 4 | Sensor de presión hidrostática |
| Entrada análoga 4 | Posición peine 1 | Sensor de tracción de hilo |
| Entrada análoga 5 | Posición peine 2 | Sensor de tracción de hilo |
| Entrada análoga 6 | Posición peine 3 | Sensor de tracción de hilo |
| Entrada análoga 7 | Posición peine 4 | Sensor de tracción de hilo |

Cuadro 8. Listado de señales conectadas a segundo módulo de ocho entradas analógicas de corriente.

| Tipo de señal / No. | Nombre de señal | Procedencia de campo |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| Entrada analógica 0 | Nivel de agua de la presa | Sensor ultrasónico |
| Entrada analógica 1 | Posición compuerta radial | Sensor de tracción de hilo |

E. Modernización física del nuevo sistema de control y monitoreo.

1. **Determinación de controlador y módulos de expansión.** Como parte de la modernización se determinó utilizar un controlador lógico programable (PLC). La selección de este controlador no fue parte de los requerimientos de este trabajo debido a que el PLC seleccionado fue en acuerdo a la conveniencia de la entidad responsable del desarenador.

El controlador que se utilizó en este trabajo fue un PLC Schneider Electric TM221CE24T, el cual se adaptó a las necesidades y requerimientos del sistema de control y monitoreo. Debido a su tamaño compacto fue necesario agregar siete módulos de expansión compatibles.

Figura 13. PLC Schneider Electric TM221CE24T, más módulos de expansión.



Cuadro 9. Módulos de expansión utilizados para interconexión de PLC TM221CE24T.

| No. | Nombre del módulo | Descripción |
|-----|-------------------|---|
| 1 | TM3DQ16T | Módulo de 16 canales de salidas a transistor. 1 común. |
| 2 | TM3DQ16R | Módulo de 16 canales de salidas a relé. 2 líneas de común. |
| 3 | TM3DQ16R | Módulo de 16 canales de salidas a relé. 2 líneas de común. |
| 4 | TM3DI32K | Módulo de 32 canales de entradas digitales a 24Vdc, utiliza dos módulos de expansión de 16 canales c/u. |
| 5 | TM3DI32K | Módulo de 32 canales de entradas digitales a 24Vdc, utiliza dos módulos de expansión de 16 canales c/u. |
| 6 | TM3AI8 | Módulo de 8 canales de entradas análogas. (+-10V, 0-10V, 0-20mA, 4-20mA) |
| 7 | TM3AI8 | Módulo de 8 canales de entradas análogas. (+-10V, 0-10V, 0-20mA, 4-20mA) |

2. Instalación de equipos en panel de control a modernizar. Luego determinar el PLC a utilizar, así como la cantidad y tipo de los módulos de expansión, se procedió a instalarlos en el panel de control que se le realizaría la modernización. Este proceso se realizó según se describe en los siguientes pasos:

a. Desmontaje de los equipos de control a remplazar. El remplazo de los equipos existentes es consecuente a que la modernización del sistema propone un mejor funcionamiento en la operación del desarenador. Fue necesario modificar la posición de otros elementos dentro del panel para conseguir el espacio adecuado donde se montarían los nuevos equipos.

b. Montaje de los nuevos equipos de control. Tanto el PLC como sus módulos de expansión pueden instalarse sobre el riel DIN existente. Así que bastó con montarlos en el espacio libre que se obtuvo luego del desmontaje.

c. Remover cableado innecesario: al desmontar los equipos anteriores, también fue necesario desconectar todo el cableado que el controlador y sus módulos poseía.

d. Cableado interno. Se utilizó cable TFF calibre 18 para realizar todo el cableado dentro del panel de control. Se realizaron cables que conectaban bornes y relés con los módulos de entradas y salidas, respectivamente.

e. Prueba punto a punto de señales. Esta prueba refiere a obtener la retroalimentación de todas las señales luego de ser cableadas. Es decir, se forzaron los sensores instalados en los elementos de campo uno a uno de modo que se obtuviera la señal de retroalimentación esperada en cada una de las entradas digitales, o variación de la señal analógica según la señal a probar. En el caso de los controles, se forzó la salida de los módulos del PLC para observar la activación del relé esperado y activación de los elementos de campo de forma adecuada.

f. Ajuste de sensores analógicos. Ya que en las pruebas punto a punto solo se observó la variación de la medición de los sensores analógicos, era necesario poder interpretar la señal proveniente de cada uno. Se buscó la hoja de datos de cada sensor para conocer sus rangos de operación. Sabiendo que todos los sensores analógicos proveen una señal de corriente de 4-20mA, bastó con realizar una tendencia lineal entre sus límites según su aplicación con base en el rango de medición de cada sensor. Para los sensores de posición por tracción de hilo no fue posible observar el modelo utilizado debido a su ubicación física, pero, al ser de posición sólo bastó con operar los elementos de campo en sus posiciones finales (arriba/abajo, abierto/cerrado) y observar que valor de corriente generaban. Al realizar el ejercicio repetidas veces se determinó el rango de corriente para cada elemento, y mediante una relación lineal se obtuvo la posición porcentual de los elementos que poseían este tipo de sensor instalado con base en el rango de corriente obtenido.

A continuación, se muestra los tipos de sensores que se encontraban previamente instalados, los cuales se reutilizaron para el monitoreo de los estados, posiciones, y niveles de los elementos del desarenador.

- Sensor de proximidad, inductivo. Determina el estado en: peines hidráulicos abierto/cerrado, compuertas de entrada y fondo abierta/cerrada.

Figura 14. Sensor de proximidad cilíndrico Autonics PR8. Ejemplo de ubicación en campo.



- Sensor de vibración. Para detección de sólidos en fondo de canales.

Figura 15. Sensor de vibración Vegavib 62 contactless electronic switch. Ejemplo de ubicación en campo.



- Sensor de nivel con base en la presión hidrostática. Para medición de nivel en canales.

Figura 16. Sensor de nivel sumergible AST4510. Ejemplo de ubicación en campo.



- Sensor de nivel con base en onda ultrasónica. Para medición de nivel en la presa.

Figura 17. Sensor de nivel ultrasónico Endress+Hauser FMU41. Ejemplo de ubicación en campo.



- Sensor de posición por tracción de hilo. Determina posición porcentual para: compuerta radial, peines hidráulicos ubicación arriba/abajo. No se identificó el modelo.

F. Lógicas de control para el desarenador.

Para cada rutina requerida en el sistema se siguieron los siguientes pasos:

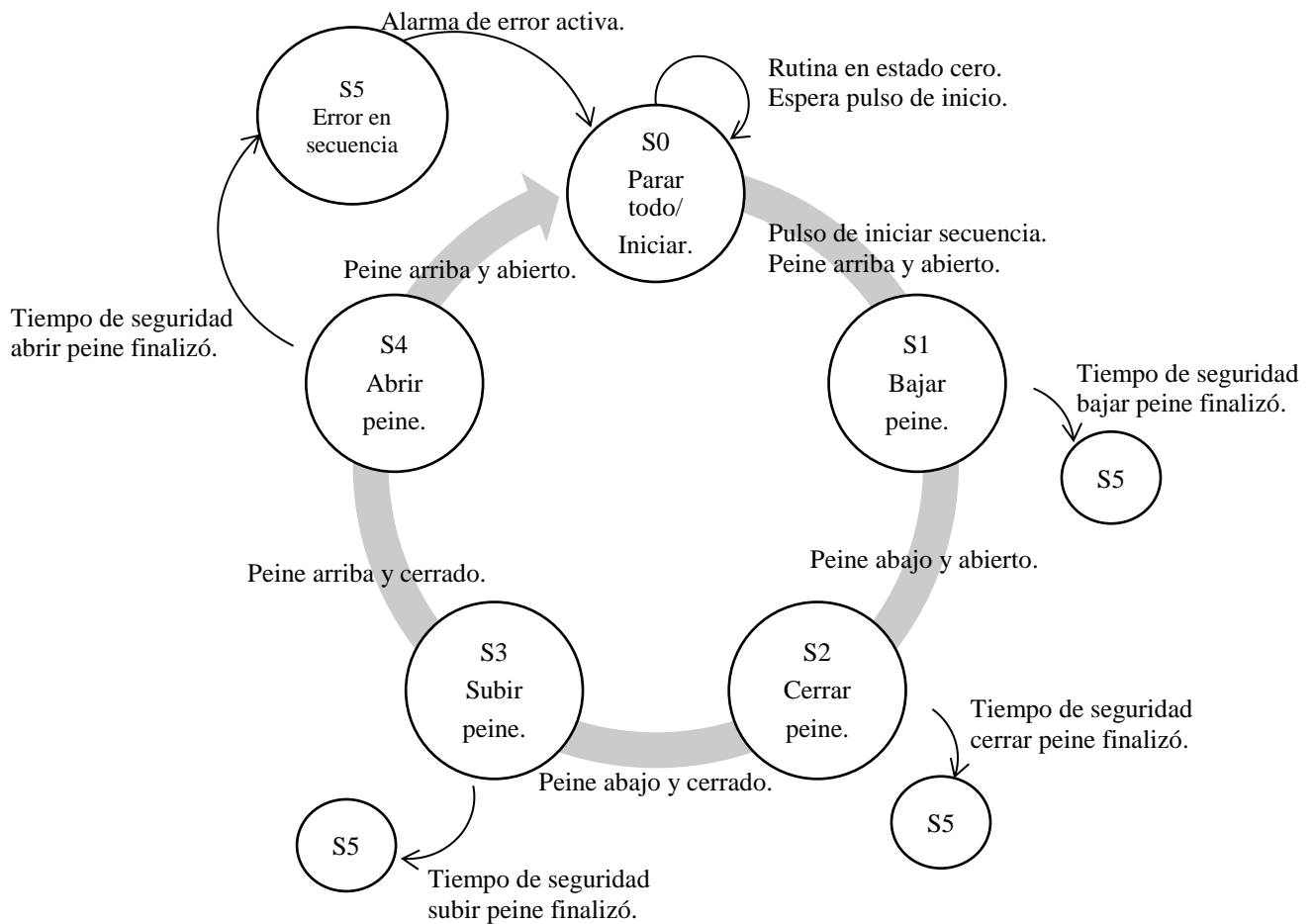
- Identificar los elementos de campo que se ven involucrados en la rutina.
- Determinar las señales necesarias de retroalimentación y control que se manejarán en las lógicas a programar, con base en los elementos de campo involucrados.
- Plantear la secuencia de la rutina tomando en cuenta la delimitación del sistema, condiciones iniciales, acciones a ejecutar en cada paso, condiciones para avanzar al siguiente paso, y condiciones para interrumpir la rutina de ser necesario.
- Realizar un diagrama de estados representativo de la rutina.
- Implementar la secuencia planteada en una tarea específica del PLC, usando el software SOMachine Basic 1.4 SP1. Software disponible en siguiente enlace: <http://bit.ly/2nQONmr>
- Realizar pruebas sobre los elementos de campo. Ajustar tiempos de seguridad en cada paso de la secuencia implementada, si aplica.
- Implementar mejoras en la tarea programada del PLC de ser necesario.

- Plantear e implementar las condiciones externas que activan la secuencia, de forma automática o manual asistida, si aplica.

1. Lógica de secuencia para rutina de limpieza de rejilla.

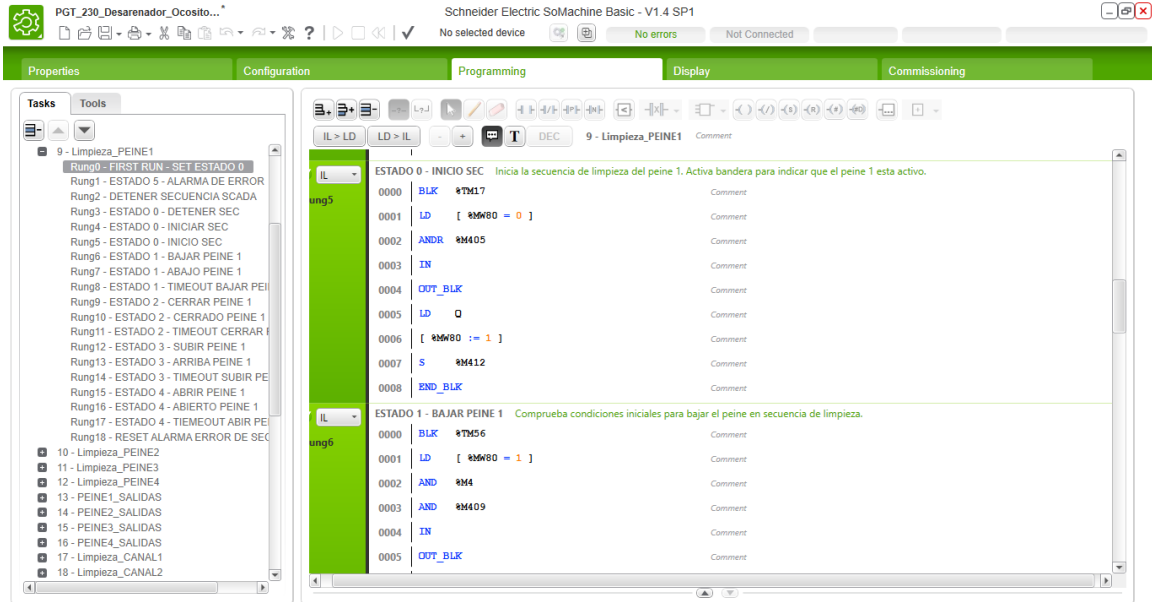
- Elementos involucrados: peine hidráulico, por cada rejilla.
- Señales a tomar en cuenta sobre peine: estado abierto/cerrado, ubicación arriba/abajo.
Acciones a tomar en cuenta sobre peine: abrir/cerrar, subir/bajar.
- Secuencia del peine para limpieza de rejilla: bajar, luego cerrar, luego subir, y luego abrir.
Condiciones iniciales de la rutina: peine debe encontrarse arriba y abierto.
- Diagrama de estados representativo de la rutina de limpieza de rejilla:

Figura 18. Diagrama de estados para rutina de limpieza de rejilla.



e. Implementar la secuencia planteada en una tarea específica del PLC:

Figura 19. Interfaz de SoMachine Basic, captura con demostración de rutina de limpieza de rejilla.



f. Tiempos de seguridad: obtenidos con base en pruebas de campo. Los tiempos de seguridad mostrados aplican a los cuatro peines hidráulicos.

