

# CAPÍTULO 1

## OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE Y VACIADO MEDIANTE UN CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE: ESTUDIO DE CASO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA LOCAL

---

*Data de aceite: 02/05/2024*

### **Thiago Espósito Sasano**

Licenciatura en Ingeniería Eléctrica  
– Fundación Universidad Federal de  
Rondônia, Brasil

### **Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira**

Mtro .Profesor del Departamento  
de Ingeniería Eléctrica - Fundación  
Universidad Federal de Rondônia, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2255311473963948>

### **Viviane Barrozo da Silva**

Phd. Profesor del Departamento  
de Ingeniería Eléctrica - Fundación  
Universidad Federal de Rondônia, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9428968456380501>

### **David Lopes Maciel**

Estudiante de doctorado - Programa de  
Doctorado en Desarrollo Regional y Medio  
Ambiente, Fundación Universidad Federal  
de Rondônia, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/8995688340143134>

### **Leonardo Severo da Luz Neto**

Phd. Profesor del Departamento de  
Educación Física - Fundación Universidad  
Federal de Rondônia, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/7182458638383958>

### **Fabricio Moraes de Almeida**

Phd. Profesor del Departamento  
de Ingeniería Eléctrica - Fundación  
Universidad Federal de Rondônia, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/5959143194142131>

**RESUMEN:** El capítulo del libro aborda un caso práctico de una innovación implementada en el sistema de drenaje y evacuación de agua de una central hidroeléctrica ubicada en la región. La innovación consistió en integrar un sistema de automatización mediante un Controlador Lógico Programable (CLP) a la configuración existente. Para evaluar la efectividad de la intervención realizada y realizar un análisis comparativo con las condiciones operativas anteriores, se examinaron los registros de supervisión previa y posterior a la mejora. Este estudio no solo destacó la relevancia de la automatización para aumentar la eficiencia operativa, sino que también demostró cómo la modernización puede contribuir a una gestión más eficaz de los recursos hídricos. El análisis de los datos reveló mejoras significativas en el funcionamiento del sistema de drenaje y vaciado, corroborando la importancia de las

inversiones en tecnologías de automatización. Este estudio de caso sirve como referencia para futuras implementaciones en sistemas similares, proporcionando información valiosa sobre la planificación y ejecución de mejoras de infraestructura en plantas hidroeléctricas.

**PALABRAS-CLAVE:** Controlador Lógico Programable; innovación; sistema de drenaje y vaciado; automatización; Central Hidroeléctrica

## OPTIMIZATION OF DRAINAGE AND EMPTYING SYSTEM USING A PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER: CASE STUDY OF THE LOCAL HYDROELECTRIC PLANT

**ABSTRACT:** The book chapter addresses a practical case of an innovation implemented in the drainage and water evacuation system of a hydroelectric plant located in the region. The innovation consisted of integrating an automation system using a Programmable Logic Controller (PLC) to the existing configuration. To evaluate the effectiveness of the intervention carried out and perform a comparative analysis with the previous operating conditions, the pre- and post-improvement supervision records were examined. This study not only highlighted the relevance of automation in increasing operational efficiency, but also demonstrated how modernization can contribute to more effective management of water resources. Data analysis revealed significant improvements in the operation of the drainage and emptying system, corroborating the importance of investments in automation technologies. This case study serves as a reference for future implementations in similar systems, providing valuable information on the planning and execution of infrastructure improvements in hydropower plants.

**KEYWORDS:** Programmable Logic Controller; improvement, drainage and emptying system; automatization; Local Hydroelectric Plant.

## INTRODUCCIÓN

En contextos industriales, particularmente en centrales hidroeléctricas, la eficiencia de los sistemas de drenaje y vaciado es crucial no sólo para mantener la operatividad, sino también para la seguridad de las instalaciones. Estos sistemas se encargan de eliminar el agua acumulada por infiltración, precipitación u otras fuentes, previniendo daños estructurales y asegurando el correcto funcionamiento de los equipos vitales. En este caso de estudio, abordamos la implementación de una mejora significativa en un sistema de drenaje y vaciado en una planta local, utilizando un Controlador Lógico Programable (CLP) integrado en la arquitectura existente.

El papel de un sistema de drenaje y vaciado en las centrales hidroeléctricas va más allá de la simple gestión del agua. La presencia incontrolada de agua puede provocar fallas mecánicas, corrosión y, en casos extremos, fallas catastróficas que pueden comprometer toda la planta. Por ello, la eficacia de estos sistemas es una prioridad absoluta para los responsables de estas instalaciones. La modernización a través de la automatización aparece como una solución viable para aumentar la confiabilidad y eficiencia de estos sistemas críticos. El CLP, al ser un elemento central en la automatización industrial moderna, ofrece la flexibilidad, precisión y capacidad de respuesta esenciales para el control eficaz de procesos complejos como el vaciado y drenaje de agua.

En este contexto, el estudio se centró en evaluar la eficiencia de la mejora implementada comparando el desempeño operativo del sistema antes y después de su integración. La metodología adoptada incluyó el análisis de los datos recopilados por el sistema de supervisión, que registra variables operativas críticas en tiempo real. Este enfoque permitió una valoración cuantitativa de los cambios provocados por la implantación del CLP, con especial atención a la velocidad de respuesta del sistema, la reducción de fallos y la mejora general de la gestión del agua.

La relevancia de este estudio radica en su contribución a una comprensión más profunda de cómo la tecnología de automatización se puede aplicar de manera efectiva en las plantas hidroeléctricas, un sector a menudo desafiado por las necesidades de modernización frente al envejecimiento de la infraestructura. La integración de tecnologías modernas, como el CLP, en los sistemas existentes ofrece la oportunidad de realizar mejoras sustanciales sin la necesidad de una revisión completa, que sería mucho más costosa y disruptiva.

El presente estudio también se alinea con la creciente tendencia de digitalización y automatización en el sector energético, que busca no solo aumentar la eficiencia operativa, sino también mejorar la sostenibilidad y seguridad de las operaciones. Con la creciente demanda de energía y la necesidad de operaciones ambientalmente responsables, las plantas hidroeléctricas enfrentan el desafío de optimizar sus procesos minimizando los impactos ambientales y maximizando la seguridad.

Finalmente, este trabajo contribuye a la literatura existente proporcionando datos empíricos sobre la implementación de mejoras en sistemas críticos de plantas hidroeléctricas a través de la automatización. El análisis de los resultados no sólo valida la eficacia del uso de CLP en tales contextos, sino que también destaca las mejores prácticas y consideraciones necesarias para futuras implementaciones tecnológicas en la industria.

## **Fundamentación teórica**

En el desarrollo de sistemas de automatización para centrales hidroeléctricas, el control de procesos juega un papel vital. La eficacia del sistema de drenaje y vaciado es fundamental, no sólo para la seguridad operativa, sino también para mantener la eficiencia energética. Estos sistemas están diseñados para gestionar el flujo de agua para evitar inundaciones y optimizar el rendimiento de las turbinas y otros equipos, lo cual es crucial para la producción de energía.

La automatización de estos sistemas a través de Controladores Lógicos Programables (CLP) ofrece una serie de ventajas, entre ellas una mayor precisión en la operación, reducción de fallas y la capacidad de responder rápidamente a condiciones cambiantes. Los CLP son muy utilizados en la industria debido a su robustez y flexibilidad, permitiendo la integración con diversos dispositivos y sistemas, algo fundamental en un entorno tan complejo como una central hidroeléctrica.

Varios estudios destacan la importancia de la automatización en infraestructuras críticas. La capacidad de un CLP para realizar controles en tiempo real y recopilar datos operativos proporciona una base sólida para el monitoreo y análisis continuo del desempeño del sistema. Este aspecto es especialmente importante en las centrales eléctricas, donde la detección temprana de anomalías puede evitar paradas no planificadas y daños importantes.

Además, la literatura en ingeniería eléctrica y control de sistemas destaca que la implementación de mejoras como la automatización siempre debe ir precedida de un análisis riguroso de los sistemas existentes. Esto incluye comprender la configuración del sistema de drenaje, las limitaciones del equipo actual y los posibles puntos de falla. Por lo tanto, la decisión de implementar un CLP debe basarse en una comprensión detallada de estos elementos, asegurando que la solución elegida no sólo sea técnicamente viable, sino también optimizada para el contexto específico de la planta.

## **METODOLOGÍA**

El capítulo del libro utiliza un enfoque metodológico enfocado en evaluar el impacto de las mejoras implementadas en un sistema de drenaje y vaciado de una central hidroeléctrica a través de la automatización con un Controlador Lógico Programable (CLP). El estudio se desarrolló en n etapas, iniciando con el análisis del sistema existente, seguido de la implementación de la mejora y la evaluación post-implementación.

De manera general se realizó el Análisis Preliminar del Sistema Existente detallando el sistema de drenaje y vaciado existente. Este análisis incluyó revisión de documentos técnicos, entrevistas con operadores de planta e inspecciones en sitio para comprender completamente las operaciones y limitaciones del sistema anterior.

La implementación de mejoras con CLP consistió en la integración de un CLP para automatizar el control del sistema de drenaje. Y fue programado para gestionar las operaciones según criterios predeterminados, con el objetivo de optimizar el proceso y reducir las fallas operativas. Además, la configuración del sistema se ha ajustado para permitir una comunicación efectiva entre el CLP y los componentes del sistema, como sensores y actuadores.

El uso del Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Este sistema permitió la recopilación de datos en tiempo real y el monitoreo continuo del desempeño del sistema de drenaje. SCADA fue esencial para visualizar el comportamiento del sistema antes y después de implementar la mejora, proporcionando una base de datos sólida para el análisis comparativo.

La recogida y análisis de datos operativos, los datos fueron recogidos antes y después de la implementación de las mejoras. El análisis de estos datos se centró en indicadores clave de rendimiento, incluida la eficiencia de eliminación de agua, la frecuencia de fallas y el tiempo de respuesta del sistema. Las herramientas de análisis incluyeron software estadístico para procesar los datos recopilados y realizar comparaciones cuantitativas.

Así, la evaluación de resultados se produjo en la fase final de la metodología que implicó la evaluación de los resultados obtenidos. Esta evaluación comparó el desempeño del sistema antes y después de la automatización, con el objetivo de verificar la efectividad de las mejoras implementadas. Se utilizaron indicadores de desempeño, comentarios de los operadores y análisis técnicos para evaluar el éxito de la implementación.

## Descripción de la planta

En un escenario donde la creciente relevancia de la sostenibilidad está intrínsecamente ligada a la necesidad de proteger el medio ambiente, preservar los recursos naturales y garantizar un futuro más equitativo para las generaciones futuras, además de requerir, al mismo tiempo, un suministro constante de energía eléctrica, Las turbinas hidroeléctricas extraen electricidad a gran escala de la energía de los cursos de agua de forma limpia y renovable.

### *Central Hidroeléctrica*

Según el Operador del Sistema Eléctrico Nacional - ONS (2023), una Central Hidroeléctrica (CH) se define como un conjunto de obras y equipos que tienen como finalidad generar energía eléctrica mediante el aprovechamiento del potencial hidráulico existente en un río. De esta manera, a través de la conversión de la energía potencial gravitacional del agua en energía cinética, se produce la activación de la Unidad Generadora (UG), que consecuentemente genera energía eléctrica.

En este contexto, la estructura de una Central Hidroeléctrica se compone de varios elementos fundamentales, entre los que se incluyen:

- Presa: Responsable de formar el depósito de agua;
- Sistemas de captación y abastecimiento de agua: Dirigir el flujo de agua a la UG;
- Casa de máquinas: Donde se produce la conversión de energía potencial en energía cinética, y que a través de inducción electromagnética genera electricidad;
- Sistema de retorno de agua al cauce natural: Garantiza que el caudal del río siga su curso habitual tras su paso por la planta.

La combinación de estos elementos permite que una central hidroeléctrica funcione eficientemente en la conversión de energía hidráulica en electricidad, proporcionando energía limpia y renovable a gran escala.

## Central Eléctrica local

Es importante resaltar que los detalles específicos y características técnicas de esta planta local no pueden ser divulgados debido a restricciones de confidencialidad. Por lo tanto, este trabajo se centrará en aspectos generales relacionados con la industria energética.

