



POSGRADOS EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados  
Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería Mecatrónica

Título de la investigación  
Automatización del sistema de limpieza de rejillas de  
la obra de toma de la Central Hidroeléctrica Atexcaco.

Tesis que para obtener el Grado de Maestro  
en Ingeniería Mecatrónica

Presenta  
Germán Zaragoza Sánchez

Director de Tesis  
Dr. Ricardo Iván Álvarez Tamayo



**UPAEP – Secretaría General**

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

**Tesis Digitales Restricciones de uso:**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados

Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Mecatrónica

Se aprueba la Tesis:

Automatización del sistema de limpieza de rejillas  
de la obra de toma de la Central Hidroeléctrica  
Atexcaco.

Nombre del Alumno

Germán Zaragoza Sánchez

Comité Asesor

---

Dr. Ricardo Iván Álvarez Tamayo  
Director(a) de Tesis

---

Ing. Sergio Paúl Ramírez Núñez  
Gerente General C.H. Atexcaco

---

Dr. Alfredo Toriz Palacios  
Asesor(a)

---

Dr. Luis Rosales Roldán  
Asesor(a)

Puebla, México.

20 de septiembre de 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A MI ESPOSA**

Por su apoyo incondicional, su amor, su comprensión, por siempre creer en mí y por guiarme en momentos donde mi juicio no es el mejor. Te amo Chanita.

### **A MIS PADRES Y HERMANOS**

Por todo el amor que me han dado, por alentarme a seguir adelante y por todo el sacrificio que han hecho para que pudiera concluir con mi educación.

### **A MIS DOCENTES**

Por todas las lecciones y conocimientos que me ofrecieron a lo largo de esta etapa de mi vida; mi reconocimiento y gratitud.

### **A AUTLÁN**

Por todas las facilidades otorgadas para poder cursar los estudios de maestría y por permitirme desarrollar este proyecto en la Central Hidroeléctrica Atexcaco con acceso total.

# 1 Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Planteamiento del problema.....	16
1.3 Preguntas de investigación.....	17
1.4 Propósito de la investigación.....	18
1.5 Objetivo General.....	18
1.6 Objetivos específicos.....	18
1.7 Justificación de la investigación.....	19
1.8 Alcances y limitaciones.....	20
1.9 Organización del estudio.....	21
Capítulo 2. Marco teórico.....	22
2.1 Energía hidroeléctrica.....	22
2.2 Clasificación de centrales hidroeléctricas.....	24
2.3 Potencia eléctrica.....	27
2.4 Circuito hidráulico de la Central Hidroeléctrica Atexcaco.....	28
2.4.1 Desarenador.....	30
2.4.2 Rejillas de limpieza.....	33
2.5 Instrumentación.....	35
2.5.1 Controlador lógico programable (PLC).....	35
2.5.2 Sensores de nivel.....	41
2.6 Normas para tableros eléctricos.....	45
2.6.1 Norma internacional IEC 60529.....	45
2.6.2 Norma NEMA 250.....	45

Capítulo 3. Metodología.....	46
3.1 Topología del proyecto.....	46
3.2 Diagrama de flujo de proceso.....	47
3.3 Requerimientos del cliente.....	51
3.4 Elementos del sistema.....	52
3.4.1 Hardware.....	52
3.4.2 Software.....	55
3.5 Integración de hardware.....	56
3.6 Programación del PLC.....	58
3.6.1 Bloques de programa.....	58
3.6.2 Acoplamiento de señales.....	59
3.6.3 Desarenador Talconapan.....	61
3.6.4 Tabla de variables.....	64
3.6.5 Interfaz HMI.....	65
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	71
4.1 Simulación.....	71
4.2 Parámetros de monitoreo.....	75
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	83
Capítulo 6. Referencias.....	86

Ilustración 1 Pórtico Limpia rejas y toma de carga de la Central Agoyán (Aldaz, K., Sánchez, P. A., & Torres, J. A. 2018).....	12
Ilustración 2 Diagrama de bloques del pórtico limpia rejas de la central hidroeléctrica de Agoyán.....	13
Ilustración 3 Precios de energía por kWh. Fuente CFE.....	19
Ilustración 4 Plano de localización de obras, Atexcaco. Hidalgo, 2021.....	29
Ilustración 5 Compuertas de entrada al desarenador. Atexcaco, 2021.....	30
Ilustración 6 Limpieza de sólidos del desarenador. Atexcaco, 2021.....	31
Ilustración 7 Mecanismo de apertura y cierre de las compuertas del desarenador. Atexcaco, 2021.....	32
Ilustración 8 Sistema de captación de sólidos. Atexcaco, 2011. ....	33
Ilustración 9 Plano de localización de rejillas. Atexcaco, 2011.....	34
Ilustración 10 Canalización de sensores de nivel de agua. Atexcaco, 2021.....	35
Ilustración 11 Controlador lógico programable.....	36
Ilustración 12 PLC S7-1214C (Siemens, 2009).....	39
Ilustración 13 Clasificación de los sensores de nivel por tipo de medición.....	41
Ilustración 14 Topología del sistema de alertamiento.....	47
Ilustración 15 Diagrama de flujo del sistema de alertamiento. ....	48
Ilustración 16 Función matemática "restar".....	49
Ilustración 17 Comparadores matemáticos. Fuente propia.....	50
Ilustración 18 Conexión de entradas y salidas del PLC S7 1200 .....	57

Ilustración 19 Conexión de dispositivos Siemens.....	57
Ilustración 20 Bloques de función programados en el PLC S7 1200.....	59
Ilustración 21 Configuración módulo de entradas analógicas.	59
Ilustración 22 Configuración módulo de entradas analógicas.	61
Ilustración 23 Diagrama de proceso para el control de compuertas.....	63
Ilustración 24 Condiciones compuerta de salida desarenador.	64
Ilustración 25 Listado de señales del proyecto.....	65
Ilustración 26 Componentes de la HMI.....	66
Ilustración 27 Componente de la pantalla inicial.....	67
Ilustración 28 Pantalla de sesión.....	67
Ilustración 29 Pantalla de configuraciones.....	68
Ilustración 30 Estados del sistema.....	70
Ilustración 31 Estado de la compuerta, desarenador Talconapan. .....	71
Ilustración 32 Condiciones de falla.....	73
Ilustración 33 Condiciones normales.....	73
Ilustración 34 Interfaz "Cerrando compuerta".....	74
Ilustración 35 Interfaz "abriendo compuerta".....	74
Ilustración 36 Estados de compuertas.....	74
Ilustración 37 Interfaz de diagnóstico y análisis.....	75
Ilustración 38 Pantalla de inicio Heros 4.0.....	76
Ilustración 39 Tendencias directas al proceso de generación eléctrica.....	77
Ilustración 40 Disminución de carga con plena cantidad de agua disponible.....	78
Ilustración 41 Comparativa de fluctuaciones en la potencia de generación.....	79
Ilustración 42 Fluctuaciones de potencia vs eficiencia.....	80

Ilustración 43 Niveles de agua en el tanque de carga.....	81
Ilustración 44 Fluctuaciones de carga y vibraciones 29/08/2022 .....	82
Ilustración 45 Cojinete dañado generador 1.....	82
Ilustración 46 Mejoras al proyecto.....	84
Ilustración 47 Propuesta de control para compuertas.....	85

## Resumen

Este trabajo muestra el desarrollo del sistema de automatización de la limpieza de las rejillas en la obra de toma de la Central Hidroeléctrica Atexcaco, lo cual permite la entrada constante y estable del agua hacia la tubería de presión previa a las turbinas. Para esto se instaló hardware que consistió en un PLC Siemens, una HMI siemens y sensores de nivel de agua como principales instrumentos conectados por una red Ethernet.

## Palabras Clave:

Central hidroeléctrica, automatización, redes de control, HMI, PLC.

## Abstract

This document presents the trash racks automation system since the perception to the comissioning. This Project was developed in Atexcaco's hydroelectric power plant and it allows to have a smooth and stable amount of water flushing into the turbines. In order to achieve this goal, a PLC siemens, a touch panel siemens and two water level sensors were installed and connected through a wired network.

## Keywords:

Hydroelectric power plant, automation, control networks, HMI, PLC

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

La generación hidroeléctrica no es algo nuevo en el mundo; se inició en 1882 en países como Inglaterra, Estados Unidos y Francia (Ramos, Gutiérrez, 2012). En México, fue 7 años después que se construyó la primera central del país.

Desde ese entonces se han estado robusteciendo y perfeccionando los procesos de operación y mantenimiento de las mismas; en este gran paso, la automatización ha sido y sigue siendo la principal herramienta de la que los ingenieros del área han echado mano.

En este sentido, se plantea la definición de automatización como control (automático) de sistemas que trata de regular con la mínima intervención humana, el comportamiento dinámico de un sistema mediante ordenes de mando (Armesto, 2008:4); en otras palabras, es el uso de computadores y electrónica para manipular indirectamente, y en ocasiones a control remoto, los equipos principales y auxiliares del proceso productivo.

Los principales objetivos de la automatización en centrales hidroeléctricas, como en todos los procesos industriales, son:

- Reducir los costos de operación.
- Incrementar la confiabilidad de la central (evitar errores humanos).
- Aumentar la seguridad de los equipos y del personal que los opera.
- Reducir el tiempo por mantenimientos no requeridos.

Por mencionar un ejemplo de los mismos, en 1984 se realizó la automatización de la central hidroeléctrica de Tamazulapan en donde se estimaba que entre el 75% y 80% de los costos de operación era por costos del personal de la misma; al final esa cifra se vio reducida a un 55% (Bermúdez Martínez, 1984).

Sin embargo, alcanzar esos niveles de mejora no ha sido fácil y rápido, en un inicio la automatización se realizó de manera celular atacando los principales subprocesos tales como:

Para control de la turbina

- Regulador de velocidad.
- Reguladores de nivel para centrales conectados a la red.
- Regulador de potencia generada.
- Regulador de caudal turbinado.

Para control del generador

- Regulador de tensión para grupos sincrónicos.
- Equipos de sincronización.
- Excitación de la unidad.

Conjunto de equipos

- Secuencias de arranque (Rodado de la turbina).
- Secuencia de paro.
- Operación de equipos auxiliares (alimentación eléctrica, lubricación, etc.).

Todos estos subprocesos son parte del equipo electromecánico para la etapa final del proceso de generación. Es un hecho que la parte hidráulica o de captación no ha tenido el mismo desarrollo. Saber el tipo de automatización para una central depende de la disponibilidad de agua que tenga, su capacidad y modelo de regulación. No es lo mismo automatizar una compuerta de un embalse inmenso que el de una hidroeléctrica a filo de agua en donde sólo se aprovecha lo que el afluente le brinda.

Para el caso de las segundas, el regular la entrada a la tubería principal es un reto ya que depende del control de las rejillas auto limpiables y personal del área para lograr este objetivo. En América, la Central Hidroeléctrica Agoyán en Quito, ha sido de las primeras en implementar un sistema de automatización de limpieza de rejillas (Aldaz, K., Sánchez, P. A., & Torres, J. A. 2018), su objetivo se enfocó en evitar el ingreso de agentes extraños a la tubería con ayuda controladores lógicos programables (PLC) y una pantalla de interfaz hombre máquina (HMI). En la Ilustración 1 se observan las rejillas o pórticos de la central de Agoyán.



*Ilustración 1 Pórtico Limpia rejas y toma de carga de la Central Agoyán (Aldaz, K., Sánchez, P. A., & Torres, J. A. 2018)*

Figura 1 Pórtico Limpia rejas y toma de carga de la Central Agoyán (Aldaz, K., Sánchez, P. A., & Torres, J. A. 2018)

El trabajo presenta resultados funcionales y menciona beneficios por reducción en costos por mantenimiento, sin embargo, éstos últimos no se comprueban.

En la Ilustración 2 podemos observar el diagrama de bloques del proyecto desarrollado en la central de Agoyán en donde el uso del PLC fue esencial.

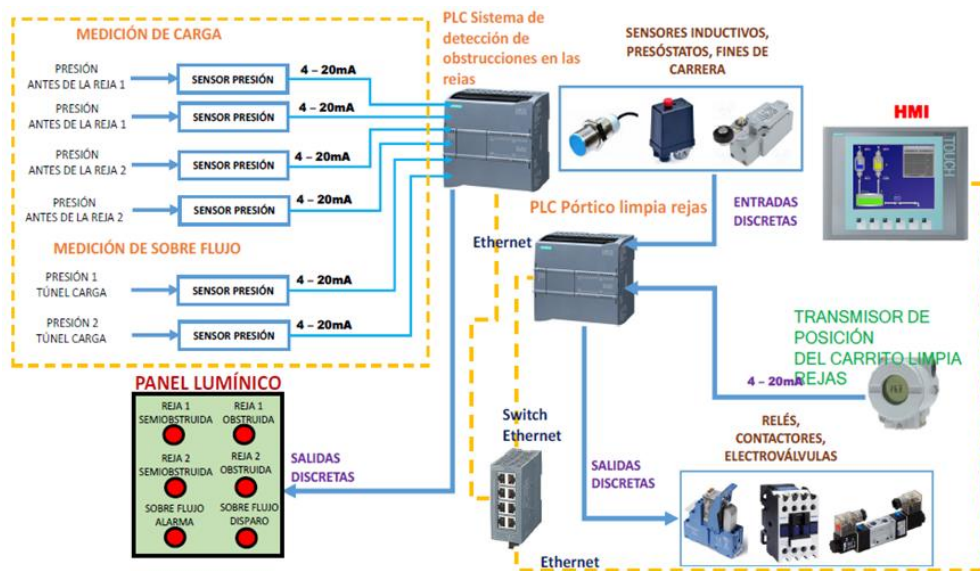


Ilustración 2 Diagrama de bloques del pórtico limpia rejas de la central hidroeléctrica de Agoyán.

La presente investigación se enfoca en la realización de un proyecto similar que sí comprueba las preguntas de hipótesis del mismo para alcanzar beneficios tangibles para la Central Hidroeléctrica Atexcaco.

Así como la central de Agoyán, existen múltiples casos de automatización en el sector hidroeléctrico; en 2016 se culminó el proyecto de modernización del sistema de control de la turbina de la central Mae-Ngat en Tailandia liderado por el ingeniero eléctrico Chanapan Kongnam originario del mismo país (Duangsoithong, Tanabodee & Kongnam. Renovation of turbine control system using PLC-based for small hydroelectric power generation); dicho proyecto dividió el proceso en dos partes, el gobernador de la turbina y el control de la operación, con la ayuda de un PLC siemens de la familia S7-400 se diseñó y se programó un control PID y se integraron los dispositivos de campo para alcanzar estas dos partes. Como interfaz HMI, se diseñó un sistema Supervisor de Control y Adquisición de Datos (SCADA por sus siglas en inglés). Sin embargo, al igual que en la central Agoyán en Quito, se presentaron resultados funcionales y simulaciones, pero no se implementó la propuesta de sistema con lo que no se pudieron comprobar los beneficios de este tipo de proyectos.

En base a los casos anteriores, se observa un factor común, el uso de PLC e interfaces hombre-máquina para el control del proceso de generación.

El PLC es un dispositivo de estado sólido, diseñado para controlar procesos secuenciales que se ejecutan en un ambiente industrial. Es decir, que van asociados a la maquinaria que desarrolla procesos de producción y controlan su trabajo.

Desde comienzos del control de procesos productivos con la utilización de los relés, se redujo e incluso se eliminó la carga de trabajo del operador humano añadiendo lógica a la operación de las máquinas.

Hoy en día, los PLC's no sólo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control, tales como controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo).

Los principales fabricantes de Hardware de control están integrados por: ABB, BECKHOFF, SIEMENS, ROCKWELL AUTOMATION, SCHNEIDER, aunque existen otros productores.

Las principales ventajas de los PLC's son:

- Menor tiempo empleado en la elaboración de proyectos debido a que no es necesario dibujar el esquema de contactos, ni simplificar las ecuaciones lógicas, pues generalmente, la capacidad de almacenamiento del módulo de memoria es lo suficientemente grande como para almacenarlas; la lista de materiales a emplear es más reducida y, al elaborar el presupuesto correspondiente, se elimina parte del problema que supone el contar con diferentes proveedores, distintos plazos de entrega, etc.
- Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado y añadir aparatos.
- Mínimo espacio de ocupación.
- Menor coste de mano de obra de la instalación.
- Economía de mantenimiento.
- Mayor confiabilidad del sistema al eliminar contactos móviles.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo autómata.

- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado.
- Mayor robustez en comparación con microcontroladores como Arduino y Raspberry Pi.

Complementando el uso de los PLC's, se tienen las interfaces de control y los sistemas SCADA, desde el inicio de la automatización de las centrales hidroeléctricas, ha sido un método infalible en el que se tiene un control automático de las rutinas, un monitoreo y posibilidad de ajuste del proceso de manera remota mediante el SCADA.

El presente trabajo adopta este modelo de automatización confiando en los resultados de múltiples casos de éxito en el sector hidroeléctrico y de diferentes ramas de la industria.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Compañía Mexicana de Energía S.A. de C.V. (CEM) se encuentra ubicada entre los municipios de Hueyapan y Teziutlán en el estado de Puebla, CEM forma parte del Grupo Autlán quién posee los derechos y acciones sobre La Central Hidroeléctrica Atexcaco (CHA). La CHA es un proyecto hidroeléctrico, el primero del grupo que opera bajo la modalidad de auto abasto entregando la energía generada a las plantas de ferroaleaciones de Autlán. El proyecto original consistió en dos turbinas hidráulicas que entregarían una potencia máxima de 30 MW, sin embargo, con las mejoras al sistema y los esfuerzos de ingeniería, actualmente produce 36 MW saturando su permiso de generación eléctrica.

Esta Central tiene la particularidad de pertenecer a la categoría de Hidroeléctricas a Filo de Agua, es decir, que no tienen presa de almacenamiento de agua, lo cual es benéfico para los ecosistemas ya que sólo pasa el agua por sus turbinas para después regresar al caudal natural de los ríos o arroyos

de donde fue tomada. No obstante, esta particularidad también produce desventajas operativas al no tener un volumen de agua almacenado que se pueda entregar a las turbinas de manera constante.