Cuadro 10. Tiempos de seguridad en rutina de limpieza de rejilla.

| Acción | Tiempo de seguridad ajustado (s) |
|--------------|----------------------------------|
| Bajar peine | 250 |
| Cerrar peine | 30 |
| Subir peine | 250 |
| Abrir peine | 30 |

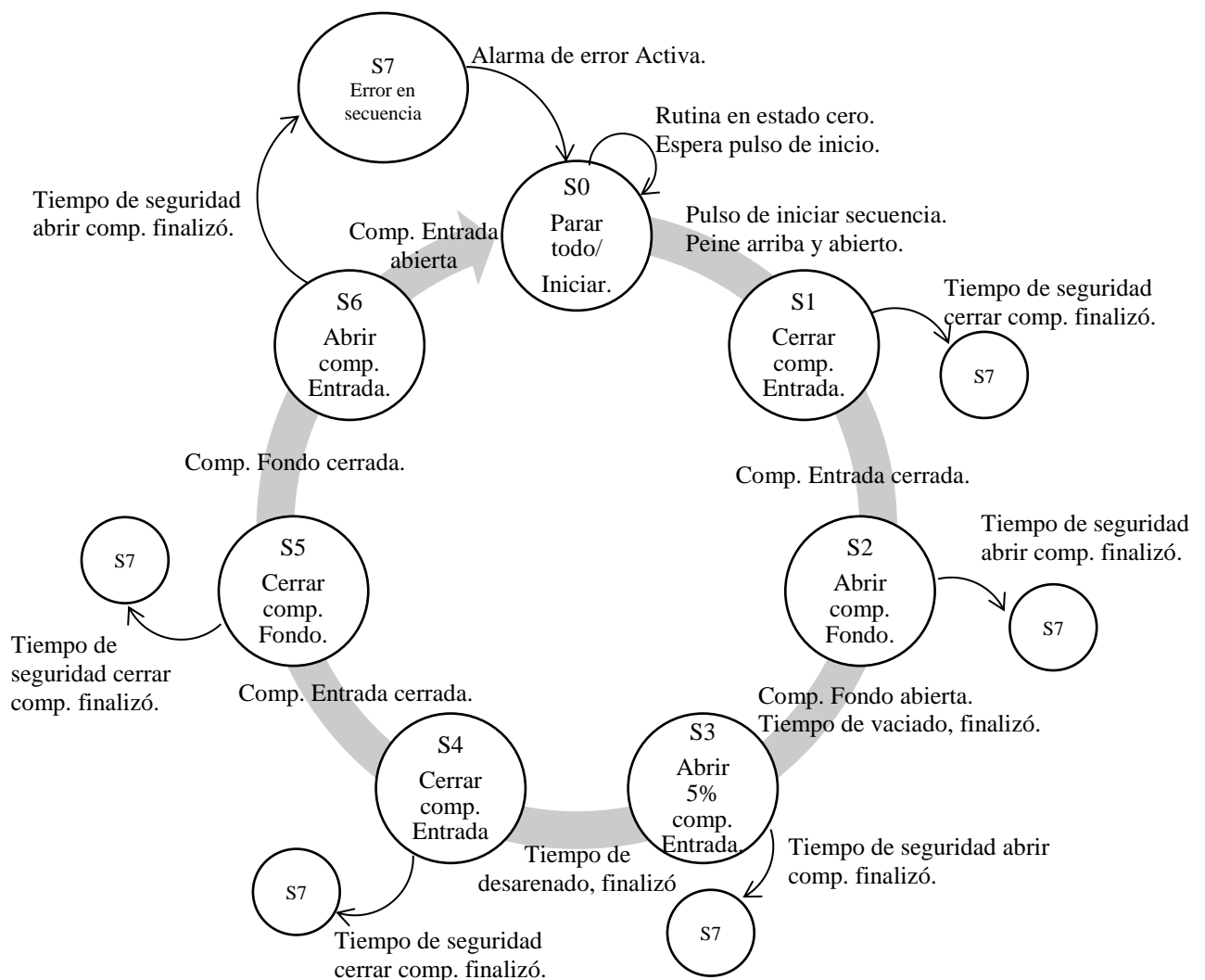
g. Mejoras en secuencia: Se agregó la acción de poder detener la rutina de limpieza de rejilla en cualquier punto de la secuencia.

h. Acciones que activan la secuencia de forma automática: nivel de presa mayor a nivel de canal, se ajustó una diferencia de siete centímetros con base en pruebas. De forma manual asistido: control proveniente de sistema SCADA.

2. Lógica de secuencia para rutina de limpieza de canal.

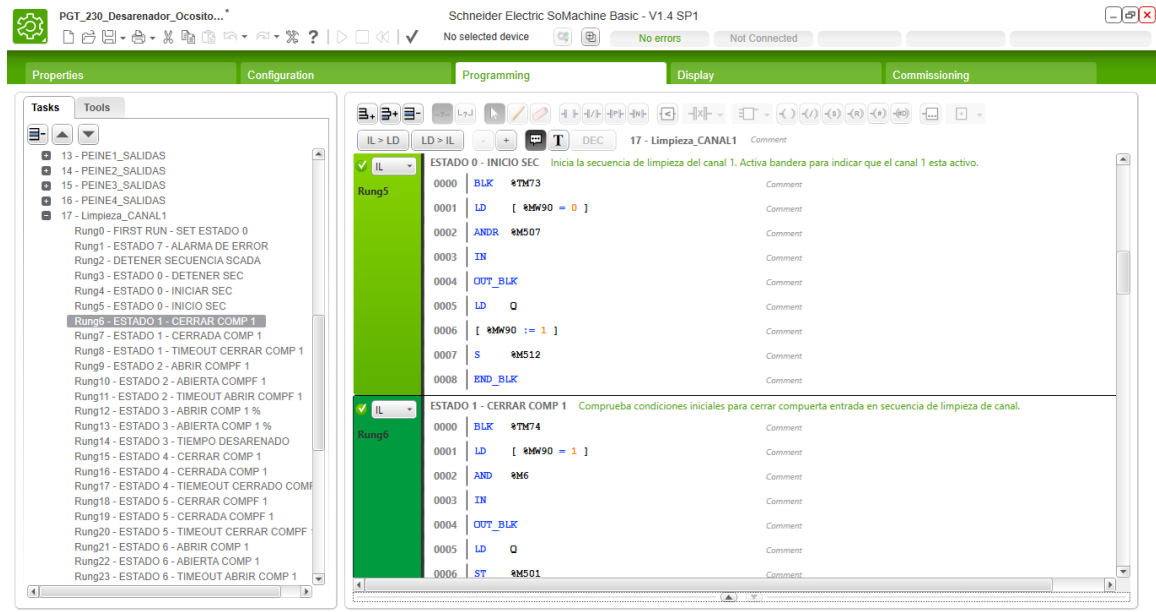
- a. Elementos involucrados: compuerta de entrada, compuerta de fondo. Elementos por canal.
- b. Señales a tomar en cuenta: estados de compuertas abierta/cerrada. Acciones a tomar en cuenta sobre compuertas: abrir/cerrar.
- c. Secuencia para limpieza de canal: cerrar compuerta de entrada, abrir compuerta de fondo, esperar tiempo de vaciado, abrir la compuerta de entrada 5%, esperar tiempo de desarenado, cerrar compuerta de entrada, cerrar compuerta de fondo, abrir compuerta de entrada. Condiciones iniciales de la rutina: compuerta de entrada abierta, compuerta de fondo cerrada.
- d. Diagrama de estados representativo de la rutina de limpieza de canal:

Figura 20. Diagrama de estados para rutina de limpieza de canal.



e. Implementar la secuencia planteada en una tarea específica del PLC:

Figura 21. Interfaz de SoMachine Basic, captura con demostración de rutina de limpieza de canal.



f. Tiempos de seguridad obtenidos: con base en pruebas de campo. Los tiempos de seguridad mostrados aplican a las compuertas de los cuatro canales.

Cuadro 11. Tiempos de seguridad en rutina de limpieza de canal.

| Acción | Tiempo de seguridad/operación ajustado (s) |
|-------------------------------|--|
| Cerrar compuerta de entrada | 100 |
| Abrir compuerta de fondo | 60 |
| Tiempo de vaciado de canal | 360 |
| Abrir compuerta de entrada 5% | 5 |
| Tiempo desarenado | 80 |
| Cerrar compuerta de entrada | 15 |
| Cerrar compuerta de fondo | 60 |
| Abrir compuerta de entrada | 100 |

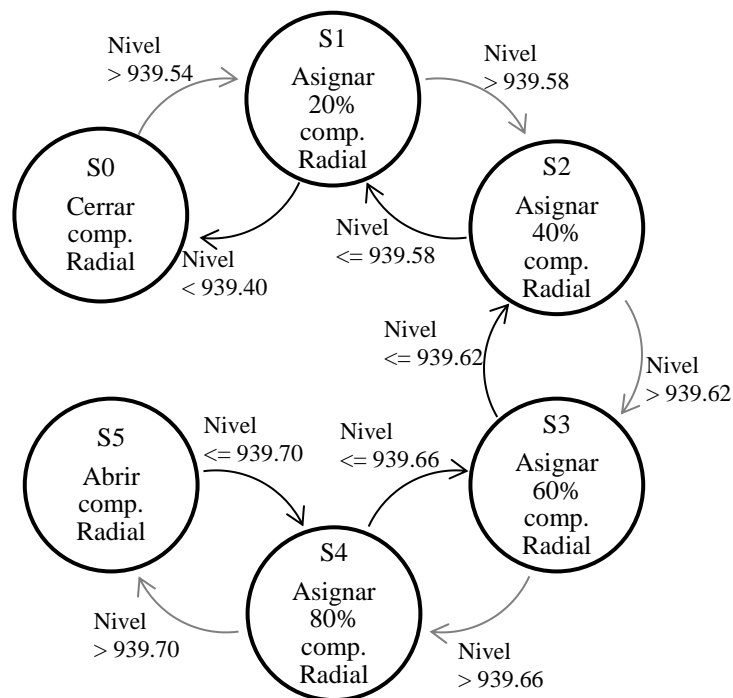
g. Mejoras en secuencia: Se modificó apertura de compuerta de entrada en etapa de desarenado a 1%. Se agregó un segundo tiempo de vaciado de cien segundos luego de cerrar la compuerta de entrada después de la etapa de desarenado.

h. Acciones que activan la secuencia de forma automática: sensor de sólidos activo después de treinta segundos, tiempo periódico definido por operador en SCADA. De forma manual asistido: control proveniente de sistema SCADA.

3. Lógica de secuencia para regulación de nivel.

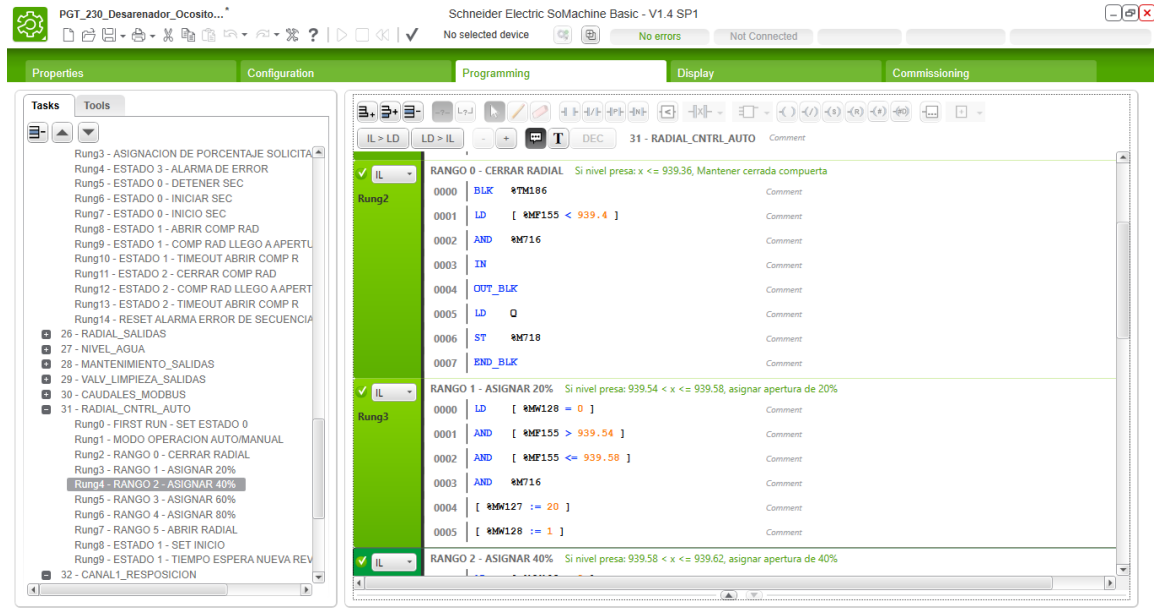
- a. Elementos involucrados: compuerta radial.
- b. Señales a tomar en cuenta de la compuerta radial: ubicación abierta/cerrada. Ubicación porcentual 0-100%. Acciones a tomar en cuenta sobre compuerta radial: abrir/cerrar.
- c. Secuencia para regulación de nivel: la apertura de la compuerta radial deberá ser proporcional al nivel de agua de la presa conforme este supere la capacidad del desarenador. No posee condiciones iniciales.
- d. Diagrama de estados representativo de la secuencia de regulación de nivel:

Figura 22. Diagrama de estados para rutina de regulación de nivel.



e. Implementar la secuencia planteada en una tarea específica del PLC:

Figura 23. Interfaz de SoMachine Basic, captura con demostración de rutina de regulación de nivel.



f. Tiempos de seguridad: obtenidos con base en pruebas de campo.

Cuadro 12. Tiempos de seguridad en rutina de regulación de nivel.

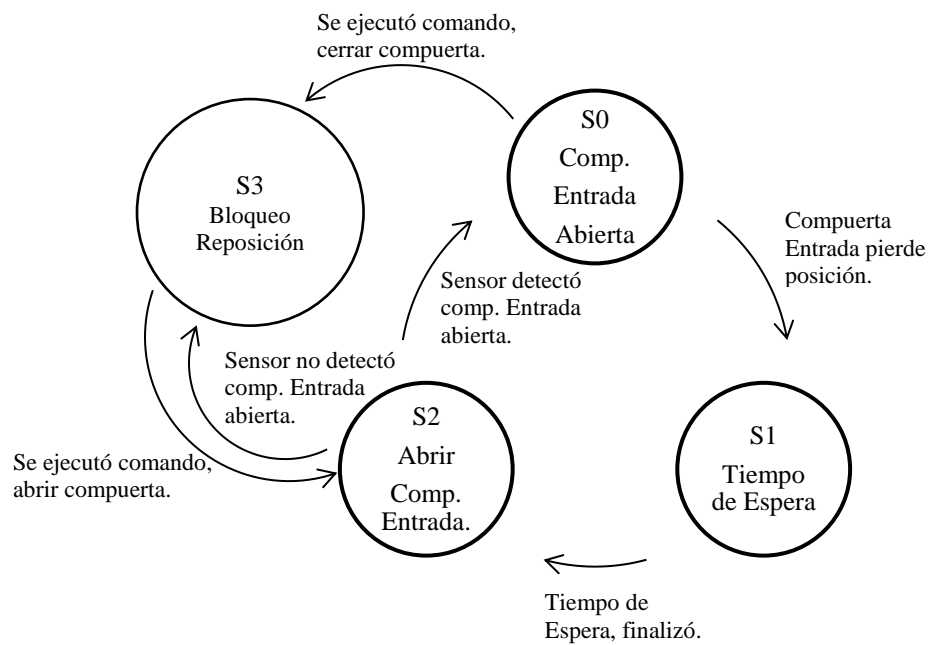
| Acción | Tiempo de seguridad ajustado (s) |
|-------------------------|----------------------------------|
| Abrir compuerta radial | 60 |
| Cerrar compuerta radial | 60 |

g. Mejoras en secuencia: Se agregó una secuencia para determinar si la compuerta radial debía abrir o cerrar según la consigna de ubicación porcentual requerida contra su ubicación actual, la modificación de la consigna requerida puede provenir de forma automática en la regulación de nivel o por intervención del operador.

h. Acciones que activan la secuencia de forma automática: nivel en la presa mayor a la capacidad de rebalse físico del desarenador. De forma manual asistido: apertura, cierre o consignas enviadas desde sistema SCADA.

