

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica



**Diseño de un sistema SCADA para la automatización de la
planta de tratamiento de aguas de la empresa Cargill en San
Rafael de Alajuela**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el Grado Académico de Licenciatura

Freddy Salazar Acosta

San Carlos, I semestre 2019

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR
ACTA DE EVALUACIÓN**

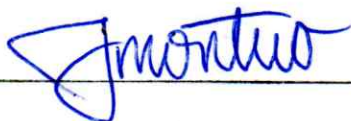
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: SALAZAR ACOSTA FREDDY

Carné: 2013116449


Nombre del Proyecto: *"Diseño de un sistema SCADA para la automatización de la planta de tratamiento de aguas de la empresa Cargill en San Rafael de Alajuela"*

Miembros del Tribunal



Ing. Juan José Montero Rodríguez

Profesor lector



Ing. Leonardo Cardinale Villalobos

Profesor lector



Ing. Pablo César Rodríguez Vargas

Profesor asesor

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

Nota Final del Proyecto de Graduación : 100

San Carlos, 18 de junio 2019

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

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

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

San Carlos, 18/06/2019



Freddy Salazar Acosta

Céd: 2-0739-0160

Resumen

En este documento se plantea la evaluación y diseño de un SCADA que logre la automatización de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Cargill. Para realizar la propuesta del diseño se consultó ante la empresa las principales necesidades que tiene la planta y que necesitan ser cubiertas. El fin de automatizar la planta es no solo que el proceso sea más eficiente y permita eliminar muchos procesos manuales, sino que también permita un mejor mantenimiento preventivo de los equipos.

El diseño se basa tanto en la parte de hardware como en el software, se plantea el diseño de un sistema completo desde sensores en la planta hasta el software de visualización en la computadora del operador que le permita controlar y supervisar la planta de forma remota. La solución planteada muestra la programación del equipo para que permita un control autónomo de la planta, además de la comunicación entre dispositivos de diferente tipo a través del protocolo Modbus TCP/IP.

El proyecto contempla el uso de distintos dispositivos tales como: motores, bombas, relés, electroválvulas, sensores de nivel, sensores de flujos, variadores de frecuencia, controladores, PLCs, entre otros. Se consideró los componentes que existen actualmente en la planta y aquellos que deben ser adquiridos para lograr el objetivo final. Mediante un estudio económico se determinó la factibilidad de llevar a implementar el sistema.

La idea del principal del proyecto es dejar el planteamiento previsto ante una eventual implementación por parte de la empresa, en caso de llevarse a cabo el SCADA diseñado se incorporará al sistema general de control y supervisión con el que planta cuenta.

Palabras clave: PLC, SCADA, Modbus TCP/IP, automatización, variadores de frecuencia.

Abstract

This document proposes the evaluation and design of a SCADA that achieves the automatization of Cargill's Residual water treatment plant. To carry out the design proposal the company was consulted about the main needs that have to be covered. The purpose of the automatization is not only to improve the efficiency of the plant but to have a better preventive maintenance of the equipment.

The design is not only based on the hardware but in the software as well, the design of a complete system is proposed from the sensors in the plant to the visualization software in the operator's computer that allows the control and supervise the plant remotely. The proposed solution shows the programming of the equipment to allow the autonomous control of the plant, in addition to the communication between devices of different types through the Modbus TCP/IP protocol.

The project contemplates the use of different devices such as: motors, pumps, relays, electro valves, level sensors, flow sensors, frequency variators, controllers, PLCs, and others. The design considered the components that currently exist in the plant and those that must be acquired to achieve the final objective. Through an economic study, the feasibility of implementing the system was determined.

The main idea of the project is to leave the design ready for an eventual implementation by the company, in case of carrying out the designed SCADA will be incorporated into the general SCADA with which the plant has.

Keywords: PLC, SCADA, Modbus TCP/IP, automatization, frequency variators.

Agradecimientos

A los empleados de Cargill, por permitirme realizar el proyecto en su empresa y detener sus labores para contestar mis dudas durante la realización del proyecto.

A mi familia y amigos, por apoyarme hasta al final y motivarme siempre a seguir adelante.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1 : Introducción..... | 10 |
| 1.1 Problema existente e importancia de su solución | 10 |
| 1.2 Solución seleccionada..... | 13 |
| Capítulo 2 : Meta y Objetivos | 16 |
| 2.1 Meta..... | 16 |
| 2.2 Objetivo general..... | 16 |
| 2.3 Objetivos específicos | 16 |
| Capítulo 3 : Marco Teórico..... | 17 |
| 3.1 Descripción del sistema a mejorar | 17 |
| 3.2 Antecedentes bibliográficos | 18 |
| 3.2.1 Programación escalera | 18 |
| 3.2.2 SCADA | 19 |
| 3.3 Principios físicos y electrónicos | 20 |
| 3.3.1 PLC | 20 |
| 3.3.2 Comunicación analógica | 22 |
| 3.3.3 Programación lógica digital | 23 |
| Capítulo 4 : Procedimiento metodológico | 26 |
| 4.1 Reconocimiento y definición del problema | 26 |
| 4.2 Obtención y análisis de la información | 27 |
| 4.3 Requerimientos | 29 |
| 4.4 Descripción de las alternativas | 31 |
| 4.4.1 Equipo de protección vs sensores de vibraciones | 31 |
| 4.4.2 Sensor de nivel vs tiempo de trabajo de paletas | 34 |
| 4.4.3 Bomba Peristáltica vs bomba diafragma..... | 39 |
| 4.4.4 Bomba #1 como bomba principal | 41 |
| 4.4.5 Motores de reluctancia vs motores actuales | 42 |
| 4.5 Evaluación y selección de las alternativas..... | 43 |
| 4.5.1 Equipo de protección vs sensores de vibraciones | 44 |
| 4.5.2 Sensor de nivel vs tiempo de trabajo de paletas | 45 |
| 4.5.3 Bomba Peristáltica vs bomba diafragma..... | 46 |
| 4.5.4 Motores de reluctancia vs motores actuales | 48 |
| Capítulo 5 : Descripción detallada de la solución | 49 |