## Sistemas auxiliares

Los sistemas auxiliares de una central hidroeléctrica juegan un papel fundamental para el funcionamiento de una central hidroeléctrica, ya que deben cumplir con la normativa y estar de acuerdo con los procedimientos específicos inherentes a cada proyecto.

## Planta

Según la *ESC Engenharia* (2023), el sistema auxiliar de una instalación está formado por un conjunto de paneles que aseguran el suministro adecuado de carga de corriente alterna y corriente continua a los dispositivos que componen el sistema de protección, control y supervisión de una instalación. . planta de energía.

También según la *ESC Engenharia* (2023), las cargas se dividen en cargas esenciales, que deben ser suministradas de forma prioritaria, y cargas no esenciales, que permiten interrupciones de larga duración.

En este sentido, dentro del sector energético, el consumo medio es del 6,1% del consumo total de energía eléctrica nacional, lo que equivale a más de  $2.526 \times 10^3 \text{ tep}$ , medida que representa mil toneladas equivalentes de petróleo, como se muestra en el Cuadro 1, tomado del Balance Energético Nacional 2022, que es elaborado por la Empresa de Investigación Energética - EIE.

SECTORES	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
CONSUMO FINAL (10 <sup>3</sup> tep)	42.861	44.391	45.800	45.128	44.838	45.413	46.303	47.503	47.102	49.090
SECTOR ENERGÉTICO	5,3	5,8	5,9	6,1	5,7	5,6	5,8	7,1	7,0	6,8
RESIDENCIAL	23,6	24,2	24,8	25,0	25,5	25,5	25,6	25,9	27,2	26,4
COMERCIAL	16,0	16,4	17,0	17,4	17,1	17,1	16,8	17,1	15,5	15,7
PÚBLICO	8,0	8,0	8,0	8,3	8,3	8,2	8,4	8,4	7,8	7,5
AGRÍCOLA	4,7	4,6	5,0	5,1	5,4	5,4	5,6	5,5	5,9	5,9
TRANSPORTES	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
INDUSTRIAL	42,1	40,7	38,9	37,7	37,6	37,8	37,3	35,7	36,2	37,4

Tabla 1 – Composición sectorial del consumo de electricidad.

Fuente: Tomado de EPE (2022).

Por tanto, el consumo eléctrico en una central hidroeléctrica está destinado a abastecer los servicios auxiliares de Corriente Alterna (CA) y Corriente Continua (CC) a través de un Transformador de Servicios Auxiliares (TSA). Se entiende de esta manera que los servicios auxiliares tienen el importante papel de suministrar energía a todo el conjunto de equipos y paneles eléctricos necesarios para el funcionamiento continuo de los sistemas de generación.

### *Principio de generación*

Ya en la antigüedad el hombre sabía que la energía podía transformarse. Como dijo Antoine Lavoisier, uno de los padres de la Química Moderna: “En la naturaleza nada se crea, nada se pierde, todo se transforma” (LAVOISIER, 1785). La famosa frase del químico resume la idea de conservación de la energía, que es una de las leyes más fundamentales de la física. Ella nos recuerda que la energía puede cambiar de forma, pero nunca puede crearse ni destruirse.

En este sentido, la generación de energía eléctrica implica la conversión de diferentes formas de energía, como la energía cinética del agua, que en movimiento se utiliza para hacer girar la turbina conectada al generador de una central hidroeléctrica.

### *Conversión de energía*

Según afirma el ONS (2023), el curso natural de un río es interrumpido por una presa que provoca la formación de un lago artificial llamado embalse. Con esto, el embalse retiene el agua y ésta es conducida por el conducto bifurcado hasta pasar por la turbina hidráulica, en la casa de máquinas, el agua es devuelta al cauce natural, a través del canal de escape.

En este sentido, por tanto, la energía hidráulica se convierte en energía mecánica al pasar por la turbina, dando lugar a la rotación. Posteriormente, en el generador, que está conectado mecánicamente a la turbina, esta energía mecánica se convierte en energía eléctrica mediante inducción electromagnética.

### *Energía mecánica*

Hallyday (2016) define la energía mecánica (Emec) de un sistema como la suma de la energía cinética  $K$  y la energía potencial  $U$ , según la Ecuación 1.

$$\text{Emec} = K + U \text{ Joules (J)} \dots\dots\dots(1)$$

La energía cinética es la energía asociada con el estado de movimiento de un objeto. Cuanto más rápido se mueve el objeto, mayor es la energía cinética. Por otro lado, la energía potencial es la energía asociada a la configuración de un sistema que está sujeto a la acción de una fuerza conservadora (HALLIDAY, 2016).

### *Inducción electromagnética*

La inducción electromagnética es el principio detrás del funcionamiento de los transformadores, en consecuencia también de los generadores y motores eléctricos (CHAPMAN, 2013). Así, la inducción electromagnética es la base para la generación de electricidad en centrales hidroeléctricas, así como para la transmisión de energía eléctrica en redes de distribución. Así, existen dos principios detrás de la inducción electromagnética (LAGE, 2021).

#### *Ley de Faraday*

Esta Ley establece que si hay un flujo que pasa por una espira de alambre conductor, entonces se inducirá un voltaje que es directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo en relación con el tiempo según la Ecuación 2 (CHAPMAN, 2013).

$$e_{ind} = \frac{-d\phi}{dt} \quad (2)$$

#### *Ley de Lenz*

La Ley establece que la dirección de la corriente inducida es tal que su campo magnético se opone al cambio en el campo magnético original que la generó, es decir, la corriente inducida tiende a crear un campo magnético que se opone a la variación del campo magnético externo que lo generó (CHAPMAN, 2013).

## **Equipos y paneles eléctricos**

Se define equipo eléctrico como cualquier componente, dispositivo, máquina o aparato que utiliza energía eléctrica en su funcionamiento. En este sentido, se consideran equipos eléctricos las lámparas, los electrodomésticos y las máquinas industriales. Por otro lado, para Mamede (2013), un cuadro eléctrico es un conjunto de dispositivos de conmutación asociados a equipos de protección, comando, medición y control complementados con accesorios instalados internamente a un cubículo normalmente metálico dotado de estructuras de soporte.

Por lo anterior, en una CH, para satisfacer las necesidades, se cuenta con un conglomerado de equipos y cuadros eléctricos, ya que los sistemas auxiliares que utilizan estos juegan un papel fundamental en la planta.

## *Sistemas auxiliares esenciales para la generación*

Además de las turbinas y generadores presentes en una central hidroeléctrica, existen una serie de sistemas que juegan papeles fundamentales en el funcionamiento de la central, sistemas que realizan la protección, comando, medición y control de toda la CH.

En la Figura 1, se muestra un panel de bajo voltaje, un Centro de control de motores (CCM). Este cuadro, fundamental en cualquier planta industrial, es un cuadro eléctrico diseñado para la protección, seccionamiento, maniobra y medición de diversidad de cargas eléctricas, con especial enfoque en motores. Además, un CCM puede cubrir todas las cargas de una planta en una única ubicación, lo que lo hace imprescindible en el entorno industrial.



Figura 1 – Vista interna de un panel de baja tensión.

Fuente: Mamede, 2013

Como un CCM está diseñado para manejar múltiples cargas, es posible un control eficiente y confiable en una sola ubicación. Además, el acceso rápido y seguro al panel hace que la operación y el mantenimiento sean más sencillos y fáciles para los operadores durante las maniobras y el mantenimiento. Como se mencionó anteriormente, el CCM distribuye, desde los disyuntores de salida, energía a diversas cargas, como motores eléctricos y otros paneles, por ejemplo, un Centro de Drenaje y Vaciado de Motores (CCMDV).

## Drenaje y vaciado del centro del motor

En una CH existe un flujo de agua que ingresa a la casa de máquinas debido a fugas internas producto de la falta de sellado de las unidades generadoras, infiltraciones en la casa de máquinas y el agua generada en su interior. Desde allí, el flujo de agua se dirige a un depósito, donde se realiza el vaciado a través de tubos de aspiración mediante motores acoplados a bombas de vaciado. El CCMDV está diseñado para manejar múltiples motores y bombas que son esenciales para garantizar el control del flujo de agua dentro de la planta.

### *Operación*

Un CCMDV contiene unidades de control de motores y unidades de circuitos de suministro de energía. Por tanto, ambos incluyen necesariamente un interruptor seccionador con fusibles o un disyuntor accionable externamente al panel. Por lo tanto, como se muestra en la Figura 2, normalmente, buscando redundancia del sistema, existen dos disyuntores de entrada para alimentar ambas unidades, los cuales están presentes en un cajón, que puede definirse como un panel eléctrico removible, donde se realiza la conexión y desconexión de este. panel procedente del bus vertical, que se alimenta mediante uno de los disyuntores de entrada, y se realiza de forma simplificada mediante una palanca presente en el cajón.

En un cajón se encuentran una serie de dispositivos electrónicos y de protección, que junto con el panel de control (que se ubican encima de los disyuntores en la Figura 2), realizan el control, medición y protección de todo el sistema de drenaje y vaciado.

En este sentido, cada cajón es responsable de una carga, en este caso todas las cargas son motobombas centrífugas, cuya finalidad es vaciar el depósito, donde cada bomba tiene su respectivo cajón, donde el tamaño del cajón refleja la potencia del motobomba, ya que a mayor potencia, mayor es el disyuntor necesario, lo que en consecuencia ocupa más espacio en el cajón.

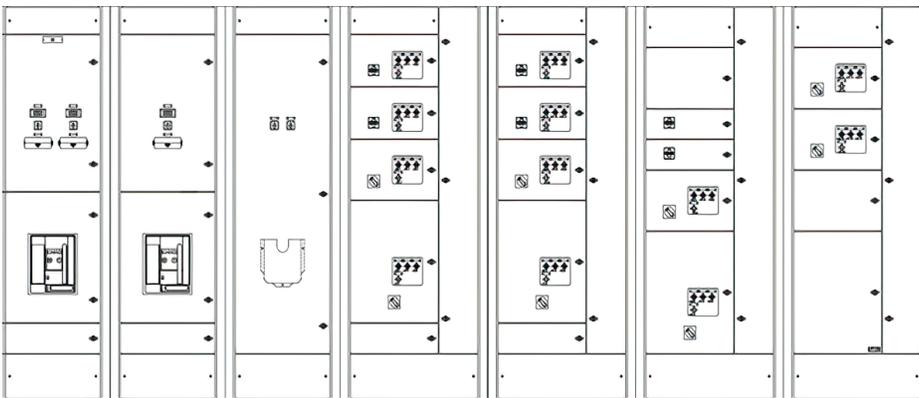


Figura 2 – Vista externa de un CCMDV.

Fuente: Planta local, 2024

### *Motobomba centrífuga*

Para Macintyre (2010), una bomba centrífuga es un dispositivo mecánico giratorio desarrollado para impulsar un fluido, generalmente agua limpia o agua contaminada con material sólido, superando una diferencia de altura o elevación entre el punto de succión y el punto final de la línea de descarga. Este dispositivo convierte el trabajo mecánico en energía hidráulica, transfiriendo energía desde el eje del rotor al flujo de líquido.

Según Russeli Charles Hibbeler (2016), las motobombas centrífugas pueden proporcionar altos caudales, pero tienen una desventaja importante: la baja presión de flujo. Como resultado, este tipo de bombas funcionan bien para drenar agua de zonas poco profundas que requieren poca presión, pero con un gran volumen de agua, sin necesidad de cambiar de dirección.

En este sentido, para aplicaciones que impliquen vaciado del depósito, las motobombas centrífugas son ideales, ya que ofrecen elevados caudales. Como resultado, las motobombas centrífugas del CCMDV son capaces de mover grandes volúmenes de agua de manera eficiente. Además, el obstáculo de la baja presión y el cambio de dirección no suponen mayores problemas, ya que el gran volumen de agua se dirige a un solo lugar, aguas abajo, donde no se necesita gran presión, ya que la altura con respecto al embalse no es excelente.

### *Desgaste mecánico*

En las máquinas eléctricas, debido al uso prolongado existe desgaste en cojinetes, escobillas, conmutadores y sellos que se presenta naturalmente debido a la corriente eléctrica inicial del motor, la cual es alta, como se muestra en la Figura 3, en consecuencia su torque inicial también es alto. Por lo tanto, con ambos parámetros elevados se produce desgaste en componentes eléctricos y mecánicos (CHAPMAN, 2013).