El control de las turbinas de la central hidroeléctrica se realiza automáticamente, dependiendo sólo del nivel de agua que se tiene en el tanque de carga. En consecuencia, si baja el nivel de agua, también baja la potencia de generación. Cuando las limpiezas no se realizan en los intervalos de tiempo correctos, se dan casos en donde el nivel de generación disminuye debido al bloqueo parcial de la parrilla debido a los sólidos que arrastra el agua. Esto provoca que se desborde el agua en el área de parrillas y cuando la parrilla se destapa, el nivel aumenta súbitamente provocando oscilaciones en el nivel. Estas fluctuaciones de volumen de agua se reflejan, a su vez, en variaciones significativas de la potencia de la turbina. Para evitar estas variaciones, la implementación de un hasta que el control PID permite estabilizar los cambios. Como resultado de las fluctuaciones, si nos encontramos en un horario que demande una producción al 100% de energía, se experimentan disminuciones en la generación que provocan un déficit en ingresos.

### **1.3 Preguntas de investigación**

A través de los resultados derivados de la implementación del proyecto propuesto, se busca dar respuesta a las preguntas de investigación:

- El criterio del operador en turno, ¿afecta el comportamiento del nivel del tanque de carga?
- ¿La frecuencia de limpieza de la parrilla es la idónea para mantener constante el flujo de entrada de agua al tanque regulador?

- ¿La manipulación manual de las compuertas del desarenador Talconapan provoca fluctuaciones en el nivel de agua del tanque de carga?

#### **1.4 Propósito de la investigación**

El presente trabajo de tesis consiste en automatizar el monitoreo de los niveles de agua en las rejillas de limpieza y la operación de las compuertas del desarenador principal, para demostrar que las fluctuaciones en el nivel de agua del tanque de carga son originadas por cuestiones climatológicas y, cuando este factor no presenta cambios, por las actividades manuales y a criterio de los operadores o trabajadores.

#### **1.5 Objetivo General**

Diseñar un sistema de automatización enfocado en las fluctuaciones provocadas por la obstrucción de las rejillas, que permita demostrar que las fluctuaciones en el nivel del tanque de carga son resultado de las condiciones climatológicas y de las actividades manuales a criterio de los operadores, así mismo ayude a mantener un flujo de agua controlado al tanque de carga y minimice esfuerzo en la apertura y cierre de compuertas.

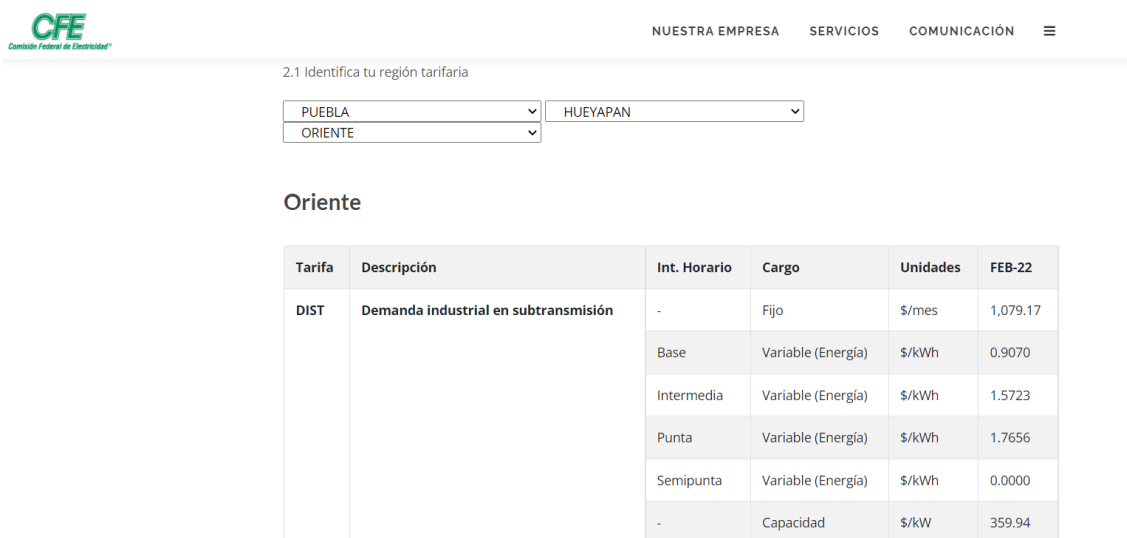
#### **1.6 Objetivos específicos**

- Detonar la rutina de operación de la parrilla de limpieza automática en la entrada al tanque de carga.
- Minimizar el esfuerzo en la manipulación de compuertas del desarenador Talconapan.
- Crear un sistema de alerta para la limpieza de la parrilla sólo cuando sea requerida.

- Realizar un análisis de los resultados de la implementación del sistema propuesta para contrastar con los registros de operación actuales.

## 1.7 Justificación de la investigación

El precio de la energía en México está definido por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Este organismo establece, para las centrales que no se encuentran en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), diferentes precios durante el día y durante los diferentes días de la semana. Base, intermedio y punta son los periodos que existen en función de la demanda de potencia donde: base es el más económico y punta el más caro. En la Ilustración 3 podemos ver los precios por periodo horario, incluyendo el cargo por capacidad y cargo fijo, de la región Oriente para centrales y cargas conectados en un nivel de subtransmisión (115 kV).



Tarifa	Descripción	Int. Horario	Cargo	Unidades	FEB-22
DIST	Demanda industrial en subtransmisión	-	Fijo	\$/mes	1,079.17
		Base	Variable (Energía)	\$/kWh	0.9070
		Intermedia	Variable (Energía)	\$/kWh	1.5723
		Punta	Variable (Energía)	\$/kWh	1.7656
		Semipunta	Variable (Energía)	\$/kWh	0.0000
		-	Capacidad	\$/kW	359.94

Ilustración 3 Precios de energía por kWh. Fuente CFE.

En función de lo anterior, la central debe administrar el agua que recibe de manera natural para darle el mayor valor monetario a la generación. El ciclo normal es operar a baja

potencia en horario base y operar a máxima potencias en horario punta.

Cuando la limpieza de las rejillas no es eficiente se presentan bloqueos de las mismas, provocando fluctuaciones en el nivel y por consecuencia, fluctuaciones en la potencia de generación. Cuando la fluctuación es a la baja (en horario punta), esa potencia no se recupera lo que se traduce en pérdidas de ingresos para la central.

Adicionalmente, existe un componente operativo que se ve afectado. En centrales hidroeléctricas con grandes embalses, se puede definir a qué potencia operarán las turbinas ya que tienen el agua disponible, sin embargo, en centrales como a filo de agua, se implementan métodos para suavizar la entrada de agua, para minimizar los esfuerzos de los sistemas hidráulicos y el desgaste de los componentes. Las fluctuaciones de potencia generada hidráulicamente se traducen entonces en apertura o cierre de inyectores que permitan regular el flujo de agua. Sin embargo, estas acciones provocan en las unidades hidráulicas de potencia un estrés mayor que generan un desgaste irregular y acelerado de los componentes mecánicos. Todo lo mencionado se refleja en costos por mantenimiento (reparaciones, refacciones, tiempo de parada, etc.).

## **1.8 Alcances y limitaciones**

En la CHA, año con año se realiza un presupuesto de inversiones ya revisadas y definidas por el equipo de trabajo. En esta ocasión, el proyecto de tesis contempla un sistema de monitoreo que detone la rutina de limpieza de una parrilla automática, sin embargo, aún no se ha definido el presupuesto para ese nuevo equipo. Adicionalmente, el plan de producción vigente puede sufrir cambios que provocaría un desvío de los esfuerzos,

dejando de lado la implementación de este trabajo. En base a lo anterior, se considera un alcance del mismo con los siguientes puntos:

- Programación de la lógica de funcionamiento en el software TIA Portal de Siemens.
- Diseño de la interfaz de usuario (Human Machine Interface) para la operación del sistema.
- Simulación del sistema de automatización con ayuda del software PLCSIM y WinCC RT ambos de Siemens.
- Integración del tablero de control para su instalación en campo.

## **1.9 Organización del estudio**

El presente trabajo se compone de los siguientes capítulos, mismo que se describen de manera general.

- **Introducción:** Brinda las generalidades del proyecto, el lugar y área de aplicación, su razón de ser, beneficios y alcances-limitaciones.
- **Marco teórico:** como su nombre lo indica, describe los fundamentos teóricos requeridos y consultados para la realización del proyecto.
- **Metodología:** Especifica los pasos que se siguieron en la ejecución del trabajo, en específico se compone de la programación, simulación y ejecución del sistema de automatización.
- **Resultados y discusión:** presenta los resultados obtenidos y los compara con las preguntas de la hipótesis.
- **Conclusiones y recomendaciones:** en función de los resultados obtenidos se plasman comentarios adicionales que ayuden a mejorar la operación en esas áreas del proceso.

- Referencias: se enlistan las fuentes consultadas durante el desarrollo del trabajo.
- Anexos: describen de manera más detallada, tablas, bloques de programa, etcétera, que son necesarios para la comprensión al 100% del presente trabajo de tesis.

## **Capítulo 2. Marco teórico**

### **2.1 Energía hidroeléctrica**

La energía hidroeléctrica es una forma de energía renovable. Las centrales eléctricas no consumen recursos para generar electricidad ni contaminan el aire, la tierra o el agua, como pueden hacerlo otras centrales eléctricas. La energía proviene del agua de los arroyos de montaña y lagos. El agua, cuando cae por la fuerza de la gravedad, es utilizada para hacer girar turbinas y generadores que al final producen electricidad. La energía hidroeléctrica es el mayor recurso renovable utilizado para la electricidad, juega un papel esencial en muchas regiones del mundo y existen más de 150 países generadores de energía hidroeléctrica. Una encuesta realizada en 1997 por el International Journal on Hydropower and Dams (Al-juboori, 2016) encontró que la energía hidroeléctrica suministra al menos el 50% de la producción eléctrica nacional en 63 países y al menos el 90% en 23 países. Unos 10 países obtienen prácticamente toda su electricidad comercial de la hidroeléctrica, incluidos Noruega, varios países africanos, Bután y Paraguay. Hay alrededor de 700 GW de capacidad hidroeléctrica en funcionamiento en todo el mundo, esto genera 2600 TWh/año (alrededor del 19% de la producción mundial de electricidad). Cerca de la mitad de esta capacidad y generación está en Europa y América del Norte, siendo Europa el más grande con el 32 % del uso total y América del Norte con un 23% del total. Sin embargo, esta proporción va disminuyendo a medida que Asia y

América Latina ponen en operación grandes cantidades de nueva capacidad hidroeléctrica. Plantas hidroeléctricas pequeñas, mini y micro (generalmente definidas como plantas de menos de 10 MW, 2 MW y 100kW, respectivamente) también juegan un papel clave en muchos países para la electrificación rural. Se estima que 300 millones de personas en China, por ejemplo, dependen de pequeñas centrales hidroeléctricas (Al-Juboori, 2016).

## **2.2 Clasificación de centrales hidroeléctricas**

La altura o caída determina la presión del agua en las turbinas que, junto con el caudal, son los parámetros más importantes para decidir el tipo de turbina hidráulica a utilizar. La turbina Francis fue desarrollada en 1848 por el ingeniero francés James B. Francis y es el tipo de turbina hidráulica más utilizado. Es una turbina de flujo centrípeto en la que el agua llega al rotor a través de un conducto en espiral; después, un rodillo en la parte fija dirige el caudal para invertir las palas del rotor. Se utiliza para caídas de altura media (de 10 a 300/400 metros) y caudales de agua de 2 a 100 metros cúbicos por segundo. La turbina Pelton fue introducida en 1879 por el carpintero e inventor americano Lester Allan Pelton. Su principio de funcionamiento refleja el de la clásica noria con paletas de los antiguos molinos de agua, reelaborada para aumentar su eficiencia: el agua se transporta a la tubería forzada, que cuenta con una boquilla en el extremo, una obturación que aumenta la velocidad del agua. El chorro de agua que sale de la boquilla golpea las palas del rotor, que tienen forma de cuchara. La turbina Pelton se utiliza para grandes caídas (entre 300 y 1400 metros) y caudales de menos de 50 metros cúbicos por segundo, con el fin de obtener mayores velocidades. La turbina Kaplan, que vio la luz en 1913 gracias al profesor austriaco Viktor Kaplan, sigue el principio de las hélices de un barco. La turbina Kaplan es una turbina de tipo axial en la que el caudal de agua hace que los álabes de la hélice giren hacia adentro y hacia afuera en dirección axial con respecto al eje de rotación de la hélice. Gracias a la posibilidad de ajustar el ángulo de incidencia de las palas, tiene la ventaja de proporcionar un excelente rendimiento con pequeños saltos, pero también con grandes variaciones en el caudal (desde 200 metros cúbicos por segundo para subir).

Sin embargo, independientemente al tipo de turbina utilizada, las centrales hidroeléctricas se clasifican en base a dos criterios importantes, el tipo de operación y disponibilidad del agua, así como la capacidad instalada, como se muestra en la

Tabla 1 Clasificación de centrales hidroeléctricas (Al-Juboori, 2016), (Valdez, 2005).

Tabla 1.

Tabla 1 Clasificación de centrales hidroeléctricas (Al-Juboori, 2016), (Valdez, 2005).

Criterio	Tipo	Descripción
Tipo de operación o instalaciones	"A filo de agua"	<p>Extrae la energía para la producción principalmente de la caudal disponible del río, puede incluir algo de almacenamiento a corto plazo (por hora, por día) que permite algo adaptaciones al perfil de demanda, pero el perfil de generación seguirá dependiendo de las condiciones locales del flujo del río.</p>
	De almacenamiento o embalse	<p>Almacena agua para turbinar, no dependen del perfil hidrológico de la región ya que lo almacenado permite decidir cuándo y en qué medida producir. Generalmente se adaptan a perfiles de consumo definidos.</p>

	De bombeo o reversibles	Funciona como un circuito hidráulico cerrado con dos embalses (arriba y abajo). Se descarga agua del embalse superior en horas pico de demanda y esa misma agua es bombeada desde el embalse inferior en horarios base o de baja demanda. A pesar de la energía requerida para el bombeo, el valor neto deja un margen de generación entregable a la red.
Capacidad instalada	Micro	<100 kW
	Mini	100 < kW < 1,000
	Pequeña	1 < MW < 30
	Grande	< 30 MW

### 2.3 Potencia eléctrica

Para calcular la potencia eléctrica o potencia de turbina, se necesita conocer la potencia hidráulica, la cual depende del caudal y del diferencial de altura del salto de agua.

La Ecuación 1 es utilizada para calcular la potencia hidráulica es la siguiente:

*Ecuación 1 Potencia eléctrica.*

$$PH (kW) = g \left( \frac{m}{s^2} \right) * Q \left( \frac{m^3}{s} \right) * H(m) * \eta$$

En donde:

g= aceleración de la gravedad

Q= flujo de agua en metros cúbicos por segundo

H=metros columna de agua

$\eta$ =eficiencia de la máquina

## **2.4 Circuito hidráulico de la Central Hidroeléctrica Atexcaco.**

La Ilustración 4 muestra la distribución de las obras principales de la central hidroeléctrica Atexcaco. Como se observa, la central cuenta con 6 puntos de aprovechamiento de aguas superficiales ubicados en la zona montañosa entre los municipios de Hueyapan y Yaonahuac Puebla; 5 de ellos conforman el sector izquierdo (Xiucayucan, Puxtla, 1+380, Colaxtitla y Ojo de Agua) y el restante el sector derecho (Atexcaco). Ambos sectores convergen en la derivadora Talconapan que es la estructura principal de derivación del flujo de agua, posteriormente el agua fluye a través de un canal artificial pasando por una estructura de decantación de sólidos comúnmente llamada desarenador. El penúltimo punto del viaje del agua es el tanque de carga en donde se busca mantener un nivel óptimo para garantizar la presión que llegue a los equipos electromecánicos, pasando esta sección se tiene una tubería de alta presión de 48" que termina por encaminar el agua hasta las turbinas. El sistema hidráulico se compone de 2 márgenes

que convergen en el tanque de carga para encauzar el agua hasta la casa de máquinas.

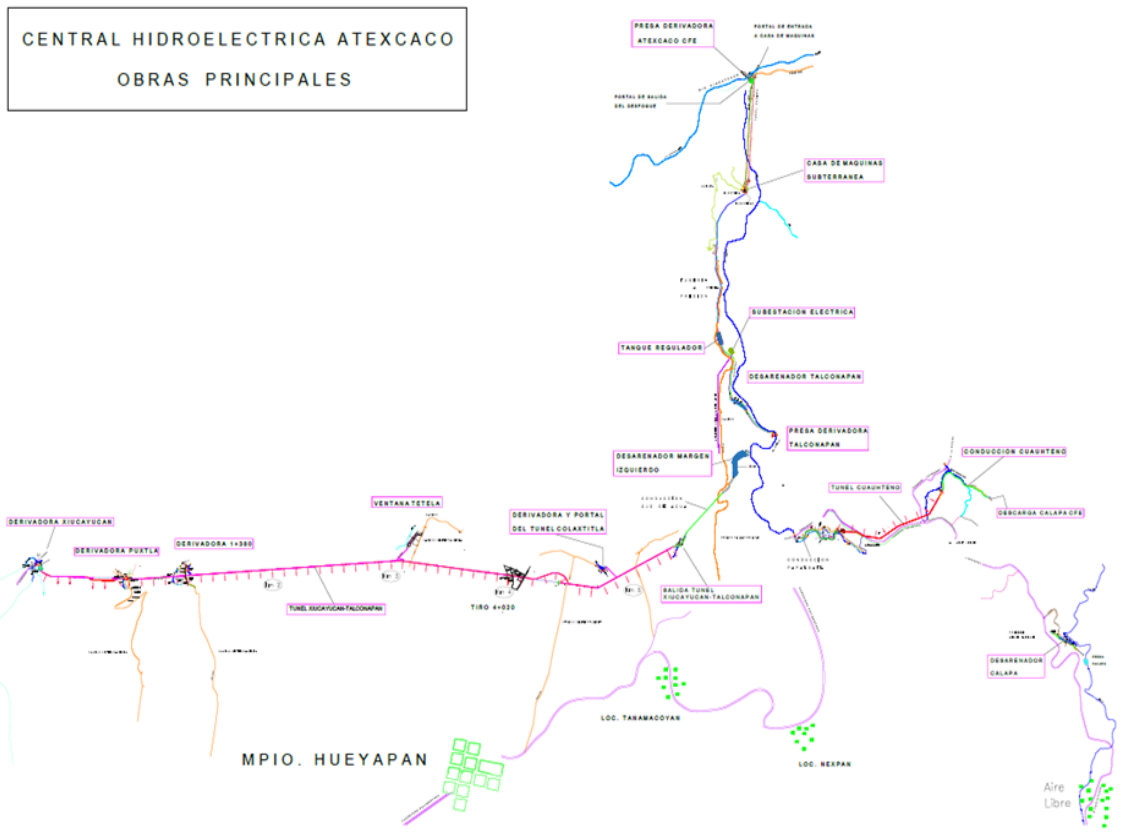


Ilustración 4 Plano de localización de obras, Atexcaco. Hidalgo, 2021

### 2.4.1 Desarenador

El objetivo de esta estructura es evitar que los sólidos suspendidos en el agua lleguen hasta los componentes de la turbina ya que éstos causan desgaste acelerado en los mismos.