| | |
|--|------------|
| 5.1 Descripción de Hardware | 49 |
| 5.1.1 Modicon M221..... | 49 |
| 5.1.2 Altivar 630D18N4..... | 56 |
| 5.1.3 Bomba de coagulante | 58 |
| 5.1.4 Sensores de flujo | 61 |
| 5.1.5 Zelio | 65 |
| 5.1.6 Equipo de protección EL-FI M20 | 67 |
| 5.1.7 Bomba diafragma y válvula solenoide | 70 |
| 5.1.8 Contactor bomba floculante..... | 72 |
| 5.2 Descripción del Software | 73 |
| 5.2.1 SoMachine | 73 |
| 5.2.2 SoMove | 80 |
| 5.2.3 ZelioSoft 2..... | 85 |
| 5.2.4 Ignition Scada Designer | 87 |
| Capítulo 6 : Análisis de resultados | 94 |
| Capítulo 7 : Análisis de pre-factibilidad económica | 96 |
| Capítulo 8 : Conclusiones y Recomendaciones | 99 |
| 8.1 Conclusiones..... | 99 |
| 8.2 Recomendaciones..... | 99 |
| Bibliografía..... | 100 |
| Apéndices..... | 102 |
| A.1 Glosario | 102 |
| A.2 Sección de cálculos | 105 |
| A.2.1 Tiempos de ejecución de las paletas y llenado del tanque..... | 106 |
| A.2.2 Cálculo de consumo y ahorro Bombas #1, #2, #3 | 107 |
| A.2.3 Cálculo de comparación entre peristáltica y bomba diafragma | 111 |
| A.2.4 Cálculo de ahorro en coagulante..... | 112 |
| A.2.5 Cálculo de ahorro en con el nuevo tiempo del compresor | 113 |
| A.3 Manual de usuario | 115 |
| Manual de operaciones | 115 |
| Configuración del equipo..... | 121 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Diagrama de la primera etapa de tratamiento..... | 10 |
| Figura 3.1 - Ejemplo de contactos comunes | 19 |
| Figura 3.2 - Arquitectura típica de un SCADA | 19 |
| Figura 3.3 - Diagrama básico de un PLC | 20 |
| Figura 3.4 - Arquitectura típica de un PLC | 21 |
| Figura 3.5 - Paquete de datos Modbus TCP..... | 23 |
| Figura 3.6 - Ejemplo AND | 25 |
| Figura 4.1 - Diagrama de conexión entre los equipos | 27 |
| Figura 4.2 - Sistema de sensores de vibración | 32 |
| Figura 4.3 - Diagrama de conexión Emotron | 33 |
| Figura 4.4 - Alarmas del Emotron..... | 33 |
| Figura 4.5 - Diagrama que muestra la lógica para el funcionamiento de la bomba que se plantea siguiendo el modelo del sensor de nivel. | 35 |
| Figura 4.6 - Vegapuls 64 | 36 |
| Figura 4.7 - Micropilot FMR20 | 37 |
| Figura 4.8 - Diagrama que muestra la lógica para el funcionamiento de la bomba que se plantea siguiendo el modelo de imitar tiempo de trabajo de las paletas. | 39 |
| Figura 4.9 - Grafica comparativa sobre la eficiencia en función de la potencia de los motores de reluctancia IE de siemens..... | 42 |
| Figura 4.10 - Análisis de la eficiencia para un motor de 18.5 kw. | 43 |
| Figura 4.11 - Gráfica de descarga de la bomba diafragma | 47 |
| Figura 5.1 - Modicon M221 | 50 |
| Figura 5.2 - Modulo de expansión TM3DM24R. | 51 |
| Figura 5.3 - Modulo de expansión TM3AQ4..... | 52 |
| Figura 5.4 - Modulo de expansión TM3AI8 | 53 |
| Figura 5.5 - Variador de frecuencia ATV630..... | 57 |
| Figura 5.6 - Diagrama de cableado del bloque de control | 58 |
| Figura 5.7 - Bomba de inyección de coagulante | 59 |
| Figura 5.8 - Configuración de control analógico..... | 60 |
| Figura 5.9 - Conexión eléctrica para la entrada analógica | 60 |
| Figura 5.10 - Configuración de control Externo | 61 |
| Figura 5.11 - Sensor de flujo iMAG 4700p..... | 62 |
| Figura 5.12 - Panel de conexión del sensor de flujo | 63 |
| Figura 5.13 - Panel de pines de conexión..... | 63 |
| Figura 5.14 - Diagrama de conexión para control analógico..... | 64 |
| Figura 5.15 - Conexión de salida analógica | 64 |
| Figura 5.16 - Relé inteligente Zelio SR3B261FU..... | 65 |
| Figura 5.17 - Equipo de protección EL-FI M20..... | 67 |
| Figura 5.18 - Configuración de relés para alarma y pre-alarma | 68 |
| Figura 5.19 - Diagrama de conexión del EL-FI M20 | 68 |
| Figura 5.20 - Diferentes configuraciones analógicas del EL-FI M20 | 69 |

| | |
|--|------------|
| Figura 5.21 - Configuración de porcentaje de potencia en el eje..... | 70 |
| Figura 5.22 - Bomba diafragma NDP-50FAN..... | 70 |
| Figura 5.23 - Válvula solenoide 120/110V, 1/2 pulg..... | 72 |
| Figura 5.24 - Contactor Eléctrico..... | 73 |
| Figura 5.25 - Ventana de programación SoMachine..... | 74 |
| Figura 5.26 - Ventana de configuración SoMachine..... | 74 |
| Figura 5.27 - Operadores AND lógicos..... | 75 |
| Figura 5.28 - Operadores OR lógicos..... | 76 |
| Figura 5.29 - Función de reloj SoMachine..... | 76 |
| Figura 5.30 - Lógica bomba coagulante..... | 77 |
| Figura 5.31 - Lógica bomba floculante..... | 78 |
| Figura 5.32 - Lógica flujo de los ATV630D18N4..... | 79 |
| Figura 5.33 - Lógica equipo DAF Garita..... | 80 |
| Figura 5.34 - Software SoMove..... | 81 |
| Figura 5.35 - SoMove, Panel de selección del PID..... | 82 |
| Figura 5.36 - Configuración del proceso del PID..... | 82 |
| Figura 5.37 - Configuración de referencias del PID..... | 83 |
| Figura 5.38 - Parámetros de monitoreo genérico..... | 84 |
| Figura 5.39 - Configuración de relés de salida..... | 85 |
| Figura 5.40 - Programación actual del Zelio..... | 86 |
| Figura 5.41 - Programación modificada del Zelio..... | 87 |
| Figura 5.42 - Interfaz gráfica del SCADA..... | 88 |
| Figura 5.43 - Interfaz bomba coagulante..... | 88 |
| Figura 5.44 - Dispositivos SCADA IGNITION..... | 89 |
| Figura 5.45 - Pantalla de selección del controlador..... | 89 |
| Figura 5.46 - Configuración del nuevo dispositivo..... | 90 |
| Figura 5.47 - Selección de registros del controlador..... | 90 |
| Figura 5.48 - Ventana de selección de componentes..... | 91 |
| Figura 5.49 - Ventana de etiquetas..... | 92 |
| Figura 5.50 - Buscador de etiquetas OPC..... | 92 |
| Figura 5.51 - Editor de etiquetas..... | 93 |
| Figura 6.1 - Diagrama previsto de conexión final entre los equipos..... | 95 |
| Figura A.0.1 - Tarifas eléctricas establecidas por el CNFL..... | 106 |
| Figura A.0.2 - Interfaz gráfica del SCADA..... | 115 |
| Figura A.0.3 - Bomba de coagulante. SCADA..... | 116 |
| Figura A.0.4 - Selección de coagulante. SCADA..... | 116 |
| Figura A.0.5 - Flujo de entrada de San Rafael. SCADA..... | 116 |
| Figura A.0.6 - Nivel de llenado Igualador #1. SCADA..... | 117 |
| Figura A.0.7 - Bombas de extracción. SCADA..... | 117 |
| Figura A.0.8- Flujo de entrada de DAF Garita. SCADA..... | 117 |
| Figura A.0.9 - DAF Garita. SCADA..... | 118 |
| Figura A.0.10 - Bomba diafragma. SCADA..... | 118 |
| Figura A.0.11 - Tanque de polímero. SCADA..... | 119 |
| Figura A.0.12 - Bombas de lodo A y B. SCADA..... | 119 |