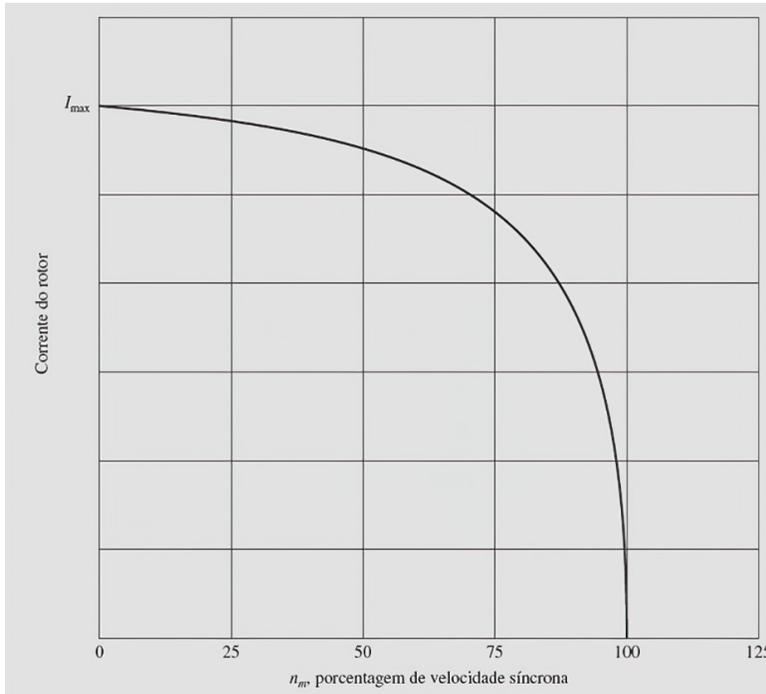


Figura 3 – Gráfico de la corriente del rotor en función de la velocidad del motor

Fuente: Tomado de Chapman (2013).

El desgaste en las bombas centrífugas, según Rijeza metalúrgica (2024), es de tres tipos y genera importantes impactos en los procesos industriales, los cuales son:

1. Pérdida de eficiencia: Una motobomba que sufre desgaste con el tiempo inevitablemente pierde su eficiencia de bombeo, lo que se traduce en un aumento en el consumo de energía necesario para realizar su función;
2. Pérdida de calidad: la ineficiencia operativa puede tener implicaciones para el proceso de producción;
3. Paros de la máquina: Debido al desgaste, es necesario parar la motobomba, generando la necesidad de realizar mantenimiento correctivo.

#### *Modo de funcionamiento: Automático*

Paralelamente al panel de control del CCMDV, existe una placa externa, que es una Placa de Comando Local (PCL), la cual se encarga de medir el nivel dentro del depósito a partir de dos sondas de nivel, donde una envía una señal analógica (4 al 20 de marzo) para el sistema de supervisión y el otro para el comando en PCL. Además, la señal analógica enviada al PCL se convierte en una señal digital, que se envía al panel de control del CCMDV. La señal recibida por el CCMDV, una señal 0 o 1, es interpretada por el sistema como se muestra en la Figura 4.

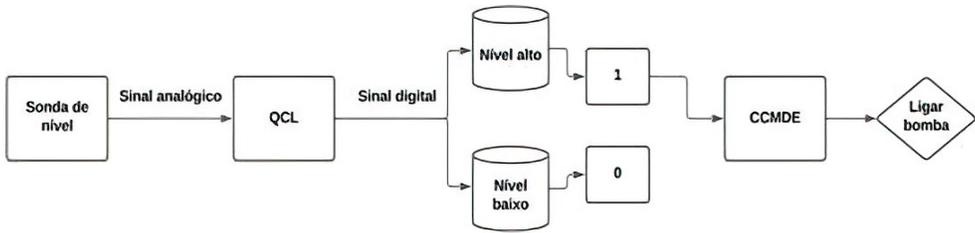


Figura 4 – Diagrama de bloques de la señal de la sonda de nivel para una bomba

Fuente: Autoría, 2024

La señal analógica enviada por la sonda de nivel se define en tres etapas:

1. Nivel bajo: Las bombas permanecen apagadas;
2. Nivel alto: Se envía un comando desde el CCMDV a los dispositivos electroelectrónicos de un cajón, los cuales dan un comando para que se encienda la respectiva bomba;
3. Nivel muy alto: En este nivel existe riesgo para la estructura del embalse e inundación de la casa de máquinas de la CH, por lo que se envía una alarma de emergencia a la sala local, además de que todas las bombas disponibles están en operación.

Según sea necesario, el número de bombas en funcionamiento viene definido por el nivel, es decir, en determinados niveles se activan más bombas, dependiendo del aporte de agua en el embalse. Por tanto, como se muestra en la Figura 5, habrá bombas en espera para entrar en funcionamiento en los casos en que el nivel alcance determinados parámetros.

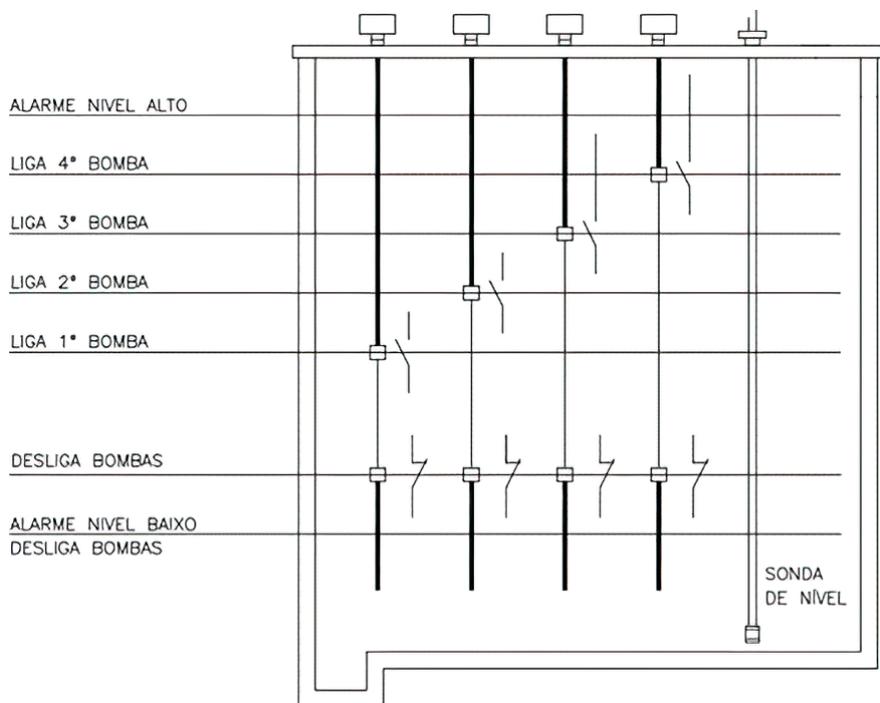


Figura 5 – Activación del nivel de la bomba.

Fuente: Autoría, 2024

### *Modo de operación: Manual*

En el PCL hay un interruptor selector de dos posiciones, que define el estado del panel, automático o manual. Cuando el PCL está en manual, no envía señales al CCMDV, por lo que las bombas no se encenderán incluso si el nivel es muy alto. En operación manual, la única forma de encender las bombas es desde el botón del PCL, es decir, un operador tiene que ir al lugar para activar las bombas.

### *Protección*

Dispositivo de protección en un cuadro eléctrico diseñado para garantizar la seguridad de los equipos. En el caso del CCMDV, los objetivos de esta seguridad son las motobombas centrífugas. La protección se basa en monitorear el flujo de corriente eléctrica, identificando condiciones anormales que podrían presentar riesgos de cortocircuito y sobrecarga para la motobomba.

## *Disyuntores*

El autor Garzón (2002) define los disyuntores como dispositivos de protección electromecánica cuya función principal es interrumpir las corrientes de falla, especialmente las resultantes de cortocircuitos en la red eléctrica. Por lo tanto, es imperativo que los disyuntores tengan la capacidad de interrumpir dichas corrientes de falla en el intervalo de tiempo más corto posible, independientemente de la duración de su inactividad, para mitigar los efectos de la degradación en sus contactos y regular el tiempo de residencia de la falla.

En un CCMDV existen dos tipos de disyuntores, los disyuntores de entrada, que se ubican debajo del respectivo panel de control, los cuales se caracterizan por ser disyuntores de caja moldeada que operan a corrientes superiores a 200 A, según la parametrización en su relé supervisor. Además de estos, dentro de los cajones existen disyuntores termomagnéticos, donde su propósito es proteger la línea de control de las motobombas, por lo tanto, el rendimiento de estos disyuntores está entre 2 y 63 A.

## *Fusibles*

Según el sitio web de Siemens (2024a), los fusibles se utilizan para proteger las sobrecorrientes de cortocircuito en instalaciones eléctricas industriales. Los fusibles rompen el circuito de forma segura tan pronto como se produce una sobrecarga o un cortocircuito, esto evita daños al equipo eléctrico y reduce el tiempo de inactividad.

Sin embargo, los fusibles requieren reemplazo después de cada falla, ya que se abren y pierden su utilidad, a diferencia de los disyuntores, que ofrecen reinicio después de cada falla. Sin embargo, los fusibles son más simples y, a menudo, más económicos, lo que significa que la combinación de disyuntores y fusibles ofrece una mayor protección sin mucho costo.

## *Control*

Según la definición del autor Gata (2010), el control se puede definir como el proceso de monitorear y ajustar variables en sistemas complejos para asegurar que operen de la manera deseada y eficiente. En el contexto industrial, el uso del control se utiliza para regular variables como temperatura, presión, humedad, viscosidad y flujo en una amplia gama de aplicaciones. En este sentido, el control asegura que los parámetros operativos se mantengan dentro de límites específicos, garantizando un rendimiento seguro y eficaz de la planta.

También según Gata (2010), una planta se refiere a una unidad completa de equipo o simplemente a un arreglo de componentes interconectados en un equipo, diseñados para operar en conjunto y realizar una operación específica.

## *Relé*

Dispositivo utilizado para controlar la apertura o cierre de circuitos eléctricos, funcionando como un interruptor controlado por una corriente eléctrica o una señal de control (Siemens, 2024b). Con estas condiciones de funcionamiento, un relé proporciona protección a máquinas e instalaciones, donde sus principales variables de medida son:

- Secuencia de fase;
- Caída de fase;
- Subtensión;
- Sobretensión.

Con estos parámetros, el relé reconoce fallas en la red y, por lo tanto, puede reconocerlas y resolverlas prematuramente, antes de que se produzcan daños consecuentes mucho mayores. Además, en combinación con un contactor, es posible construir una línea de comando que, cuando se activa el relé, permite desconectar la carga, protegiéndola completamente. Por otro lado, el relé también se utiliza en conjunto con lámparas, ya que cuando el relé se activa, es posible identificar la falla a través de este conjunto, facilitando el diagnóstico y mantenimiento.

## *Contactor*

El sitio web de Automatización Industrial (2024) define un contactor como un dispositivo electrónico utilizado para controlar la activación e interrupción de cargas, como motores eléctricos. El funcionamiento del dispositivo electrónico en cuestión utiliza una bobina y un núcleo magnético que, cuando se energiza, crea un campo magnético capaz de atraer un núcleo móvil, moviendo los contactos del contactor para abrir o cerrar el circuito. En este sentido, cuando se energiza la bobina del contactor, los contactos abiertos (NA) se cierran, mientras que los contactos cerrados (NC) se abren.

Por último, los contactores que controlan los motores eléctricos trifásicos son tripolares, es decir, tienen tres contactos, los cuales están abiertos. En este sentido, para energizar la bobina del contactor en cuestión y finalmente permitir el encendido del motor eléctrico, generalmente se colocan juntos relés de sobrecorriente y cortocircuito para proteger la línea de control. Por lo tanto, para que el motor comience a funcionar, la línea de control debe estar en condiciones adecuadas. Por otro lado, el disyuntor de caja moldeada de línea eléctrica protege el circuito de potencia, por lo que para la activación del motor eléctrico es necesaria la integridad del circuito de control y potencia, formando una protección completa.