Para lograr lo anterior se realizan limpiezas del desarenador con equipo pesado en función de las señales de los sensores de arena que se tienen instalados. Dicha limpieza implica operar las compuertas de entrada y salida para mantener el flujo hacia el tanque de carga, es decir, se cierran las compuertas de entrada y salida para aislar el desarenador del canal, una vez aislado se vacía para iniciar el retiro de los sólidos. En la Ilustración 5 se observan las compuertas de entrada al desarenador; a la izquierda se tiene el flujo por el canal normal (compuerta abierta) y a la derecha la compuerta de entrada al desarenador (compuerta cerrada). Una vez aislada la estructura, se retiran los sólidos con ayuda de equipo pesado como se puede apreciar en la Ilustración 6.



*Ilustración 5 Compuertas de entrada al desarenador. Atexcaco, 2021.*



Ilustración 6 Limpieza de sólidos del desarenador. Atexcaco, 2021.

Actualmente la apertura y cierre se hace de manera manual con el personal en campo, sin embargo, se ha visto que los esfuerzos son grandes y por consecuencia se requiere más mano de obra y tiempo. En la Ilustración 7 se observa el mecanismo de accionamiento actual el cual consta de un volante acoplado a un tren de engranes que fungen como reductor, el operario en turno manipula el volante, pero el movimiento efectivo del vástago de la compuerta es pequeño lo cual complica la apertura y cierre. Como se puede apreciar, el mecanismo utilizado es completamente manual. La acción de apertura y cierre por parte del operador se realiza en cada ciclo de limpieza del desarenador. Esta limpieza depende de la temporada, en época de estiaje se realiza cada 15 días y en época de lluvias cada semana.



*Ilustración 7 Mecanismo de apertura y cierre de las compuertas del desarenador.  
Atexcaco, 2021.*

## 2.4.2 Rejillas de limpieza

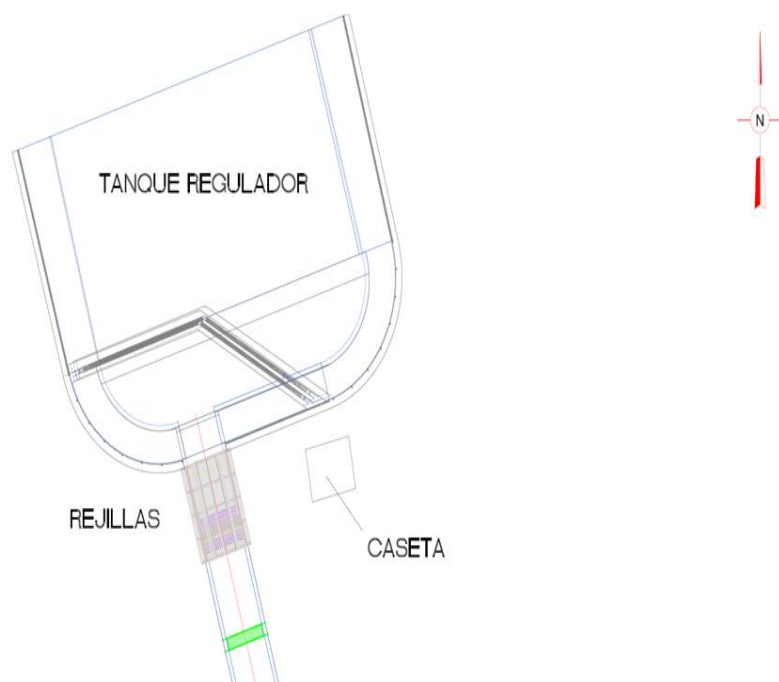
Previo a la entrada al tanque de carga se encuentran las rejillas principales de limpieza, este es el último punto que se tiene para evitar que agentes extraños lleguen a la turbina. Se trata de 2 estructuras metálicas de 3x3 m situadas a 2.55 m de profundidad con un ángulo de 50° con respecto a la base del canal, dichas rejillas están situadas en paralelo, así se puede retirar la que se va a limpiar mientras la otra sigue sumergida para captar los sólidos y basura.

La limpieza actual se realiza de manera manual y a criterio del operador. Esto es, cuando el operador observa que la rejilla empieza a saturarse de sólidos la retira con ayuda de un polipasto eléctrico. Posteriormente, en un tiempo aproximado de 10 minutos, con un rastrillo retira hacia un costado todos los agentes captados. En la Ilustración 8 se observan las rejillas, el polipasto eléctrico y la botonera de accionamiento.



*Ilustración 8 Sistema de captación de sólidos. Atexcaco, 2011.*

Debido a que el sistema de captación de sólidos es el último filtro dentro del sistema hidráulico, es imperativo realizar las limpiezas de forma sistematizada con una agenda dictada por las condiciones del agua que esté fluyendo. Esto permitirá realizar el procedimiento cuando realmente se requiera y no con un criterio subjetivo como se realiza actualmente. La programación de mantenimiento debe incluir la participación de la instrumentación del área, a fin de tener un monitoreo de las condiciones del proceso las 24 h. La Ilustración 9 muestra la localización de las rejillas al final del canal de conducción e inicio del tanque regulador o tanque de carga. Cuando las rejillas se bloquean por la basura, se experimenta un diferencial de nivel del agua comparando la medición antes y después de las mismas. Este diferencial será el parámetro fundamental para el monitoreo de la saturación de rejillas que detonará el sistema de alertamiento.



*Ilustración 9 Plano de localización de rejillas. Atexcaco, 2011.*

En la Ilustración 10 se muestra parte de la canalización de los sensores de nivel de agua con los que se cuenta, actualmente.

Los correspondientes en el área de rejillas están instalados 0.5 m antes y después de las mismas, se han canalizado hasta el tablero de control como se puede apreciar en la figura 10.



*Ilustración 10 Canalización de sensores de nivel de agua. Atexcaco, 2021.*

## **2.5 Instrumentación**

### **2.5.1 Controlador lógico programable (PLC).**

Un controlador lógico programable es una unidad que realiza funciones de control discretas o continuas en una variedad de ambientes de la planta de procesamiento y de la fábrica, está basado en una computadora reforzada industrialmente. Originalmente fue pensado como un relé de reemplazo para la industria automotriz, hoy en día se utiliza en prácticamente todas las industrias imaginables (Theorin & Segovia, 2012). A diferencia de los sistemas convencionales, como se aprecia en la Ilustración 11, el programa de un PLC realiza se ejecuta en un ciclo permanente, comúnmente llamado ciclo de escaneo. En este proceso, las entradas son leídas y procesadas para actualizar el estado de las salidas (Mader A. 2000).



*Ilustración 11 Controlador lógico programable*

La cantidad de aplicaciones de PLC es enorme y muy variada, incluye la industria de manufactura, de transporte, de comunicación, etc. Al ser sistemas interdisciplinarios, en todos lados se puede encontrar una aplicación para los PLC's, puede utilizarse en la producción de juguetes como en el control de la producción de farmacéuticos.

Estos dispositivos son producidos y vendidos en todo el mundo como equipo independiente por varios principales fabricantes de equipos de control. Además, una variedad de empresas más especializadas produce PLC para aplicaciones de fabricantes de equipos originales.

### 2.5.1.1

### PLC Siemens S7 1200

Dentro de la empresa se ha estandarizado el uso de equipos siemens para el sistema de control, debido a esto se debe seleccionar el equipo que más se adapte a las condiciones del proceso a controlar. Actualmente, dentro de la familia SIMATIC de Siemens, existen dos equipos principales; el S7 1200 y S7 1500. En la Tabla 2 se describen las principales características de cada uno a fin de dejar más claro el alcance que tienen.

*Tabla 2 Comparativa de PLC's simatic.*

<b>Característica</b>	<b>S7 1200</b>	<b>S7 1500</b>
<i>Entradas/Salidas integradas</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 14 entradas digitales</li> <li>• 10 salidas digitales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 32 entradas digitales</li> <li>• 16 salidas digitales</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 entradas analógicas de 0 a 10 V</li> <li>• 0 salidas analógicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 entradas analógicas de 0 a 10 V</li> <li>• 8 salidas analógicas</li> </ul>
<i>Comunicación</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comunicación S7 integrada.</li> <li>• Protocolos TCP/IP, UDP.</li> <li>• Interface PROFINET-ETHERNET</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comunicación S7 integrada.</li> <li>• Protocolos TCP/IP, UDP.</li> <li>• Interface PROFINET-ETHERNET, PROFIBUS.</li> </ul>
<i>CPU</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.085 microsegundos para operaciones binarias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.04 nanosegundos para operaciones binarias.</li> </ul>
<i>Memoria</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 kB de trabajo.</li> <li>• 4 MB de carga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 MB de trabajo.</li> <li>• 32 GB de carga vía tarjeta de memoria.</li> </ul>
<i>Módulos adicionales</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí, expansión de entradas y salidas locales o remotas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sí, expansión de entradas y salidas locales o remotas.</li> </ul>

Como podemos observar el S7 1500 es muy superior, por sus grandes capacidades se utiliza en sistemas complejos o para el

control de plantas completas, precisamente por esto se descartó para el proyecto de esta tesis, hubiera quedado muy sobrado. Por otro lado, el S7 1200 cuenta con lo necesario para los requerimientos del trabajo; una CPU rápida y confiable, entradas/salidas digitales y analógicas más que suficientes para los dispositivos a manejar, memoria suficiente procesar la información, interfaz de comunicación Ethernet para poder comunicar dispositivos a distancia (dentro de la planta o fuera de la misma) y la capacidad de poder agregar módulos adicionales que ayudan cuando el proceso se va haciendo más complejo. Adicionalmente, los costos entre cada uno son muy diferentes, siendo el primero hasta 10 veces más caro que su hermano menor.

Por lo anterior, el S7 1200 se usa para tareas de automatización hasta cierto punto sencillas, recordemos que se le pueden agregar módulos para procesos más grandes, pero de precisión. Todo sin sacrificar flexibilidad de comunicación ya que puede manipularse desde cualquier red de área local (LAN) o inalámbrica de manera local o a distancia gracias a su interfaz ethernet.

En cuanto a hardware, los PLC's Siemens son más prácticos ya que pueden utilizar equipos complementarios universales a diferencia de Allen Bradley que requieren que todo sea de la misma marca: Por mencionar un ejemplo, las fuentes de alimentación de Siemens pueden ser cualquiera con salida de 24 VCD.

El software de Siemens no es muy intuitivo, pero permite hacer aplicaciones altamente personalizadas como en el caso del presente trabajo de tesis.

En la Ilustración 12 se presenta el PLC S7 1214, mismo que fue utilizado en el desarrollo del presente trabajo.



*Ilustración 12 PLC S7-1214C (Siemens, 2009)*

### **2.5.1.2 Módulos de entradas y salidas E/S.**

Para el desarrollo del presente trabajo de estudio se agregó un módulo (6ES7-231-5ND30-0XB0) de 4 entradas analógicas con resolución de 16Bits y que permiten conectar sensores cuya salida puede ser en voltaje o corriente. Dicho módulo será el responsable de monitorear los niveles de agua ya que los sensores envían una señal de 4 a 20 mA.

### **2.5.1.3 Software de programación**

Para programar los PLC's de la familia SIMATIC (S7 1200, S71500) se utiliza TIA portal, anteriormente se programaban los PLC's antecesores (S7 200, S7 300) con STEP 7 pero ahora está incluido en TIA.

TIA portal (Totally Integrated Automation Portal) es denominado por SIEMENS como un concepto que integra diferentes herramientas de automatización en un solo paquete, siendo útil para PLCs, paneles de operador, redes de comunicación y otros dispositivos (Vásquez, 2014).

Dichas herramientas son: el SIMATIC STEP 7, el WinCC, simuladores PLCsim y componentes o módulos para soluciones de automatización basadas en PC con SIMATIC. Con esto se pretende realizar una mejor planificación, procesamiento y operación de proyectos de automatización (Salazar, J. Á., & Arango, 2017). Siemens creó este software hace aproximadamente 10 años y ha sido aceptado de muy buena manera ya que ha logrado el objetivo de centralizar todo el proceso de automatización.

TIA portal ha logrado lo anterior gracias a las siguientes bondades:

- Integración de diferentes lenguajes de programación para PLC's (AWL, KOP, FUP).
- Interconexión entre STEP 7 y WinCC que es el software de desarrollo y simulación de pantallas o SCADA.
- Integración del software para control de movimiento (Start Drive para servo motores y Scout TIA para control de motores).
- Diseño de una interfaz intuitiva y amigable para el programador.
- Facilidad de detección de errores de programación.
- Gestión o manejo de errores online para disminuir los tiempos de parada.

### 2.5.2 Sensores de nivel

Conocer la cantidad un fluido (agua, aceite, combustibles, etc.) que tenemos en un proceso es muy importante, para ello, como con otros elementos, se utilizan sus características físicas tales como reflexión de luz, conductividad, densidad, entre otras.

En base a lo anterior, los sensores pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Medición con señal digital o de estado: funcionan como interruptores o señaladores de un nivel en específico, cuando se cumple la condición el sensor se activa y viceversa.
- Medición con señal continua: a diferencia de los primeros, estos sensores están enviando siempre una señal de nivel sin importar su valor.

En la Ilustración 13 se muestran los principales sensores de nivel.

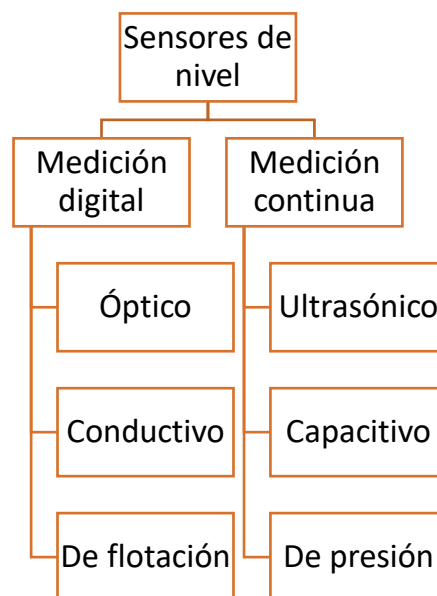


Ilustración 13 Clasificación de los sensores de nivel por tipo de medición.

De manera general el principio de cada uno de ellos es el siguiente:

- Óptico: se utiliza un haz de luz el cual es reflejado o refractado cuando entra en contacto con el líquido, esa característica se utiliza para indicar la presencia de elemento en cierto punto nivel.
- Conductivo: Utiliza la capacidad de conducción del líquido, su aplicación es simple, teniendo dos sondas o polos dentro del tanque, cuando ambos están en contacto con el elemento el circuito se cierra y manda una señal de estado.
- De flotación: con un interruptor de boya el sensor indica cuando el nivel del agua llega a cierto nivel, es una señal de estado.
- Ultrasónico: se envían ondas que son reflejadas por el líquido, la relación entre los tiempos de regreso de la onda permite calcular el comportamiento del nivel.
- Capacitivo: es muy parecido al sensor conductivo ya que utiliza la característica de permitividad eléctrica del líquido en comparación con el aire de la zona vacía del recipiente.
- De presión: utiliza la presión que ejerce el volumen del líquido en el sensor, éste último realiza la conversión de esta presión a una señal eléctrica que generalmente se hace llegar a un controlador.

### **2.5.2.1 Sensor de nivel Keller 36XW**

Debido a los requerimientos del proyecto, se hace uso de un sensor de nivel Keller 36XW. Este sensor tiene una salida analógica de corriente de 4 a 20 mA, además, es ideal para niveles de agua menores a 15 m de columna como los que se tienen en las derivadoras de la central hidroeléctrica. Es un sensor de presión cuyo principio se basa en el efecto de la presión hidrostática del agua sobre un diafragma de silicio que genera una señal eléctrica proporcional a la altura de fluido.

La presión hidrostática es resultado de la combinación de 4 fórmulas muy conocidas.

La Ecuación 2 de la presión

*Ecuación 2 Presión*

$$P = \frac{F}{A}$$

En donde:

P: presión

F: fuerza

A: área

Ecuación 3 de la densidad

*Ecuación 3 Densidad*

$$\rho = \frac{m}{V}$$

En donde:

$\rho$ : densidad

m: masa

V: volumen

Ecuación 4 para el volumen.