| | |
|---|-----|
| Figura A.0.13 - Filtro prensa. SCADA | 120 |
| Figura A.0.14 - Paro de emergencia | 120 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1 - Compuerta AND..... | 24 |
| Tabla 3.2 - Compuerta OR | 24 |
| Tabla 3.3 - Compuerta NOT..... | 24 |
| Tabla 4.1 - Descripción de químicos utilizados para el tratamiento de agua..... | 27 |
| Tabla 4.2 - Descripción del consumo de los motores..... | 28 |
| Tabla 4.3 - Consumo total de los motores | 29 |
| Tabla 4.4 - Tarifa eléctrica establecida por CNFL | 29 |
| Tabla 4.5 - Requerimientos de la solución..... | 30 |
| Tabla 4.6 - Costo económico de implementación | 34 |
| Tabla 4.7 - Costo económico de la implementación de los sensores | 37 |
| Tabla 4.8 - Comparación de datos técnicos entre ambos sensores | 38 |
| Tabla 4.9 - Comparativa económica entre el consumo de las bombas | 40 |
| Tabla 4.10 - Ventajas y desventajas de los equipos de bombeo de lodo..... | 40 |
| Tabla 4.11 - Información de los motores actuales..... | 42 |
| Tabla 4.12 - Ventajas y desventajas de los equipos de monitoreo para los motores y bombas..... | 44 |
| Tabla 5.1 - Parámetros del M221 | 50 |
| Tabla 5.2 - Parámetros principales del TM3DM24R..... | 51 |
| Tabla 5.3 - Parámetros principales del TM3AQ4..... | 52 |
| Tabla 5.4 - Parámetros principales del TM3AI8..... | 53 |
| Tabla 5.5 - Descripción de las entradas del sistema de control | 54 |
| Tabla 5.6 - Descripción de las salidas del sistema de control..... | 54 |
| Tabla 5.7 - Descripción de las variables utilizadas en la comunicación con el SCADA .. | 55 |
| Tabla 5.8 - Datos eléctricos del ATV630D18N4 | 57 |
| Tabla 5.9 - Características de flujo..... | 62 |
| Tabla 5.10 - Parámetros del Zelio SR3B261FU | 66 |
| Tabla 5.11 - Parámetros de la bomba diafragma NDP-50FAN..... | 71 |
| Tabla 5.12 - Funciones básicas SoMachine | 75 |
| Tabla 5.13 - Configuración de referencia del PID | 83 |
| Tabla 7.1 - Desglose de la inversión necesaria..... | 97 |
| Tabla 7.2 - Desglose del ahorro esperado anualmente..... | 97 |
| Tabla 7.3 - Resultado del estudio económico..... | 98 |
| Tabla A.1 - Datos experimentales sobre llenado del tanque de lodos..... | 106 |
| Tabla A.2 - Datos eléctricos de los motores de las bombas de extracción del Igualador #1 | 107 |
| Tabla A.3 - Consumo eléctrico de las bombas de extracción del Igualador #1 | 107 |
| Tabla A.4 - Comparación de tarifas para los dos flujos más comunes | 109 |
| Tabla A.5 - Comparativa económica entre bomba peristáltica y bomba diafragma.... | 111 |
| Tabla A.6 - Ahorro producido por el nuevo periodo de trabajo del compresor | 113 |
| Tabla A.7 - Variables utilizadas en la programación del PLC | 121 |
| Tabla A.8 - Configuración del PID del ATV630D18N4..... | 123 |

Capítulo 1 : Introducción

En este capítulo se detalla el problema que existe en la planta de tratamiento y cuáles son las principales razones para encontrar la forma de solucionarlo, además de formular una propuesta de solución.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

La planta de tratamiento de aguas en San Rafael de Alajuela de la empresa Cargill tiene un diseño para tratar $3500\text{ m}^3/\text{día}$, sin embargo se trabaja con un promedio de $150\text{ m}^3/\text{día}$, con picos de un máximo de $250\text{-}300\text{ m}^3/\text{día}$. (SAUBER, 2016). La Figura 1.1 - **Diagrama de la primera etapa de tratamiento** muestra el flujo de la primera etapa de la planta, el cual se detalla a continuación.