## Controlador Lógico Programable

El Controlador Lógico Programable (CLP) es un dispositivo electrónico utilizado en automatización para controlar máquinas y procesos. Según Macedo (2018), el CLP tiene la siguiente configuración de hardware:

- CPU – Unidad Central de Procesamiento;
- Fuente de alimentación, con batería interna;
- Cerraduras de entrada;
- Cerraduras de salidas;
- Memorias;
- Cerradura de datos, direccionamiento y control;
- Archivos de programas;
- Archivos de información;
- Puerta de comunicación;
- Bus de expansión de entradas/salidas.

Con estas configuraciones, el CLP tiene la facultad de controlar los elementos conectados a su salida, según la lógica de programación (generalmente en líder), y considerando tanto el estado de los sensores de entrada como la situación de los elementos de salida (MACEDO, 2018) . En las Figuras 6 y 7 se representa la arquitectura del hardware del CLP y su principio de funcionamiento, respectivamente.

Durante un ciclo de operación (scan), el CLP ejecuta una secuencia de pasos. Primero, la inicialización, lectura de los sensores de entrada y actuadores de salida, actualización de las memorias con el estado de las entradas y salidas, comparación del estado de las memorias con la lógica de programación definida por el usuario, actualización de las salidas según esta lógica y, finalmente, repitiendo el ciclo de barrido para asegurar el control (Mitsubishi Electric, 2024).

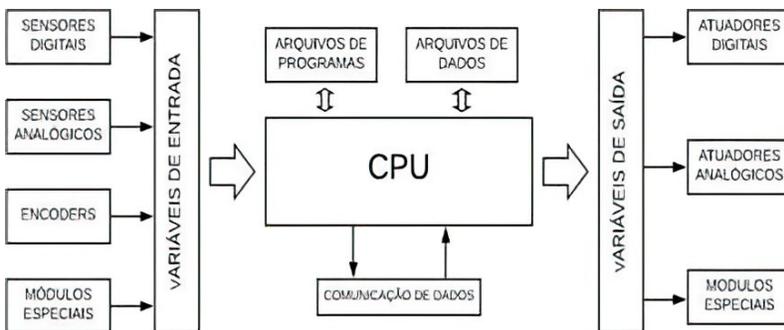


Figura 6 – Arquitectura del hardware del PLC.

Fuente: Tomado de Macedo (2018).

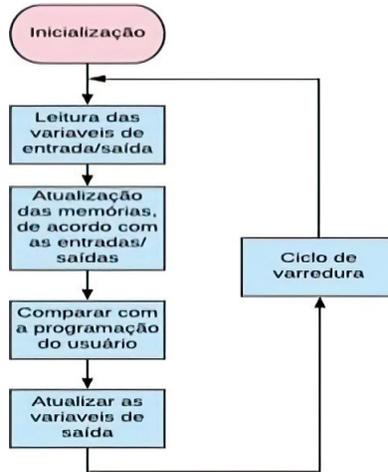


Figura 7 – Principio de funcionamiento del PLC.

Fuente: Tomado de Macedo (2018).

### Lenguaje de Ladder

El lenguaje de programación en ladder es el más utilizado cuando se trata de lenguajes de programación para CLPs, ya que su programación alude al comando eléctrico. Además, esta programación recibió su nombre debido a su arquitectura, la cual asemeja un escalón, y a lo largo de la programación visualmente se convierte en una escalera, como se muestra en la Figura 8 (MACEDO, 2018).

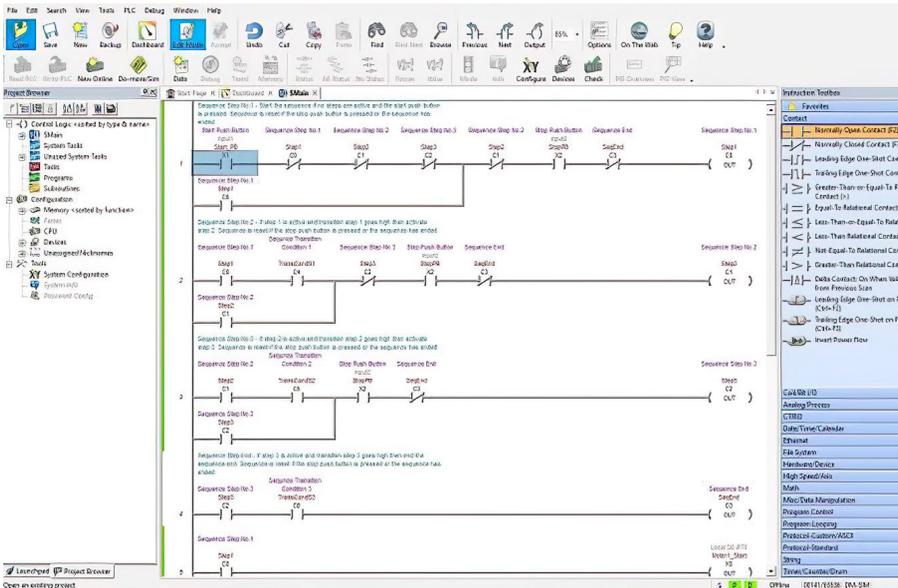


Figura 8 – Ejemplo de programación en ladder.

Fuente: Ladder Logic World, 2024

### *Sonda de nivel*

Según el sitio web de la empresa especialista en sensores de presión Keller (2024), una sonda de nivel es un dispositivo que tiene la capacidad de medir la profundidad de una superficie líquida o sólida granular en tanques y materiales que tienen una gran capacidad de almacenamiento. Además, la sonda consta de un transmisor que convierte la información de nivel en una señal eléctrica, generalmente analógica (corrientes eléctricas de 4 a 20 mA).

### *Comunicación de datos*

Según Forouzan (2010), la comunicación de datos implica la transferencia de información entre dos dispositivos utilizando un medio de transmisión, como un cable con hilos conductores. Este intercambio de datos requiere que los dispositivos de comunicación formen parte de un sistema integrado, que incluye componentes tanto físicos (hardware) como lógicos (software). Aún así, según Forouzan, el hardware y toda la infraestructura física para transportar las señales, mientras que el software viabiliza el proceso de comunicación.

En el contexto industrial, la comunicación entre un sensor ubicado en campo y un receptor ubicado en la sala de control se vuelve fundamental, ya que se optimizan los recursos y la toma de decisiones debido al monitoreo en tiempo real.

De esta manera, de manera inmediata, la transmisión continua de datos del sensor al receptor permite a los operadores monitorear las condiciones ambientales en tiempo real, además de que no necesitan desplazarse al lugar para recibir información del sensor, con lo que aumentando la eficiencia operativa y la toma de decisiones debido al monitoreo en tiempo real, permitiendo una intervención rápida si ocurre una falla.

### *Protocolo de comunicación*

Un protocolo establece el estándar para el formato y la secuencia de mensajes compartidos entre dos o más entidades comunicantes. Además, especifica las operaciones realizadas durante la transmisión y/o recepción de un mensaje u otro evento (KUROSE, 2021).

Teniendo esto en cuenta, se establece un estándar de comunicación común entre dispositivos y sistemas industriales, como es el caso de la entrega de datos de nivel CCMDV a la sala de control de una central hidroeléctrica.

### *Modbus*

Como explica el blog de Alfacom (2024), Modbus es un protocolo de comunicación de datos desarrollado por la empresa Modicon, publicado en 1979 para su uso en la programación de CLP. Sin embargo, Modicon fue adquirida por Schneider y los derechos de Modbus ahora están a cargo de Modbus Organizativo, que es responsable de mantener el protocolo.

El protocolo Modbus se usa comúnmente para transmitir señales desde instrumentos y equipos de control a un controlador principal o una base de datos. Además, la comunicación de bits entre dispositivos de diferentes fabricantes no tiene restricciones y no se cobra por su uso, lo que hace que este protocolo sea fácil de usar y mantener.

Existen versiones del protocolo para cables serie (Modbus RTU y Modbus ASCII) y Ethernet (Modbus TCP). Por otro lado, la versión expuesta en este trabajo será Modbus RTU, ya que es la implementación del protocolo más utilizada y la aplicada al caso de estudio.

### *Modbus RTU*

La Unidad Terminal Remota (RTU) Modbus es un protocolo de comunicación abierto que utiliza puertos serie como RS-232 y RS-485, derivados de la arquitectura Maestro/ Esclavo, donde cada mensaje de 8 bits contiene dos caracteres hexadecimales de 4 bits y debe transmitirse en un flujo continuo de caracteres. En las redes Modbus RTU, los esclavos tienen su propia dirección única, que va de 1 a 247. Por otro lado, el maestro es responsable de escribir y leer información de los esclavos en su red, como se muestra en la Figura 9 (Modbus ONG, 1996).

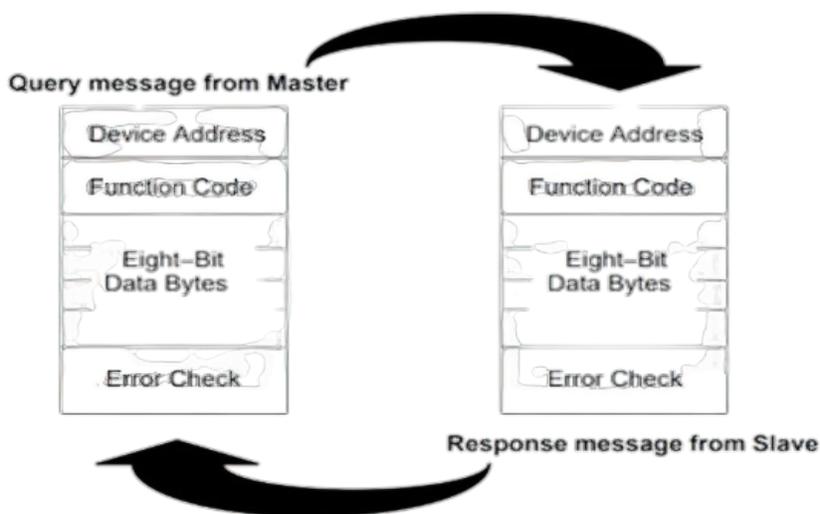


Figura 9 – Ciclo de consulta y respuesta entre maestro y esclavo

Fuente: ONG Modbus, 1996

El ciclo de consulta y respuesta entre maestro y esclavo se refiere al proceso de comunicación en el que un dispositivo maestro envía una solicitud (consulta) a uno o más dispositivos esclavos, los cuales luego responden con los datos solicitados o con una confirmación de finalización.

Los datos se envían en series de ceros y unos, que se denominan bits, los cuales son definidos por Forouzan (2010) como la unidad de almacenamiento de datos más pequeña y representa un valor binario de 0 o 1. Los bits se utilizan para representar datos en las computadoras, donde diferentes Los patrones de bits se utilizan para representar información como texto, números e imágenes.

Como ya se mencionó, cada mensaje tiene 8 bits, sin embargo contiene dos caracteres hexadecimales de 4 bits, donde los dos primeros caracteres representan la solicitud del maestro para un esclavo específico, el cual representa su dirección única. Así, los bits restantes se refieren al código de la función a solicitar.

Con esto, el protocolo Modbus RTU permite una comunicación efectiva entre un dispositivo maestro y sus dispositivos esclavos a través de puertos RS-232 o RS-485. De esta forma, el protocolo es capaz de transmitir datos en entornos industriales, facilitando el control y seguimiento de los procesos operativos.



Figura 10 – RS-232.

Fuente: Newegg, 2024



Figura 11 – RS-485.

Fuente: Newegg, 2024

## Control de Supervisión y Adquisición de Datos - SCADA

El control de supervisión SCADA es un sistema integrado de software y hardware diseñado para permitir a las organizaciones gestionar y supervisar procesos industriales de forma eficaz. Un sistema de este tipo establece una conexión directa con las máquinas presentes en la fábrica, lo que permite la visualización instantánea y en tiempo real de datos relevantes (Inductive Automation, 2024).

Con la implementación de un sistema de supervisión, los controles de procesos industriales y el monitoreo de datos en tiempo real son posibles de forma remota. Además, se mantiene un registro detallado de las actividades, acciones e información relevante que ocurre en la planta, manteniendo un historial de operación del sistema (Inductivo Automation, 2024).