*Ecuación 4 Volumen*

$$V = A * h$$

En donde:

V: volumen

A: área

h: altura

Ecuación 5 de la fuerza

*Ecuación 5 Fuerza*

$$F = m * g$$

En donde:

F: fuerza

m: masa

g: gravedad

Sustituyendo en valor de "F" en la ecuación 2 y posteriormente reemplazando el valor de "m" en la misma ecuación, obtenemos que la presión hidrostática es:

$$P = \rho * g * h$$

Por consiguiente, el valor de la altura es igual a:

$$h = \frac{P}{\rho * g}$$

Como el sensor envía una señal eléctrica, se calcula una relación rango de presión/señal eléctrica que el PLC interpreta y escala de acuerdo la posición cero de presión atmosférica que se determina durante su instalación.

## **2.6 Normas para tableros eléctricos**

Con el fin de homologar estructuras en el diseño e implementación de tableros eléctricos, se han elaborado normas o guías, actualmente existen diferentes normas, pero las más utilizadas son las normas industriales europeas y norteamericanas.

### **2.6.1 Norma internacional IEC 60529**

La Comisión Electrotécnica Internacional, también conocida por sus siglas en inglés IEC, es una entidad que normaliza los campos de estudio eléctrico, electrónico y relacionada. Dicha organización, para el logro de sus fines, desarrolla normas dentro de las cuales está la IEC 60529. Esta norma define los grados de protección IP (International Protection) que aplican para diferentes elementos de la industria tales como, tableros eléctricos, herramientas, sensores, etcétera.

### **2.6.2 Norma NEMA 250**

esta norma es la homóloga de la norma IEC 60529, la diferencia es su uso se define para Norteamérica, centro y algunos países de Sudamérica. Al igual que la IEC 60529, NEMA 250 se ocupa de la protección contra el ingreso, pero difiere en que también se ocupa de las especificaciones que detallan los criterios mínimos de la construcción, el rendimiento de pruebas, la resistencia a la corrosión y mucho más. Aunque su comienzo está basado en los Estados Unidos, NEMA es una organización global que trabaja para promover las normas eléctricas en todo el mundo. (Hoffman a Pantair Company, s.f.)

## **Capítulo 3. Metodología**

### **3.1 Topología del proyecto**

El sistema desarrollado indica el momento correcto para realizar la limpieza de las rejillas de entrada al tanque de carga (actualmente detona una serie de alarmas, pero a futuro puede iniciar la secuencia de limpieza si se cuenta con una rejilla automática), dicho sistema se compone de una serie de elementos interconectados como se puede apreciar la Ilustración 14 de la topología del mismo.

Aquí podemos observar como las entradas analógicas y digitales se procesan para activar o desactivar las salidas digitales, todo esto gracias al PLC siemens; con el objetivo de poder monitorear, se integró una pantalla táctil y a su vez se conectó una PC para el operador. En caso de requerirse, es posible conectarse de manera remota con ayuda de una Virtual Private Network (VPN).

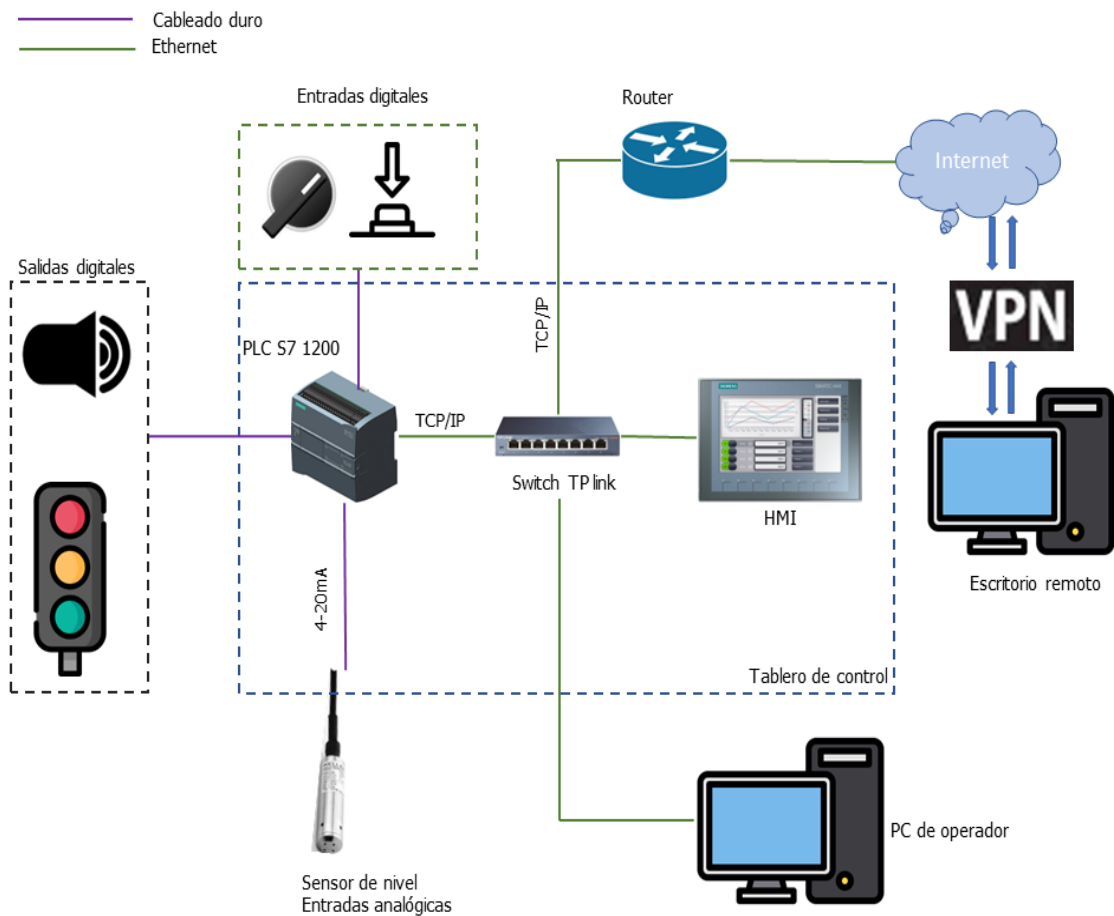


Ilustración 14 Topología del sistema de alertamiento

### 3.2 Diagrama de flujo de proceso.

En la Ilustración 15 podemos apreciar el funcionamiento del proyecto.

# Alertamiento en rejillas de limpieza

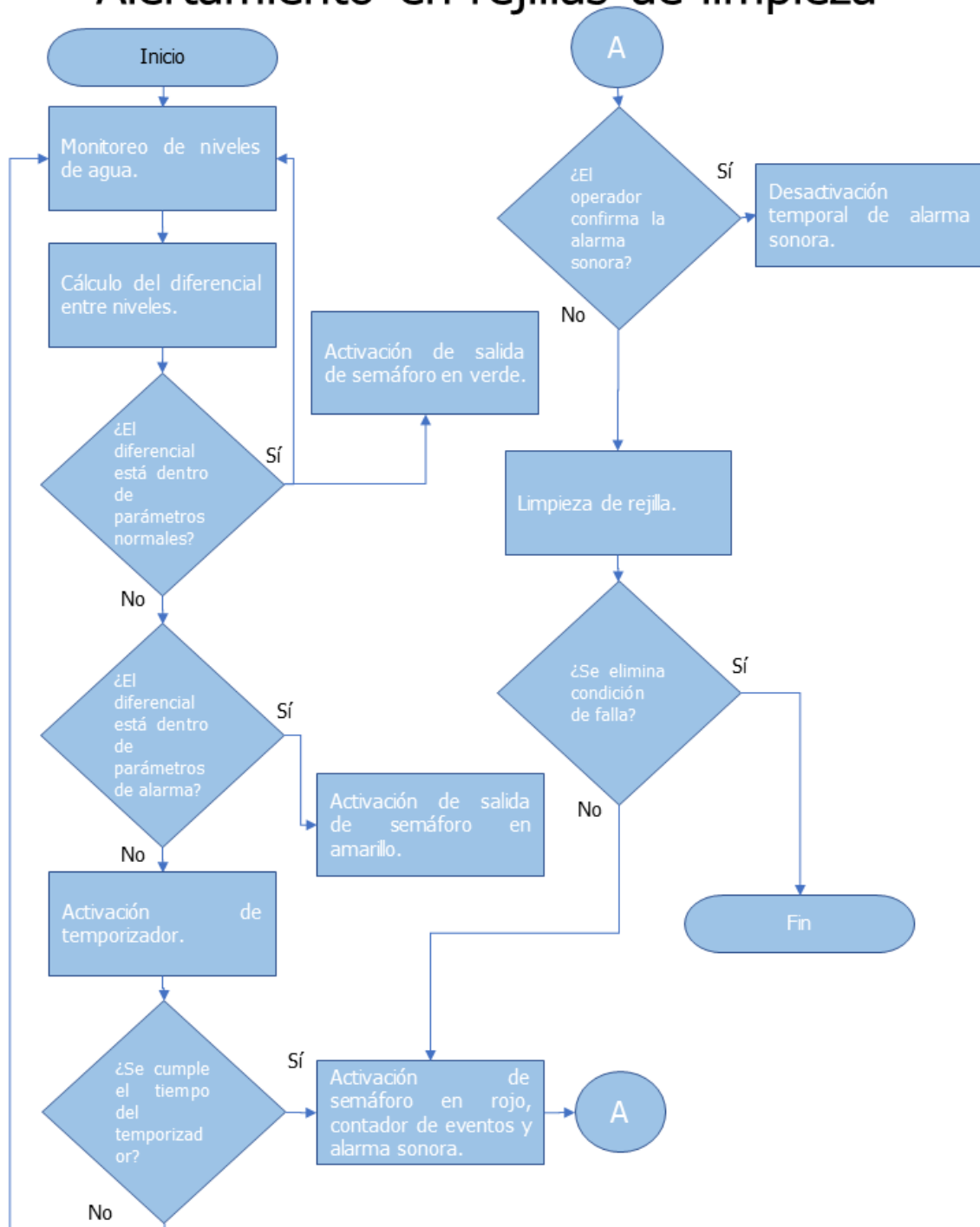


Ilustración 15 Diagrama de flujo del sistema de alertamiento.

La lógica y experiencia dictan que cuando las rejillas se bloquean con basura o elementos ajenos al flujo del agua, el nivel antes de la rejilla (primera medición viendo en el

sentido del flujo del caudal) incrementa en comparación con el nivel después de la rejilla, esto se aprovechó para la automatización de las alertas.

El PLC integrado recopila las señales de medición directamente de los sensores y las almacena en una memoria temporal del mismo, posteriormente las compara para obtener un diferencial entre el nivel "aguas arriba" y "aguas abajo". De manera coloquial se define por los trabajadores de la empresa "aguas arriba" como la zona de medición previa a la parrilla de limpieza y "aguas abajo" la zona posterior al sector de la parrilla.

En la Ilustración 16 se muestra la función matemática cuyas entradas son los niveles de agua y su diferencia se almacena de manera temporal en el PLC.



Ilustración 16 Función matemática "restar".

Una vez que se tiene el valor del diferencial entre niveles, se pasa a la parte de comparaciones para activar o desactivar las salidas.

En la Ilustración 17 se puede observar código que realiza la comparación.

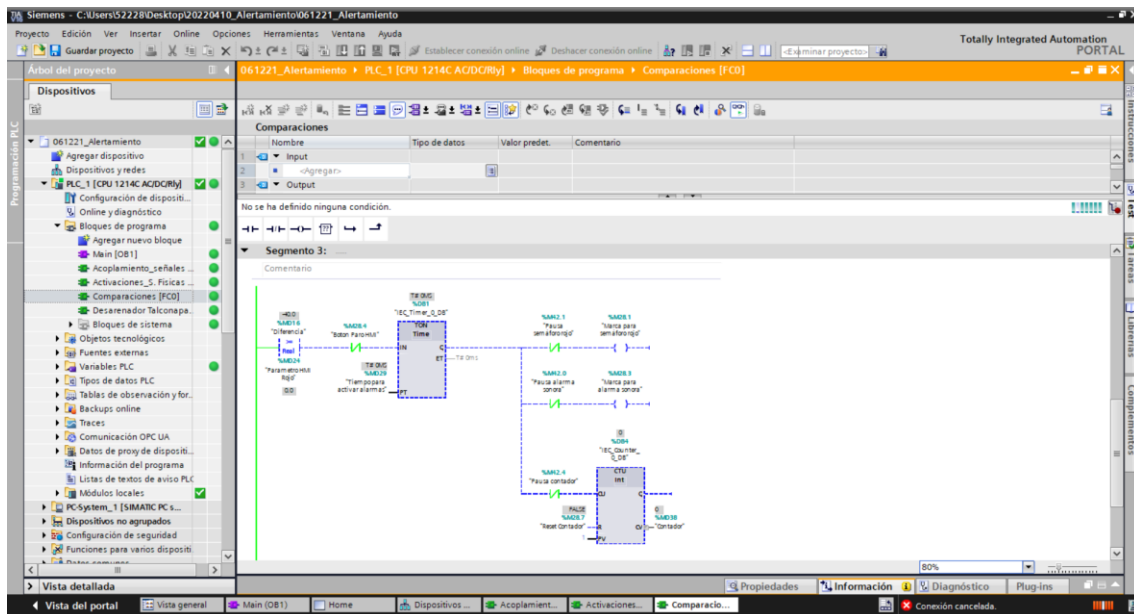


Ilustración 17 Comparadores matemáticos. Fuente propia.

Dentro de la configuración del programa del PLC se pueden definir los rangos de este diferencial para cada salida física, en esta etapa se precisaron a manera de propuestas con el fin de validar el funcionamiento del programa (en los resultados se muestran los valores aplicados realmente). En funcionamiento de estas salidas se basa en una señalización tipo semáforo en donde el verde (diferencial  $\leq 2$  cm) indica que el proceso o los niveles están en condiciones normales, el amarillo ( $2 < \text{diferencial} < 5$  cm) indica un estado de alarma y el rojo ( $5 \text{ cm} < \text{diferencial}$ ) detona en una condición anormal que requiere de la actuación del operador, en otras palabras, se requiere limpiar o desbloquear las rejillas. Junto con este semáforo en rojo se activa también una salida adicional que corresponde a una bocina, esto en caso de que el operador no esté visualizando el semáforo; en esta condición, el operario tiene la posibilidad de confirmar o desactivar por un tiempo de 30 segundos la salida que corresponde a la bocina con ayuda de un botón dentro de la HMI, esto pensado para hacer menos estresante el trabajo de limpieza, si después de confirmar dos veces la salida la condición de falla se mantiene, la salida

no podrá confirmarse más y la limpieza deberá hacerse de inmediato.

Si después de realizar la limpieza, el diferencial de niveles continúa dentro de valores altos, la bocina se activa nuevamente y el operario debe limpiar nuevamente o revisar el motivo de ese nivel; por otro lado, si al limpiar la rejilla el diferencial disminuye a los valores de semáforo verde, la condición de falla se elimina y tanto el led rojo como la bocina se desactivan.

Un punto que se consideró fue la fluctuación que el nivel puede tener debido a alteraciones propias del proceso como en la etapa de limpieza de las parrillas, para mitigar esto se colocó un temporizador con retardo a la conexión con un tiempo de 20 segundos que corresponde al tiempo de escalamiento entre parrillas, es decir, el tiempo que se tarda el operador en sacar una parrilla y sumergir la otra, con esto aseguramos que si se activa el semáforo rojo realmente haya una condición que así lo amerite; para control y monitoreo se agregó un contador de eventos, así se sabrá con precisión en qué momentos se dio un mayor número taponamientos.

Este ciclo de monitoreo se realiza de manera periódica.

### **3.3 Requerimientos del cliente**

Parte fundamental del desarrollo de cualquier proyecto es determinar la expectativa del usuario o cliente final con los requerimientos puntuales. En el caso del presente trabajo se definieron como sigue:

- Un sistema que indique el momento exacto para realizar la limpieza de las rejillas para no alterar el nivel de agua en el tanque de carga.

- Uso de un PLC compatible con el sistema de control actual del resto del proceso (Siemens).
- Creación de usuarios del sistema con niveles de acceso. El administrador podrá cambiar todos los parámetros, pero el operador sólo tendrá la posibilidad de confirmar alarmas e indicar cuando va a realizar la limpieza.
- Alarmas visuales y sonoras para evitar la omisión de la limpieza cuando se requiera.
- Interfaz de monitoreo y control para el operador del tanque de carga.

### 3.4 Elementos del sistema

Para el desarrollo del presente proyecto se integraron elementos de hardware y software mismos que se describen a continuación.

#### 3.4.1 Hardware

En la Tabla 3 se presenta el resumen del equipo y materiales utilizado para la realización del proyecto.

*Tabla 3 Detalle de equipos y materiales.*

Descripción	Cantidad	Variable	Tipo de señal
<p>Sensor de nivel marca Keller, tipo PR-36XW, 8-32 VCD.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de presión: 0-0.3, 0-30 bar</li> </ul>	2	Nivel de agua	Entrada analógica

<ul style="list-style-type: none"> <li>● Precisión: +-0.5%FE</li> <li>● Banda de error: +- 0.1%FE a 0- 50 °C</li> <li>● Interfaces: RS485 4-20 mA, 0-10V.</li> <li>● Diámetro 22 mm</li> </ul>			
Botón pulsador NA	1	Confirmación alarma sonora	Entrada digital
Botón pulsador NA	1	Indicador "inicia limpieza"	Entrada digital
Led de señalización verde uso industrial, 24 VCD.	1	Estado "OK" del proceso.	Salida digital
Led de señalización amarillo uso industrial, 24 VCD.	1	Estado "alarma" del proceso.	Salida digital
Led de señalización rojo uso industrial, 24 VCD.	1	Estado "rejilla bloqueada" del proceso.	Salida digital

Bocina zumbadora	1	Estado "rejilla bloqueada" del proceso.	Salida digital
<p>PLC siemens S7 1200, 1214 AC/DC Rly.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Modelo: 6ES7-214- 1BG40-0XB0.</li> <li>● Tensión de alimentación: 24VDC</li> <li>● Consumo (valor nominal): 500 mA, solo el CPU</li> <li>● Memoria integrada: 100 kByte.</li> <li>● Número de entradas digitales: 14</li> <li>● Número de salidas digitales: 10</li> <li>● Número de entradas</li> </ul>	1	Todas	Todas

analógicas: 2 (0-10 V) <ul style="list-style-type: none"> <li>● Interfaz PROFINET</li> <li>● Soporta servidores WEB</li> <li>● Dimensiones : 110x100x75m m</li> </ul>			
Módulo de 4 entradas analógicas de 16 bits 6ES7-231- 5ND30-0XB0.	1	Nivel de agua	Entrada analógica
Display HMI SIMATIC, 10"	1	Todas	Todas
Terminales para riel DIN, 10 A.	17		
Interruptor monopolar	1		
Tablero de control marca Rittal	1		

### 3.4.2 Software

En la Tabla 4 se presentan los diferentes programas utilizados y la descripción del uso de cada uno de ellos dentro del desarrollo del proyecto.