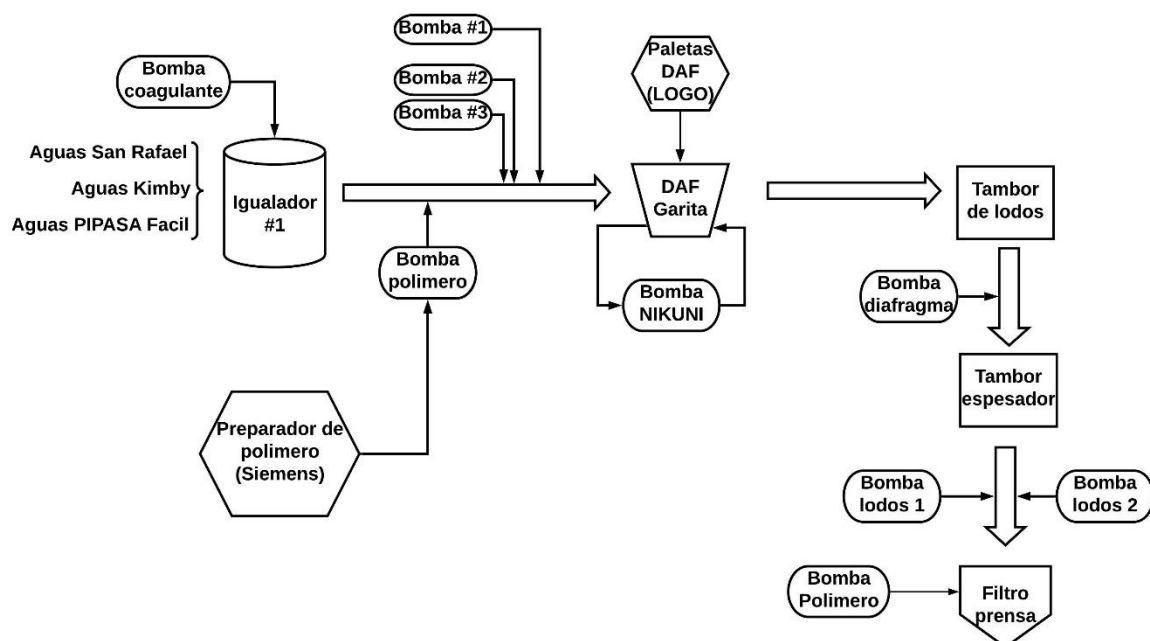


Figura 1.1 - Diagrama de la primera etapa de tratamiento

Fuente: Elaboración propia

La planta recibe las aguas residuales industriales de la planta de procesamiento de aves de San Rafael (generadas por matanza de pollos), de la planta Kimby (embutidos) y de la planta de Pipasa Fácil (pollo pre hecho) en el Igualador #1; actualmente únicamente la entrada de San Rafael cuenta con un sensor de flujo por lo que las otras dos entradas se encuentran “a ciegas” en cuanto a la cantidad de agua que ingresa. La planta es administrada por la empresa sub contratada SAUBER, especializada en plantas de tratamiento de aguas residuales.

A la tubería de San Rafael se le inyecta un coagulante con el fin de que los sólidos empiecen a agruparse; la cantidad de coagulante es regulada de forma manual dependiendo de la hora y el flujo de entrada por el técnico encargado de la planta, este hecho significa que el mismo debe desplazarse desde su oficina hasta la bomba para poder realizar el ajuste varias veces al día y además en algunos casos se presenta la inyección de químico cuando no existe un flujo por lo que se da un desperdicio del polímero.

Para extraer el agua de la primera pileta (Igualador #1), se utilizan tres bombas de manera separada dependiendo del nivel de líquido que se desea mantener, el cual es de aproximadamente entre el 15%-30%. Por lo general se activa la bomba #2 y se deja la bomba #3 como respaldo; si el nivel del agua continúa aumentando hasta aproximadamente el 60% de la capacidad del tanque, entendiéndose que sobrepasa la capacidad de extracción de agua de la bomba activa, se desactiva la bomba que se encuentre en funcionamiento y manualmente se activa la bomba #1, la cual es de una muy alta capacidad en comparación con las otras dos. Actualmente debido a un problema de arranque al activarse la bomba #2 se enciende la bomba #3 de manera simultánea por lo que esta última se debe desconectar una manualmente; de la misma manera el proceso de activación de la bomba #1 y la consiguiente desactivación de la bomba #2 o #3 se realiza de forma manual por los operarios que se encuentran en la planta. Las bombas además de esto son reguladas de manera manual con una llave de paso que regula el flujo de agua, esto genera que las bombas no trabajen de manera eficiente.

Mediante las tres bombas mencionadas anteriormente se transporta el agua hasta la Unidad de Flotación por Aire disuelto (DAF por su nombre en inglés) Garita; justo antes de que las aguas lleguen al DAF Garita se le inyecta mediante una bomba, un polímero de químicos floculantes previamente preparado que permite separar las grasas, sólidos suspendidos y parte de la carga orgánica del líquido con mayor facilidad. Este sistema de polímero funciona en dos partes, la primera es la preparación del producto para lo cual se utiliza un variador de frecuencia que

modifica la concentración de químico a lo largo del día de acuerdo con las necesidades; la segunda parte es la inyección del floculante a tubería de agua que se realiza mediante la bomba de inyección; el accionar de ambas partes se realizan manualmente. Esta introducción de químico sufre el mismo problema que el de la bomba de coagulante: existe un desperdicio de producto ya que en ocasiones se inyecta cuando en la tubería que conecta el Igualador #1 y el DAF Garita no existe un flujo de agua.

Mediante la bomba de marca Nikuni se impulsa el producto acuoso al DAF Garita. Esta bomba se utiliza para rotar el agua del DAF, es decir toma el agua dentro de la unidad de flotación, la extrae y la vuelve a meter a DAF solo que esta vez le agrega aire con el fin de facilitar la acumulación de materia orgánica.

Los sólidos que se forman dentro del DAF Garita emergen a la superficie y son empujados mediante un sistema de paletas hacia el contenedor de lodos que se ubica al final del tanque con el fin de deshidratar los lodos removidos y transportarlos a la filtro prensa. Estas paletas actúan de forma continua y únicamente pueden ser detenidas si el DAF es apagado por completo mediante un actuador manual, por lo que según lo comentado por el técnico de SAUBER, el químico no tiene el suficiente tiempo para actuar en los sólidos y por ende se da un desperdicio.

Los lodos son trasladados del contenedor especificado anteriormente a uno nuevo mediante una bomba de tipo diafragma especializada para sólidos, esta bomba funciona mediante una entrada de aire comprimido que se regula mediante una válvula manual para alcanzar la presión deseada.

Seguido, los lodos son movilizados nuevamente mediante dos bombas que se alternan entre ellas hasta la filtro-prensa para ser tratados. Existe una bomba peristáltica que se encuentra dañada actualmente la cual tiene la capacidad para realizar la tarea de movilizar los lodos.

El proceso de mantenimiento que se realiza actualmente se realiza mediante la contratación de una empresa que llega a tomar mediciones de los equipos, por lo que el mantenimiento preventivo se realiza con cierta periodicidad y la información del estado del equipo no está disponible en todo momento.

El principal problema que existe en la planta de tratamiento es que varios de los procesos esenciales para un funcionamiento eficaz son manuales; esto significa que la reacción ante un evento dado (por ejemplo cortar la inyección de químico cuando no hay flujo de agua en la tubería) no se dé en un periodo de tiempo óptimo.