La arquitectura SCADA parte de los CLP o unidades terminales remotas (RTU), que se comunican con una matriz de objetos, como sensores, luego, con un protocolo de comunicación, la información adquirida por esta matriz es enviada a computadoras con software SCADA, que procesa esta información y muestra los datos, como se muestra en el diagrama de la Figura 12. Por otro lado, también es posible enviar comandos desde la computadora a la matriz de objetos, posibilitando así una maniobra de forma remota (Automatización Inductiva, 2024) .

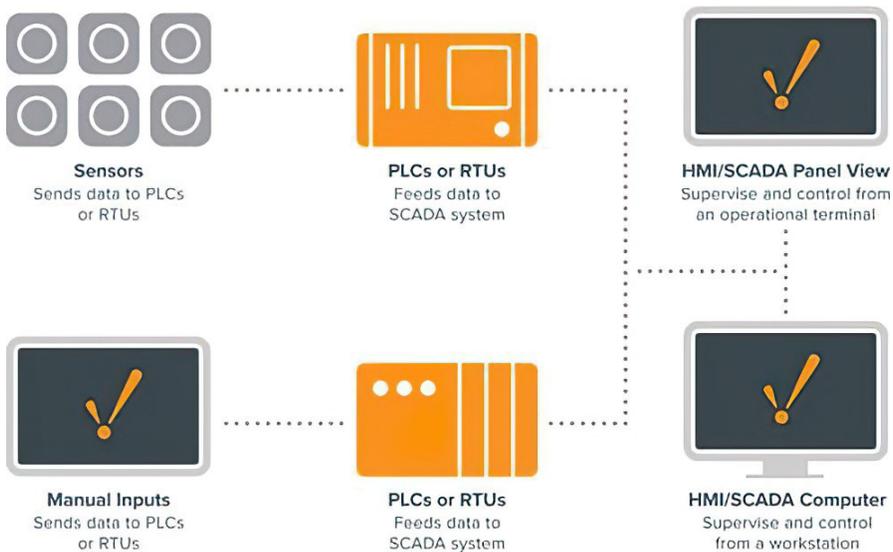


Figura 12 – Diagrama SCADA básico

Fuente: Inductive Automation, 2024

La empresa Elipse software desarrolla herramientas para la gestión en tiempo real de diversos procesos relacionados con los segmentos de energía, infraestructura e industria (Elipse software, 2024a). El software proporcionado por la empresa, líder en este mercado, es ampliamente utilizado para el control y monitoreo de procesos, ofreciendo capacidades de visualización de datos, control y registro de historial (Software Elipse, 2024a). El software de la empresa es utilizado por el CCMDV, principal objetivo de este trabajo.

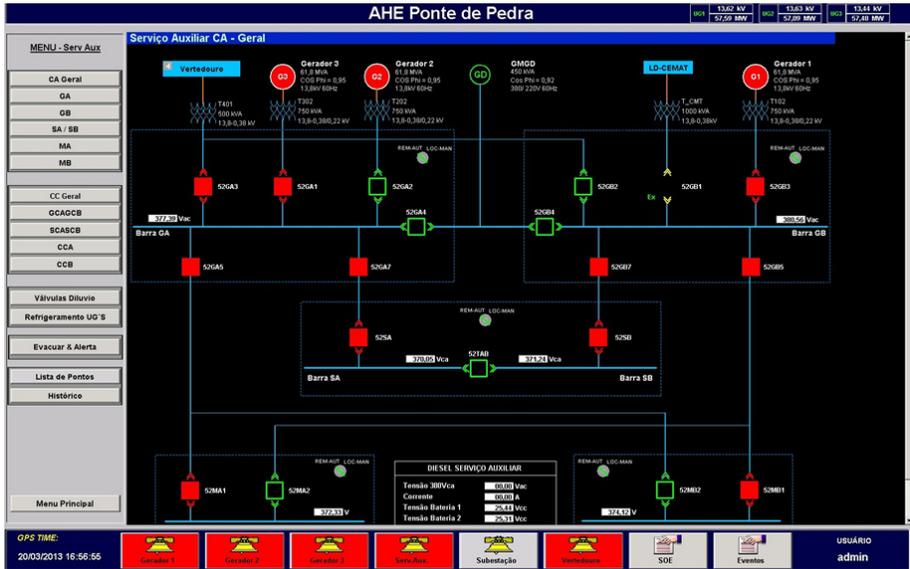


Figura 13 – Ejemplo de aplicación del software elipse - Serviço auxiliar en la planta de Ponte da Pedra.

Fuente: Software Elipse, 2024

## ESTUDIO DE CASO DE PLANTA LOCAL

Como se mencionó anteriormente, debido a restricciones de confidencialidad, no habrá exposición de datos confidenciales de la Planta local. No obstante, con fines didácticos se añadirán diagramas y vistas, pero modificando y/o eliminando su contenido.

Este caso de estudio aborda una modificación realizada en la planta local, más precisamente una automatización implementada en el mismo CCMDV. Así, se describirá cómo funcionaba el sistema de drenaje y vaciado de la planta antes de la implementación de la automatización, detalles de la mejora con su finalidad y finalmente el funcionamiento del sistema con la mejora incorporada.

Por lo tanto, luego de la explicación de ambos escenarios y la descripción de la mejora implementada, se realizará una discusión de los datos recopilados por el autor a través de la supervia-sober, con el objetivo de comparar la eficiencia operativa del CCMDV antes y después de la implementación. de la mejora.

## Escenario analizado

En la planta local existen tres reservorios (también llamados pozos), estos reciben agua de diferentes ubicaciones que estarán determinadas por:

- Río abajo: toda el agua que proviene del interior de la central eléctrica, ya sea agua generada por el hombre o infiltración de la parte aguas abajo de la planta, se dirige al pozo aguas abajo. Para el vaciado de este pozo se cuenta con cuatro motobombas;
- Río arriba: el agua de las fuentes de infiltración aguas arriba se dirige al pozo aguas arriba. Para el vaciado de este pozo se cuenta con tres motobombas;
- Vaciado: La fosa de vaciado tiene como objetivo llenar la unidad generadora cuando ésta se apaga por mantenimiento. Sin embargo, debido a fugas o falta de sellos de eje en las unidades generadoras, el foso de vaciado también actúa por estos motivos. Para el vaciado de este pozo se dispone de tres motobombas.

## Sistema de drenaje y vaciado previo a la mejora

Antes de la mejora, la operación CCMDV de los pozos aguas abajo, aguas arriba y de vaciado seguía la lógica de los diagramas de bloques de los Apéndices A, B y C respectivamente.

En los pozos aguas abajo y aguas arriba no hubo automatización en conjunto con el PCL y, por lo tanto, no hubo rotación de la bomba, es decir, la misma motobomba, que se definió como prioritaria, entraba en operación cada vez que el nivel alcanzaba el volumen 1, es decir, la sonda de nivel transmite una señal de 8 mA. Las bombas 1, 2, 3 o 4 (en el caso de aguas abajo) se pueden definir como prioridad en su respectivo PCL, en estos casos, Placa de comando local río abajo (PCLRío Abajo) y Placa de comando local aguas arriba (PCLRío Arriba). De esta manera, un operador, una vez al día, se desplazaba hasta la ubicación del sistema y cambiaba la motobomba prioritaria, para realizar una rotación diaria de la bomba. Así, por ejemplo, la bomba 1, que antes tenía prioridad, pasa a ser la última, activándose sólo en el nivel 3 (río arriba) o 4 (río abajo) y la bomba 2, que se activaba en el nivel 2, ahora se activa en el nivel 1.

Por otro lado, en el foso de vaciado, controlado por la Placa de Comando de Vaciado Local (PCL Vaciado), ya se contaba con un PLC con lógica de rotación de la bomba incorporada, es decir, no era necesario que un operador se desplazara hasta el lugar y la rotación que ocurre diariamente en los demás pozos, en el pozo de vaciado ocurre cada vez que se activa la primera bomba.

## Descripción de la mejora implementada

Como se mencionó anteriormente, los pozos río abajo y aguas arriba no tenían un PLC para rotar automáticamente las motobombas. Para ello, la mejora en el CCMDV apuntó a implementar un PLC que controlara conjuntamente los tres pozos, con el objetivo de lograr la rotación de todas las bombas simultáneamente, tal como ya están instaladas en el pozo de vaciado. Además, como ya tenía su propia lógica y toda la infraestructura PLC estaba lista, tanto ella como su lógica existente fueron descartadas para la introducción del nuevo modelo.

En primer lugar, una vez finalizado el proyecto, se inició la programación de la lógica del PLC en ladder, la cual no será expuesta en este trabajo, pero sí se presentará en un diagrama de bloques, según los Apéndices D y E. Además, se recuerda al lector que el Los pozos río arriba y de vaciado tienen tres bombas y el pozo aguas abajo tiene cuatro. Además, en el Apéndice E se describe el funcionamiento del pozo de aguas arriba luego de la mejora y del pozo de vaciado, pero recuerde que el pozo de vaciado ya contaba con esta automatización.

Con esto los tres pozos serán controlados por un único PLC siguiendo la lógica de ladder descrita en los Anexos antes mencionados. El PLC elegido fue de la familia Novus XL (2024), que según el fabricante, cuenta con la integración de tarjetas de entrada y salida, interfaces de comunicación y memoria masiva en una unidad compacta, robusta y confiable. Con estas características, este PLC satisface las necesidades de implementación de mejoras en el CCMDV.



Figura 14 – PLC de la familia XL.

Fuente: Tomado de Novus (2024).

Se montó un panel específicamente para alojar el PLC y sus protecciones para un fácil mantenimiento y organización. El panel se muestra en la Figura 15, el cual cuenta con dos disyuntores termomagnéticos para proteger el PLC y una fuente de rectificación de 220 VAC a 24 VDC para alimentarlo y sus conjugados (tarjetas de entrada y salida). Además, también existe un relé (que se encuentra en la Figura 15 en la parte inferior, de color verde) con la función exclusiva de detectar fallas en el PLC y enviar una señal a la sala de control.



Figura 15 – Panel ensamblado.

Fuente: Autoría, 2024

## Entradas y salidas digitales

En los Apéndices F y G, respectivamente, representan las entradas y salidas digitales del pozo aguas arriba, el cual fue elegido para explicar el sistema de entrada-salida.

Este sistema consiste en tomar puntos existentes de la automatización CCMDV de los pozos y transformarlos en entradas y salidas, por ejemplo activando un relé que enciende la bomba 1. Una parte de la automatización existente se muestra en el Apéndice H.

El PLC habilita una entrada desde una consecuencia, por ejemplo en el Apéndice F, coordenadas E2 (entrada 5), hay un contacto de contador K5M que, en consecuencia, si no hubiera salida digital, activaría la bobina del contador K5M en el diagrama de Apéndice

H en la coordenada 9, donde conectaría la bomba número 1. Sin embargo, el sistema de automatización que no se utiliza con el PLC está “pasado”, es decir, no trabaja junto con la automatización del PLC.

Así, en la automatización PLC, una entrada puede habilitar una o más salidas, según la programación en ladder incorporada en el PLC. Por lo tanto, en este caso, en la línea de código, activar la entrada 5 representa habilitar la salida 5 (Q5) en el diagrama G. Además de activar la salida Q5, como se ve en el Apéndice E, el PLC registra la memoria, si esta bomba lo tiene. la primera en activarse, será la última en la siguiente activación de la bomba.

Además, al pasar la automatización sin PLC, no hay indicaciones de protecciones, fallas o señalización del estado de las bombas a la sala de control a través del supervisor. En este caso, como se puede observar en los diagramas de entradas y salidas de los Apéndices F y G, existen líneas de comando que identifican estas indicaciones y señalizan a la sala de control a través de la elipse supervisora SCADA.

## Sistema de drenaje y vaciado tras mejora

Con el PLC instalado, el sistema CCMDV tiene tres opciones:

1. Automatización PLC: Prioridad, que rota en cada ciclo;
2. Automatización ya existente en el CCMDV: En caso de falla en el PLC, toma el relevo el sistema de automatización previo a la mejora. Sin embargo, no habrá bombas;
3. Activación manual: Como último recurso, en caso de accidente que involucre la automatización, el operador tiene la facultad de desplazarse hasta los pozos y activar manualmente las bombas.

Con la implementación de la automatización PLC, la CH agregó una potente redundancia, que no solo cumple su función, sino que también hace girar las bombas en cada activación, lo que aumenta significativamente la vida útil de las motobombas, ya que, como se muestra en el Basado en el apartado 3, al activar La bomba aumenta demasiado su desgaste mecánico.