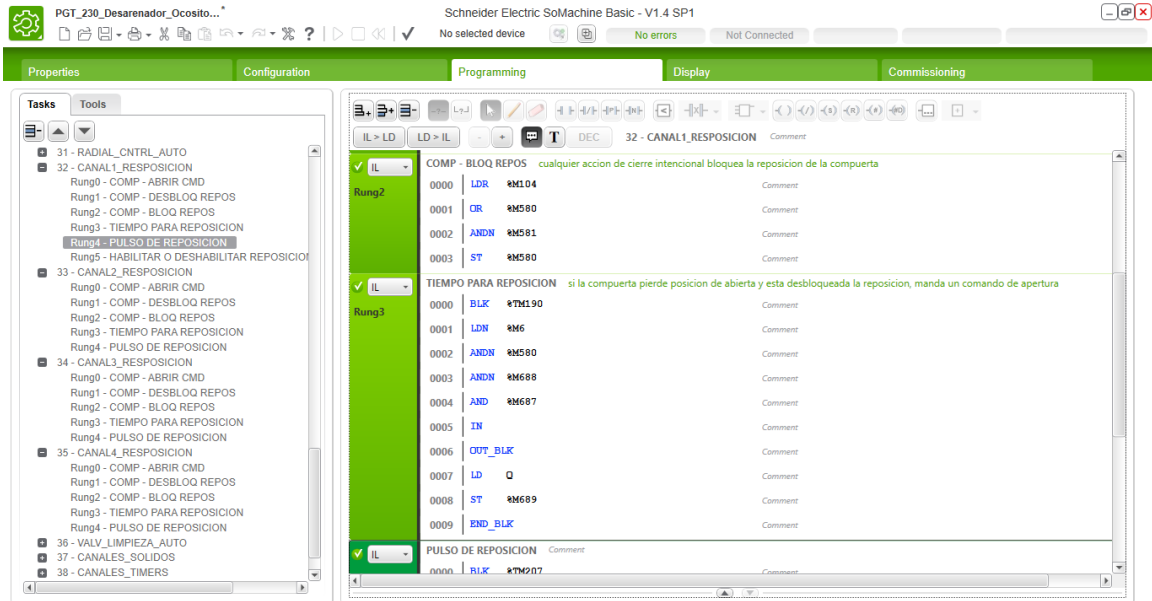
4. Lógica para activar la reposición en compuertas de entrada.
- Elementos involucrados: compuerta de entrada, por canal.
 - Señales a tomar en cuenta de las compuertas de entrada: estado abierta/cerrada. Acciones a tomar en cuenta sobre compuertas de entrada: abrir.
 - Secuencia para regulación de nivel: se deberá ejecutar la reposición como máximo una vez al día, si la reposición se encuentra activa. Condiciones iniciales: la compuerta se reposicionará sólo si la pérdida de su posición abierta es a causa de la gravedad.
 - Diagrama de estados representativo de la reposición en compuertas de entrada:

Figura 24. Diagrama de estados para reposición en compuertas de entrada.



e. Implementar la secuencia planteada en una tarea específica del PLC:

Figura 25. Interfaz de SoMachine Basic, captura con demostración de reposición de compuertas de entrada.



f. Tiempos de seguridad: obtenidos con base en pruebas de campo. El tiempo de seguridad mostrado aplica a las compuertas de los cuatro canales.

Cuadro 13. Tiempos de seguridad en reposición de compuertas de entrada.

| Acción | Tiempo de seguridad ajustado (s) |
|----------------------------|----------------------------------|
| Abrir compuerta de entrada | 100 |

g. Mejoras en secuencia: no se realizaron mejoras a la secuencia.

h. Acciones que activan la secuencia de forma automática: pérdida de posición de compuerta abierta luego de doce horas, solo si se encuentra habilitada en el sistema SCADA.

VI. RESULTADOS

A. Resultados del sistema de control en los elementos de campo.

Como se estableció en la metodología para este trabajo, todas las pruebas, mejoras y controles finales se ejecutaron sobre los elementos de campo del desarenador longitudinal de cuatro canales.

Figura 26. Vista panorámica del desarenador longitudinal de cuatro canales.



Figura 27. Muestra del vertedero en la salida de un canal del desarenador longitudinal.



1. Modernización física del nuevo sistema de control y monitoreo. Se realizó el desmontaje de los equipos de control a remplazar, el montaje de los nuevos equipos de control, se removió cableado innecesario, se instaló el nuevo cableado interno, se realizó una prueba punto a punto de señales verificando el correcto funcionamiento de cada una, y por último se ajustaron los sensores analógicos instalados en el desarenador.

Los únicos equipos instalados como parte de la modernización fueron específicamente el controlador PLC TM221CE24T y sus módulos de expansión. Todos los demás equipos, como: fuente de alimentación, bornes, relés, etc. Se reutilizaron para realizar las conexiones necesarias hacia a los módulos del controlador.

Figura 28. Modernización, panel de control de desarenador longitudinal, en proceso de reconexión.

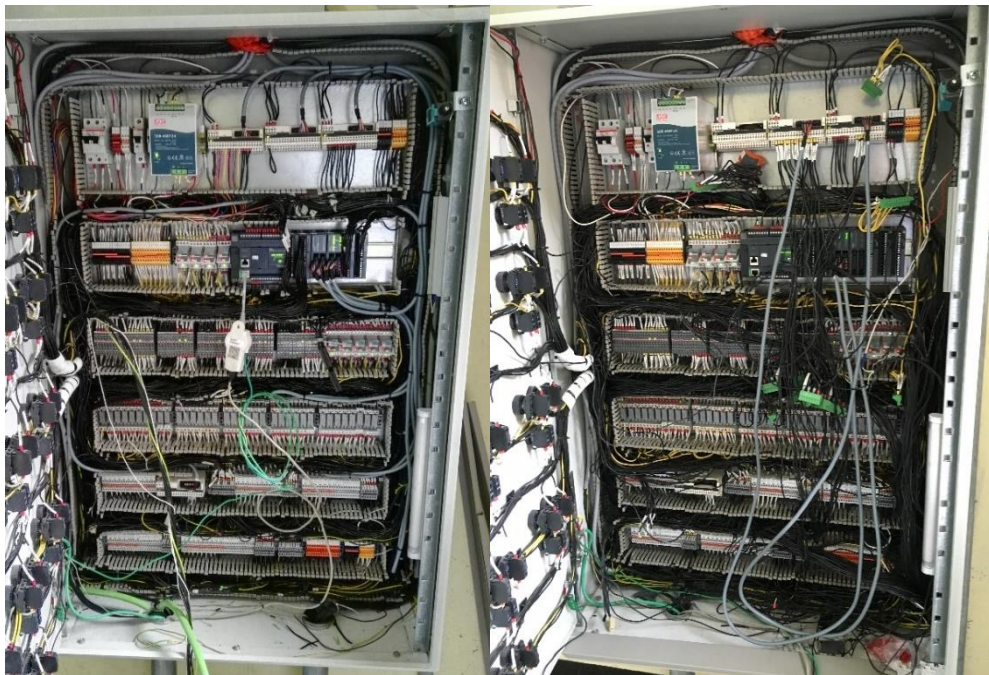


Figura 29. Modernización, PLC Schneider Electric TM221CE24T, con arreglo de módulos completo, conectado y operando.

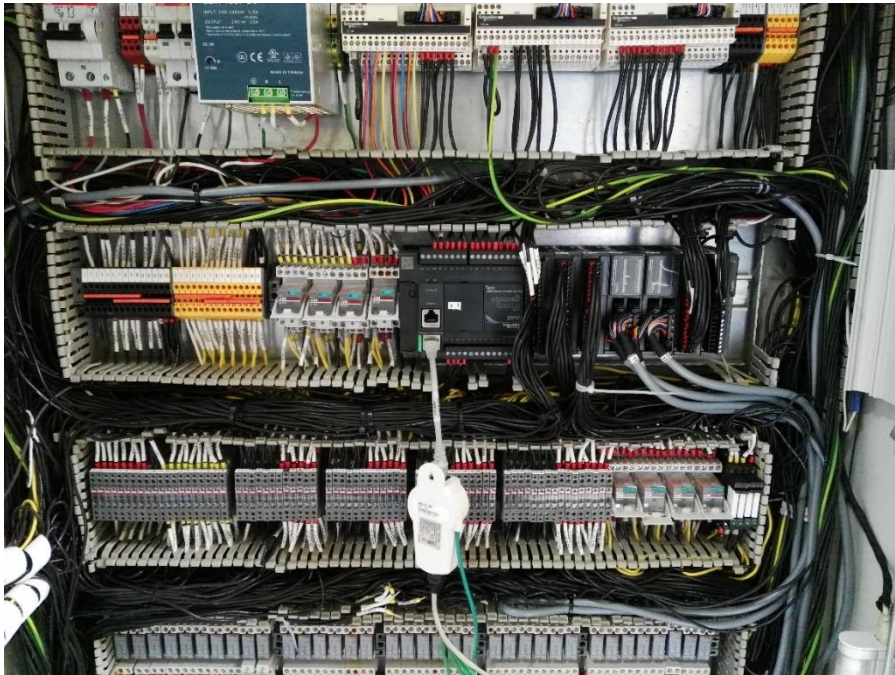


Figura 30. Modernización, escalamiento de sensores analógicos de tracción de hilo para peines hidráulicos (azul oscuro) y compuerta radial (azul claro).

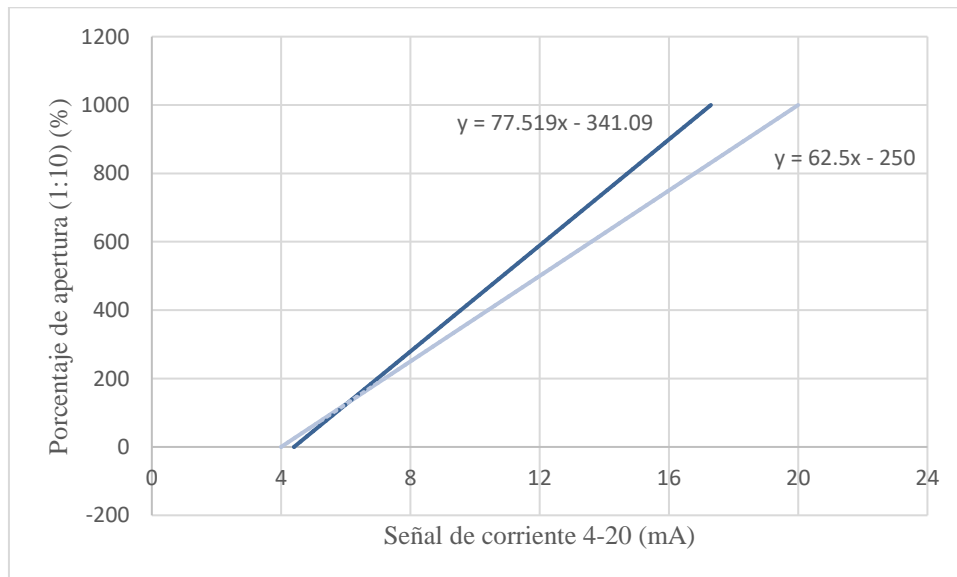
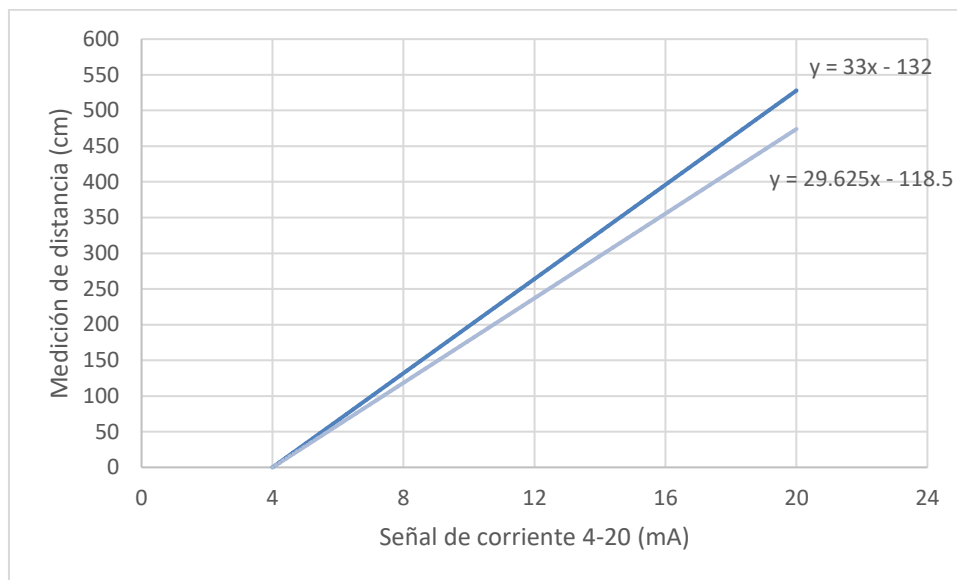


Figura 31. Modernización, escalamiento de sensores analógicos ultrasónico y de presión hidrostática para nivel de presa (azul claro) y nivel de canal (azul oscuro), respectivamente.



2. Operación de limpieza de rejillas usando peines hidráulicos. Previo a realizar la limpieza de cada rejilla con su peine hidráulico, se realizaron movimientos manuales asistidos ejecutando una limpieza paso a paso. Luego, con el conocimiento pleno del comportamiento de cada peine se ejecutaron secuencias de limpieza con activación manual con el fin de detectar oportunidades de mejora. Por último, se observó que al cumplirse la condición de la diferencia de nivel entre la presa y cada canal se activó la rutina de limpieza de forma automática.

A continuación, se observan fotografías de los peines hidráulicos ejecutando la rutina de limpieza de rejillas de forma simultánea.

Figura 32. Limpieza de rejillas, peines hidráulicos abajo y cerrados.



Figura 33. Limpieza de rejillas, peines hidráulicos subiendo y cerrados con desechos retenidos en la rejilla.



Figura 34. Limpieza de rejillas, peines hidráulicos en punto de vertedero de desechos limpiados.

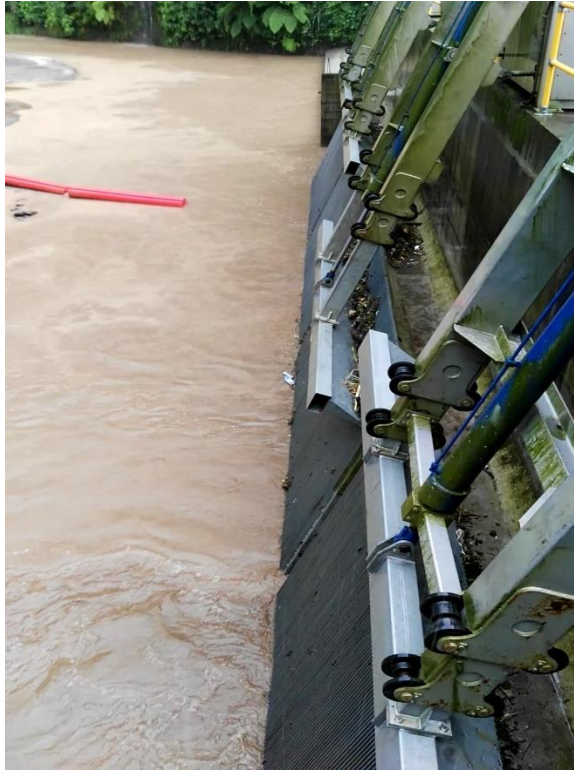


Figura 35. Limpieza de rejillas, peines hidráulicos nuevamente en posición inicial arriba y abiertos.



3. Operación de limpieza de canales usando compuertas de entrada y fondo. Previo a realizar la limpieza de cada canal, se realizaron movimientos manuales asistidos ejecutando una limpieza paso a paso. Luego, con el conocimiento pleno del comportamiento de las compuertas se ejecutaron secuencias de limpieza con activación manual con el fin de detectar oportunidades de mejora. Por último, se observó que al cumplirse la condición de la activación del sensor de sólidos se activó la rutina de limpieza de forma automática.

A continuación, se observan fotografías de los estados de un canal ejecutando la rutina de limpieza.

Figura 36. Limpieza de canal, vaciado de canal luego de cierre de compuerta de entrada y apertura de compuerta de fondo.



Figura 37. Limpieza de canal, vistas de canal vacío con sedimentos sólidos en el fondo.



Figura 38. Limpieza de canal, apertura de la compuerta de entrada al 1% para ingreso de agua a presión.



Figura 39. Limpieza de canal, limpio y cerrando compuerta de fondo para rellenado de agua en canal.



4. Operación compuerta radial para regulación de nivel en presa. Se creó la lógica de control que permite especificar a qué porcentaje de apertura se quiere tener la compuerta radial. La operación se realiza en dos pasos, primero se especifica que porcentaje de apertura se quiere y luego se envía un pulso de activación. El programa decide si debe subir o bajar la compuerta comparando el porcentaje de apertura solicitado y el porcentaje de apertura actual. Esta secuencia tiene su propio disparo por tiempo en caso de que la compuerta no llegue al porcentaje deseado.