1.2 Solución seleccionada

Seguidamente se describe brevemente la solución que se planteó para solventar el problema presentado en el apartado 1.1. A continuación se expresan los puntos críticos que las personas encargadas de la empresa han definido cruciales.

- Automatización de las bombas de extracción de agua #1, #2 y #3 del igualador #1.
- Control remoto y diferentes opciones de los tiempos de trabajo de las paletas del DAF Garita.
- Control remoto y regulación de la bomba de inyección de coagulante que se conecta con la entrada de agua de San Rafael.
- Apague y encendido de las bombas de inyección de químicos cuando no exista flujo de agua.
- Monitoreo y control de las variables de forma remota. (ejemplo: flujos de agua, equipo activo...)
- Medición de datos de los motores en línea para lograr un mantenimiento correcto y mejorar la protección a estos.
- Registro de la información de las variables en una base de datos.
- Medición de la viscosidad del tambor de lodos de la etapa 2 para evitar manipulación humana.
- Automatización de la bomba de extracción de lodos así como la reparación de la bomba peristáltica con el fin de sustituir la bomba diafragma.

Para solventar las necesidades de la empresa se diseña un SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) que tome en consideración todos los requerimientos mencionados. En manera de resumen, se desea cambiar la forma de accionar las bombas, en lugar de que el nivel del Igualador #1 determine la bomba que se debe poner en funcionamiento, se pretende que el operador pueda ingresar el flujo de agua que se le suministra al DAF y a partir de ello se regule el accionar de las bombas mediante variadores de frecuencia de manera que permita alcanzar el flujo deseado.

El operador de SAUBER podrá manipular el porcentaje de trabajo de la bomba de inyección de coagulante de manera remota, esto se hace actualmente de manera manual y se realiza para controlar la cantidad de químico que se inyecta en la entrada de agua del San Rafael (Pipasa) al Igualador #1. De manera similar el operador podrá controlar la frecuencia de trabajo del sistema de preparación e inyección de polímero, así como su encendido y apagado, se recuerda que este sistema de polímero es diferente al coagulante a pesar de que tienen una función similar, este polímero se inyecta al flujo de agua justo antes de entrar al DAF.

Luego del DAF, el material sólido (lodos) es depositado en un tanque al cual se le colocara un sensor de nivel que permitirá activar o desactivar la electroválvula (por adquirir) de la bomba tipo diafragma, que envía el lodo a un tanque para espesarlo, con el fin de que solo funcione en ciertos momentos determinados por el operario estableciendo un valor de porcentaje de llenado del tanque.

Se planea adquirir y colocar sensores de vibración en las bombas eléctricas con el objetivo de poder medir, mostrar y crear un registro de las mismas, con el fin de poder realizar un mantenimiento preventivo ideal. De igual manera se coloca un sensor de viscosidad en el tanque de lodos secundario con el fin de realizar un monitoreo remoto y evitar accidentes de atrapamiento debido al chequeo presencial de los lodos.

Actualmente existe una pequeña parte de la planta que esta automatizada, específicamente la alarma de nivel del igualador 1, y las bombas de lodo, así como el control de bomba peristáltica, por lo que se plantea absorber esta programación y modificarla para que se complemente con el diseño final, además de realizar la reparación de la bomba peristáltica.

En el mes de marzo del 2019 la empresa adquirió un sistema SCADA para la planta en general, sin embargo dicho sistema no contemplaba la planta de tratamiento de aguas por lo que se espera que la solución propuesta se incorpore a dicho SCADA.

Capítulo 2 : Meta y Objetivos

2.1 Meta

Disponer de un sistema de supervisión, control y adquisición de datos para las variables que operan en la planta de tratamiento de aguas del complejo de San Rafael de la empresa Cargill con el fin de que la misma aumente su eficiencia, disminuya el desperdicio y cuente con un plan de mantenimiento preventivo más efectivo.

2.2 Objetivo general

Diseñar una plataforma de supervisión, control y adquisición de datos para la planta de tratamiento de aguas del complejo de San Rafael de la empresa Cargill que optimice el proceso actual.

2.3 Objetivos específicos

- Diseñar la configuración del hardware que satisfaga las necesidades de la planta considerando el equipo existente.
- Diseñar una interfaz gráfica para el SCADA, que sea intuitiva y donde se muestren los parámetros que deben ser controlados para el manejo eficiente de la planta.
- Realizar un estudio de prefactibilidad de la implementación de un sistema SCADA en la empresa Cargill en relación al costo-beneficio.

Capítulo 3 : Marco Teórico

En este capítulo se describe el sistema que se va a mejorar; además de esto se hace un repaso bibliográfico sobre los principales elementos que se deben entender para poder llevar a cabo la solución planteada.

3.1 Descripción del sistema a mejorar

La primera etapa de la planta de tratamiento de aguas funciona de manera manual con excepción de una pequeña parte, esta pequeña parte consiste en un sensor de nivel colocado en el igualador uno que alerta de la capacidad del tanque y el arranque de la bomba #2 y bomba #3.

El sistema que ya se encuentra automatizado incluye la filtro prensa, la bomba peristáltica, las bombas de lodo A y B, el preparador de polímero de la filtro prensa y las señales de alerta sobre el nivel del Igualador #1.

Para extraer el agua del Igualador #1 e inyectarlo en el DAF, se utiliza un sistema de tres bombas donde la bomba #1 se activa únicamente cuando el nivel del Igualador #1 es superior al 60% (debido a que es un proceso manual el momento en el que se active puede variar). La bomba 2 y 3, se rotan para extraer el agua cuando el nivel del Igualador se encuentre entre el 15% y el 60%, ambas tienen un modo de arranque automatizado mediante un sistema de arranque y paro con contactores en el PLC, pero para activar la bomba número uno se debe de hacer de forma manual, desconectando la bomba 2 o 3 primero.

El sistema de polímero se divide en dos partes: la preparación y la inyección. La primera se realiza mediante una bomba que se encuentra activa indiferentemente del flujo de agua que entra al DAF y se detiene únicamente cuando el operario presiona el botón de apagado, de igual manera para encender. La preparación se realiza mediante el sistema de control generado por un relé inteligente S7-1200 que posee un variador de frecuencia, el cual es un punto clave para la solución del proyecto.

El agua cruda inyectada con el polímero es insertada en el DAF donde se realiza un proceso químico solidifica y une las partículas de grasas y aceites para generar solidos que floten, estos solidos son empujados por un sistema de paletas hasta el final del contenedor donde caen a otro con el fin de separar los mismos del líquido.