Tabla 4 Listado de software.

Programa	Cantidad	Descripción
TIA portal V16.	1	Integra todas las herramientas para la programación del PLC y la creación de pantallas.
WinCC RT Professional V16	1	Simula las interfaces gráficas creadas en TIA portal.
S7 PLCSIM V16	1	Permite crear una CPU virtual que interactúa con TIA portal y WinCC a fin de simular el proyecto completo.

### 3.5 Integración de hardware

Tanto el PLC como la interfaz SIMATIC se instalaron en el tablero de control. Desde este tablero se realiza el cableado de las entradas y salidas de acuerdo a lo indicado en el manual del PLC, para las entradas se puede configurar como punto de interrupción el positivo o el negativo de la fuente; con respecto a las salidas, al ser salidas a relevador podemos usar una fuente externa o la propia del controlador. En la Ilustración 18 se presentan unos ejemplos de los indicado.

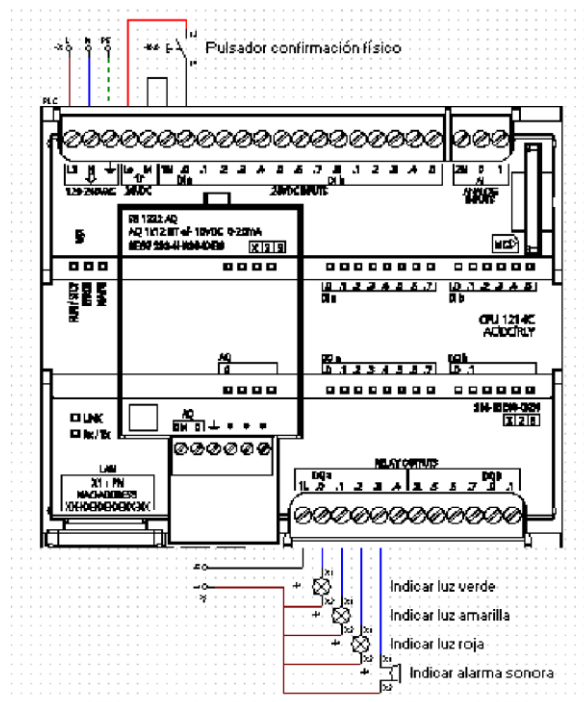


Ilustración 18 Conexión de entradas y salidas del PLC S7 1200

Una vez que se tiene la señalización de campo hasta el PLC sólo resta definir el medio de comunicación entre éste y la interfaz SIMATIC, en este proyecto se optó por usar cable de comunicación ethernet por la cercanía de los dispositivos y, más aún, por la flexibilidad que tiene este protocolo de comunicación TCP/IP.

En la Ilustración 19 se observan las direcciones IP asignadas a cada equipo, la línea verde simboliza el cable de red con conector RJ45, tienen una máscara de red por default para redes clase C y la puerta de enlace es 192.168.1.2

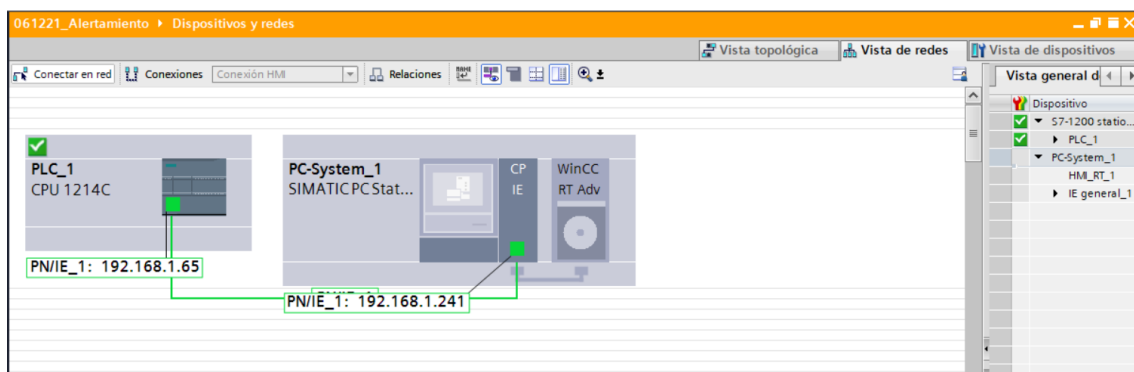


Ilustración 19 Conexión de dispositivos Siemens.

## **3.6 Programación del PLC**

### **3.6.1 Bloques de programa**

La programación de este proyecto se realiza de manera ordenada utilizando bloques de función, esto permite separar cada uno de los procesos a fin de tener una mejor trazabilidad de las señales y los estados de las mismas.

En la Ilustración 20 podemos observar que se utilizaron los siguientes bloques de función (árbol de opciones lado izquierdo):

- **Acoplamiento de señales:** En él se realiza la parametrización de las entradas analógicas con corriente de 4-20mA.
- **Comparaciones:** Calcula el diferencial de nivel y lo somete a una serie de comparaciones para definir que salidas activar.
- **Activaciones señales físicas:** Determina la activación de las salidas físicas una vez cumplidas las condiciones para las mismas.
- **Desarenador Talconapan (propuesta de integración):** Permite el control ON/OFF de las salidas físicas que encienden o apagan a los motorreductores.

Para lograr que la programación funcione es requisito indispensable el copiar o arrastrar estos bloques de función al bloque principal (main).

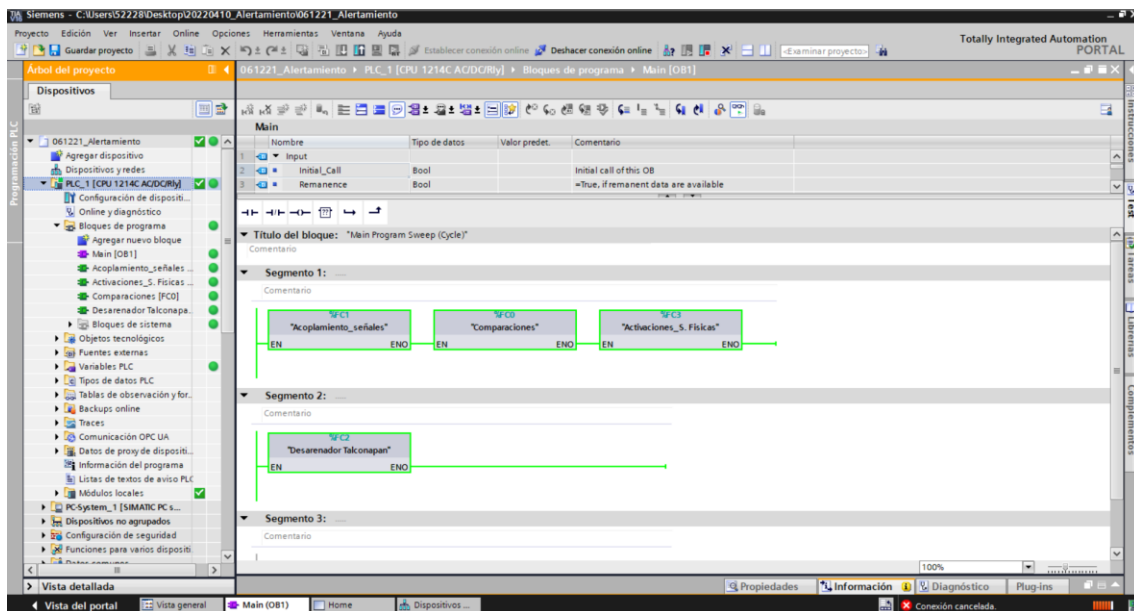


Ilustración 20 Bloques de función programados en el PLC S7 1200

### 3.6.2 Acoplamiento de señales

La correcta parametrización de las entradas analógicas es esencial pues de aquí hará las comparaciones el PLC. En el entorno de portal TIA utilizamos dos bloques: NORM\_X y SCALA\_X. El bloque de normalización realiza la conversión de la intensidad de la señal ya sea corriente o voltaje a un valor entre 0 y 1. Para el caso del PLC S7 1200 se debe especificar el tipo de medición que se tendrá, en la Ilustración 21 se muestra la interfaz en donde modificar lo mencionado para el módulo de entradas analógicas.

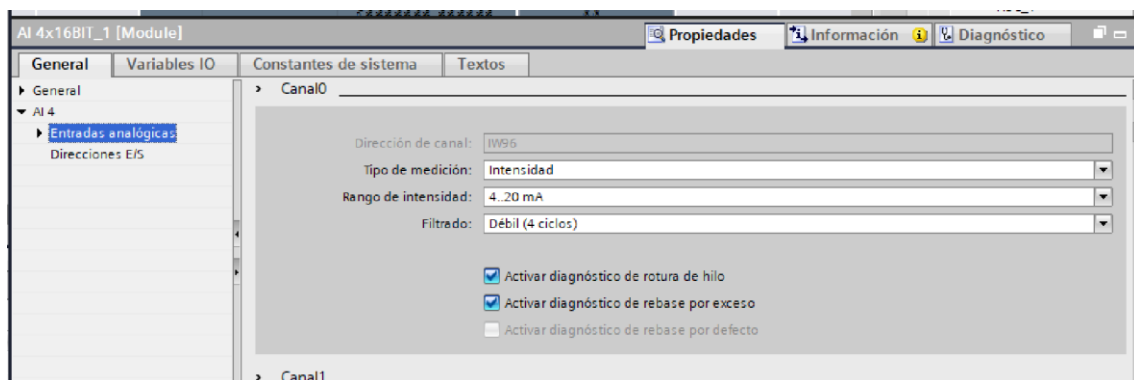


Ilustración 21 Configuración módulo de entradas analógicas.

Una vez especificado lo anterior, se define la resolución de la entrada analógica conforme a las características del PLC. La tabla XX muestra los parámetros para señales analógicas de corriente. Como se puede observar, para una señal de 4 a 20 (el sensor Keller tiene una salida de corriente de este tipo) los valores decimales para el rango nominal van de 0 a 27,648 en el sistema decimal; esos son los valores a colocar en el bloque de normalización dentro de la programación del PLC como se observa en la Tabla 5, fuera de estos valores la medición es errónea y puede provocar un desbordamiento en la señal al momento de llegar al PLC.

Tabla 5 Resolución de una señal de corriente en S7-1200 (Siemens, 2020).

System		Rango de medición de corriente		
Decimal	Hexadecimal	0 a 20 mA	4 a 20 mA	
32767	7FFF	23.7 mA	22.96 mA	Desbordamiento
32512	7F00			
32511	7EFF	23.52 mA	22.81 mA	Fuera de rango superior
27649	6C01			
<b>27648</b>	<b>6C00</b>	<b>20 mA</b>	<b>20 mA</b>	<b>Rango nominal</b>
<b>20736</b>	<b>5100</b>	<b>15 mA</b>	<b>16 mA</b>	
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>723 nA</b>	<b>4 mA + 578.7 nA</b>	
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0 mA</b>	<b>4 mA</b>	
-1	FFFF			Fuera de rango inferior
-4864	ED00	-3.52 mA	1.185 mA	
-4865	ECFF			Desbordamiento
-32768	8000			

Con lo anterior se termina el bloque NORM\_X, teniendo el valor entre 0 y 1, este valor se almacena en una memoria MD o doble palabra que a su vez sirve de entrada para el bloque SCALE\_X;

como su nombre lo indica, aquí se realiza el escalamiento de la señal. Se coloca el valor mínimo y máximo con lo cual obtenemos la salida de acuerdo a la variable que estamos midiendo (altura, temperatura, presión, etc.). Para este PLC siempre deben ir estos bloques juntos, así como se muestra en la Ilustración 22 pues la salida de uno es la entrada de otro.

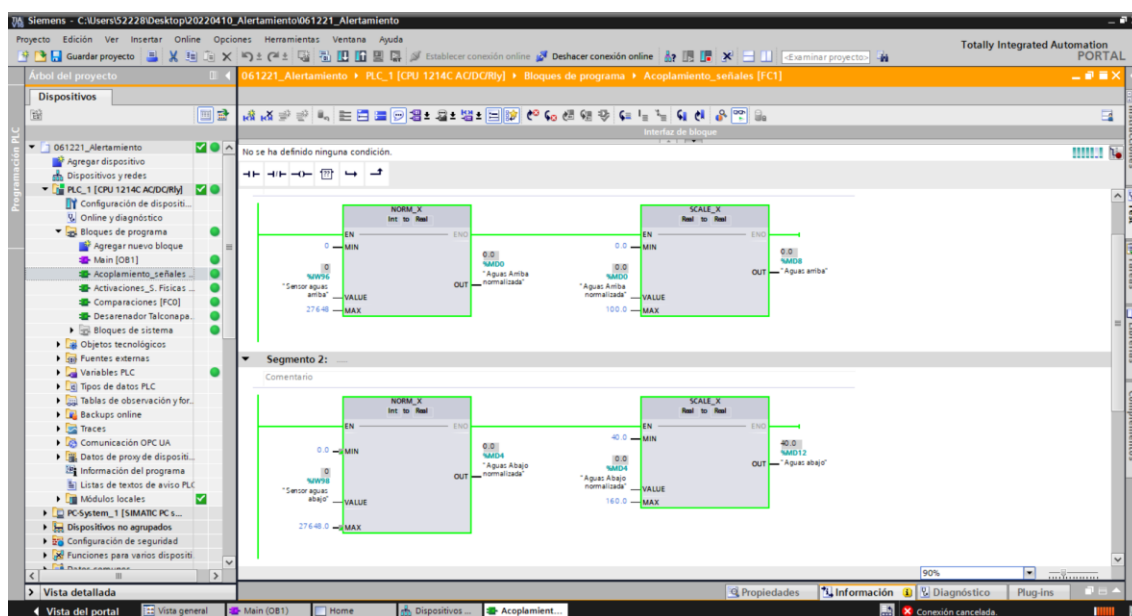


Ilustración 22 Configuración módulo de entradas analógicas.

### 3.6.3 Desarenador Talconapan

Este bloque de programación permite realizar el vaciado del desarenador de acuerdo a la secuencia que se muestra en la Ilustración 23, donde se observan las condiciones para cada paso.

El desarenador cuenta con 2 compuertas principales (la entrada y la salida) que operan en conjunto con la compuerta del canal paralelo; para poder tener la función de bypass se deben seguir los siguientes pasos:

1. Abrir la compuerta del canal.
2. Cerrar compuerta de entrada al desarenador.

### 3. Cerrar la compuerta de salida del desarenador.

Como se puede comprender en el diagrama de flujo, el programa verifica la posición de cada compuerta para poder abrirlas en la secuencia mencionada, por ejemplo, en los primeros pasos confirma el estado de la compuerta del canal y si está cerrada permite su apertura, de lo contrario continúa al siguiente paso y habilita el cierre de la compuerta de entrada.

Estos accionamientos pueden realizarse con botones físicos y/o virtuales de la HMI en ambas modalidades, presencial y remotamente. En la Ilustración 24 vemos las condicionantes de la compuerta de salida.

# Control de compuertas

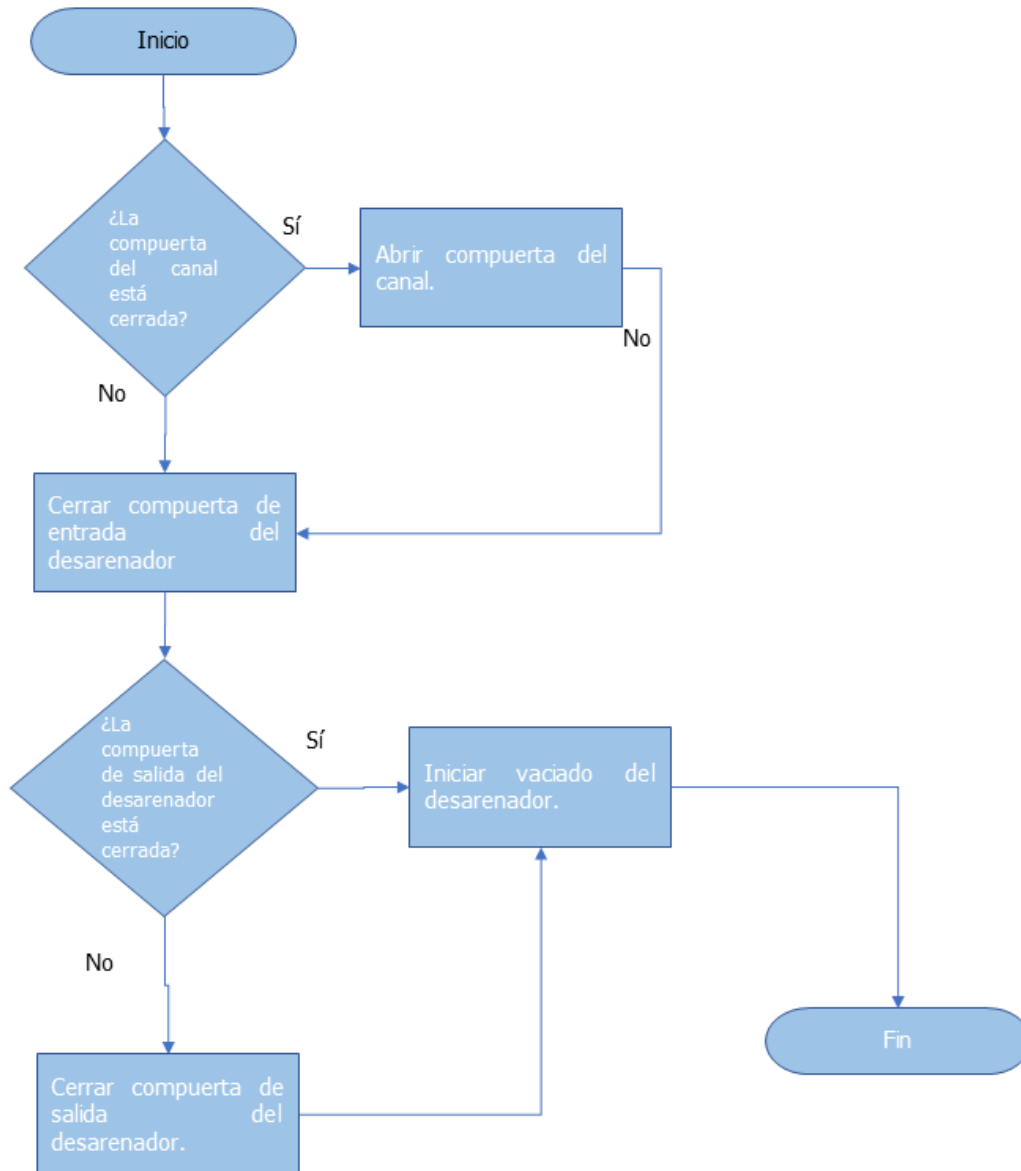


Ilustración 23 Diagrama de proceso para el control de compuertas.