## Comparación

Para analizar la eficiencia de la automatización PLC se recogieron datos del supervisor Elipse SCADA, de los meses de enero, febrero y marzo de los años 2022, cuando no existía automatización, y del año 2023, cuando ya estaba la implementación de la mejora. en la operación. . Con esto, las Figuras 16 y 17 muestran datos de supervisión de los meses 01, 02 y 03 de 2022 y 2023, respectivamente.

Hay tres ventanas, la superior se refiere a los datos del pozo de vaciado, luego del pozo de aguas abajo y finalmente del pozo de aguas arriba. Dentro de cada ventana hay tres tipos diferentes de información, la posición del interruptor selector (manual o automático), donde la señal digital 0 identifica que el PCL está en modo automático y si la señal está en 1, está en modo manual. Luego está la señal analógica de 4 a 20 mA que envía la sonda de nivel, que determina el nivel en ese pozo. Además, existe una indicación digital de todas las bombas del pozo, es decir, en el caso de aguas arriba y vaciado se identifican tres motobombas y cuatro aguas abajo. Así, con esta señal digital en el supervisor es posible identificar qué bombas están en operación, ya que la señal digital 1 muestra que la bomba está encendida, mientras que la señal 0 indica que está apagada.

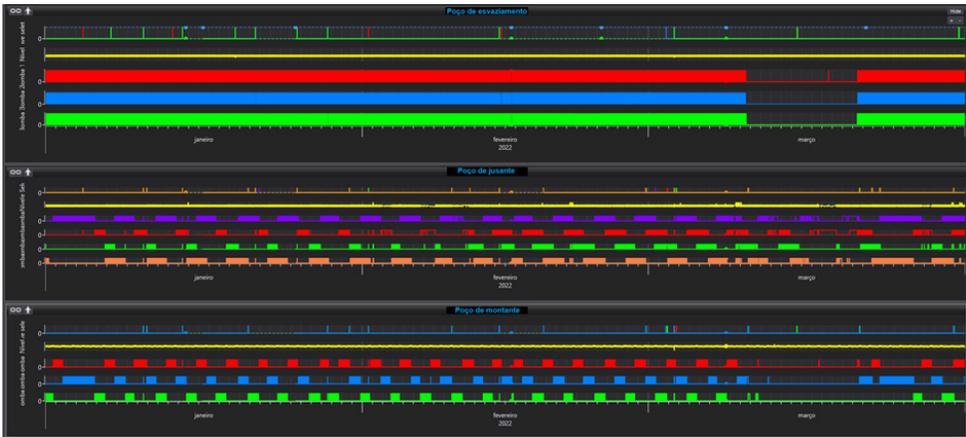


Figura 16 – Datos de supervisión de los meses 01, 02 y 03 de 2022.

Fuente: Autoría, 2024

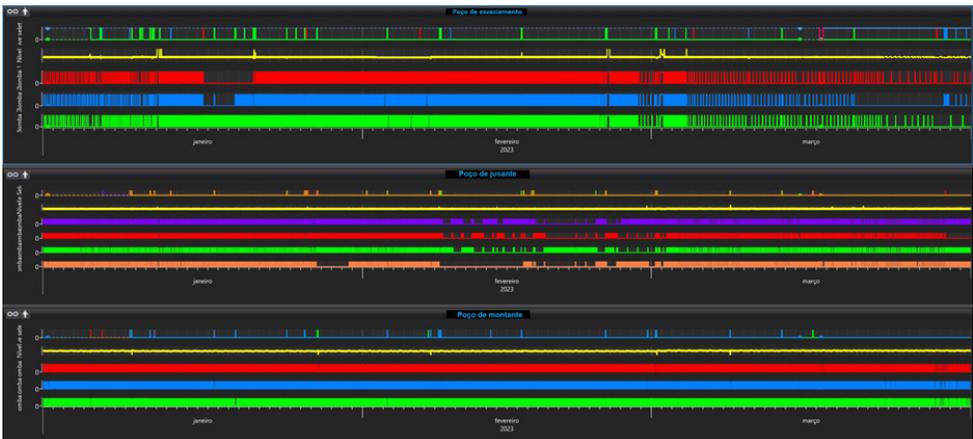


Figura 17 – Datos de supervisión de los meses 01, 02 y 03 de 2023.

Fuente: Autoría, 2024

Con los datos extraídos del sistema de supervisión es posible comparar el número de veces que se activó cada motobomba. Para una mejor visualización, en marzo se eligió el pozo aguas arriba para ampliar esta ventana y lograr una mejor comprensión y comparación. Las figuras 18 y 19 muestran con mayor detalle la diferencia de accionamientos de una misma motobomba al comparar Mar/2022 y Mar/2023.

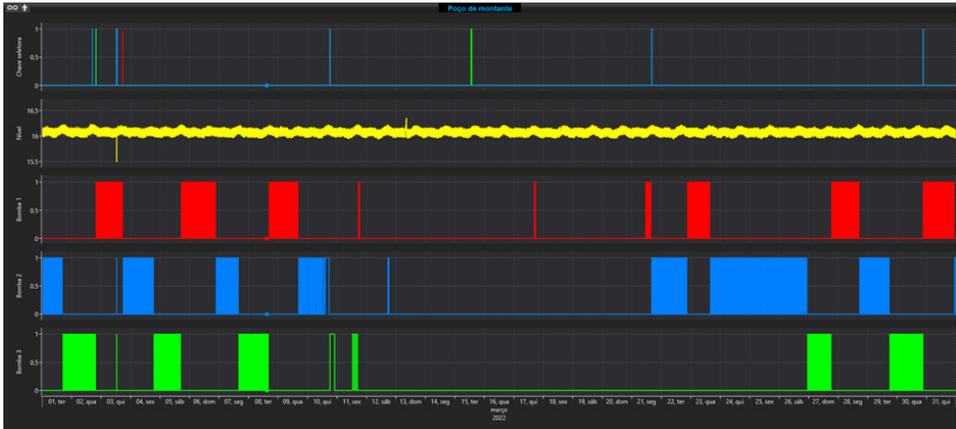


Figura 18 – Supervisión de pozos upstream, marzo de 2022.

Fuente: Autoría, 2024

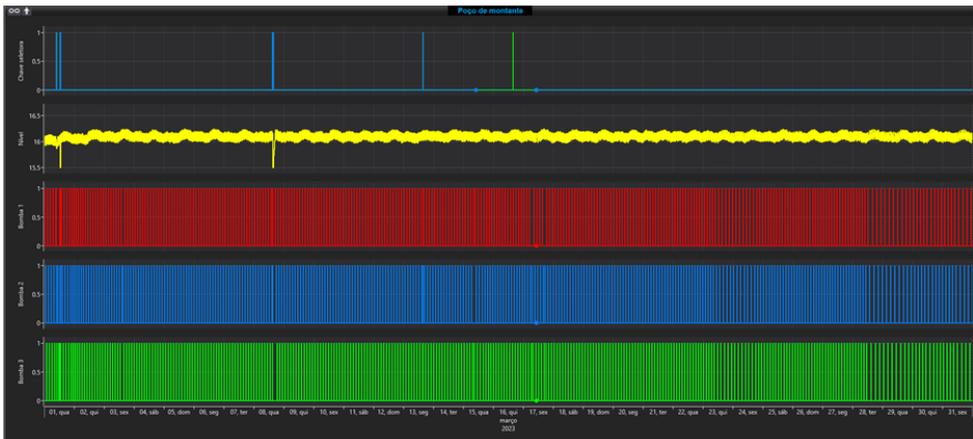


Figura 19 – Supervisión de pozos upstream, marzo de 2023.

Fuente: Autoría, 2024

Mientras que en la unidad de supervisión de la Figura 18, la bomba y la prioridad diaria cambian, en la unidad de supervisión de la Figura 19, esto ocurre cada nuevo ciclo, de acuerdo con el diagrama de bloques en el Apéndice E.

## CONCLUSIÓN

### Análisis de los datos recogidos

Los datos presentados en la Tabla 2 ilustran el número de veces que las bombas fueron activadas durante los meses de enero, febrero y marzo de los años 2022 y 2023. Este análisis permite una visualización clara de las variaciones en la frecuencia de activación de las bombas a lo largo del tiempo, destacando el cambio en la norma después de la mejora implementada.

Mês	Ano	B. J. 01	B. J. 02	B. J. 03	B. J. 04	B. M. 01	B. J. 02	B. J. 03	B. E. 01	B. E. 02	B. E. 03
JAN	2022	707	141	476	917	315	346	297	539	536	538
JAN	2023	269	373	317	233	375	373	372	350	405	586
FEV	2022	927	546	614	937	304	290	255	400	399	401
FEV	2023	343	193	369	179	341	330	333	477	474	481
MAR	2022	887	667	535	751	192	287	158	291	289	289
MAR	2023	412	239	339	256	332	333	332	135	124	127

Tabla 2 – Datos tomados del supervisor Elipse SCADA.

Fuente: Autoría, 2024

Ahora, en la Tabla 3, hay una diferencia en la activación de cada bomba, es decir, la cantidad de activación de la bomba en el año 2022 se restó de la cantidad de activación en el año 2023. Por lo tanto, los números positivos representan la reducción de activaciones y las negativas tienen una mayor activación en el año 2023.

Mês	B. J. 01	B. J. 02	B. J. 03	B. J. 04	B. M. 01	B. J. 02	B. J. 03	B. E. 01	B. E. 02	B. E. 03
DIF JAN	438	-232	159	684	-60	-27	-75	189	131	-48
DIF FEV	584	353	245	758	-37	-40	-78	-77	-75	-80
DIF MAR	475	428	196	495	-140	-46	-174	156	165	162

Tabla 3 – Diferencia de accionamientos para cada bomba.

Fuente: Autoría, 2024

### Evaluación de la eficiencia de la mejora

En primer lugar, se evalúa la cantidad de activación de la bomba por pozo. Luego, se verifica el equilibrio del accionamiento de la bomba con base en la Tabla 2. Así, finalmente, se analiza la diferencia en el accionamiento antes y después de la mejora implementada con base en la Tabla 3.

## Evaluación del pozo aguas abajo

En el pozo aguas abajo, el único que tiene cuatro motobombas, la diferencia en las activaciones de bombas en 2022 es clara, donde, por ejemplo, la bomba aguas abajo 04 entró en operación 917 veces en enero, mientras que la bomba 02 solo 141 veces. Además, lo mismo se aplica a otros meses.

En resumen, las motobombas río abajo se activaron en 2022:

- Bomba 01: 2521 activaciones;
- Bomba 02: 1354 activaciones;
- Bomba 03: 1625 actuaciones;
- Bomba 04: 2605 actuaciones.

Con estos datos se puede observar que la motobomba que sufrió mayor desgaste mecánico fue la bomba 04 con 2605 arranques, como se ve en el Apartado 3.2.1.1.1. Como resultado, la pérdida de eficiencia, calidad y posibilidad de que la bomba se detenga debido al mantenimiento correctivo es mayor en comparación con otras bombas.

Mientras que en el año 2023:

- Bomba 01: 1024 actuaciones;
- Bomba 02: 805 actuaciones;
- Bomba 03: 1025 actuaciones;
- Bomba 04: 668 actuaciones.

En 2023, la mayor activación fue la bomba 03 con 1025 operaciones (2,54 veces menor que la bomba 04 en 2022). Además se verifica el objetivo de la mejora implementada, donde el balanceo de los accionamientos de las bombas es más cercano, es decir, mientras que la diferencia entre los accionamientos más grandes y más pequeños en el año 2022 es de 1251 (BJ4 – BJ2), en el año 2023 la diferencia es sólo 357 (BJ3 – BJ4).

Por lo tanto, en 2023, según la Tabla 3, hubo 4583 activaciones menos que en 2022 en el pozo aguas abajo (suma de la diferencia de todas las bombas). En concreto, la bomba 02 tuvo más activaciones en enero de 2023, cuando ya se implementó la mejora, que en enero de 2022. En este sentido, surgen algunas razones:

1. En enero de 2022, esta bomba fue activada solo 141 veces, por lo tanto, se puede observar que esta bomba fue más favorecida por el operador, ya que el número de veces que fue prioridad fue menor en comparación con las demás;
2. La bomba 02 podría estar en mantenimiento en enero de 2023.