Los lodos de este contenedor son transportados inmediatamente hacia un tanque acondicionador mediante una bomba de tipo diafragma, la cual funciona de forma continua sin importar la cantidad de lodo que haya, para evitar que trabaje de manera poco eficiente los operadores accionan una válvula con el fin de que trabaje a menor o mayor capacidad. En este tanque acondicionador se le inyecta una solución con un polímero a fin de que los lodos sean tratados para aumentar su espesor y seguidamente dos bombas, que se alternan entre ellas, transportan el mismo hasta la filtro prensa.

3.2 Antecedentes bibliográficos

A continuación, se describen los métodos existentes utilizados para llevar a cabo el desarrollo de la solución.

3.2.1 Programación escalera

La manera más sencilla de realizar la programación de un PLC es mediante escalera, esto porque es una manera visual de configurar la estructura. El programa de escalera es la representación en forma de diagrama de la programación en el que se utiliza la lógica booleana mediante contactos eléctricos (Martinez, 2002).

“Los elementos básicos que configuran la función se representa entre dos líneas verticales que simbolizan las líneas de alimentación” (Martinez, 2002). Estos elementos básicos se conocen como contactos y cada uno posee una representación visual única, la Figura 3.1 - *Ejemplo de contactos comunes* muestra un ejemplo de estos elementos. El esquema se lee de izquierda a derecha y de arriba abajo, sin embargo todas las líneas se ejecutan simultáneamente.



Figura 3.1 - Ejemplo de contactos comunes

Fuente: Martínez, P. A. (2002). *Programación de PLC's*. Nuevo Leon: Universidad Autónoma de Nuevo Leon.

Al ser una programación lógica se pueden configurar los elementos para que sigan una secuencia en serie o en paralelo y que estos sigan un comportamiento lógico, es decir se pueden utilizar parámetros como AND, OR, XOR, entre otros.

3.2.2 SCADA

SCADA es el nombre que proviene de Supervisión, Control, y Adquisición de Datos por sus siglas en inglés (Supervisory Control And Data Acquisition), sin embargo, no es tanto un sistema de control sino que se enfoca más en el área de supervisión. El SCADA es puramente un software que se posiciona sobre un elemento de hardware que es interferido por lo general vía Controladores Lógicos Programables (PLCs) o cualquier otro módulo de hardware comercial (Daneels & Salter, 1999).

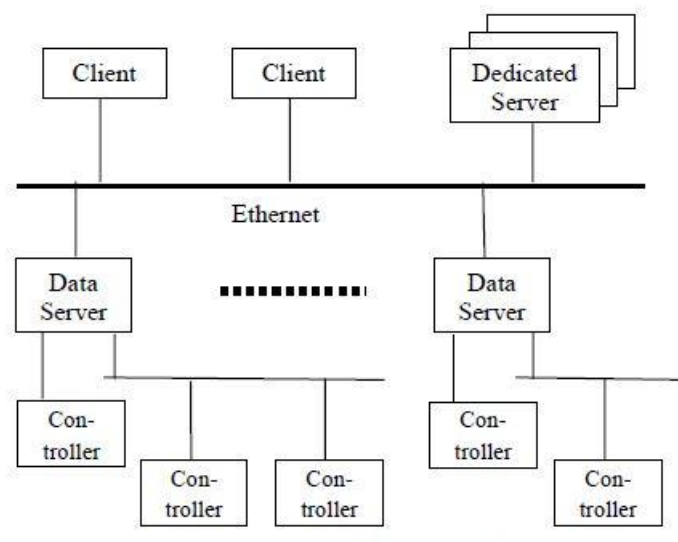


Figura 3.2 - Arquitectura típica de un SCADA

Fuente: Daneels, A., & Salter, W. (1999). *What is SCADA?* Geneva: CERN

La Figura 3.2 - *Arquitectura típica de un SCADA* muestra la arquitectura típica de un sistema SCADA. El Sistema SCADA se compone de una capa cliente donde se realiza la interacción humana-máquina y la capa de servidor de datos que maneja la mayoría de procesos de datos de control de actividades. Los servidores se comunican con los dispositivos de campo mediante los controladores de procesos como por ejemplo los PLCs, los cuales se comunican ya sea directamente o mediante redes o buses de campo. (Daneels & Salter, 1999).

3.3 Principios físicos y electrónicos

3.3.1 PLC

Un PLC es una forma especial de controlador basado en un microprocesador que usa una memoria programable para almacenar instrucciones y para implementar funciones lógicas, secuenciales, de tiempo, de conteo y aritméticas en orden de controlar máquinas y procesos (Bolton, 2015). El controlador recibe las entradas y determina las salidas según sea su programación, un esquema básico del PLC se aprecia en la Figura 3.3 - *Diagrama básico de un PLC*.

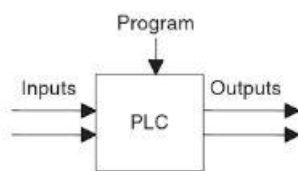


Figura 3.3 - Diagrama básico de un PLC

Fuente: Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers*. Oxford: Elsevier

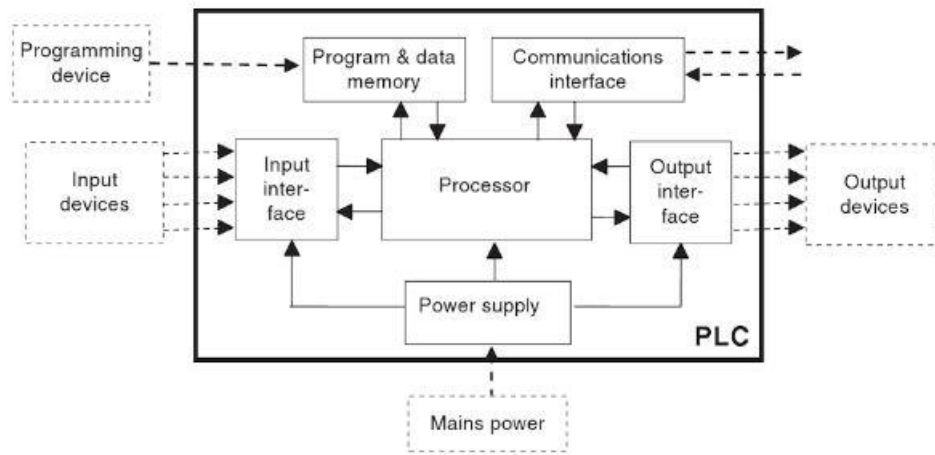


Figura 3.4 - Arquitectura típica de un PLC

Fuente: Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers*. Oxford: Elsevier

La Figura 3.4 muestra la arquitectura básica que tienen los PLC's la cual se compone por elementos externos e internos, entre los externos se tiene:

- Dispositivos de entrada
- Dispositivos de salida
- Alimentación principal
- Dispositivo de programación.