Se probó la lógica abriendo la compuerta radial en porcentajes que incrementan de 10 en 10 desde 0. La prueba se realizó con la compuerta de mantenimiento cerrada.

A continuación, se observan fotografías de la compuerta radial en diferentes porcentajes de apertura.

Figura 40. Regulación de nivel, apertura de compuerta radial al 10%.



Figura 41. Regulación de nivel, apertura de compuerta radial al 40%.



Figura 42. Regulación de nivel, apertura de compuerta radial al 70%.



B. Resultados del sistema para el monitoreo y ejecución de controles del desarenador.

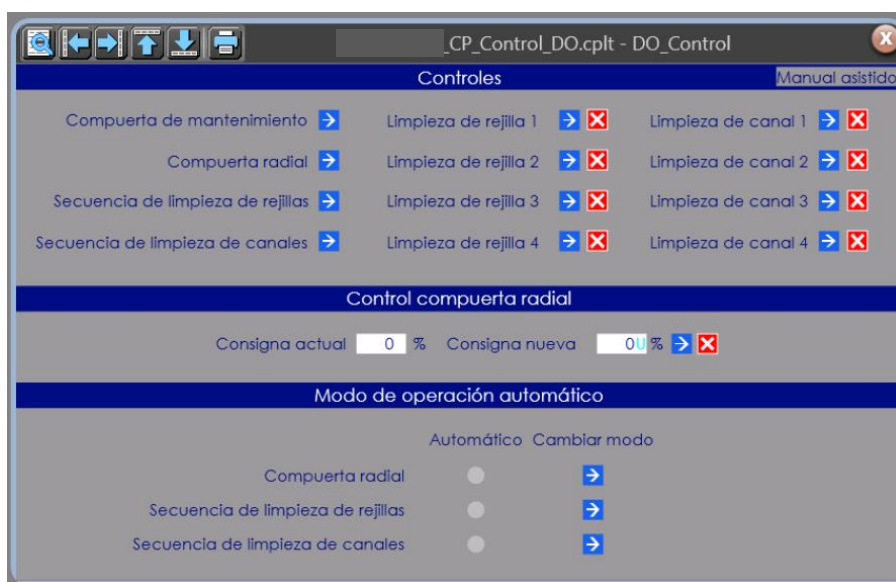
Figura 43. Interfaz de control y monitoreo, pantalla principal de desarenador.



En la pantalla se muestran cinco bloques de información: estado de las centralinas, estado del sistema de limpieza, estado de las compuertas, el valor de los niveles de los canales y la posición de la compuerta radial. Además, se tiene acceso al control panel de control y detalles del sistema de limpieza. Las imágenes en la pantalla de monitoreo y control del desarenador son puramente ilustrativas y no tienen ninguna funcionalidad adicional.

En el bloque “Estado sistema de limpieza”, en la parte superior se muestran los indicadores de estado de los sistemas de limpieza de rejillas y de canales, los cuales son de color verde cuando la limpieza se está ejecutando y son de color gris en caso contrario. También se incluye el indicador de alarma del sensor de sólidos, el cual es rojo cuando está alarmado y gris en estado normal. Al dar clic en el indicador de las rejillas, se abre un control panel con información del peine relacionado. Al dar clic en el indicador de los canales, se abre un control panel para desplegar información relacionada a la secuencia de limpieza del canal en cuestión.

Figura 44. Interfaz de control y monitoreo, control panel para control del desarenador.



La pantalla se encuentra dividida en tres secciones. En la primera, con los botones azules se tienen los controles para cambiar el estado de la compuerta de mantenimiento y de la compuerta radial, para activar la secuencia de limpieza de rejillas, ya sea de forma automática o de forma individual y para activar la secuencia de limpieza de cada canal. También es posible detener la limpieza de cada rejilla y cada canal con los botones rojos.

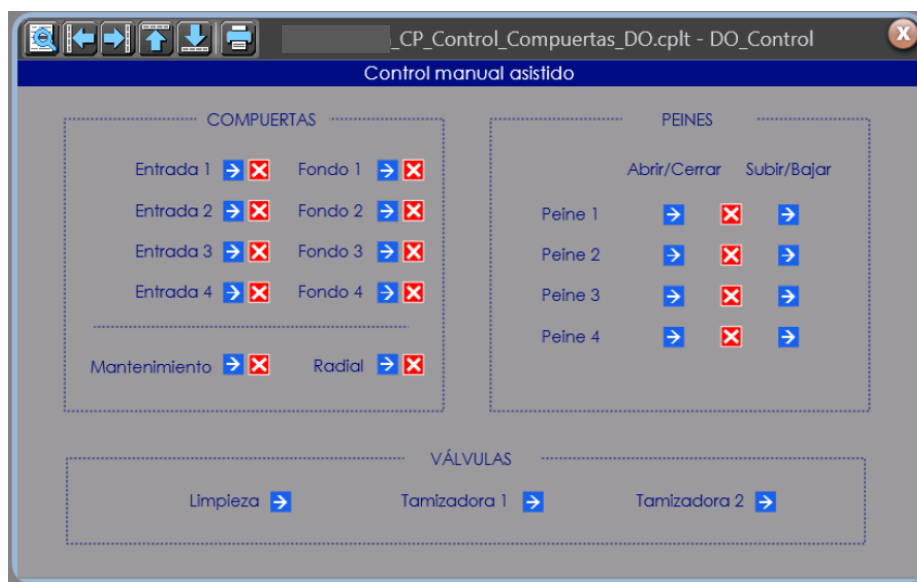
En la segunda sección, se tiene el control de la compuerta radial. El valor de la izquierda muestra el porcentaje de apertura que se desea actualmente. Cuando se desea cambiar este valor, se da clic en el número del lado derecho y se ingresa el porcentaje deseado. Luego se da clic en el botón azul para asignar el valor. Con el botón rojo se puede detener el movimiento de la compuerta.

En la tercera sección, se despliega y se asigna el modo de operación manual o automático para la compuerta radial, la secuencia de limpieza de rejillas y la secuencia de limpieza de canales. El indicador es

de color gris cuando el modo de operación es manual, y es de color verde cuando se encuentra en automático. Para los primeros dos, la selección se hace dando clic en el botón azul y luego clic en la opción deseada. En el caso del tercero, el botón azul abre un control panel para el control del modo de operación de la limpieza de canales.

En la esquina superior derecha de la pantalla, se tiene un botón rotulado “Manual asistido”. Este abre el control panel con los controles individuales de cada elemento del desarenador.

Figura 45. Interfaz de control y monitoreo, control panel para control manual asistido del desarenador.



La pantalla contiene el control individual (no de procesos) de cada uno de los elementos que componen el desarenador. Estos se encuentran divididos en tres secciones. En la primera (grupo de la izquierda), con el botón azul se tiene la opción para abrir o cerrar las compuertas de entrada y de fondo, la compuerta de mantenimiento y la compuerta radial. Se puede detener cada una de ellas con el botón rojo respectivo.

En la segunda sección (grupo de la derecha), se tienen los botones para el control de los peines. Los botones azules de la izquierda son para abrir o cerrar, mientras que los de la derecha son para subir o bajar el peine deseado. En cualquier caso, los botones rojos que se encuentran en la columna del centro sirven para detenerlos.

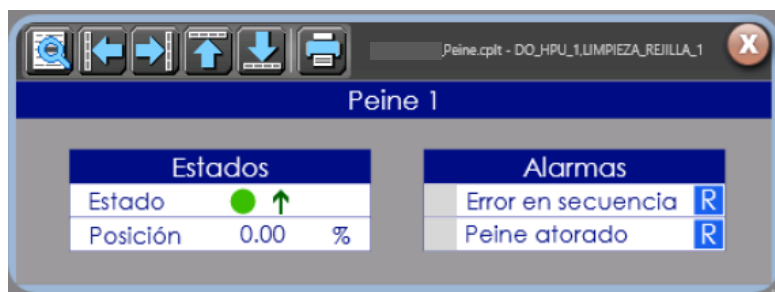
Figura 46. Interfaz de control y monitoreo, control panel para modo de control de limpieza de canal.



La pantalla se encuentra dividida en dos secciones. La primera se refiere a las tres opciones del modo de operación de la limpieza de canales: manual, automático por tiempo y automático por sensores de sólidos. Para cada caso se incluye un indicador, el cual es de color verde cuando el modo está seleccionado y es gris en caso contrario. Junto a cada indicador se tiene un botón azul. En las primeras dos opciones, al dar clic en el botón, el modo cambia automáticamente. En el último caso (sensores de sólidos), se debe confirmar la selección en la ventana que se abre al dar clic en el botón.

En la segunda sección se tiene la información necesaria para el control automático por tiempo. En este modo, para cada canal se tiene un temporizador; al transcurrir ese tiempo, se ejecuta la limpieza del canal. En la primera columna, se muestra el tiempo que falta para que se lleve a cabo la operación. Este valor puede reiniciarse para cada canal dando clic en el respectivo botón azul rotulado con “R”. En la columna de la derecha, se muestra el tiempo total que transcurre entre cada limpieza. El usuario puede cambiarlo por un nuevo valor y este límite es actualizado cuando da clic en el botón azul con una flecha blanca.

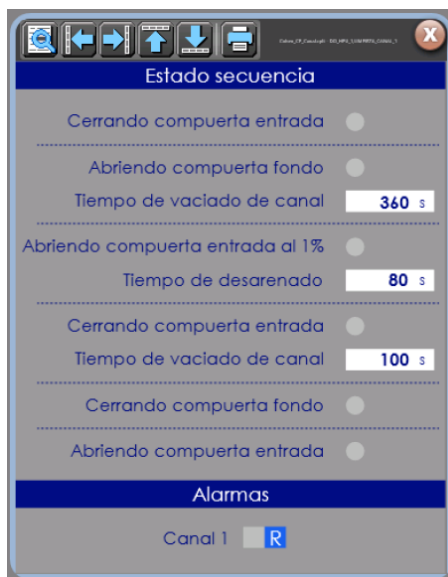
Figura 47. Interfaz de control y monitoreo, control panel para estados y alarmas del peine del desarenador.



La pantalla muestra en el lado izquierdo un indicador para el estado abierto/cerrado del peine y un indicador para su ubicación arriba/abajo. También se despliega su porcentaje de apertura.

En el lado derecho de la pantalla, se muestran las alarmas asociadas al peine. El indicador es de color rojo cuando la alarma está activa y es gris en caso contrario. Cada alarma se resetea al dar clic en el botón azul rotulado con “R” que se encuentra a la derecha de la descripción.

Figura 48. Interfaz de control y monitoreo, control panel para secuencia de limpieza y alarma de canal.



En la sección superior de la pantalla se listan los pasos de la secuencia de limpieza del canal. Cada uno contiene un indicador que es de color verde cuando la secuencia ejecuta ese paso, y es gris en caso contrario. Los eventos que tienen una dependencia del tiempo, muestran los segundos que faltan para terminar la operación en cuestión.

En la sección inferior de la pantalla se muestra un indicador de alarma, el cual es de color rojo cuando la alarma se activa y de color gris en caso contrario. Junto al indicador se muestran un botón azul rotulado con “R”, con el cual se resetea la alarma al darle clic.

C. Cumplimiento de los requerimientos

Se presenta la autoevaluación del cumplimiento de los requerimientos del sistema con un porcentaje de 0 a 100%.

Cuadro 14. Autoevaluación de cumplimiento de requerimientos del sistema de control y monitoreo.

| Requerimiento | Porcentaje de cumplimiento | Notas |
|---|----------------------------|---|
| Rutina de limpieza de cada rejilla usando peine hidráulico por canal. Modo automático y modo manual. | 100% | El control implementado es capaz de realizar la limpieza de rejilla en los cuatro canales simultáneamente o de forma individual. Por medio de activación automática y manual. |
| Realizar de limpieza de canal de los sólidos sedimentados en cada canal. Usando compuertas de entrada y fondo. Modo automático y modo manual. | 90% | El control implementado permite ejecutar la limpieza de canal, un canal a la vez. El sensor de vibración instalado para la activación automática puede mejorar. |
| Regulación de la cantidad de agua que ingresa al desarenador, usando compuerta radial. Modo automático y modo manual. | 90% | El modo automático no fue posible probarlo en una situación real, sin embargo, de forma controlada se observó su correcto funcionamiento. |
| Reposición de compuertas de entrada por pérdida de posición debido a la gravedad. | 100% | El control implementado lograr reposicionar las compuertas sólo cuando estas perdieron posición por causa de la gravedad. |
| Control manual según intervención del operador proveniente desde SCADA, sobre todas las acciones de los elementos del desarenador. | 100% | El control implementado permite accionar cada movimiento de cada elemento del desarenador tomando en cuenta interbloques que comprometan dichos elementos. |

Figura 49. Interfaz de SoMachine Basic, captura con datos de consumos de memoria en PLC Schneider Electric TM221CE24T.

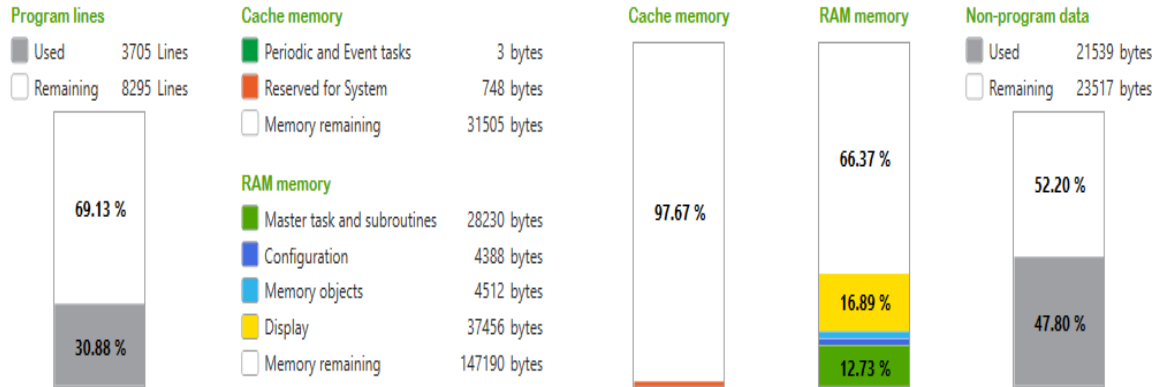
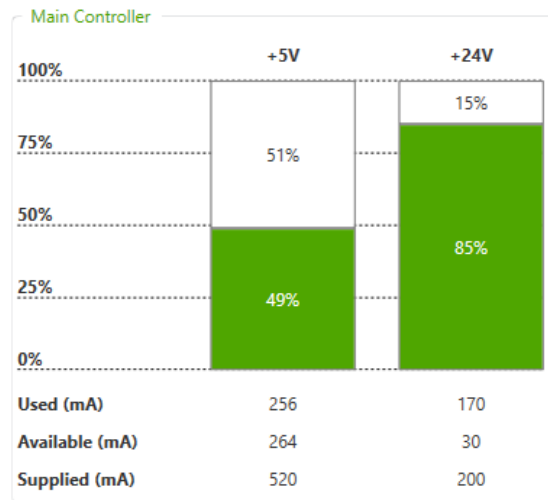


Figura 50. Interfaz de SoMachine Basic, captura con datos de consumos voltaje y corriente por módulos de expansión conectados al PLC TM221CE24T.



VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Modernización física del nuevo sistema de control y monitoreo.

La modernización tenía como objetivo reemplazar los equipos de control existentes a modo de actualización, cablear todas las señales de entradas digitales, entradas analógicas y salidas digitales hacia los nuevos equipos de control.