Con la mejora implementada, las bombas ahora giran con cada operación, por lo que las bombas dividen el esfuerzo a lo largo del día, mientras que antes del mantenimiento, una sola bomba realizaba todo el esfuerzo durante el día, desgastando más rápidamente su vida útil.

## Evaluación del pozo río arriba

Mientras que en términos de monto, tenemos datos para 2022 y 2023 respectivamente.

- Bomba 01: 811 activaciones;
- Bomba 02: 923 activaciones;
- Bomba 03: 710 actuaciones;
- Bomba 01: 1048 actuaciones;
- Bomba 02: 1036 actuaciones;
- Bomba 03: 1037 activaciones;

Si bien el número de activaciones en 2023 será mayor, debido al mayor aporte de las infiltraciones, se observa que el balance es excelente, pues la mayor diferencia en activaciones fue de 12 veces (B1 – B2), mientras que en 2022 fue de 213 ( B2-B3).

## Evaluación del pozo de vaciado

Finalmente se recogen datos de las bombas de vaciado, que ya estaban bajo la automatización de un PLC.

### **Activaciones en 2022:**

- Bomba 01: 1230 actuaciones;
- Bomba 02: 1224 actuaciones;
- Bomba 03: 1228 activaciones;

### **Activaciones en 2023:**

- Bomba 01: 962 actuaciones;
- Bomba 02: 1003 activaciones;
- Bomba 03: 1194 activaciones;

El pozo de vaciado ya contó con el PLC en el año 2022, por lo que no existen desequilibrios en los arranques de bombas. Sin embargo, ocurrió el proceso contrario esperado a partir de la implementación de la mejora, es decir, el desequilibrio en 2023 y mayor que en 2022. En este caso, la explicación y la reducción del funcionamiento de las bombas por mantenimiento. Así, cuando haya una motobomba en mantenimiento, las demás tomarán el relevo hasta que regrese, por lo que quedarán sobrecargadas.

## Reducción de riesgos operacionales

Como era de esperarse, la rotación automatizada por el PLC CCMDV incrementó el balanceo de arranques entre las bombas en operación en los pozos aguas arriba y río abajo. Además, la automatización brindó comodidad al operador, que antes necesitaba desplazarse diariamente al lugar para definir la prioridad de la bomba.

Así, con la implementación del PLC se evita el desgaste desigual y se extiende la vida útil de las motobombas, en consecuencia fallas prematuras en bombas que han sido sometidas a más activaciones por uso desigual. De esta manera, reduciendo los riesgos operacionales, ya que la vida útil de las bombas previamente sobrecargadas es la misma que las demás, se logra maximizar el tiempo de respuesta al mantenimiento correctivo, ya que ambas bombas tienen las mismas especificaciones, y con análisis predictivos es posible para determinar cuándo la motobomba debe realizar mantenimiento preventivo.

## CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo presentó la implementación y operación de la mejora mediante el Controlador Lógico Programable (CLP) en el sistema de drenaje y vaciado de una planta local. La función de este sistema es controlar el flujo de agua dentro de la casa de máquinas de la planta para que no se produzcan inundaciones en su interior y consecuentemente daños a la estructura de la planta.

Se definió una CH, destacando su sistema auxiliar, seguido de una breve discusión sobre el principio de generación eléctrica y poniendo fin a las bases de todo el sistema de drenaje y vaciado.

En el siguiente momento se analizó el escenario previo al mantenimiento, se implementó la mejora y finalmente se introdujo la mejora.

Se realizó un estudio de caso dentro de la planta de mejora implementada, con recolección de datos a través del departamento de supervisión, donde en el último capítulo se realizó una comparación de los resultados.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, donde se lograron los objetivos. Se balancearon los accionamientos de las bombas, igualando sus vidas útiles, destacando el pozo aguas abajo que al balancearse mejoró los resultados de operación en al menos 2,5 veces.

## REFERENCIAS

Alfacomp. Protocolo Modbus. 2024. Disponible em: <<https://alfacomp.net/>>. Citado na página 17.  
Automação industrial. Contator: O Que É, Como Funciona e Tipos. 2024. Disponible em: <<https://www.automacaoindustrial.info/>>. Citado na página 13.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-85-8055-207-2. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 9.

Elipse software. Soluções. 2024. Disponível em: <<https://www.elipse.com.br>>. Citado na página 20.

Elipse software. Versão 4.0 do elipse E3 otimiza a automação da Usina de ponte de pedra da Tractebel. 2024. Disponível em: <<https://www.elipse.com.br>>. Citado na página 21.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>. Citado na página 4.

ESC Engenharia. ESC, soluções de engenharia para o setor ELÉTRICO. 2023. Disponível em: <<http://esc.com.br>>. Citado na página 4.

FOROUZAN, B. A. Comunicação de dados e redes de computadores. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010. ISBN 978-85-63308-47-4. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.

GARZON, R. D. High voltage circuit breakers: Design and applications. 2. ed. New York: CRC Press, 2002. ISBN <https://doi.org/10.1201/9780203910634>. Citado na página 12.

HALLIDAY, R. Fundamentos de física. 10. ed. Porto Alegre: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016. ISBN 978-1-118-23376-4. Citado na página 5.

HIBBELER, R. C. Mecânica dos fluidos. 1. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2016. ISBN 978-85-430-1626-9. Citado na página 9.

Inductive Automation. What is SCADA? 2024. Disponível em: <<https://inductiveautomation.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

Keller. Sondas de nível: O que é, para que serve, tipos e função. 2024. Disponível em: <<https://www.kellerbr.com.br/>>. Citado na página 16.

KUROSE, J. F. e. a. Redes de computadores e a Internet. 8. ed. São Paulo: Bookman, 2021. ISBN 978-8582605585. Citado na página 17.

Ladder Logic World. Ladder Logic Programming. 2024. Disponível em: <<https://ladderlogicworld.com/>>. Citado na página 16.

LAGE, E. A indução eletromagnética. Universidade do Porto: A Casa das Ciências, 2021. Citado na página 6.

MACEDO, H. R. AUTOMACÃO DE PROCESSO DE OBTENÇÃO DE BIODIESEL EM PLANTAS DE PEQUENO PORTE, UTILIZANDO CONTROLADOR LOGICO PROGRAMAVEL. Dissertação (Mestrado) — Palmas, TO, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

MACINTYRE, A. J. Bombas e instalações de bombeamento. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2010. Citado na página 8.

MAMEDE, J. F. Manual de equipamentos elétricos. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2013. ISBN 978-85-216-2291-8. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

Mitsubishi Electric. Controladores - MITSUBICHI ELETRIC FA. 2024. Disponível em: <<https://br.mitsubishielectric.com/>>. Citado na página 14.

Modbus ONG. Modbus Protocolo Referencie Glide. 1996. Disponível em: <<https://modbus.org/>>. Citado na página 18.

Newegg. Eletrônica store. 2024. Disponível em: <<https://www.newegg.com/>>. Citado na página 19.

Novus. Controladores programáveis com IHM incorporada Família XL. 2024. Disponível em: <<https://www.novus.com.br/>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Educativo, Inc., 2010. ISBN 978-85-4301-375-6. Citado na página 12.

ONS. Operador Nacional do Sistema. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 5.

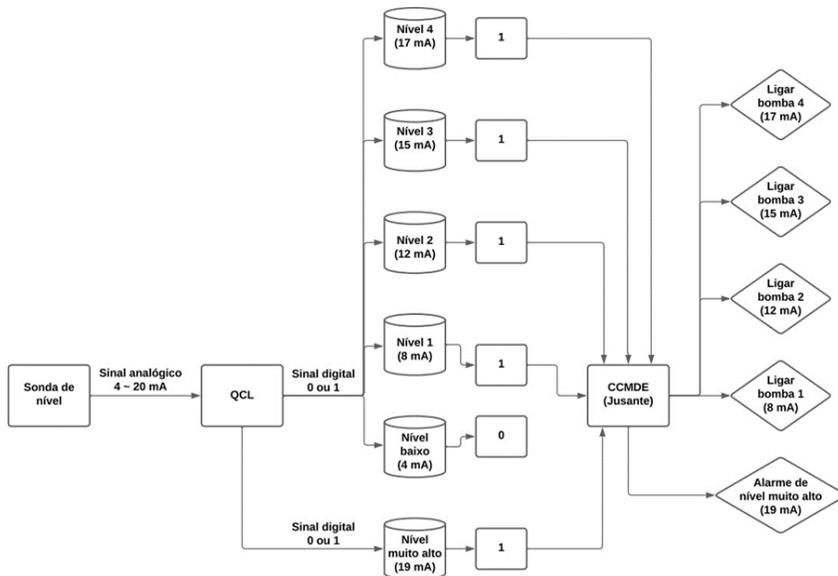
Rijeza metalúrgica. Bombas Centrífugas e Desgastes. 2024. Disponível em: <<https://rijeza.com.br/>>. Citado na página 9.

Siemens. Linha de fusíveis Siemens. 2024. Disponível em: <<https://www.siemens.com/>>. Citado na página 12.

Siemens. Monitoramento e controle com relés SIRIUS. 2024. Disponível em: <<https://www.siemens.com/>>. Citado na página 13.