Los elementos internos son:

- Interface de entrada
- Interface de salida
- Interface de comunicación
- Memoria de programa y datos
- Alimentación
- Procesador

Los dispositivos de entrada por lo general son sensores que se utilizan para monitorear procesos o variables que necesitan ser supervisados o controlados. Existen dos tipos de sensores: analógicos y digitales, los digitales pueden ser conectados fácilmente al PLC ya que por lo únicamente presentan dos estados (True, False), mientras que los analógicos deben de realizar

una conversión entre el rango de lectura del dispositivo (el sensor) y el rango de la señal de salida.

Por lo general los puertos de salida de los PLCs son relés que activan los actuadores los cuales son los encargados de controlar los procesos (Bolton, 2015). Estos relés se comportan como una salida digital, sin embargo algunos de los PLCs también tienen la capacidad tener puertos de salida analógicas, cuyo funcionamiento es igual a las entradas analógicas solo que en este caso la conversión de señales se da de manera inversa.

3.3.2 Comunicación analógica

En el caso de las entradas y salidas analógicas se utilizan diferentes maneras de manejar los datos: Analógico, Protocolo Hart, Modbus TCP/IP. En el caso analógico se manejan voltajes entre -10V y 10V y corrientes de 0 a 20mA o de 4mA a 20mA.

El protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer) es el estándar global para enviar y recibir información digital a través de cables analógicos entre dispositivos inteligentes y sistemas de control o supervisión. Este protocolo es conocido en la industria por el envío estándar de señales digitales a través de instrumentación de comunicación inteligente de 4mA a 20mA. (United States of America Patent No. US9281978B1, 2014).

Modbus TCP/IP es un protocolo de comunicación que se utiliza para transmisiones mediante Ethernet. Sus siglas significan Protocolo de Transmisión de Control (Transmission Control Protocol) y Protocolo de Internet (Internet Protocol). De manera simple el TCP/IP permite que bloques de datos binarios sean intercambiados entre computadoras (Acromag Incorporated, 2005).

La función principal del TCP es asegurar que todos los paquetes de datos son recibidos de forma correcta, mientras que IP se asegura que los mensajes son dirigidos y enrutados correctamente (Acromag Incorporated, 2005). La combinación TCP/IP es meramente un protocolo de transporte y no define lo que la información significa o cómo es interpretada; en

resumen, Modbus TCP/IP utiliza TCP/IP y Ethernet para transportar los datos del mensaje de Modbus entre dispositivos compatibles (Acromag Incorporated, 2005).

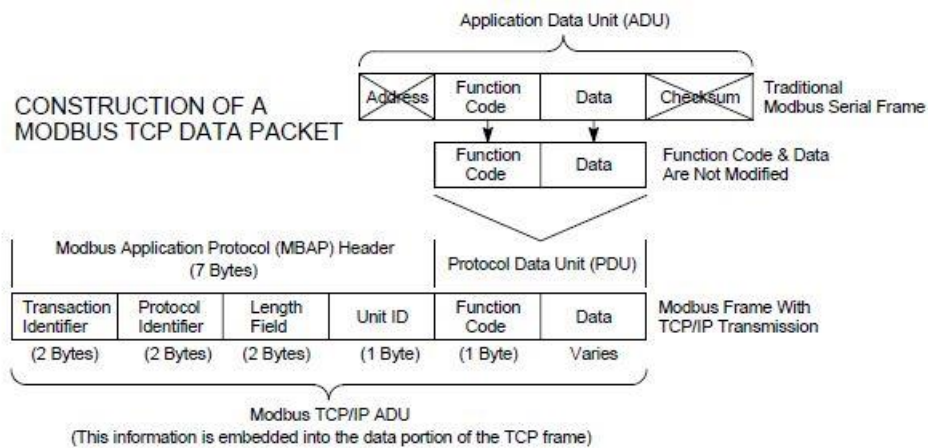


Figura 3.5 - Paquete de datos Modbus TCP

Fuente: Acromag Incorporated. (2005). *Introduction to Modbus TCP/IP*. Wixom: Acromag

La Figura 3.5 muestra la configuración de Bytes que posee un paquete de datos tipo Modbus TCP.

- Transaction Identifier: Se utiliza como identificación cuando múltiples mensajes son enviados a través de la misma conexión TCP de un cliente sin esperar por una respuesta primero.
- Protocol Identifier: Siempre es 0 para servicios Modbus.
- Length Field: Determina los bytes restantes del mensaje
- Unit ID: Se utiliza para identificar servers remotos localizados en redes que no son TCP/IP.

3.3.3 Programación lógica digital

La programación interna del PLC se realiza siguiendo una lógica digital. Los dispositivos lógicos más básicos son llamados compuerta y negados. (Wakerly, 1999). Las compuertas más utilizadas y más importantes son la AND (Tabla 3.1), OR (Tabla 3.2) y NOT (Tabla 3.3).

Tabla 3.1 - Compuerta AND

| Entrada 1 | Entrada 2 | Salida |
|-----------|-----------|--------|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2 - Compuerta OR

| Entrada 1 | Entrada 2 | Salida |
|-----------|-----------|--------|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 - Compuerta NOT

| Entrada | Salida |
|---------|--------|
| 1 | 0 |
| 0 | 1 |

Fuente: Elaboración propia

El uso de este tipo de elementos permite realizar operaciones a partir de entradas mediante múltiples configuraciones. A la hora de realizar la programación del PLC se debe indicar que se espera en la salida cuando ciertas entradas se encuentran activas, esto se lleva a cabo mediante compuertas internas que siguen la lógica digital.

La programación por diagrama de contactos (escalera) es un lenguaje que utiliza una combinación de símbolos (registros, entradas, bobinas, entre otras cosas) que siguen un comportamiento lógico como el mostrado en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3. A modo de ejemplo, la Figura 3.6 corresponde a parte de una programación de un PLC, en este caso existe el comportamiento de una compuerta AND ya que la salida Q0.0 solo estará activa (1 lógico) cuando los bit de memoria M80 y M81 estén ambos activos (1 lógico), y estará apagada (0 lógico) cuando al menos uno de los bits no este activo (0 lógico) tal y como sucede en la tabla 3.1.