Como se mencionó con anterioridad la selección de este controlador no fue parte de los requerimientos de este trabajo debido a que el PLC seleccionado fue en acuerdo a la conveniencia de la entidad responsable del desarenador. El controlador que se utilizó en este trabajo fue un PLC Schneider Electric TM221CE24T más siete módulos de expansión compatibles.

La modernización se realizó mediante del desmontaje de los equipos de control a reemplazar, el montaje de los nuevos equipos de control, remover cableado innecesario, instalar el nuevo cableado interno, realizar una prueba punto a punto de señales verificando el correcto funcionamiento de cada una, y por último ajustar los sensores analógicos instalados en el desarenador. En la Figura 17 muestra el proceso de la modernización, dando como resultado final la Figura 18, la cual muestra los módulos de control nuevos montados y cableados en su totalidad.

Las Figuras 30 y 31, muestran el resultado del escalamiento de los sensores analógicos de tracción de hilo, sensor ultrasónico, y sensor de presión hidrostática para la ubicación porcentual de los peines y compuerta radial, nivel de agua en la presa previa al desarenador y nivel de agua por cada canal, respectivamente. Se observa la variación en las curvas debido al rango de medición de cada sensor, es por ello que fue necesario implementar una ecuación para cada sensor y conseguir el escalamiento adecuado.

Con base en los resultados obtenidos, la modernización se logró ejecutar en un 100%. Todos los módulos instalados poseen la lectura y envió de comandos adecuada según listado de señales planteado en la metodología, ver Cuadros 3 al 8.

B. Limpieza de rejillas usando peines hidráulicos.

Para esta operación se tenía como objetivo implementar una rutina que permita la limpieza de cada rejilla haciendo uso del peine hidráulico correspondiente, con modo de operación automático con base en una diferencia entre el nivel de la presa y el nivel del canal o ejecución manual asistida proveniente del sistema SCADA.

De acuerdo a la metodología planteada, se identificó que la limpieza se realizaría con un peine hidráulico por cada rejilla instalada, siendo la misma cantidad de canales del desarenador, cuatro en total. Además, la limpieza de las cuatro rejillas se podría realizar de forma simultanea o individual.

Con el objetivo alcanzado de la modernización, se comprobó el funcionamiento de todas las señales necesarias de cada peine hidráulico, para conocer su estado abierto/cerrado y su ubicación arriba/abajo. La ubicación de los peines está referida a un sensor analógico de tracción de hilo, el ajuste realizado en estos sensores permitió conocer su ubicación porcentual, ver Figura 30.

Se planteó una secuencia lógica para determinar los pasos, consideraciones y precauciones capaz de permitir realizar la rutina de limpieza de rejilla, ver Figura 18. Se implementó la lógica de control en PLC (ver Anexo 1) y se procedió a realizar pruebas de operación.

De las pruebas realizadas se observó el funcionamiento del peine hidráulico, en sus diferentes estados dentro de la rutina de limpieza de rejilla. La Figura 32 muestra la ubicación más alejada de los peines en su carrera de desplazamiento, en un estado cerrado. Alcanzando dicha posición el peine logra arrastrar, desde lo más profundo de la presa, todos aquellos residuos y desechos que bloquean el paso del flujo de agua que ingresa al desarenador. La Figura 33 muestra como los residuos son arrastrados hacia arriba cuando el peine sube en su estado cerrado, se observó que en esta acción el peine puede atorarse si la cantidad de residuos que arrastra se traban en la rejilla e impiden que siga subiendo manteniendo el estado cerrado. Es por ello que para evitar daños sobre el peine se implementó un tiempo de seguridad en cada acción logrando evitar esfuerzos sobre el elemento mecánico. Al cumplir el tiempo de seguridad se detiene la rutina de limpieza y emite una alarma. No fue parte del objetivo de la rutina de limpieza de rejilla regresar el peine a su posición inicial luego de que la rutina sale por que el peine se atoro realizando la limpieza.

La Figura 34 muestra el momento en que los peines siguen subiendo en estado cerrado y alcanzan el ras del vertedero donde cae por gravedad los desechos que cada peine arrastra. La Figura 35, muestra la posición final e inicial de los peines hidráulicos luego de realizar una limpieza de rejilla sin inconvenientes, así como la posición que deben estar para iniciar nuevamente una rutina. No fue parte del objetivo reposicionar el peine hidráulico previo a iniciar una rutina de limpieza.

Los ajustes que se muestran en la Figura 31, permitieron determinar el nivel de agua tanto en cada canal como en la presa previa al desarenador. De modo que cuando la diferencia entre estos supere los siete centímetros activan la secuencia de limpieza de rejilla de forma automática, respectiva al canal donde ocurra la diferencia de nivel.

La Figura 47, muestra el control panel desplegado en las pantallas del sistema SCADA. Permite conocer el estado, ubicación del peine, o visualizar una alarma porque el peine se atoró en una limpieza de rejilla, así como reconocer la alarma.

C. Limpieza de canales usando compuertas de entrada y fondo.

Para esta operación se tenía como objetivo implementar una rutina que permita la limpieza de los sólidos sedimentados en cada canal, controlando la compuerta de entrada y compuerta de salida correspondientes, con modo de operación automático con base en un sensor de sólidos colocado al fondo del canal, o por contador tiempo periódico, o ejecución manual asistida proveniente del sistema SCADA.

Con base en la metodología planteada, los elementos involucrados serían las compuertas de entrada compuertas de fondo. Sin embargo, la limpieza solo podría hacerse en un canal del desarenador a la vez.

Con el objetivo alcanzado de la modernización, se comprobó el funcionamiento de todas las señales necesarias de cada compuerta, para conocer su estado abierto/cerrado.

Se planteó una secuencia lógica para determinar los pasos, consideraciones y precauciones capaz de permitir realizar la rutina de limpieza de cada canal, ver Figura 20. Se implementó la lógica de control en PLC (ver Anexo 2) y se procedió a realizar pruebas de operación.

De las pruebas realizadas se observó el estado del canal, en las diferentes etapas de la rutina de limpieza de canal. La Figura 36 muestra un canal del desarenador cuando este empieza a vaciarse luego de cerrar la compuerta de entrada para impedir el ingreso de agua, y la apertura de la compuerta de fondo que libera el agua contenida en el canal a un desfogue en vez de continuar su cauce hacia un embalse. Esta etapa permite que el agua que se desfoga arrastre consigo parte de los desechos sólidos acumulados en el canal del desarenador. El tiempo máximo de vaciado de canal se ajustó a 360 segundos. La Figura 37 muestra los sólidos acumulados en el canal aún después de desfogarse el agua en la etapa de vaciado. Dicha figura sólo es representativa de la cantidad de sólidos que puede acumular el desarenador, pero no la máxima.

La Figura 38 muestra el flujo a presión de agua que ingresa al canal luego de abrir la compuerta de entrada al 1%. Se observó que dicho flujo es suficiente para poder arrastrar la mayor parte de sólidos acumulados en el canal, sin embargo, hay zonas en donde el agua que circula no es capaz de alcanzar, debido a la estructura civil del fondo del canal, lo que provoca que resten sólidos dentro del mismo a una cantidad despreciable para los fines de la rutina de limpieza. El tiempo de desarenado se ajustó a 80 segundos después que la compuerta de entrada ya está en su apertura de 1%.

La Figura 39 muestra el canal limpio, en esta etapa la compuerta de entrada ya se había cerrado nuevamente y había transcurrido un segundo tiempo de vaciado ajustado a 100 segundos. La rutina de limpieza concluye con el cierre de la compuerta de fondo y la apertura de la compuerta de entrada para que nuevamente circule agua por el canal.

La Figura 48 muestra el control panel desplegado en las pantallas del sistema SCADA para la limpieza de canal. Permite conocer el paso en que se encuentra la rutina de limpieza y el tiempo restante de las etapas de vaciado, desarenado y segundo vaciado, además de visualizar una alarma por si se sobrepasa el tiempo de operación de alguna compuerta por un problema mecánico durante la rutina de limpieza, así como el comando de resetear para reconocer la alarma.

D. Regulación de nivel de la presa mediante operación de compuerta radial.

Para esta operación se tenía como objetivo implementar el control de la compuerta radial para regulación de la cantidad de agua que ingresa al desarenador, con modo de operación automático con base en el nivel de agua en la presa previa al desarenador o apertura completa o porcentual proveniente del sistema SCADA.

Con base en la metodología planteada, el elemento involucrado sería la compuerta radial. Sin embargo, el paso del agua que libera la compuerta radial solo es posible cuando una compuerta de mantenimiento se encuentra completamente abierta.

Con el objetivo alcanzado de la modernización, se comprobó el funcionamiento de todas las señales necesarias la compuerta y así conocer su estado abierta/cerrada. La ubicación de la compuerta radial está referida a un sensor analógico de tracción de hilo, el ajuste realizado en estos sensores permitió conocer su ubicación porcentual, ver Figura 30.

Se planteó una secuencia lógica para determinar los pasos, consideraciones y precauciones capaz de permitir realizar la regulación de nivel de la presa, ver Figura 22. Se implementó la lógica de control en el PLC (ver Anexo 3) y se procedió a realizar pruebas de operación.

De las pruebas realizadas se observó el estado de la compuerta radial, es decir, su variación en apertura. La lógica de control permitió especificar a qué porcentaje de apertura se quería tener la compuerta radial. La lógica implementada decide si debe subir o bajar la compuerta comparando el porcentaje de apertura solicitado y el porcentaje de apertura actual. Esta secuencia tiene su propio disparo por tiempo de seguridad en caso de que la compuerta no llegue al porcentaje deseado.

Se observó que el porcentaje de apertura varía dentro del PLC en un rango de 2% de manera constante. Esto produce inconvenientes cuando se solicita un porcentaje de apertura de 0% (completamente cerrada). Esto es porque la compuerta puede haber alcanzado la posición de cerrada, pero la señal no lo indica así. Por ello se debe tomar en cuenta no utilizar porcentaje de apertura de 0%, para cerrar completamente la compuerta se debe utilizar el comando cerrar.

Las Figuras 40, 41 y 42 muestran la apertura de la compuerta radial a un 10%, 40%, y 70%, respectivamente. Dichas aperturas mostradas son representativas del control sobre la compuerta radial. Es decir, se logró comprobar que la lógica creada para el control de la compuerta radial por solicitud de apertura fue funcional para una regulación automática del nivel, ya que la secuencia de regulación automática solo especifica el porcentaje de apertura sobre la compuerta radial en el momento que se activa.

El ajuste que se muestra en la Figura 31, permitieron determinar el nivel en la presa previa al desarenador. De modo que, dependiendo que tan elevada es la altura del agua comparado con el rebalse de la obra civil del desarenador se activa la regulación automática del nivel.

La Figura 44, segunda sección, muestra el control panel desplegado en las pantallas del sistema SCADA para el control por solicitud de apertura de forma manual asistido desde las pantallas del sistema SCADA.

E. Reposición de compuertas de entrada / Monitoreo y controles manuales desde sistema SCADA.

Los objetivos de estas operaciones fueron implementar una rutina de reposición de las compuertas de entrada, con modo de operación automática con base en un tiempo definido después de detectar la pérdida de posición a causa de la gravedad. Implementar el control manual para operación remota de compuertas de entrada, compuertas de salida, peines hidráulicos y compuerta radial con base en comandos enviados por el sistema SCADA.

Con base en la metodología planteada, el elemento involucrado para la reposición sería las compuertas de entrada. La reposición entre compuertas es independiente, pero, la activación de la función de reposición si aplica en las cuatro compuertas.

Para los controles manuales los elementos involucrados son los peines hidráulicos, compuertas de entrada, compuertas de fondo, y compuerta radial. Ya que en la realización de las rutinas de limpieza de canal y limpieza de rejillas ya se había comprobado los estados de cada elemento de campo, no fue necesario repetir la verificación del funcionamiento de los sensores.

Para la reposición de compuertas de entrada se planteó una secuencia lógica para determinar los pasos, bloqueos y precauciones capaz de permitir realizar la reposición, ver Figura 24. Se implementó la lógica de control en el PLC (ver Anexo 4) y se procedió a realizar pruebas de operación.

Para los controles manuales no se realizó ninguna secuencia ya que dichos controles accionan de forma directa los elementos de campo, sin embargo, se agregaron interbloqueos para no poder realizar ciertas acciones que comprometan el elemento mecánico. Se implementó la lógica de controles manuales en el PLC (ver Anexo 5) y se procedió a realizar pruebas de operación.

La Figura 43 es el resultado de la pantalla principal que permite monitorear cada estado y ubicación de todos los elementos pertenecientes al desarenador, las mediciones de nivel de agua en cada canal y en la presa. La Figura 44 es el resultado del control panel de control, el cual permite activar las rutinas de limpieza por canal, rutinas de limpieza de rejilla de forma simultanea o individual, comandos de apertura y cierre de compuerta radial, así como apertura por asignación de porcentaje. Además, permite habilitar o deshabilitar los modos de operación de cada rutina, automático o manual.

La Figura 45 es el resultado del control panel de controles manuales asistidos, el cual contiene el control individual (no de procesos) de cada uno de los elementos que componen el desarenador. Permitiendo ejecutar apertura y cierre de compuertas, y las acciones individuales para el control de los peines, también, permite detener cada una de ellas al pulsar el botón de paro respectivo a la acción que se mandó a realizar, tanto en compuertas como en los peines hidráulicos.

F. Cumplimiento de los requerimientos.

En el Cuadro 14 se autoevalúa el cumplimiento de los requerimientos del sistema de control y monitoreo obtenidos luego del diseño e implementación, y pruebas en campo. La ponderación total obtenida tras la autoevaluación es de 96%, la mayoría de requerimientos se cumplieron. Se considera exitosa la modernización del sistema de control y monitoreo para desarenador longitudinal de cuatro canales.

Sin embargo, se considera que los sensores de sólidos podrían llegar a ser el punto débil debido a que no presentan consistencia en su operación, se cuestiona que no son aptos para la aplicación en la que se requieren.

Por otro lado, para obtener un resultado real de los requerimientos en la lógica de regulación de nivel mediante el uso de la compuerta radial se necesita retroalimentación bajo condiciones no controladas. De este modo se observaría que los rangos asignados a la apertura de la compuerta radial sean los más apropiados según el incremento del nivel de agua en la presa. La limitante fue el caudal que ingresaba al desarenador al momento de realizar las pruebas de regulación. Sin embargo, el control por asignación porcentual usada en los modos manual y automático presenta resultados positivos.

Finalmente, como se observa en la Figura 49 los consumos de los distintos tipos de memoria no superan el 50% de la capacidad del controlador, lo cual permite implementar más lógicas si fuera necesario. Aunque, la capacidad de controlar más elementos de campo, así como obtener lecturas de nuevos sensores se ve limitado por el consumo de voltaje y corriente que producen los módulos de expansión, tomando en cuenta que ya no es posible agregar más módulos, ver Figura 50. De modo que el sistema sólo puede volverse más robusto implementando más lógicas de control, usando las señales existentes, y agregando otras a modo de no sobrepasar la capacidad de alimentación.

VIII. CONCLUSIONES

Se modernizó el sistema de control y monitoreo para un desarenador longitudinal de cuatro canales cumpliendo con un 96% de los requerimientos de operación.

Las debilidades principales de la modernización del sistema de control y monitoreo se encuentran en su capacidad de agregar más señales de retroalimentación y operación para los elementos de campo. Se cuestiona la consistencia en la operación de los sensores de sólidos para la activación de la rutina de limpieza en cada canal.

Se reemplazaron en su totalidad los equipos de control existentes, se cablearon todas las señales necesarias para retroalimentación y operación del nuevo sistema.

Se implementó una rutina que permite la limpieza de cada rejilla haciendo uso del peine hidráulico correspondiente. La implementación permite ejecutar una limpieza simultánea en las cuatro rejillas, o de forma individual.

Se logró la implementación de una rutina para la limpieza de los sólidos sedimentados en cada canal, haciendo uso de las compuertas de entrada y compuertas de fondo correspondientes. Obteniendo una remoción subjetiva del 95% de los sólidos por limitaciones de la estructura civil del fondo de los canales.