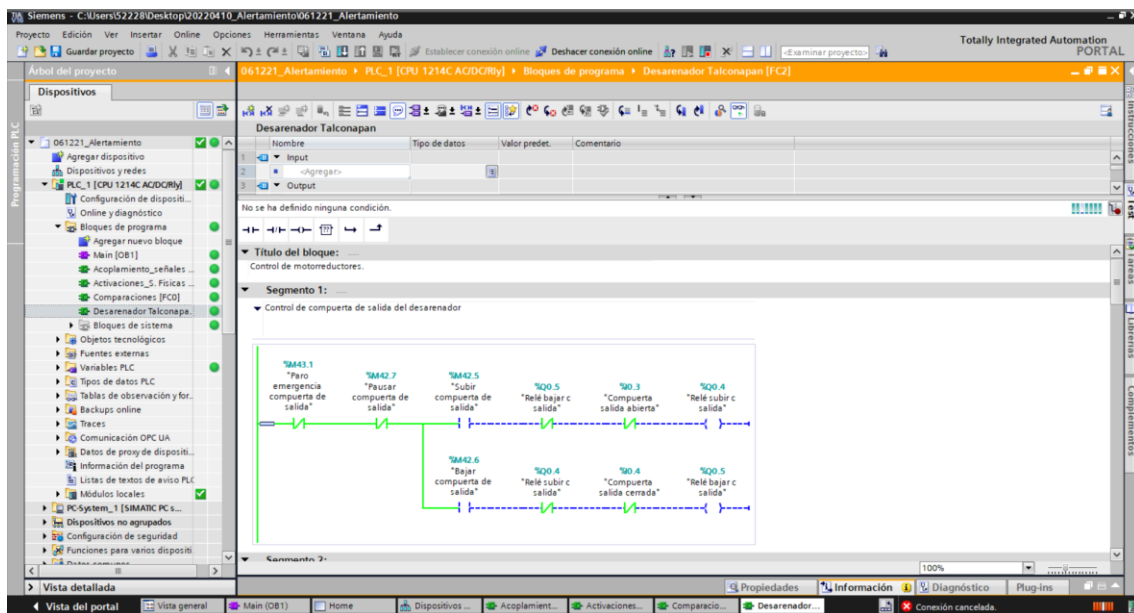


Ilustración 24 Condiciones compuerta de salida desarenador.

Por cuestiones de presupuesto de la central hidroeléctrica no fue posible instalar los motorreductores, sin embargo, la programación del control se realizó y va a estar incluida también la pantalla en la interfaz HMI.

### 3.6.4 Tabla de variables

Con el objetivo de aprovechar la memoria del PLC se definieron memorias de sistema de manera consecutiva, así lo podemos observar en la Ilustración 25 de la tabla de señales o variables del proyecto. Tenemos por columnas el nombre de la variable, el tipo de datos y la dirección asignada; para el proyecto se tienen variables de tipo entero, booleanas, reales y de tiempo.

061221\_Alertamiento > PLC\_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] > Variables PLC > Tabla de variables estándar

Tabla de variables estándar

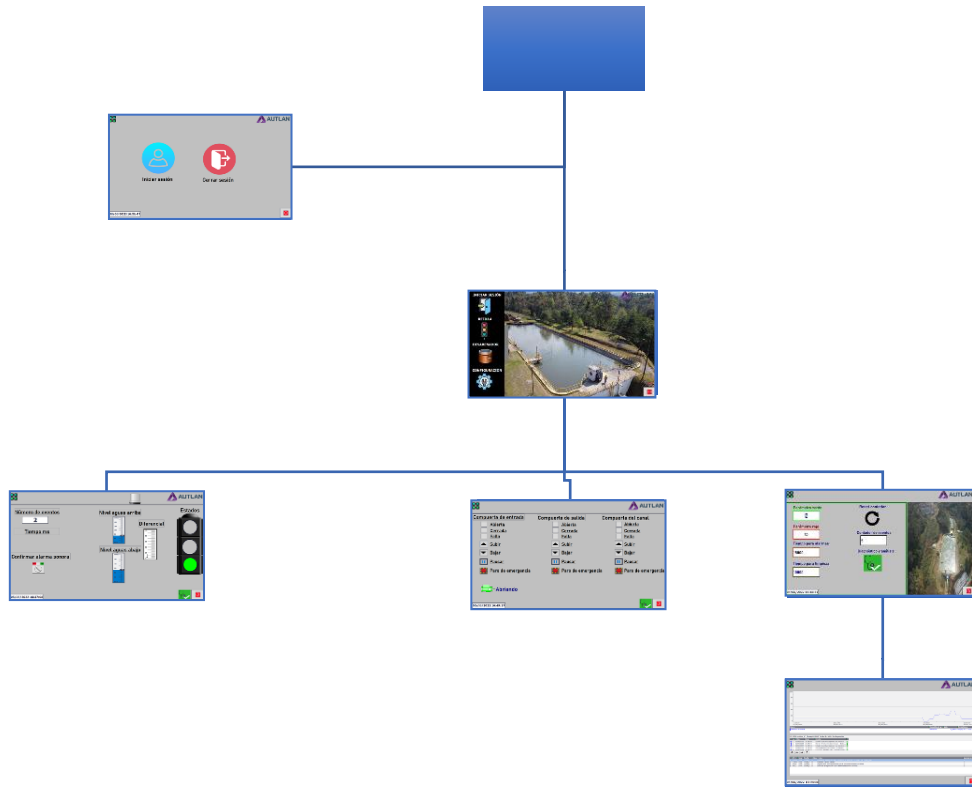
	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...
1	Sensor aguas arriba	Int	%IW96	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Sensor aguas abajo	Int	%IW98	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Aguas Arriba normalizada	Real	%MD0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Aguas Abajo normalizada	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Aguas arriba	Real	%MD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Aguas abajo	Real	%MD12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Diferencia	Real	%MD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Parametro HMI Verde	Real	%MD20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Parametro HMI Rojo	Real	%MD24	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Marca para semáforo verde	Bool	%M28.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Marca para semáforo rojo	Bool	%M28.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Marca para semáforo amarillo	Bool	%M28.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Marca para alarma sonora	Bool	%M28.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Tiempo para activar alarmas	Time	%MD29	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Boton Paro HMI	Bool	%M28.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	Tablero_Boton Paro	Bool	%I0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Set/Reset	Bool	%M28.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	Tiempo de pausa a contador	Time	%MD34	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	Pausa contador	Bool	%M42.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20	Salida fisica Verde	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	Salida fisica Amarilla	Bool	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
22	Salida fisica Rojo	Bool	%Q0.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23	Salida fisica Sonora	Bool	%Q0.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24	Contador	Real	%MD38	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25	Reset Contador	Bool	%M28.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Pausa alarma sonora	Bool	%M42.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
27	Pausa semáforo rojo	Bool	%M42.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	HMI_Pausa alarma sonora	Bool	%M42.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	HMI_Pausa semáforo rojo	Bool	%M42.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30	Tablero_Pausa alarma sonora	Bool	%I0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Ilustración 25 Listado de señales del proyecto.

### 3.6.5 Interfaz HMI

La interfaz del proyecto fue creada siguiendo un orden lógico que incluye los elementos principales debidamente etiquetados, estado de los equipos y gráficos de apoyo cuando se esté realizando alguna opción como la activación de las bocina o semáforo. Todo lo anterior para ayudar al operador en sus actividades de monitoreo y control.

Se integra de pantallas independientes para cada una de las funciones o áreas a controlar; en la Ilustración 26 se muestra la estructura general del proyecto.



*Ilustración 26 Componentes de la HMI.*

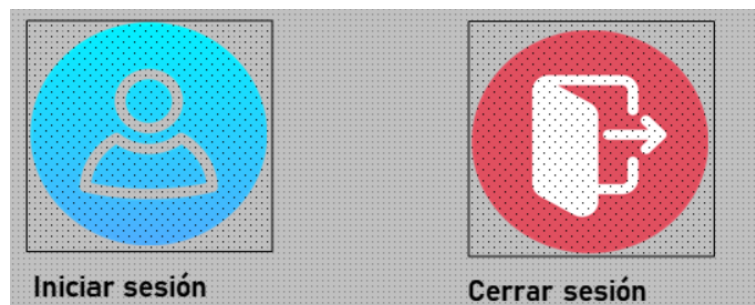
La pantalla inicial cuenta con dos botones, el de cierre de la sesión o visualización (parte inferior derecha) y otro menú que despliega las siguientes secciones (parte superior izquierda) como se observa en la Ilustración 27 de componentes de la pantalla principal.

- Iniciar/cerrar sesión
- Rejillas
- Desarenador
- Configuración



*Ilustración 27 Componente de la pantalla inicial.*

Siguiendo con la estructura del sistema se diseñó una pantalla de inicio y cierre de sesión como se ve en la Ilustración 28 Pantalla de sesión. Para este trabajo fueron configurados un usuario de administrador y uno de operador, el primero con todos los accesos y el segundo sólo con privilegios de monitoreo.



*Ilustración 28 Pantalla de sesión.*

El administrador será el único con acceso a las configuraciones del sistema, esto le permitirá (como lo vemos en la Ilustración 29 de configuraciones) cambiar los parámetros para el semáforo de señalización, resetear el contador de eventos y modificar

los tiempos de accionamiento de los temporizadores, así mismo podrá revisar el estado del PLC incluyendo eventos y alarmas.

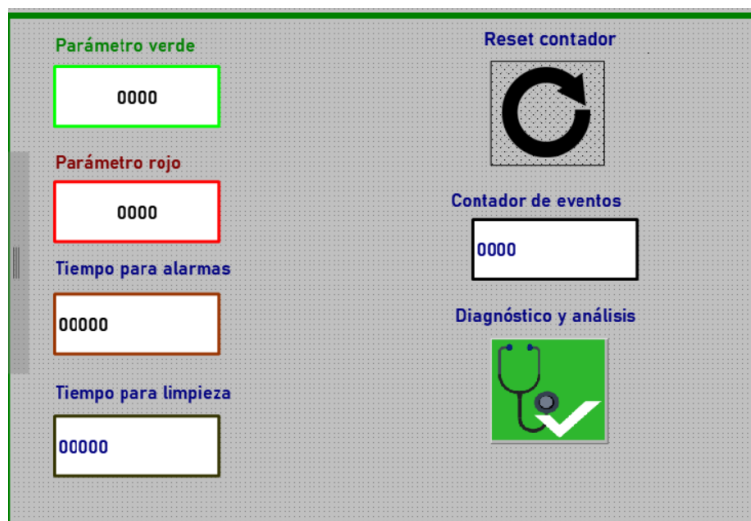

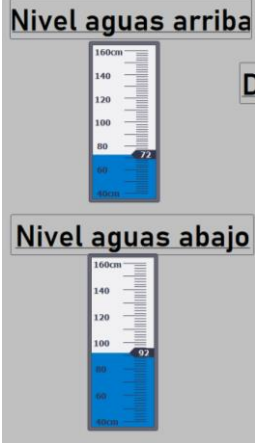
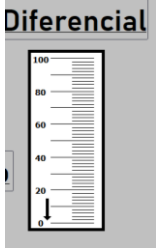
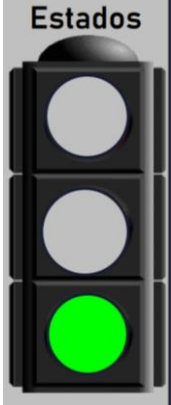


Ilustración 29 Pantalla de configuraciones.

La pantalla principal corresponde al monitoreo del estado de las rejillas, en esta se presentan los principales indicadores para el operador. En la Tabla 6 se describen los elementos de configurables y aquellos de monitoreo mostrados en la HMI.

Tabla 6 Descripción de componentes de la interfaz de la rejilla.

Descripción	Visualización
El número de eventos de taponamiento	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Número de eventos</b>  <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 10px; margin: 5px;">2</div> </div>
El contador de tiempo en caso de que estemos en una condición de falla	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Tiempo ms</b>  <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 10px; margin: 5px;">6446</div> </div>
Botón para confirmar o no la alarma sonora	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Confirmar alarma sonora</b>   </div>

<p>Niveles aguas arriba y aguas debajo de la rejilla</p>	
<p>Diferencial de niveles</p>	
<p>Estado del sistema indicado por el semáforo.</p>	

A efecto de poder exportar o consultar los registros o estados del PLC así como del proceso, se incluye en la interfaz la pantalla de diagnósticos como se ve en la Ilustración 30. Como se puede observar, la gráfica muestra la tendencia del diferencial de nivel a lo largo del tiempo y el listado de eventos o alarmas del PLC; esta pantalla se observa al dar clic al ícono de diagnóstico en la sección de configuraciones



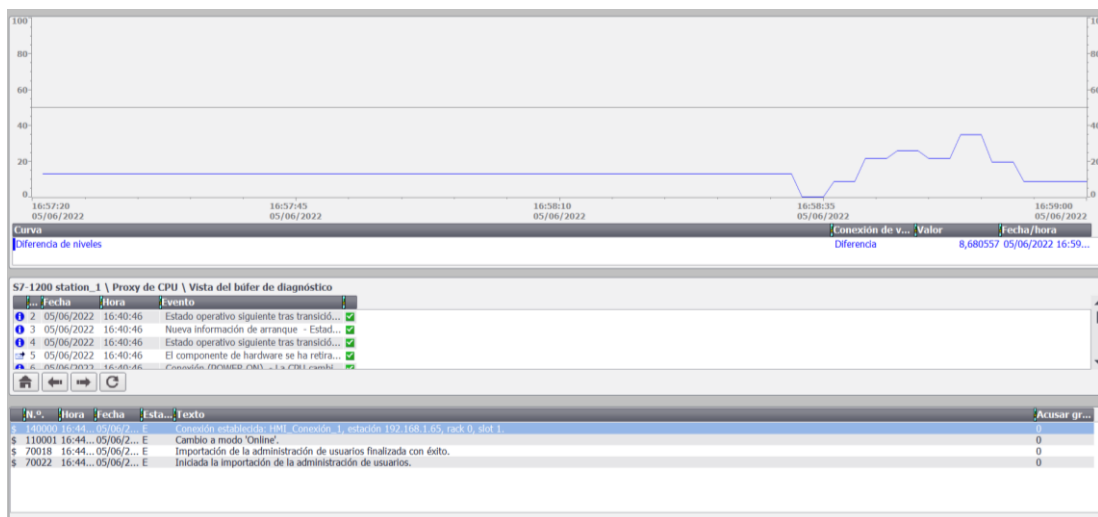


Ilustración 30 Estados del sistema.

Por último, pero no menos importante, se diseña la pantalla correspondiente al control de compuertas en el desarenador. Como se describió en el diagrama de flujo, consiste en comandos para operar los motorreductores cuando se requiera la limpieza del desarenador.

Cuando esté ocurriendo algún cambio, como se observa en la Ilustración 31, en la parte inferior aparecerá de manera gráfica la acción:

- Abriendo
- Cerrando
- Pausa



Ilustración 31 Estado de la compuerta, desarenador Talconapan.


## Capítulo 4. Resultados y discusión

### 4.1 Simulación

Una etapa muy importante en el desarrollo de proyectos de este tipo es la simulación de su funcionamiento, en este caso, se presenta la Tabla 7 en donde observamos la pantalla de simulación con una descripción breve de lo que se observa a fin de mostrar que tanto el programa con la interfaz gráfica son 100% funcionales.

Tabla 7 Simulación del proyecto.