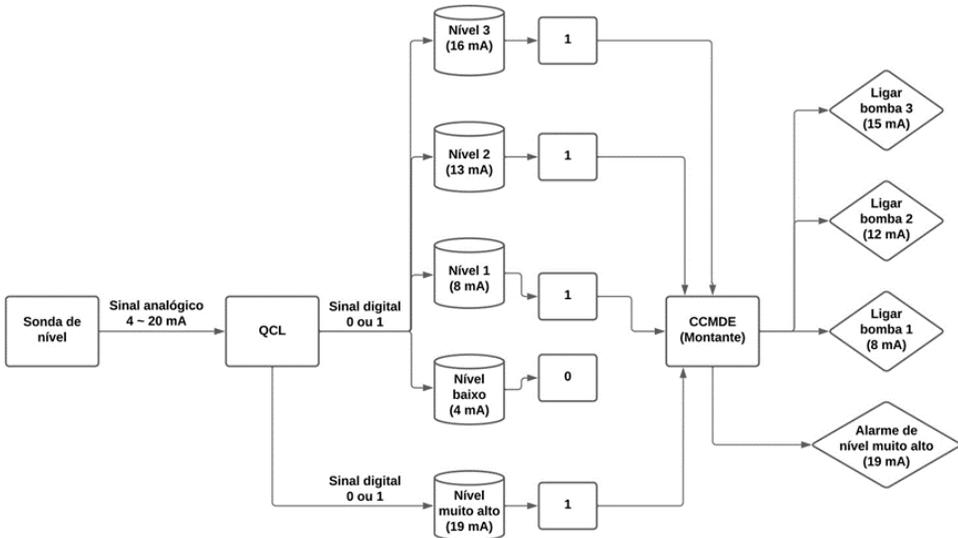
## APÉNDICES

### A - Diagrama de bloques de la operación del pozo aguas abajo antes de la mejora simplificada



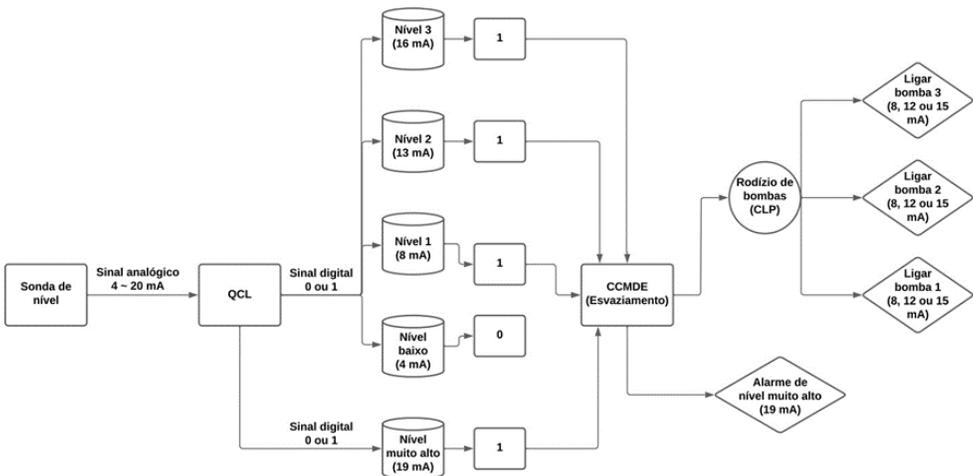
Fuente: Autoría, 2024

## B - Diagrama de bloques del funcionamiento del pozo aguas arriba antes de la mejora simplificada



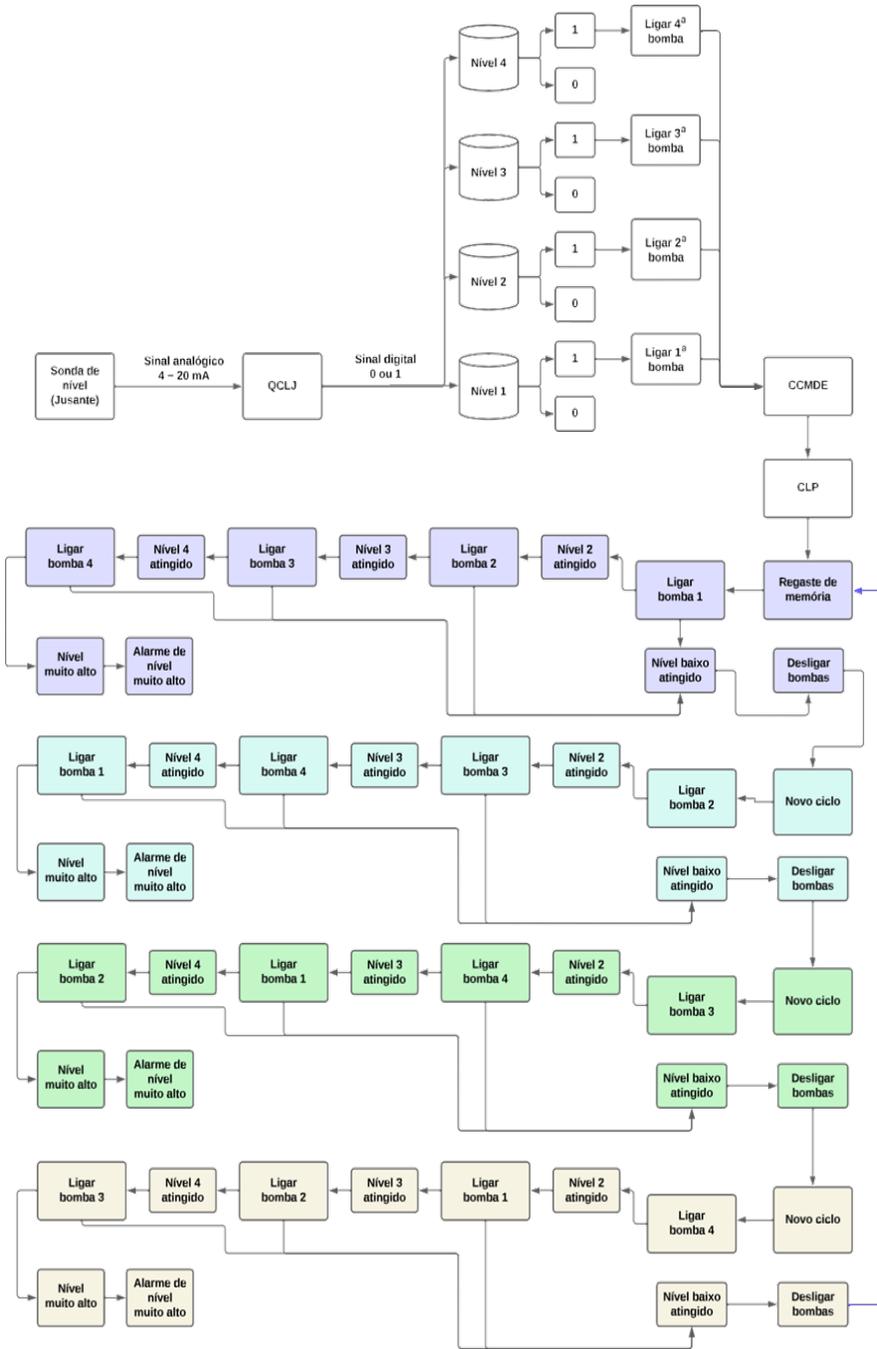
Fuente: Autoría, 2024

## C - Diagrama de bloques del funcionamiento del pozo de vaciado antes de la mejora simplificada



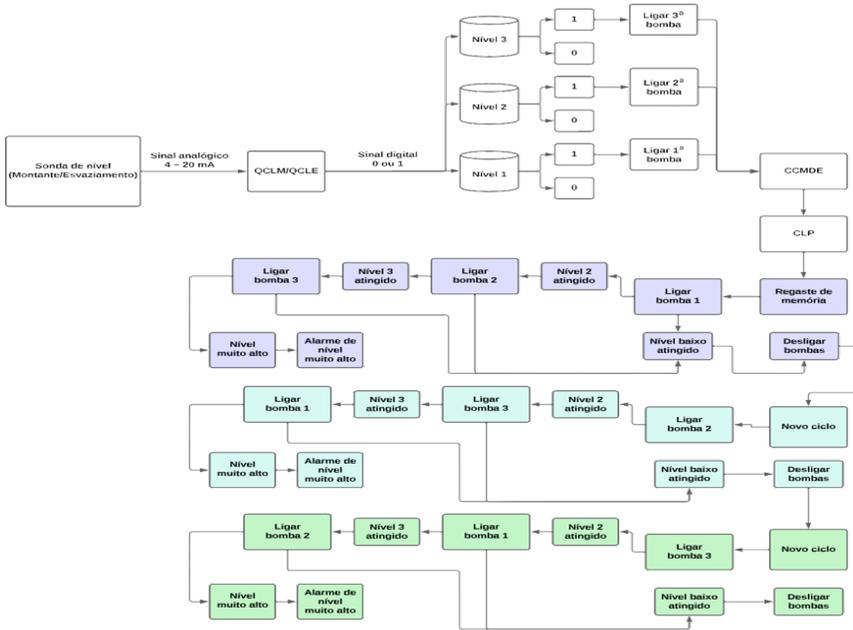
Fuente: Autoría, 2024

# D – DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA OPERACIÓN DEL POZO AGUAS ABAJO DESPUÉS DE LA MEJORA



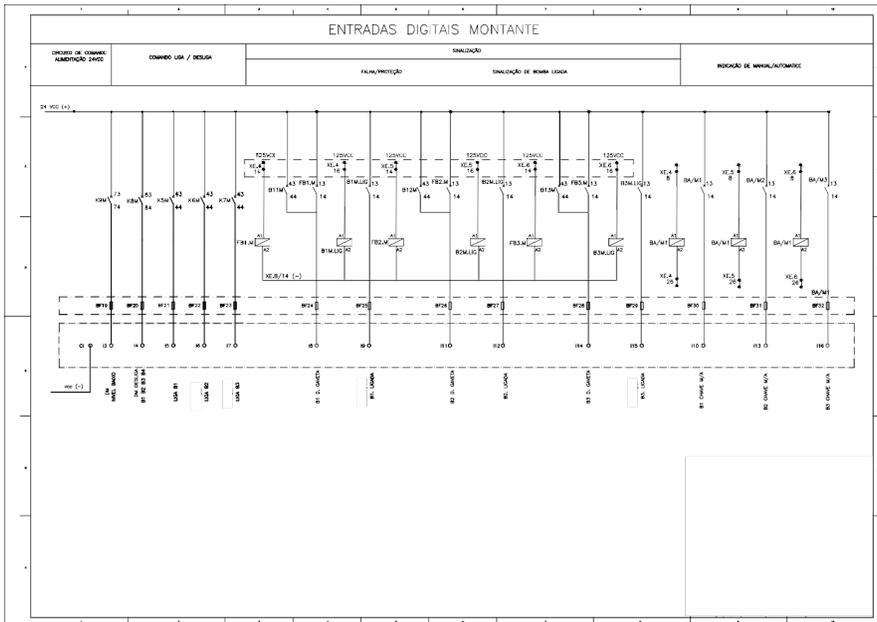
Fuente: Autoría, 2024

## E – Diagrama de bloques de la operación del pozo aguas arriba después de la mejora



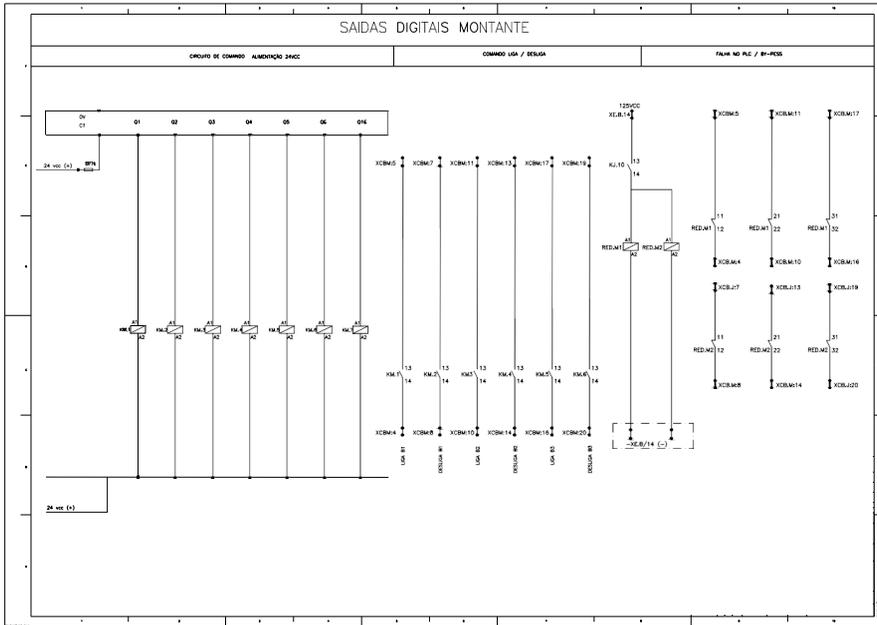
Fuente: Autoría, 2024

## F – Entradas de entrada digitales



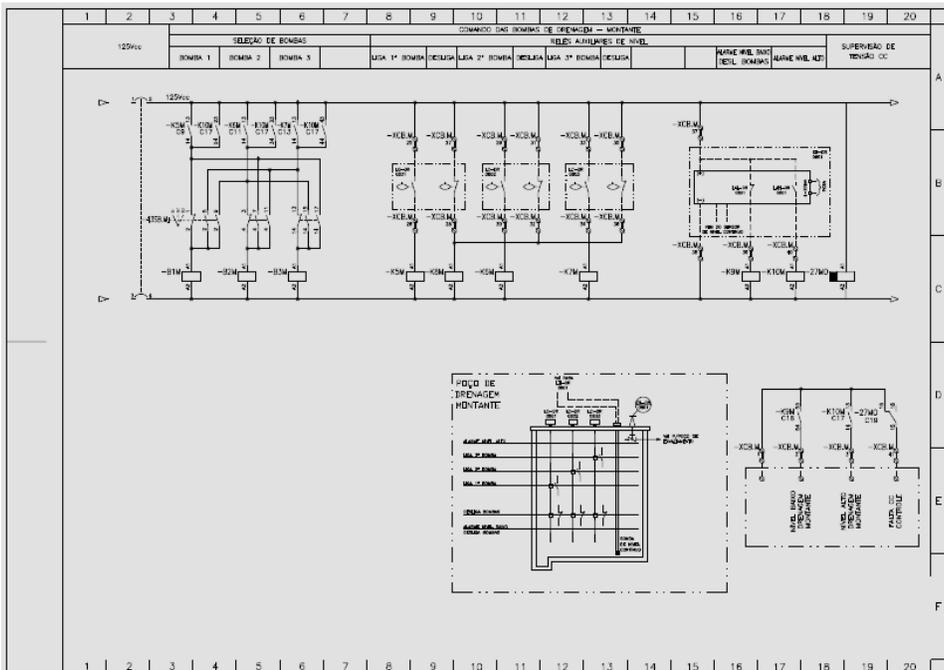
Fuente: Autoría, 2024

## G – Salidas digitales aguas arriba



Fuente: Autoría, 2024

## H – Diagrama de control de bomba aguas arriba modificado



Fuente: Autoría, 2024