Se implementó la regulación de agua que ingresa al desarenador haciendo uso de la compuerta radial. Con un cumplimiento del 90% debido a que solo se realizaron pruebas bajo condiciones controladas.

Se logró implementar una rutina que permite la reposición de las compuertas de entrada de forma independiente, con activación de 12 horas luego de la pérdida de posición a causa de la gravedad.

Se implementó una pantalla principal del desarenador, que posee el monitoreo total de los elementos que lo componen. Contiene paneles de control para activar las diferentes rutinas de limpieza, regulación y reposición de forma manual y permisivo para la activación automática.

IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una investigación sobre los sensores para detección de sólidos en líquidos no estáticos. Si se lleva a cabo, debe considerarse que es preferente un sensor análogo con retroalimentación de corriente 4-20mA, debido a que la instalación del sensor se encuentra a una distancia alejada del controlador. Además de estar sumergido aproximadamente seis metros bajo agua con un flujo dinámico.

Se recomienda la instalación de un sensor analógico de corriente 4-20mA en las compuertas de entrada, para obtener una posición porcentual entre sus estados abierta/cerrada. Eso permitiría, en la rutina de limpieza de canal, ajustar una apertura optima al momento de abrir la compuerta para que ingrese agua a presión dependiendo la cantidad de sólidos sedimentados.

Es recomendable instalar un nuevo panel de control si se desean agregar más sensores en los elementos de campo. Debe considerarse que el sistema que se agregue debe ser capaz de reportar mediante un protocolo de comunicación industrial el estado de sus señales al controlador principal ya existente.

Finalmente, se recomienda seguir utilizando el mismo controlador para aplicaciones de automatización similares debido a su capacidad de procesamiento de tareas y variedad de módulos de expansión compatibles.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Asensio, P., Vilanova, P., & Arbós, R. V. (2006). *Automatización de procesos mediante la guía GEMMA*. Catalunya: Iniciativa Digital Politecnica.
- Bustamante, J. (2016). *Curso PLC y Programacion: Todo Sobre Plc*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Eduardo Briceño, R. E. (2008). *Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas*. Lima: Soluciones Prácticas - ITDG.
- Frías, J. D. (2009). *Sistemas Empotrados en Tiempo Real. Una introducción basada en FreeRTOS y en el microcontrolador ColdFire MCF5282*. San Francisco: Creative Commons.
- Higuera, A. G., & García, F. J. (2007). *CIM, el computador en la automatización de la producción*. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Julián Rodríguez Fernández, L. C., & Sánchez-Homeros, R. B. (2014). *Automatismos industriales*. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Lanza-Espino, G. d. (1999). *Diccionario de hidrología y ciencias afines*. Madrid: Plaza y Valdes Editores.
- Lapeña, M. R. (1989). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Barcelona: Marcombo, S.A.
- Osorio, J. F. (2008). *Energía hidroeléctrica*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Osorio, S., & Francisco, J. (2016). *Energía hidroeléctrica: Serie Energías renovables*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Penin, A. R. (2012). *Sistemas SCADA*. Barcelona: Marcombo, Ediciones Técnicas .
- Romero, F. H., & Serna, J. I. (2005). *Acueductos: teoría y diseño*. Medellín: Universidad de Medellín.
- Sastre, J. A. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Madrid: EOI Esc.Organiz.Industrial.
- Wilamowski, B. M., & Irwin, J. D. (2016). *Industrial Communication Systems*. Boca Raton FL: CRC Press.

XI. ANEXOS

A. Anexo 1. Código fuente de rutina de limpieza de rejillas.

La misma rutina aplica para las cuatro rejillas.

```
FIRST RUN - SET ESTADO 0  Asigna estado inicial de la secuencia de limpieza del peine 1
0000 | LD  %S13                               Comment
0001 | [ %MW80 := 0 ]                         Comment

ESTADO 5 - ALARMA DE ERROR  Activa una alarma de error en la secuencia de limpieza del peine 1. Antes de detener la secuencia.
0000 | LD  [ %MW80 = 5 ]                       Comment
0001 | [ %MW80 := 0 ]                         Comment
0002 | S   %M411                               Comment

DETENER SECUENCIA SCADA  Si ya esta corriendo la secuencia de limpieza espera un pulso desde scada para regresar a estado 0
0000 | LDR %M605                               Comment
0001 | AND %M0                                 Comment
0002 | [ %MW80 := 0 ]                         Comment

ESTADO 0 - DETENER SEC  Dentro del estado 0 - detiene cualquier acción del peine 1
0000 | BLK %TM16                               Comment
0001 | LD  [ %MW80 = 0 ]                       Comment
0002 | IN                                       Comment
0003 | OUT_BLK                                  Comment
0004 | LD  Q                                     Comment
0005 | ST  %M400                               Comment
0006 | R   %M412                               Comment
0007 | END_BLK                                  Comment
```

ESTADO 0 - INICIAR SEC *Espera confirmación para iniciarla secuencia de limpieza del peine 1, desde scada, y de forma automática por diferencia de nivel*

```

0000 | LD      [ %MW80 = 0 ]      Comment
0001 | AND(R  %M406              Comment
0002 | AND    %M180              Comment
0003 | OR(R   %M407              Comment
0004 | AND    %M181              Comment
0005 | )                          Comment
0006 | OR(R   %M399              Comment
0007 | AND    %M180              Comment
0008 | )                          Comment
0009 | AND    %M0                 Comment
0010 | OR(    %M408              Comment
0011 | AND    %M6                 Comment
0012 | AND    %M8                 Comment
0013 | )                          Comment
0014 | )                          Comment
0015 | ANDN   %M201              Comment
0016 | ST     %M405              Comment

```

ESTADO 0 - INICIO SEC *Inicia la secuencia de limpieza del peine 1. Activa bandera para indicar que el peine 1 esta activo.*

```

0000 | BLK    %TM17              Comment
0001 | LD      [ %MW80 = 0 ]      Comment
0002 | ANDR   %M405              Comment
0003 | IN                                           Comment
0004 | OUT_BLK                                           Comment
0005 | LD      Q                  Comment
0006 | [ %MW80 := 1 ]           Comment
0007 | S      %M412              Comment
0008 | END_BLK                                           Comment

```

ESTADO 1 - BAJAR PEINE 1 *Comprueba condiciones iniciales para bajar el peine en secuencia de limpieza.*

```

0000 | BLK    %TM56              Comment
0001 | LD      [ %MW80 = 1 ]      Comment
0002 | AND    %M4                 Comment
0003 | AND    %M409              Comment
0004 | IN                                           Comment
0005 | OUT_BLK                                           Comment
0006 | LD      Q                  Comment
0007 | ST     %M402              Comment
0008 | END_BLK                                           Comment

```

ESTADO 1 - ABAJO PEINE 1 Comprueba que el peine este en su posición de abajo, para continuar con la secuencia.

| | | | |
|------|---------|---------------|---------|
| 0000 | BLK | %TM18 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW80 = 1] | Comment |
| 0002 | ANDR | %M410 | Comment |
| 0003 | AND | %M4 | Comment |
| 0004 | IN | | Comment |
| 0005 | OUT_BLK | | Comment |
| 0006 | LD | Q | Comment |
| 0007 | [| %MW80 := 2] | Comment |
| 0008 | END_BLK | | Comment |

ESTADO 1 - TIMEOUT BAJAR PEINE 1 Tiempo de espera cómo protección si el peine no llega a su posición de abajo.

| | | | |
|------|---------|---------------|---------|
| 0000 | BLK | %TM22 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW80 = 1] | Comment |
| 0002 | ANDN | %M410 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | [| %MW80 := 5] | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |

ESTADO 2 - CERRAR PEINE 1 Comprueba condiciones para cerrar el peine, dentro de secuencia de limpieza

| | | | |
|------|---------|---------------|---------|
| 0000 | BLK | %TM57 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW80 = 2] | Comment |
| 0002 | AND | %M410 | Comment |
| 0003 | AND | %M4 | Comment |
| 0004 | IN | | Comment |
| 0005 | OUT_BLK | | Comment |
| 0006 | LD | Q | Comment |
| 0007 | ST | %M403 | Comment |
| 0008 | END_BLK | | Comment |

ESTADO 2 - CERRADO PEINE 1 Comprueba que el peine este en su posición cerrada, para continuar con la secuencia.

| | | | |
|------|---------|---------------|---------|
| 0000 | BLK | %TM19 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW80 = 2] | Comment |
| 0002 | ANDR | %M3 | Comment |
| 0003 | AND | %M410 | Comment |
| 0004 | IN | | Comment |
| 0005 | OUT_BLK | | Comment |
| 0006 | LD | Q | Comment |
| 0007 | [| %MW80 := 3] | Comment |
| 0008 | END_BLK | | Comment |

ESTADO 2 - TIMEOUT CERRAR PEINE 1 Tiempo de espera cómo protección si el peine no llega a su posición de cerrado.

| | | | |
|------|---------|---------------|---------|
| 0000 | BLK | %TM23 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW80 = 2] | Comment |
| 0002 | ANDN | %M3 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | [| %MW80 := 5] | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |

ESTADO 3 - SUBIR PEINE 1 Comprueba condiciones para subir el peine, dentro de secuencia de limpieza

| | | | |
|------|---------|---------------|---------|
| 0000 | BLK | %TM58 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW80 = 3] | Comment |
| 0002 | AND | %M3 | Comment |
| 0003 | AND | %M410 | Comment |
| 0004 | IN | | Comment |
| 0005 | OUT_BLK | | Comment |
| 0006 | LD | Q | Comment |
| 0007 | ST | %M404 | Comment |
| 0008 | END_BLK | | Comment |

ESTADO 3 - ARRIBA PEINE 1 Comprueba que el peine este en su posición de arriba, para continuar con la secuencia.

| | | | |
|------|---------|---------------|---------|
| 0000 | BLK | %TM20 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW80 = 3] | Comment |
| 0002 | ANDR | %M409 | Comment |
| 0003 | AND | %M3 | Comment |
| 0004 | IN | | Comment |
| 0005 | OUT_BLK | | Comment |
| 0006 | LD | Q | Comment |
| 0007 | [| %MW80 := 4] | Comment |
| 0008 | END_BLK | | Comment |

ESTADO 3 - TIMEOUT SUBIR PEINE 1 Tiempo de espera cómo protección si el peine no llega a su posición de arriba.

| | | | |
|------|---------|---------------|---------|
| 0000 | BLK | %TM24 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW80 = 3] | Comment |
| 0002 | ANDN | %M409 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | [| %MW80 := 5] | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |

ESTADO 4 - ABRIR PEINE 1 Comprueba condiciones para abrir el peine, dentro de secuencia de limpieza

```

0000 | BLK  %TM59          Comment
0001 | LD   [ %MW80 = 4 ]  Comment
0002 | AND  %M409          Comment
0003 | AND  %M3            Comment
0004 | IN                               Comment
0005 | OUT_BLK              Comment
0006 | LD   Q              Comment
0007 | ST   %M401          Comment
0008 | END_BLK              Comment

```

ESTADO 4 - ABIERTO PEINE 1 Comprueba que el peine este en su posición abierta, para finalizar la secuencia. Deshabilita bandera de peine 1 activo

```

0000 | BLK  %TM21          Comment
0001 | LD   [ %MW80 = 4 ]  Comment
0002 | ANDR %M4            Comment
0003 | AND  %M409          Comment
0004 | IN                               Comment
0005 | OUT_BLK              Comment
0006 | LD   Q              Comment
0007 | [ %MW80 := 0 ]      Comment
0008 | ST   %M471          Comment
0009 | END_BLK              Comment

```

ESTADO 4 - TIEMEOOUT ABIR PEINE Tiempo de espera cómo protección si el peine no llega a su posición de abierto.

```

0000 | BLK  %TM25          Comment
0001 | LD   [ %MW80 = 4 ]  Comment
0002 | ANDN %M4            Comment
0003 | IN                               Comment
0004 | OUT_BLK              Comment
0005 | LD   Q              Comment
0006 | [ %MW80 := 5 ]      Comment
0007 | END_BLK              Comment

```

RESET ALARMA ERROR DE SECUENCIA Reset remoto alarma de error en la secuencia de limpieza del peine 1

```

0000 | LD   %M180          Comment
0001 | ANDR %M413          Comment
0002 | OR(  %M181          Comment
0003 | ANDR %M414          Comment
0004 | )                    Comment
0005 | R    %M411          Comment

```

B. Anexo 2. Código fuente de rutina de limpieza de canal.

La misma rutina aplica para los cuatro canales.

```

FIRST RUN - SET ESTADO 0  Asigna estado inicial de la secuencia de limpieza del canal1
0000 | LD      %S13                                     Comment
0001 | [ %MW90 := 0 ]                                   Comment

ESTADO 7 - ALARMA DE ERROR  Activa una alarma de error en la secuencia de limpieza del canal 1. Antes de detener la secuencia.
0000 | LD      [ %MW90 = 7 ]                             Comment
0001 | [ %MW90 := 0 ]                                   Comment
0002 | S      %M511                                     Comment

DETENER SECUENCIA SCADA  Si ya esta corriendo la secuencia de limpieza espera un pulso desde scada para regresar a estado 0
0000 | LDR   %M681                                     Comment
0001 | AND   %M0                                       Comment
0002 | [ %MW90 := 0 ]                                   Comment

ESTADO 0 - DETENER SEC  Dentro del estado 0 - detiene cualquier acción del canal 1
0000 | BLK   %TM72                                     Comment
0001 | LD      [ %MW90 = 0 ]                             Comment
0002 | IN                                           Comment
0003 | OUT_BLK                                       Comment
0004 | LD      Q                                       Comment
0005 | ST      %M500                                   Comment
0006 | R      %M512                                   Comment
0007 | END_BLK                                       Comment

ESTADO 0 - INICIAR SEC  Espera confirmación para iniciarla secuencia de limpieza del canal 1, desde scada, y de forma automática por sensor solidos
0000 | LD      [ %MW90 = 0 ]                             Comment
0001 | AND (R %M508                                     Comment
0002 | AND   %M180                                     Comment
0003 | OR (R %M509                                     Comment
0004 | AND   %M181                                     Comment
0005 | )                                           Comment
0006 | AND   %M0                                       Comment
0007 | OR   %M510                                     Comment
0008 | OR   %M673                                     Comment
0009 | )                                           Comment
0010 | ANDN %M532                                     Comment
0011 | ANDN %M552                                     Comment
0012 | ANDN %M572                                     Comment
0013 | ANDN %M201                                     Comment
0014 | ANDN %M285                                     Comment
0015 | ST   %M507                                     Comment

```

ESTADO 0 - INICIO SEC Inicia la secuencia de limpieza del canal 1. Activa bandera para indicar que el canal 1 esta activo.

```

0000 | BLK   %TM73                               Comment
0001 | LD    [ %MW90 = 0 ]                       Comment
0002 | ANDR  %M507                               Comment
0003 | IN                                         Comment
0004 | OUT_BLK                                   Comment
0005 | LD    Q                                   Comment
0006 | [ %MW90 := 1 ]                           Comment
0007 | S     %M512                               Comment
0008 | END_BLK                                   Comment

```

ESTADO 1 - CERRAR COMP 1 Comprueba condiciones iniciales para cerrar compuerta entrada en secuencia de limpieza de canal.

```

0000 | BLK   %TM74                               Comment
0001 | LD    [ %MW90 = 1 ]                       Comment
0002 | AND   %M6                                 Comment
0003 | IN                                         Comment
0004 | OUT_BLK                                   Comment
0005 | LD    Q                                   Comment
0006 | ST    %M501                               Comment
0007 | END_BLK                                   Comment