Validación	Pantalla
<p>La pantalla de inicio muestra las opciones generales del control en el menú desplegable:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Registro</li> </ul>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rejilla de limpieza</li> <li>• Desarenador</li> <li>• Configuración</li> </ul>	
<p>Se realizaron ajustes a las configuraciones los cuales fueron guardados sin errores; el valor para el diferencial se definió en función del proceso, es decir, se tomaron mediciones del nivel con la parrilla limpia y con la parrilla bloqueada (lista para limpiar). En el primer caso se observó una variación de niveles ("offset"), por este motivo se configuró el valor intermedio entre el offset y el diferencial a parrilla bloqueada. Además, después de una activación se verificó que el contador se reseteara a cero.</p>	 <p>The screenshot shows the AUTLAN control interface. On the left, there are four configuration parameters: 'Parámetro verde' (green) set to 5, 'Parámetro rojo' (red) set to 10, 'Tiempo para alarmas' (alarms time) set to 15000, and 'Tiempo para limpieza' (cleaning time) set to 10000. On the right, there are two buttons: 'Reset contador' (Reset counter) with a circular arrow icon, and 'Diagnóstico y análisis' (Diagnosis and analysis) with a green checkmark icon. A 'Contador de eventos' (Event counter) is shown with the value 5. The interface also features a top navigation bar with the AUTLAN logo and a date/time stamp at the bottom left: '05/06/2022 16:48:31'. A small red square icon is visible in the bottom right corner of the interface.</p>

Una vez configurado el programa, con el software propio de Siemens se forzaron los valores del nivel de los sensores hasta caer a una condición de falla. Es decir, que el diferencial sea mayor al valor configurado.

En funcionamiento normal debe activar la alarma sonora, registrar el evento, mostrar los valores del diferencial, activar la alarma sonora, parpadear el ícono rojo y cambiar el semáforo en función de las condiciones. Todo esto se aprecia en la Ilustración 32 de las condiciones de falla y la Ilustración 33 de condiciones normales de operación. En caso de no cumplirse con todo lo anterior, el programa es erróneo.

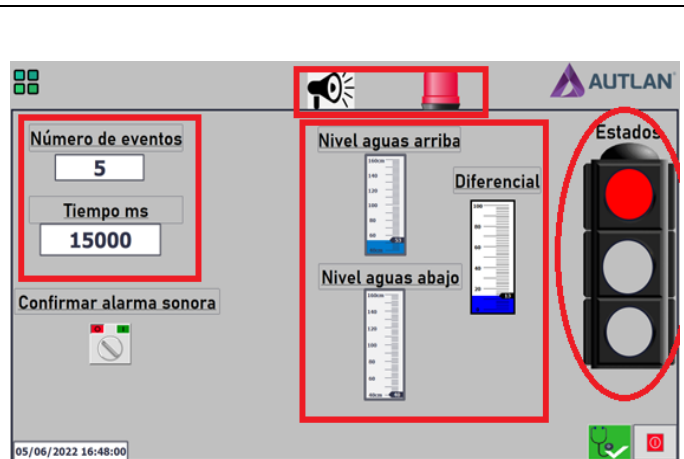


Ilustración 32 Condiciones de falla

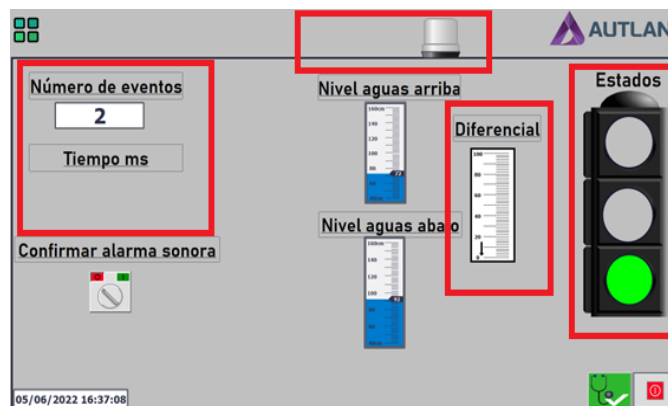


Ilustración 33 Condiciones normales

Para el caso de la interfaz de control de las compuertas, se probaron los mandos de apertura y cierre; el funcionamiento correcto de la interfaz muestra un ícono de un motor con la leyenda de la acción que se está ejecutando (en la Ilustración 34 e Ilustración 35 se puede apreciar). Por otro lado, se hicieron pruebas forzando el estado de las entradas digitales para los estados de las compuertas (en la Ilustración 36 se aprecia el estado "abierta" en color verde). En base a lo anterior se puede concluir que esta interfaz funciona de acuerdo a lo esperado.



Ilustración 34 Interfaz "Cerrando compuerta"

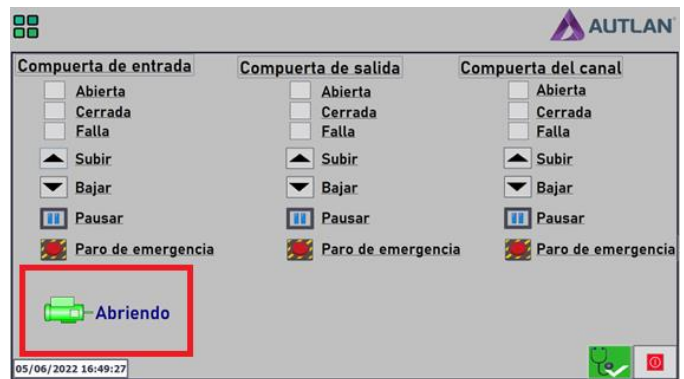


Ilustración 35 Interfaz "abriendo compuerta"

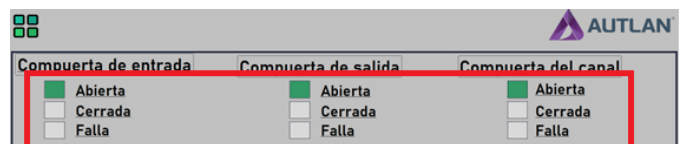


Ilustración 36 Estados de compuertas

En la opción "Diagnóstico y análisis" que se tiene en todas las pantallas se obtiene la interfaz de la derecha. Para simular su funcionamiento se forzaron los niveles de agua a fin de tener un valor diferencial variable (en el gráfico se observan cambios muy escalonados, pero en la realidad las variaciones son más graduales). En la parte inferior se observan los estados del PLC y principales cambios. Así validamos la operación correcta.

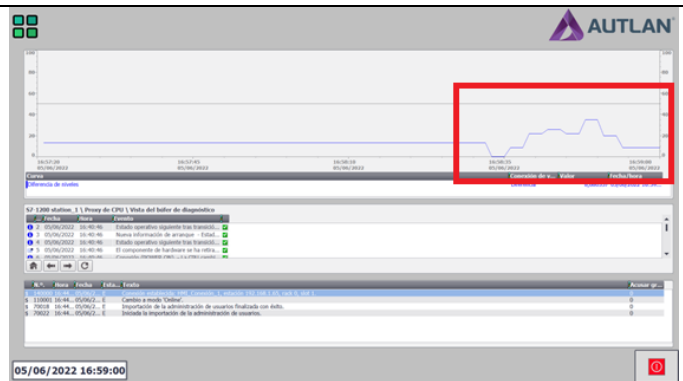


Ilustración 37 Interfaz de diagnóstico y análisis

## 4.2 Parámetros de monitoreo

Como se explicó en el planteamiento del problema, las fluctuaciones en el nivel de agua y/o potencia eléctrica entregada por los generadores, ya sea por una causa u otra, representan una condición indeseada para al proceso operativo. Cuando se tiene agua suficiente para operar a un nivel constante, la potencia eléctrica entregada es el parámetro a

monitorear, sin embargo, cuando no se tiene disponibilidad de agua, el nivel en el tanque nos brindará la información que requerimos. En base a lo anterior, la potencia eléctrica total o individual y el nivel de agua en el tanque son las variables que nos brindan claridad para definir si se tiene o no un beneficio o mejora, a partir de la implementación propuesta. Dentro de la empresa, estas mediciones se obtienen gracias al sistema de control y monitoreo "Heros 4.0" el cual es un software propietario de la compañía austriaca Global Hydro GmbH que cuenta con un servidor de base de datos con capacidad suficiente para almacenar la información hasta por 5 años (estimado para la cantidad de información generada por la central). En la Ilustración 38 podemos observar la interfaz principal del sistema (home) en donde se muestran en tiempo real los valores de potencia de generación y nivel de agua en el tanque de carga, el segundo se mide directamente en la salida del tanque de carga ya que es la zona más cercana a la tubería de conducción que llega hasta las turbinas, la potencia se mide en la salida trifásica del generador de la central. Aquí mismo, se ajusta el valor fijo (setpoint) de nivel de agua que se quiere mantener con ayuda del control PID.



Ilustración 38 Pantalla de inicio Heros 4.0

Dentro de las múltiples funcionalidades del software está un graficador que permite visualizar el comportamiento temporal de una variable de monitoreo específica. A partir de estos resultados, se pueden definir las tendencias de operación de algunos parámetros y, a partir de éstas, exportar la información para un análisis a detalle en un procesador de datos. En la Ilustración 39 se aprecia el comportamiento del proceso en un día con poca agua disponible. En el caso actual, se muestra un nivel de agua relativamente estable, pero con fluctuaciones en la potencia eléctrica entregada (línea café, leyenda "P0 Power").

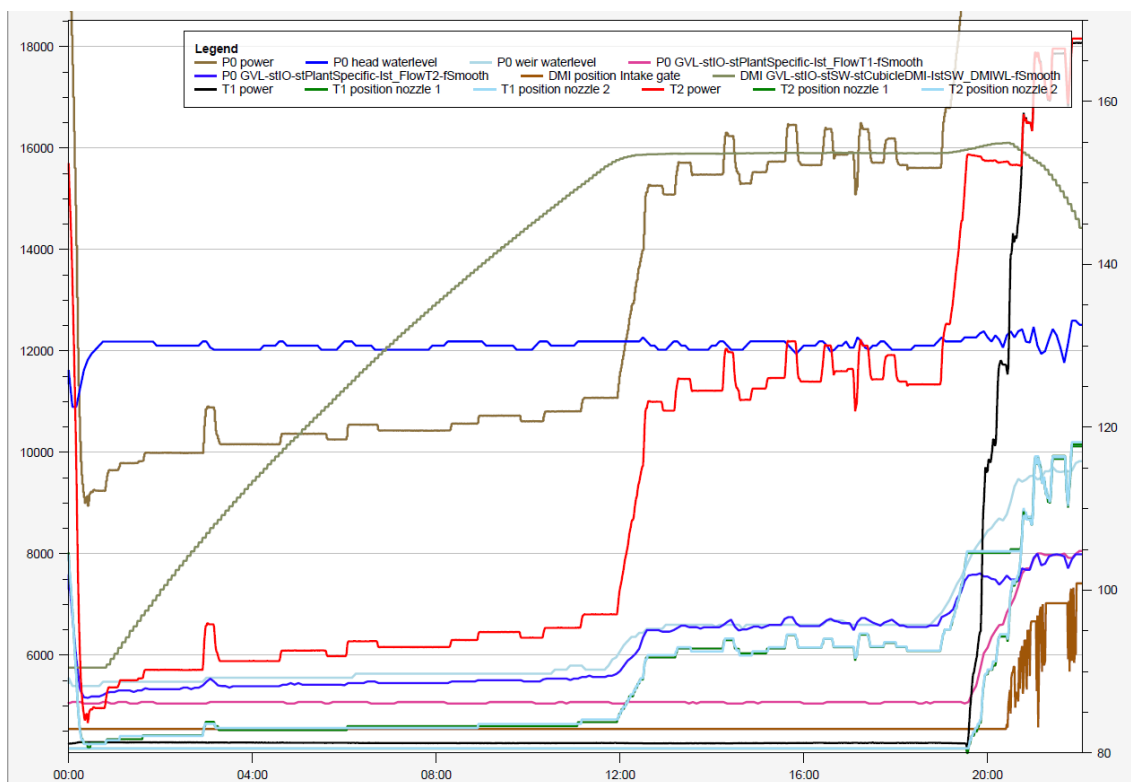
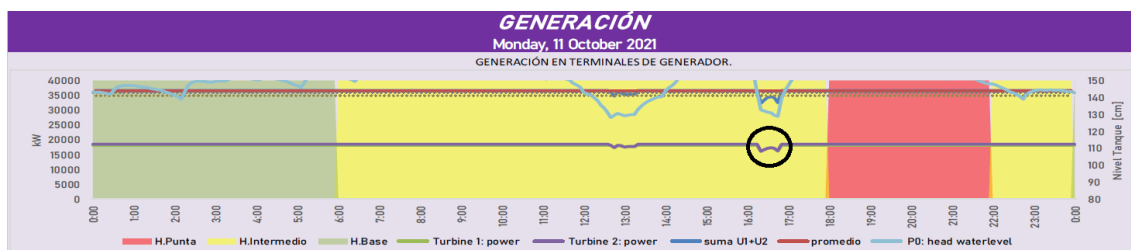


Ilustración 39 Tendencias directas al proceso de generación eléctrica.

El caso contrario es ejemplificado en la Ilustración 40, en la que se muestra un diagrama de generación para un día con plena cantidad de agua, pero con pequeñas fluctuaciones en la potencia. Estas variaciones en la generación de energía son atribuibles a un problema en el procedimiento de limpieza de la rejilla. Esto es, no se realizó de manera correcta la

limpieza, o bien, dentro del intervalo necesario, lo que causó una baja en el nivel del tanque y como consecuencia una disminución de la generación eléctrica. Al final esta situación presente representa una pérdida de producción y dinero.



*Ilustración 40 Disminución de carga con plena cantidad de agua disponible.*

Estas operaciones se realizan 24/7 en la central hidroeléctrica, por ser una central "a filo de agua", dependen de la estacionalidad durante el año, es decir, en temporada de sequía la limpieza de las rejillas se realiza cada 2 horas y en el caso contrario, se deben limpiar cada 40 minutos. Estos tiempos son los requeridos para que las rejillas se bloqueen con basura y por consecuencia el agua no fluya de manera suave; con esto dimensionamos que el impacto de esta actividad es muy grande.

En función a lo anterior se realizó un análisis de las fluctuaciones presentadas antes y después de la implementación del proyecto, como resultado se tiene la Ilustración 41 en donde se puede observar la disminución de eventos, si bien aún se ven algunos días con la misma cantidad de eventos antes de la implementación, el promedio antes y después muestra una tendencia a la baja. Dicha evaluación consideró cambios mayores a 1 MW ya que es un valor que implica cambios grandes en la apertura de inyectores; existen variaciones propias del proceso que están debajo de ese valor las cuales fueron omitidas.

Al ser un proceso semiautomático, es decir, el sistema emite la alerta pero el operador es quien decide la ejecución de

acciones, aún existen eventos de fluctuaciones después de la implementación; este es un factor humano que puede ser corregido con la instalación de una rejilla de limpieza automática.

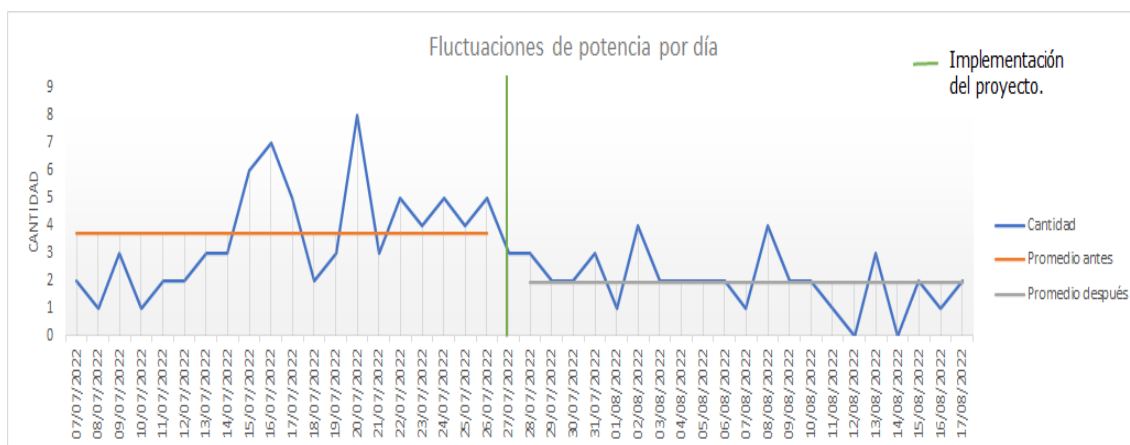


Ilustración 41 Comparativa de fluctuaciones en la potencia de generación.

Adicional al comportamiento de las fluctuaciones, en la Ilustración 42 se muestra el consumo de agua por MW/h generado (eficiencia) de cada uno de los días con el fin de determinar si la frecuencia de limpieza tiene efecto directo en este parámetro. Es importante especificar que, por disposición hidráulica de los generadores, el generador 2 es más eficiente que el generador 1.

En función de estos resultados se observan unas fluctuaciones considerables entre los resultados del 18 al 21 de julio, esto se debe a que hubo paros de unidad generadora alternados, es decir, cuando el consumo incrementa (18 de julio) sólo el generador 1 estaba operando, caso contrario en los días siguientes (19-21 de julio) donde el generador 2 estuvo funcionando. Adicional a lo anterior, se ve una estabilidad en los consumos promedios después de la implementación en comparación con las mediciones anteriores, sin embargo, no se aprecia una mejora en la eficiencia de los generadores, al contrario, se observa un muy ligero incremento en el consumo de agua por mega watt/hora generada (MWh). Con esto podemos

destacar que la eficiencia de los generadores se ve afectada indirectamente por estas fluctuaciones ya que dichos cambios de nivel se reflejan en desgaste de componentes mecánicos lo que a su vez ocasiona un incremento en el consumo de agua por MWh. Lo que es un hecho es que se ha tenido una operación más estable lo cual trae beneficios operativos para los equipos de generación eléctrica.