```

ESTADO 1 - CERRADA COMP 1 Comprueba que compuerta entrada en posición cerrada, para continuar con la secuencia.

```

0000 | BLK   %TM75                               Comment
0001 | LD    [ %MW90 = 1 ]                       Comment
0002 | ANDR  %M5                                 Comment
0003 | IN                                         Comment
0004 | OUT_BLK                                   Comment
0005 | LD    Q                                   Comment
0006 | [ %MW90 := 2 ]                           Comment
0007 | END_BLK                                   Comment

```

ESTADO 1 - TIMEOUT CERRAR COMP 1 Tiempo de espera cómo protección si compuerta entrada no llega a su posición cerrada.

```

0000 | BLK   %TM76                               Comment
0001 | LD    [ %MW90 = 1 ]                       Comment
0002 | ANDN  %M5                                 Comment
0003 | IN                                         Comment
0004 | OUT_BLK                                   Comment
0005 | LD    Q                                   Comment
0006 | [ %MW90 := 7 ]                           Comment
0007 | END_BLK                                   Comment

```

ESTADO 2 - ABRIR COMPF 1 Comprueba condiciones para abrir compuerta fondo 1, dentro de secuencia de limpieza

```

0000 | BLK  %TM77                               Comment
0001 | LD   [ %MW90 = 2 ]                       Comment
0002 | AND  %M5                                  Comment
0003 | IN                                       Comment
0004 | OUT_BLK                                  Comment
0005 | LD   Q                                    Comment
0006 | ST   %M506                               Comment
0007 | END_BLK                                  Comment

```

ESTADO 2 - ABIERTA COMPF 1 Comprueba que compuerta fondo 1 este en su posición abierta, para continuar con la secuencia.

```

0000 | BLK  %TM78                               Comment
0001 | LD   [ %MW90 = 2 ]                       Comment
0002 | AND  %M7                                  Comment
0003 | IN                                       Comment
0004 | OUT_BLK                                  Comment
0005 | LD   Q                                    Comment
0006 | [ %MW90 := 3 ]                           Comment
0007 | END_BLK                                  Comment

```

ESTADO 2 - TIMEOUT ABRIR COMPF 1 Tiempo de espera cómo protección si compuerta fondo 1 no llega a su posición de abierta.

```

0000 | BLK  %TM79                               Comment
0001 | LD   [ %MW90 = 2 ]                       Comment
0002 | ANDN %M7                                  Comment
0003 | IN                                       Comment
0004 | OUT_BLK                                  Comment
0005 | LD   Q                                    Comment
0006 | [ %MW90 := 7 ]                           Comment
0007 | END_BLK                                  Comment

```

ESTADO 3 - ABRIR COMP 1 % Comprueba condiciones para abrir compuerta entrada un porcentaje, dentro de secuencia de limpieza

```

0000 | BLK  %TM80                               Comment
0001 | LD   [ %MW90 = 3 ]                       Comment
0002 | IN                                       Comment
0003 | OUT_BLK                                  Comment
0004 | LD   Q                                    Comment
0005 | ST   %M502                               Comment
0006 | END_BLK                                  Comment

```

ESTADO 3 - ABIERTA COMP 1 % Comprueba que compuerta entrada abrió un porcentaje, para continuar con la secuencia.

```

0000 | BLK  %TM81                               Comment
0001 | LD   [ %MW90 = 3 ]                       Comment
0002 | IN                                       Comment
0003 | OUT_BLK                                  Comment
0004 | LD   Q                                    Comment
0005 | ST   %M515                               Comment

```

| | | |
|--|---------|--------------|
| 0006 | END_BLK | Comment |
| ESTADO 3 - TIEMPO DESARENADO Comprueba un tiempo suficiente para limpiar canal, para continuar con la secuencia. | | |
| 0000 | BLK | TM82 |
| 0001 | LD | [MW90 = 3] |
| 0002 | AND | M515 |
| 0003 | IN | |
| 0004 | OUT_BLK | |
| 0005 | LD | Q |
| 0006 | [| MW90 := 4] |
| 0007 | END_BLK | Comment |
| ESTADO 4 - CERRAR COMP 1 Comprueba condiciones para cerrar compuerta entrada, dentro de secuencia de limpieza | | |
| 0000 | BLK | TM83 |
| 0001 | LD | [MW90 = 4] |
| 0002 | IN | |
| 0003 | OUT_BLK | |
| 0004 | LD | Q |
| 0005 | ST | M503 |
| 0006 | END_BLK | Comment |
| ESTADO 4 - CERRADA COMP 1 Comprueba que compuerta entrada este cerrada, para continuar la secuencia | | |
| 0000 | BLK | TM84 |
| 0001 | LD | [MW90 = 4] |
| 0002 | ANDR | M5 |
| 0003 | IN | |
| 0004 | OUT_BLK | |

| | | | |
|--|---------|---------------|---------|
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | [| %MW90 := 5] | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 4 - TIEMEOUT CERRADO COMP 1 Tiempo de espera cómo protección si el peine no llega a su posición de abierto. | | | |
| 0000 | BLK | %TM85 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW90 = 4] | Comment |
| 0002 | ANDN | %M5 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | [| %MW90 := 7] | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 5 - CERRAR COMPF 1 Comprueba condiciones iniciales para cerrar compuerta fondo en secuencia de limpieza de canal. | | | |
| 0000 | BLK | %TM86 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW90 = 5] | Comment |
| 0002 | AND | %M5 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | ST | %M505 | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 5 - CERRADA COMPF 1 Comprueba que compuerta fondo en posición cerrada, para continuar con la secuencia. | | | |
| 0000 | BLK | %TM87 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW90 = 5] | Comment |

| | | | |
|---|---------|---------------|---------|
| 0002 | ANDR | %M8 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | [| %MW90 := 6] | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 5 - TIMEOUT CERRAR COMPF 1 Tiempo de espera cómo protección si compuerta fondo no llega a su posición cerrada. | | | |
| 0000 | BLK | %TM88 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW90 = 5] | Comment |
| 0002 | ANDN | %M8 | Comment |
| 0003 | AND | %M505 | Comment |
| 0004 | IN | | Comment |
| 0005 | OUT_BLK | | Comment |
| 0006 | LD | Q | Comment |
| 0007 | [| %MW90 := 7] | Comment |
| 0008 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 6 - ABRIR COMP 1 Comprueba condiciones iniciales para abrir compuerta entrada en secuencia de limpieza de canal. | | | |
| 0000 | BLK | %TM89 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW90 = 6] | Comment |
| 0002 | AND | %M8 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | ST | %M504 | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 6 - ABIERTA COMP 1 Comprueba que compuerta entrada en posición abierta, para continuar con la secuencia. | | | |
| 0000 | BLK | %TM90 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW90 = 6] | Comment |
| 0002 | ANDR | %M6 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | [| %MW90 := 0] | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 6 - TIMEOUT ABRIR COMP 1 Tiempo de espera cómo protección si compuerta entrada no llega a su posición abierta. | | | |
| 0000 | BLK | %TM91 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW90 = 6] | Comment |
| 0002 | ANDN | %M6 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | [| %MW90 := 7] | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |

```
RESET ALARMA ERROR DE SECUENCIA  Reset remoto alarma de error en la secuencia de limpieza del canal 1
0000 | LD      %M180                               Comment
0001 | ANDR   %M513                               Comment
0002 | OR(    %M181                               Comment
0003 | ANDR   %M514                               Comment
0004 | )                                           Comment
0005 | R      %M511                               Comment

ENLACE TIEMPOS SCADA  Asignar tiempo de vaciado de canal, desarenado y vaciado despues de limpieza, hacia registros para lectura desde scada
0000 | LD      1                                   Comment
0001 | [ %MW140 := %TM78.P - %TM78.V ]           Comment
0002 | [ %MW141 := %TM82.P - %TM82.V ]           Comment
0003 | [ %MW142 := %TM86.P - %TM86.V ]           Comment
```

C. Anexo 3. Código fuente de rutina de regulación de nivel usando compuerta radial.

Se incluyen rutinas de control por asignación porcentual, y regulación automática.

| | | |
|--|-------------------|---------|
| 0003 | OUT_BLK | Comment |
| 0004 | LD Q | Comment |
| 0005 | ST %M700 | Comment |
| 0006 | R %M712 | Comment |
| 0007 | END_BLK | Comment |
| ESTADO 0 - INICIAR SEC Espera confirmación para iniciarla secuencia de limpieza del comp rad, desde scada, y de forma automática | | |
| 0000 | LD [%MW123 = 0] | Comment |
| 0001 | AND (R %M708 | Comment |
| 0002 | AND %M180 | Comment |
| 0003 | OR (R %M709 | Comment |
| 0004 | AND %M181 | Comment |
| 0005 |) | Comment |
| 0006 | ANDN %M716 | Comment |
| 0007 | ORR %M710 | Comment |
| 0008 |) | Comment |
| 0009 | AND %M0 | Comment |
| 0010 | ANDN %M201 | Comment |
| 0011 | ST %M707 | Comment |
| ESTADO 0 - INICIO SEC Inicia la secuencia de limpieza de comp rad. Activa bandera para indicar que el comp rad esta activo. | | |
| 0000 | BLK %TM180 | Comment |
| 0001 | LD [%MW123 = 0] | Comment |
| 0002 | ANDR %M707 | Comment |
| 0003 | IN | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | Comment |

```

FIRST RUN - SET ESTADO 0  Asigna estado inicial de la secuencia
0000 | LD  %S13                               Comment
0001 | [ %MW123 := 0 ]                         Comment

ASIGNACION DE PORCENTAJE SOLICITADO DESD... Comment
0000 | LD  [ %MW123 = 0 ]                     Comment
0001 | ANDR %M708                             Comment
0002 | [ %MW124 := %MW125 ]                 Comment

ASIGNACION DE PORCENTAJE SOLICITADO DESD... Comment
0000 | LD  [ %MW123 = 0 ]                     Comment
0001 | ANDR %M709                             Comment
0002 | [ %MW124 := %MW126 ]                 Comment

ASIGNACION DE PORCENTAJE SOLICITADO DESD... Comment
0000 | LD  [ %MW123 = 0 ]                     Comment
0001 | ANDR %M710                             Comment
0002 | [ %MW124 := %MW127 ]                 Comment

ESTADO 3 - ALARMA DE ERROR  Activa una alarma de error en la secuencia
0000 | LD  [ %MW123 = 3 ]                     Comment
0001 | [ %MW123 := 0 ]                         Comment
0002 | S  %M711                             Comment

ESTADO 0 - DETENER SEC  Dentro del estado 0 - detiene cualquier acción del compuerta radial
0000 | BLK %TM179                             Comment
0001 | LD  [ %MW123 = 0 ]                     Comment
0002 | IN                                     Comment

```

| | | | |
|---|---------|----------------------|---------|
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | MPS | | Comment |
| 0007 | AND | [%MW124 > %MW122] | Comment |
| 0008 | [| %MW123 := 1] | Comment |
| 0009 | MRD | | Comment |
| 0010 | AND | [%MW124 < %MW122] | Comment |
| 0011 | [| %MW123 := 2] | Comment |
| 0012 | MPP | | Comment |
| 0013 | S | %M712 | Comment |
| 0014 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 1 - ABRIR COMP RAD <i>Comment</i> | | | |
| 0000 | LD | [%MW123 = 1] | Comment |
| 0001 | ST | %M702 | Comment |
| ESTADO 1 - COMP RAD LLEGO A APERTURA <i>Comprueba que compuerta radial haya alcanzado la apertura solicitada.</i> | | | |
| 0000 | LD | [%MW123 = 1] | Comment |
| 0001 | AND | [%MW124 <= %MW122] | Comment |
| 0002 | [| %MW123 := 0] | Comment |
| ESTADO 1 - TIMEOUT ABRIR COMP R <i>Tiempo de espera cómo protección si compuerta rad no llega a su posición</i> | | | |
| 0000 | BLK | %TM181 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW123 = 1] | Comment |
| 0002 | IN | | Comment |
| 0003 | OUT_BLK | | Comment |
| 0004 | LD | Q | Comment |
| 0005 | [| %MW123 := 3] | Comment |
| 0006 | END_BLK | | Comment |
| ESTADO 2 - CERRAR COMP RAD <i>Comment</i> | | | |
| 0000 | LD | [%MW123 = 2] | Comment |
| 0001 | ST | %M701 | Comment |
| ESTADO 2 - COMP RAD LLEGO A APERTURA <i>Comprueba que compuerta radial haya alcanzado la apertura solicitada.</i> | | | |
| 0000 | LD | [%MW123 = 2] | Comment |
| 0001 | AND | [%MW124 >= %MW122] | Comment |
| 0002 | [| %MW123 := 0] | Comment |
| ESTADO 2 - TIMEOUT ABRIR COMP R <i>Tiempo de espera cómo protección si compuerta rad no llega a su posición</i> | | | |
| 0000 | BLK | %TM182 | Comment |
| 0001 | LD | [%MW123 = 2] | Comment |
| 0002 | IN | | Comment |
| 0003 | OUT_BLK | | Comment |
| 0004 | LD | Q | Comment |
| 0005 | [| %MW123 := 3] | Comment |
| 0006 | END_BLK | | Comment |

RESET ALARMA ERROR DE SECUENCIA *Reset remoto alarma de error en la secuencia de limpieza del comp rad*

```

0000 | LD      %M180                               Comment
0001 | ANDR   %M713                               Comment
0002 | OR (   %M181                               Comment
0003 | ANDR   %M714                               Comment
0004 | )                                           Comment
0005 | R      %M711                               Comment

```

FIRST RUN - SET ESTADO 0 *Comment*

```

0000 | LD      %S13                               Comment
0001 | [ %MW128 := 0 ]                             Comment

```

MODO OPERACION AUTO/MANUAL *Comment*

```

0000 | LDR    %M704                               Comment
0001 | OR     %M716                               Comment
0002 | AND    %M0                                 Comment
0003 | ANDN   %M705                               Comment
0004 | ST     %M716                               Comment

```

RANGO 0 - CERRAR RADIAL *Si nivel presa: x <= 939.36, Mantener cerrada compuerta*

```

0000 | BLK    %TM186                               Comment
0001 | LD     [ %MF155 < 939.4 ]                 Comment
0002 | AND    %M716                               Comment
0003 | IN                                           Comment
0004 | OUT_BLK                                     Comment
0005 | LD     Q                                    Comment
0006 | ST     %M718                               Comment
0007 | END_BLK                                     Comment

```

RANGO 1 - ASIGNAR 20% *Si nivel presa: 939.54 < x <= 939.58, asignar apertura de 20%*

```

0000 | LD     [ %MW128 = 0 ]                       Comment
0001 | AND   [ %MF155 > 939.54 ]                 Comment
0002 | AND   [ %MF155 <= 939.58 ]               Comment
0003 | AND   %M716                               Comment

```

| | | |
|---|--------------------------|---------|
| 0004 | [%MW127 := 20] | Comment |
| 0005 | [%MW128 := 1] | Comment |
| RANGO 2 - ASIGNAR 40% Si nivel presa: 939.58 < x <= 939.62, asignar apertura de 40% | | |
| 0000 | LD [%MW128 = 0] | Comment |
| 0001 | AND [%MF155 > 939.58] | Comment |
| 0002 | AND [%MF155 <= 939.62] | Comment |
| 0003 | AND %M716 | Comment |
| 0004 | [%MW127 := 40] | Comment |
| 0005 | [%MW128 := 1] | Comment |
| RANGO 3 - ASIGNAR 60% Si nivel presa: 939.62 < x <= 939.66, asignar apertura de 60% | | |
| 0000 | LD [%MW128 = 0] | Comment |
| 0001 | AND [%MF155 > 939.62] | Comment |
| 0002 | AND [%MF155 <= 939.66] | Comment |
| 0003 | AND %M716 | Comment |
| 0004 | [%MW127 := 60] | Comment |
| 0005 | [%MW128 := 1] | Comment |
| RANGO 4 - ASIGNAR 80% Si nivel presa: 939.66 < x <= 939.70, asignar apertura de 80% | | |
| 0000 | LD [%MW128 = 0] | Comment |
| 0001 | AND [%MF155 > 939.66] | Comment |
| 0002 | AND [%MF155 <= 939.7] | Comment |
| 0003 | AND %M716 | Comment |
| 0004 | [%MW127 := 80] | Comment |
| 0005 | [%MW128 := 1] | Comment |
| RANGO 5 - ABRIR RADIAL Si nivel presa: x < 939.7, Mantener abierta compuerta | | |
| 0000 | BLK %TM187 | Comment |
| 0001 | LD [%MF155 > 939.7] | Comment |
| 0002 | AND %M716 | Comment |
| 0003 | IN | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | Comment |
| 0005 | LD Q | Comment |
| 0006 | ST %M717 | Comment |
| 0007 | END_BLK | Comment |
| ESTADO 1 - SET INICIO Comment | | |
| 0000 | BLK %TM188 | Comment |
| 0001 | LD [%MW128 = 1] | Comment |
| 0002 | AND %M716 | Comment |
| 0003 | IN | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | Comment |
| 0005 | LD Q | Comment |
| 0006 | ST %M710 | Comment |
| 0007 | END_BLK | Comment |

| ESTADO 1 - TIEMPO ESPERA NUEVA REVISIÓN | | Comment |
|---|-------------------|---------|
| 0000 | BLK %TM185 | Comment |
| 0001 | LD [%MW128 = 1] | Comment |
| 0002 | ANDN %M712 | Comment |
| 0003 | AND %M716 | Comment |
| 0004 | IN | Comment |
| 0005 | OUT_BLK | Comment |
| 0006 | LD Q | Comment |
| 0007 | [%MW128 := 0] | Comment |
| 0008 | END_BLK | Comment |

D. Anexo 4. Código fuente de rutina de reposición de compuertas.

La misma rutina aplica para las cuatro compuertas.

```

COMP - ABRIR CMD  Evalua que se mando abrir, mantiene un tiempo para que le de tiempo si la compuerta llega a estar completamente abierta
0000 | BLK  %TM189                                     Comment
0001 | LD   %M105                                     Comment
0002 | IN                                     Comment
0003 | OUT_BLK                                     Comment
0004 | LD   Q                                       Comment
0005 | ST   %M582                                     Comment
0006 | END_BLK                                     Comment

COMP - DESBLOQ REPOS  si se mando la apertura y luego a su posicion de abierta, desbloquea la reposicion.
0000 | LD   %M582                                     Comment
0001 | AND  %M6                                       Comment
0002 | ST   %M581                                     Comment

COMP - BLOQ REPOS  cualquier accion de cierre intencional bloquea la reposicion de la compuerta
0000 | LDR  %M104                                     Comment
0001 | OR   %M580                                     Comment
0002 | ANDN %M581                                     Comment
0003 | ST   %M580                                     Comment

TIEMPO PARA REPOSICION  si la compuerta pierde posicion de abierta y esta desbloqueada la reposicion, manda un comando de apertura
0000 | BLK  %TM190                                     Comment
0001 | LDN  %M6                                       Comment
0002 | ANDN %M580                                     Comment
0003 | ANDN %M688                                     Comment
0004 | AND  %M687                                     Comment
0005 | IN                                     Comment

```

| | | |
|---|------------|---------|
| 0006 | OUT_BLK | Comment |
| 0007 | LD Q | Comment |
| 0008 | ST %M689 | Comment |
| 0009 | END_BLK | Comment |
| PULSO DE REPOSICION <i>Comment</i> | | |
| 0000 | BLK %TM207 | Comment |
| 0001 | LDR %M689 | Comment |
| 0002 | IN | Comment |
| 0003 | OUT_BLK | Comment |
| 0004 | LD Q | Comment |
| 0005 | ST %M583 | Comment |
| 0006 | ST %M688 | Comment |
| 0007 | END_BLK | Comment |
| HABILITAR O DESHABILITAR REPOSICION DESDE... <i>Comment</i> | | |
| 0000 | LDR %M685 | Comment |
| 0001 | OR %M687 | Comment |
| 0002 | AND %M0 | Comment |
| 0003 | ANDN %M686 | Comment |
| 0004 | ST %M687 | Comment |

E. Anexo 5. Código fuente de controles manuales de todos los elementos de campo.

La rutina aplica para todos los peines, compuertas de entrada, compuertas de fondo y compuerta radial.

| | | | |
|----------------------|--------|-------|----------------|
| PEINE 1 - BAJAR CMD | | | <i>Comment</i> |
| 0000 | LDR | %M402 | <i>Comment</i> |
| 0001 | OR (R | %M600 | <i>Comment</i> |
| 0002 | AND | %M0 | <i>Comment</i> |
| 0003 | ANDN | %M412 | <i>Comment</i> |
| 0004 | ANDN | %M201 | <i>Comment</i> |
| 0005 |) | | <i>Comment</i> |
| 0006 | OR | %M106 | <i>Comment</i> |
| 0007 | ANDN | %M400 | <i>Comment</i> |
| 0008 | ANDN | %M604 | <i>Comment</i> |
| 0009 | ANDN | %M410 | <i>Comment</i> |
| 0010 | ANDN | %M107 | <i>Comment</i> |
| 0011 | ANDN | %M460 | <i>Comment</i> |
| 0012 | AND (N | %M3 | <i>Comment</i> |
| 0013 | OR | %M468 | <i>Comment</i> |
| 0014 |) | | <i>Comment</i> |
| 0015 | ST | %M106 | <i>Comment</i> |
| PEINE 1 - CERRAR CMD | | | <i>Comment</i> |
| 0000 | LDR | %M403 | <i>Comment</i> |
| 0001 | OR (R | %M602 | <i>Comment</i> |
| 0002 | AND | %M0 | <i>Comment</i> |
| 0003 | ANDN | %M412 | <i>Comment</i> |
| 0004 | ANDN | %M201 | <i>Comment</i> |
| 0005 |) | | <i>Comment</i> |

| | | | |
|------------------------------------|--------|-------|---------|
| 0006 | OR | %M102 | Comment |
| 0007 | ANDN | %M400 | Comment |
| 0008 | ANDN | %M604 | Comment |
| 0009 | ANDN | %M3 | Comment |
| 0010 | ANDN | %M103 | Comment |
| 0011 | ANDN | %M461 | Comment |
| 0012 | AND (N | %M409 | Comment |
| 0013 | OR | %M468 | Comment |
| 0014 |) | | Comment |
| 0015 | ST | %M102 | Comment |
| PEINE 1 - SUBIR CMD <i>Comment</i> | | | |
| 0000 | LDR | %M404 | Comment |
| 0001 | OR (R | %M601 | Comment |
| 0002 | AND | %M0 | Comment |
| 0003 | ANDN | %M412 | Comment |
| 0004 | ANDN | %M201 | Comment |
| 0005 |) | | Comment |
| 0006 | OR | %M107 | Comment |
| 0007 | ANDN | %M400 | Comment |
| 0008 | ANDN | %M604 | Comment |
| 0009 | ANDN | %M409 | Comment |
| 0010 | ANDN | %M106 | Comment |
| 0011 | ANDN | %M460 | Comment |
| 0012 | ST | %M107 | Comment |
| PEINE 1 - ABRIR CMD <i>Comment</i> | | | |
| 0000 | LDR | %M401 | Comment |
| 0001 | OR (R | %M603 | Comment |
| 0002 | AND | %M0 | Comment |
| 0003 | ANDN | %M412 | Comment |
| 0004 | ANDN | %M201 | Comment |
| 0005 |) | | Comment |
| 0006 | OR | %M103 | Comment |
| 0007 | ANDN | %M400 | Comment |
| 0008 | ANDN | %M604 | Comment |
| 0009 | ANDN | %M4 | Comment |
| 0010 | ANDN | %M102 | Comment |
| 0011 | ANDN | %M461 | Comment |
| 0012 | ST | %M103 | Comment |

| | | |
|---|---------|----------------------|
| PEINE 1 - TIMEOUT SUBIR BAJAR <i>Comment</i> | | |
| 0000 | BLK | %M163 <i>Comment</i> |
| 0001 | LD | %M106 <i>Comment</i> |
| 0002 | OR | %M107 <i>Comment</i> |
| 0003 | IN | <i>Comment</i> |
| 0004 | OUT_BLK | <i>Comment</i> |
| 0005 | LD | Q <i>Comment</i> |
| 0006 | ST | %M460 <i>Comment</i> |
| 0007 | END_BLK | <i>Comment</i> |
| PEINE 1 - TIMEOUT ABRIR CERRAR <i>Comment</i> | | |
| 0000 | BLK | %M164 <i>Comment</i> |
| 0001 | LD | %M102 <i>Comment</i> |
| 0002 | OR | %M103 <i>Comment</i> |
| 0003 | IN | <i>Comment</i> |
| 0004 | OUT_BLK | <i>Comment</i> |
| 0005 | LD | Q <i>Comment</i> |
| 0006 | ST | %M461 <i>Comment</i> |
| 0007 | END_BLK | <i>Comment</i> |
| COMP1 - CERRAR CMD <i>Comment</i> | | |
| 0000 | LDR | %M501 <i>Comment</i> |
| 0001 | ORR | %M503 <i>Comment</i> |
| 0002 | OR (R | %M630 <i>Comment</i> |
| 0003 | AND | %M0 <i>Comment</i> |
| 0004 | ANDN | %M512 <i>Comment</i> |
| 0005 | ANDN | %M201 <i>Comment</i> |
| 0006 |) | <i>Comment</i> |
| 0007 | OR | %M104 <i>Comment</i> |
| 0008 | ANDN | %M500 <i>Comment</i> |
| 0009 | ANDN | %M634 <i>Comment</i> |
| 0010 | ANDN | %M5 <i>Comment</i> |
| 0011 | ANDN | %M105 <i>Comment</i> |
| 0012 | ANDN | %M516 <i>Comment</i> |
| 0013 | ST | %M104 <i>Comment</i> |
| COMP1 - ABRIR CMD <i>Comment</i> | | |
| 0000 | LDR | %M502 <i>Comment</i> |
| 0001 | ORR | %M504 <i>Comment</i> |
| 0002 | OR (R | %M631 <i>Comment</i> |
| 0003 | ORR | %M583 <i>Comment</i> |
| 0004 | AND | %M0 <i>Comment</i> |
| 0005 | ANDN | %M512 <i>Comment</i> |
| 0006 | ANDN | %M201 <i>Comment</i> |
| 0007 |) | <i>Comment</i> |

| | | | |
|------------------------------------|---------|--------|---------|
| 0008 | OR | %M105 | Comment |
| 0009 | ANDN | %M500 | Comment |
| 0010 | ANDN | %M634 | Comment |
| 0011 | ANDN | %M6 | Comment |
| 0012 | ANDN | %M515 | Comment |
| 0013 | ANDN | %M104 | Comment |
| 0014 | ANDN | %M516 | Comment |
| 0015 | ST | %M105 | Comment |
| COMPF1 - CERRAR CMD <i>Comment</i> | | | |
| 0000 | LDR | %M505 | Comment |
| 0001 | OR (R | %M632 | Comment |
| 0002 | AND | %M0 | Comment |
| 0003 | ANDN | %M512 | Comment |
| 0004 | ANDN | %M285 | Comment |
| 0005 |) | | Comment |
| 0006 | OR | %M128 | Comment |
| 0007 | ANDN | %M500 | Comment |
| 0008 | ANDN | %M635 | Comment |
| 0009 | ANDN | %M8 | Comment |
| 0010 | ANDN | %M129 | Comment |
| 0011 | ANDN | %M517 | Comment |
| 0012 | ST | %M128 | Comment |
| COMPF1 - ABRIR CMD <i>Comment</i> | | | |
| 0000 | LDR | %M506 | Comment |
| 0001 | OR (R | %M633 | Comment |
| 0002 | AND | %M0 | Comment |
| 0003 | ANDN | %M512 | Comment |
| 0004 | ANDN | %M285 | Comment |
| 0005 |) | | Comment |
| 0006 | OR | %M129 | Comment |
| 0007 | ANDN | %M500 | Comment |
| 0008 | ANDN | %M635 | Comment |
| 0009 | ANDN | %M7 | Comment |
| 0010 | ANDN | %M128 | Comment |
| 0011 | ANDN | %M517 | Comment |
| 0012 | ST | %M129 | Comment |
| COMP1 - TIMEOUT <i>Comment</i> | | | |
| 0000 | BLK | %TM171 | Comment |
| 0001 | LD | %M104 | Comment |
| 0002 | OR | %M105 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | ST | %M516 | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |

| COMPF1 - TIMEOUT <i>Comment</i> | | | |
|---------------------------------|---------|-------|----------------|
| 0000 | BLK | %M172 | <i>Comment</i> |
| 0001 | LD | %M128 | <i>Comment</i> |
| 0002 | OR | %M129 | <i>Comment</i> |
| 0003 | IN | | <i>Comment</i> |
| 0004 | OUT_BLK | | <i>Comment</i> |
| 0005 | LD | Q | <i>Comment</i> |
| 0006 | ST | %M517 | <i>Comment</i> |
| 0007 | END_BLK | | <i>Comment</i> |

| RADIAL - CERRAR CMD <i>Comment</i> | | | |
|------------------------------------|--------|-------|----------------|
| 0000 | LDR | %M701 | <i>Comment</i> |
| 0001 | OR (R | %M654 | <i>Comment</i> |
| 0002 | ANDN | %M716 | <i>Comment</i> |
| 0003 | OR (R | %M718 | <i>Comment</i> |
| 0004 | AND | %M716 | <i>Comment</i> |
| 0005 |) | | <i>Comment</i> |
| 0006 | AND | %M0 | <i>Comment</i> |
| 0007 | ANDN | %M712 | <i>Comment</i> |
| 0008 | ANDN | %M201 | <i>Comment</i> |
| 0009 |) | | <i>Comment</i> |
| 0010 | OR | %M108 | <i>Comment</i> |
| 0011 | AND (N | %M145 | <i>Comment</i> |
| 0012 | OR | %M712 | <i>Comment</i> |
| 0013 |) | | <i>Comment</i> |
| 0014 | ANDN | %M656 | <i>Comment</i> |
| 0015 | ANDN | %M700 | <i>Comment</i> |
| 0016 | ANDN | %M109 | <i>Comment</i> |
| 0017 | ANDN | %M703 | <i>Comment</i> |
| 0018 | ST | %M108 | <i>Comment</i> |
| RADIAL - ABRIR CMD <i>Comment</i> | | | |
| 0000 | LDR | %M702 | <i>Comment</i> |
| 0001 | OR (R | %M655 | <i>Comment</i> |
| 0002 | ANDN | %M716 | <i>Comment</i> |

| | | | |
|------|--------|-------|---------|
| 0003 | OR (R | %M717 | Comment |
| 0004 | AND | %M716 | Comment |
| 0005 |) | | Comment |
| 0006 | AND | %M0 | Comment |
| 0007 | ANDN | %M712 | Comment |
| 0008 | ANDN | %M201 | Comment |
| 0009 |) | | Comment |
| 0010 | OR | %M109 | Comment |
| 0011 | AND (N | %M144 | Comment |
| 0012 | OR | %M712 | Comment |
| 0013 |) | | Comment |
| 0014 | ANDN | %M656 | Comment |
| 0015 | ANDN | %M700 | Comment |
| 0016 | ANDN | %M108 | Comment |
| 0017 | ANDN | %M703 | Comment |
| 0018 | ST | %M109 | Comment |

RADIAL - TIMEOUT CIERRE O APERTURA *Comment*

| | | | |
|------|---------|--------|---------|
| 0000 | BLK | %TM162 | Comment |
| 0001 | LD | %M108 | Comment |
| 0002 | OR | %M109 | Comment |
| 0003 | IN | | Comment |
| 0004 | OUT_BLK | | Comment |
| 0005 | LD | Q | Comment |
| 0006 | ST | %M703 | Comment |
| 0007 | END_BLK | | Comment |