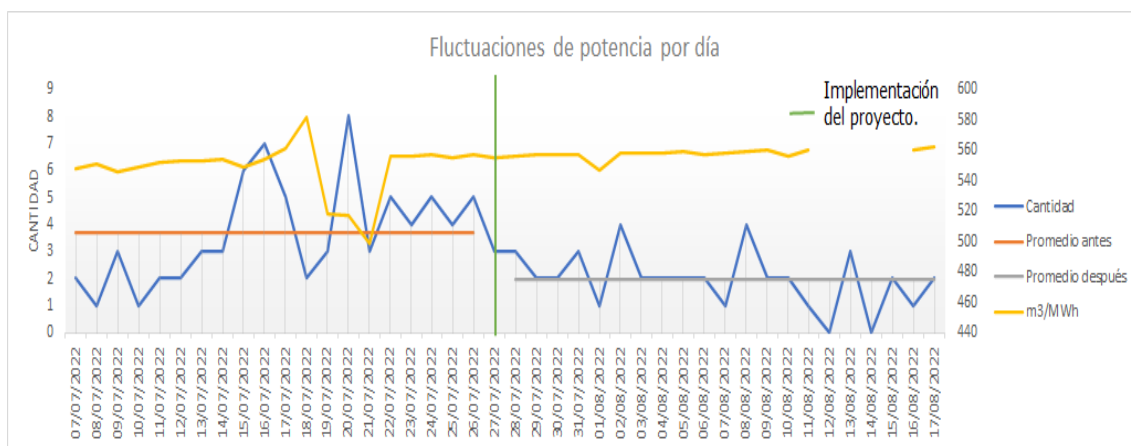


Ilustración 42 Fluctuaciones de potencia vs eficiencia

Otra de las variables a medir es el nivel de agua del tanque de carga, en la Ilustración 43 observamos la comparación entre el nivel de agua antes de la implementación y después de la misma, al igual que en el gráfico de fluctuaciones, se observa una disminución en los picos y valles de la variable. De este gráfico despreciamos los cambios desde las 19:30 h hasta las 0:00 h ya que en ese horario se vacía unos de los desarenadores por lo que el flujo de agua es irregular afectando los niveles en el tanque sin considerar la limpieza de rejillas.



Ilustración 43 Niveles de agua en el tanque de carga.

Todo lo anterior se resume en minimización de pérdidas de generación y de esfuerzos o estrés a las máquinas de la planta. Las condiciones actuales de la central, por la baja cantidad de agua disponible para turbinar, no permitieron analizar eventos como el que se observa en la Ilustración 40 en donde es inmediato el cálculo de generación perdida por taponamientos de la rejilla a falta de limpieza, sin embargo, el estrés o esfuerzo derivado de estas fluctuaciones se puede apreciar claramente en la Ilustración 44 donde tenemos los niveles de vibración en las chumaceras del generador ante cambios en la potencia de generación (consecuencia de los cambios de nivel de agua en el tanque de carga); la línea azul representa la potencia del generador 1 y la línea roja los niveles de vibración.

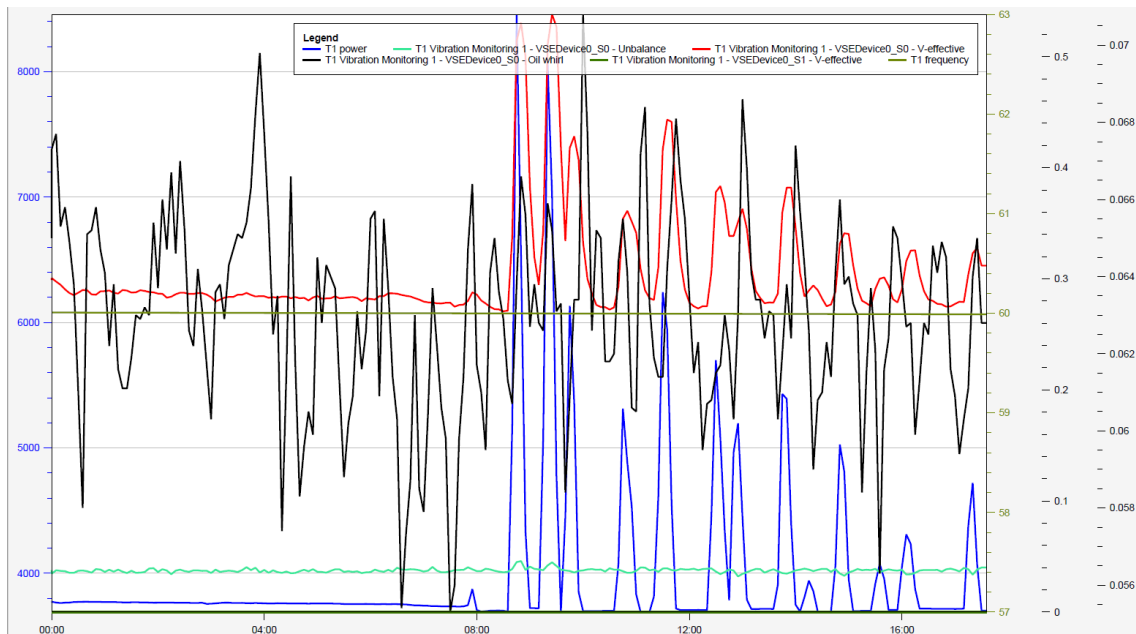


Ilustración 44 Fluctuaciones de carga y vibraciones 29/08/2022

El impacto sobre los componentes mecánicos es inmediato y termina en daños de los mismos. En la Ilustración 45 se presenta un cojinete dañado por efecto de vibraciones del generador.

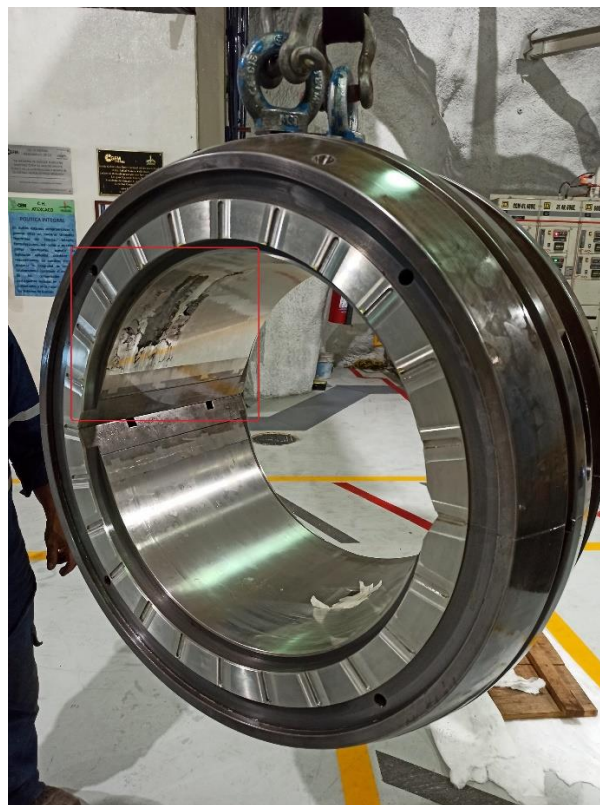


Ilustración 45 Cojinete dañado generador 1

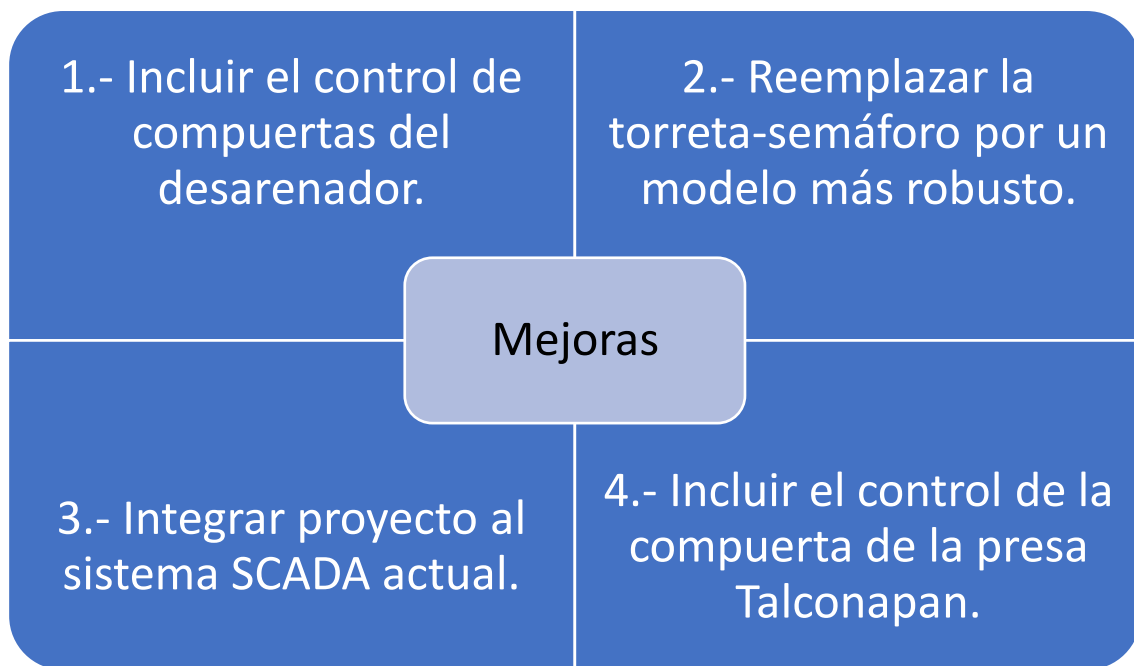
La reparación de esta pieza, aparte de ser de largo tiempo de entrega, tiene un costo de 16 k USD. Si bien el proyecto en cuestión no evitará el daño, es un hecho que incrementará su vida útil reduciendo los costos por reparación y tiempos muertos por el reemplazo de piezas.

## **Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones**

En función de los resultados obtenidos y revisados en la Ilustración 41 e Ilustración 43, se puede constatar que el mantener un monitoreo constante del proceso nos permite un mayor control del mismo, es decir, automatizar las áreas a fin de que el operador interactúe solo cuando es necesario.

Como parte de las interrogantes de este trabajo de tesis, se puede concluir que la frecuencia de limpieza actual no es la correcta y, como consecuencia, que el criterio de limpieza de cada operador sí afecta el comportamiento del nivel en el tanque de carga lo que se traduce es fluctuaciones indeseadas de la potencia de generación. La reducción en las fluctuaciones es el principal indicio de esta conclusión.

Como se describió en este documento, la implementación de este proyecto abarcó hasta el sistema de alerta de la limpieza de rejillas, sin embargo, es un hecho que puede ser mejorado o complementado. En este sentido, como trabajo a futuro, en la Ilustración 46 se describen los principales cambios que ayudarán a este objetivo.



*Ilustración 46 Mejoras al proyecto.*

Para el primero y cuarto de los ajustes se debe integrar un módulo remoto de entradas y salidas compatible con el PLC utilizado (S7 1200 1214C), dicho módulo permitirá saber el estatus de las compuertas (entradas) y a su vez, realizar la apertura y cierre de las mismas. Un modelo como el de la Ilustración 47 puede ser la opción de implementación. En él se plasma el uso de un módulo remoto ET200S para realizar el control de las entradas y salidas, como la ubicación del desarenador supera los 100 m lineales, se debe usar fibra óptica para conectar ambos puntos, la ventaja es que ambos sitios ya cuentan con esta conexión.

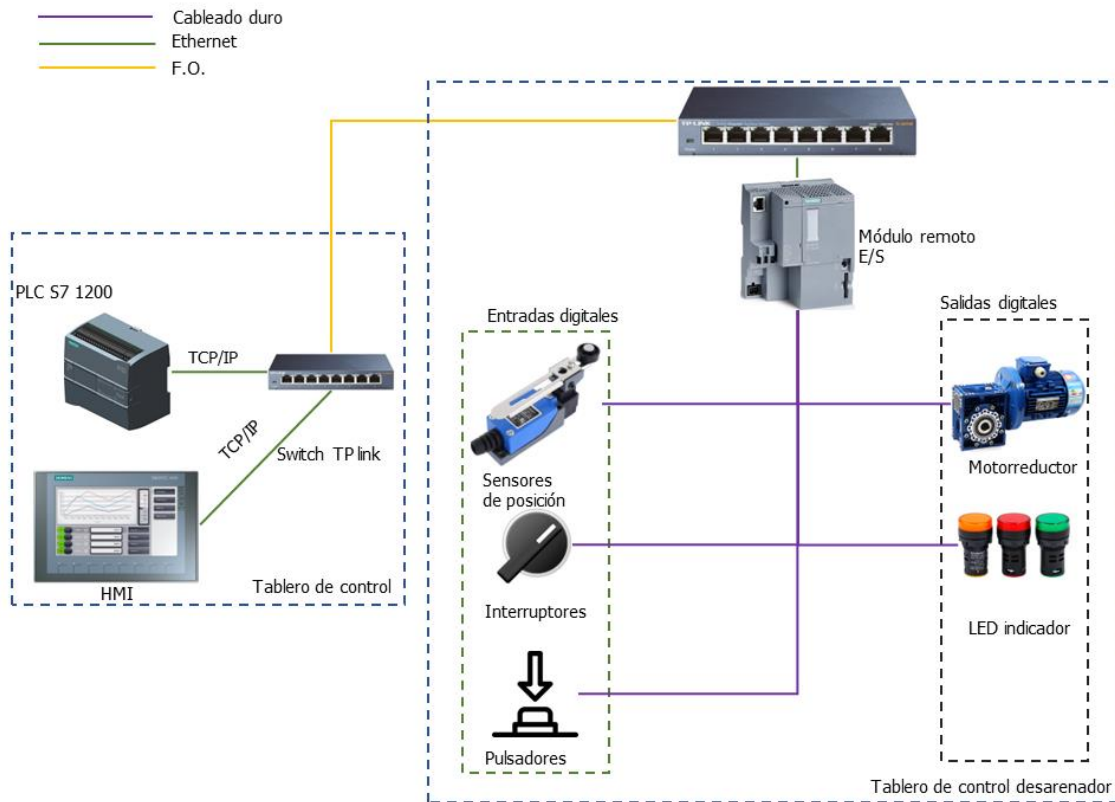


Ilustración 47 Propuesta de control para compuertas.

El segundo punto implica un cambio de hardware, dadas las condiciones del clima (lluvia principalmente) se requiere una torreta o semáforo para intemperie ya que el instalado en esta etapa del proyecto cumple con la función, pero su durabilidad es poca ya que no tiene una protección mínima IP 65.

Finalmente, la tercera mejora implica integrar este sistema de monitoreo de la rejilla al SCADA actual de la central, con esto se homologa el control y monitoreo de todas las áreas instrumentadas. Al ser PLC de la misma marca, la comunicación entre los mismos se hace más confiable y fácil a su vez.

## Capítulo 6. Referencias

- Kaur, S., Kathpal, N., & Munjal, N. (2015). Role of Scada in Hydro Power Plant Automation. *International Journal Of Advanced Research in Electrical, Electronics And Instrumentation Engineering*, 4(10), 8085-8090.
- Aldaz, K., Sánchez, P. A., & Torres, J. A. (2018). Modernización del Control del Sistema de Limpieza de las Rejillas de la toma de carga de la Central Hidroeléctrica Agoyán. *Journal Of Science And Research: Revista Ciencia E Investigación*, 3(2), 10-16.
- Duangsoithing, T., & Kongnam, C. (2007). Renovation of Turbine Control System Using Plc-Based for small Hydroelectric Power Generation. Brief Report On Mae-Ngat Hydro Power Plant by Electricity Generating Authority Of Thailand (Egat).
- Elmiladi, A. O. A. (2021). Automation Of Run-Of-River Hydroelectric Power Plant (Doctoral Dissertation).
- Bermúdez Martínez, José Luis. (1984). "Automatización de la Central Hidroeléctrica Tamazulapan". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma De México, México. Recuperado de <https://Repositorio.Unam.Mx/Contenidos/208152>
- Yilmaz, E. N., & Karayel, M. (2016). Plc Based Scada for Micro Hydroelectric Power Plants. *International Journal Of Electrical Energy*, 4
- John Twidell, *Renewable Energy Resources*, Second edition, Taylor & Francis Group.
- Al-juboori, S. S. (2016). Hydroelectric power. *Energy Science & Technology: Opportunities and Challenges*. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/315493188> (accessed on 10 September 2021).

- El potencial de la micro hidráulica - Micro-turbinas hidráulicas. (2017, April 28). Tecnoturbines. <https://tecnoturbines.com/blog/calcular-la-potencia-de-una-turbina-2>
- Segovia, V. R., & Theorin, A. (2012). History of Control History of PLC and DCS. University of Lund.
- Mader, A. (2000). A classification of PLC models and applications. In Discrete Event Systems (pp. 239-246). Springer, Boston, MA.
- Theorin, V. R. S. A., & Segovia, V. R. A short history about PLC and DCS.
- Vásquez, R. D. (2014). Tutorial TIA. Medellín: Fondo Editorial Politécnico Jaime Isaza Cadavid.
- Salazar, J. Á., & Arango, J. G. M. (2017). TIA Portal. Aplicaciones de PLC. Instituto Tecnológico Metropolitano.
- TIA Portal, José Ramón Vaello, 2021. [https://www.festo.com/es/es/e/tendencias/tia-portal-id\\_828990/](https://www.festo.com/es/es/e/tendencias/tia-portal-id_828990/)
- <https://domoticaintegrada.com/sensor-de-agua/>
- Keller 36XW, Operating and installation information.
- Hoffman a Pantair Company. (s.f.). Normas globales para gabinetes. Obtenido de [http://www.hoffmanonline.com/stream\\_document.aspx?rRID=245286&pRID=245285](http://www.hoffmanonline.com/stream_document.aspx?rRID=245286&pRID=245285)
- Vargas Cruz, M. R. Fabricación de un motorreductor hipocicloidal.
- Ojeda Ayala, J. Tablero de control con motorreductor de una lavadora industrial (inversión de giro) (Doctoral dissertation).
- Giménez Paredes, Á. (2019). Proyecto de automatización de una línea de producción de engranajes mediante autómeta

S7-1200 y HMI KTP700 basic de Siemens (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Valencia).

Tabla 1	Clasificación de centrales hidroeléctricas (Al-Juboori, 2016), (Valdez, 2005).....	25
Tabla 2	Comparativa de PLC's simatic.....	36
Tabla 3	Detalle de equipos y materiales.....	52
Tabla 4	Listado de software.....	56
Tabla 5	Resolución de una señal de corriente en S7-1200 (Siemens, 2020).....	60
Tabla 6	Descripción de componentes de la interfaz de la rejilla.....	68
Tabla 7	Simulación del proyecto.....	71