Figura 3.6 - Ejemplo AND

Fuente: SoMachine. Elaboración propia

Capítulo 4 : Procedimiento metodológico

Este capítulo consiste en utilizar el problema definido y la información obtenida en la empresa para definir las diferentes alternativas de solución que se pueden llevar a cabo eventualmente y lograr la selección de las mejores opciones para la realización de los objetivos utilizando criterios fundamentados.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

La planta de tratamiento de agua cuenta con varios equipos que deben de ser accionados de manera manual y debido a que sólo aquellos encargados que estén preparados para la tarea (capacitados en manejo de equipo eléctrico, mecánico, entre otros) pueden modificar los equipos hace que la planta no trabaje de forma eficiente, un ejemplo de esto es la falta de sincronización que existe entre los equipos que forma que en algunos casos se genere un desperdicio de los químicos utilizados, como en el caso en el que se sigue inyectando floculante aun cuando no existe un flujo de agua en la entrada del DAF.

En la Figura 4.1 se pueden observar los diferentes equipos con los que la planta de tratamientos cuenta, en esta figura se aprecian flechas azules (salidas del PLC) y flechas rojas (entradas del PLC) que indican la conectividad que existe, aquellos dispositivos que no poseen flechas, es decir se encuentran sueltos en el diagrama, es porque se operan de manera manual y no existe ningún tipo de conexión entre ellos y el dispositivo de control PLC.

Un problema que existe en la planta es que, al no existir una forma de monitoreo remoto, cada vez que se necesita verificar el estado de algún parámetro se debe de caminar hasta el equipo y revisarlo en persona, lo que implica la posibilidad de que haya una lectura incorrecta debido a un error humano. A parte de realizar una medición de manera manual el dato obtenido se registra en hoja de papel y se archiva de forma “suelta” junto a las demás mediciones pasadas, esto ha generado que en algunas ocasiones se pierdan datos que se han registrado.

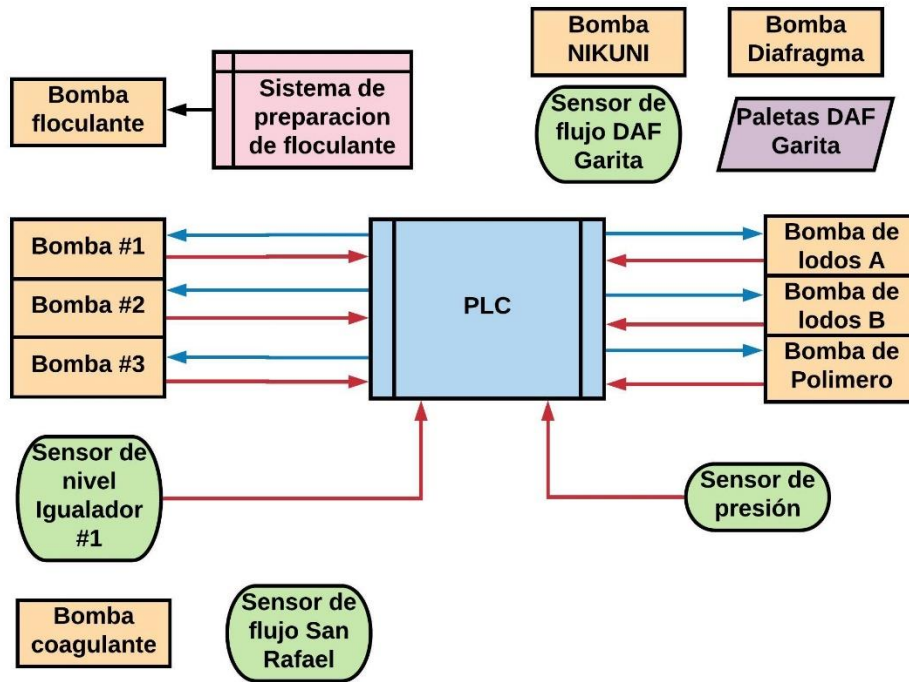


Figura 4.1 - Diagrama de conexión entre los equipos

4.2 Obtención y análisis de la información

La información que se muestra a continuación, la cual es obtenida mediante el departamento administrativo de la planta y por los datos de los equipos, se considera relevante para la realización de los cálculos que permitan analizar la viabilidad de las alternativas de solución que se detallan más adelante.

La Tabla 4.1 muestra el precio por unidad y en total de los químicos que se utilizan en la primera etapa de tratamiento de la planta de tratamiento de aguas, los químicos que se utilizan son descritos por los trabajadores de SAUBER quienes son los encargados de manejar la planta mientras que los datos de los precios son provistos por el departamento administrativo de la empresa CARGILL.

Tabla 4.1 - Descripción de químicos utilizados para el tratamiento de agua

| Cantidad | Descripción del artículo | Precio por unidad | Total |
|----------|--------------------------|-------------------|-------------|
| 1500 Kg | Floculante SWF-4000 | € 4390,70 | € 6 586 050 |

| | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|-----------|-------------|
| 4 Unidades (4400kg)(4000L) | Coagulante SWC-5000 | € 952 538 | € 2 610 152 |
| 900 Kg | Floculante SWF-8000 | € 3311 | € 2 979 900 |
| 125 Kg | Coagulante acondicionador SWC-1585C | € 2622 | € 327 750 |

Fuente: Departamento administrativo de la empresa Cargill, complejo San Rafael

La información que se puede observar en la Tabla 4.2 (potencia, eficiencia, voltaje, amperaje y el factor de potencia) son datos extraídos de las placas de los motores, el cálculo del consumo de cada equipo se puede observar en la sección de cálculos en el punto A.2.2 Cálculo de consumo y ahorro Bombas #1, #2, #3 del apéndice.

Tabla 4.2 - Descripción del consumo de los motores

| Nombre | Potencia (KW) | Eficiencia | Voltaje (V) | Amperaje (A) | P.F. | Consumo (W/H) |
|--------------------|---------------|------------|-------------|--------------|-------|---------------|
| Motor Bomba #1 | 18.5 | 93.6 | 460 | 29.1 | 0.85 | 19 707 |
| Motor Bomba #2 | 18.5 | 92.4 | 460 | 29.3 | 0.853 | 19 913 |
| Motor Bomba #3 | 18.5 | 91 | 460 | 29.5 | 0.857 | 20 143 |
| Motor Peristáltica | 5.5 | 91.7 | 460 | 9.3 | 0.83 | 6 150 |
| Compresor | 5.5 | - | 400 | 10.6 | 0.85 | 6 875 |

Fuente: Datos de la placa de los motores

La Tabla 4.3 muestra de manera promediada las horas que trabaja cada equipo, así como el aproximado de su consumo diario. Esta información se adquirió y calculo mediante el registro de datos manuales con el que cuenta la planta de tratamiento.

Tabla 4.3 - Consumo total de los motores

| Nombre | Tiempo de trabajo promedio por día | Consumo diario promedio (KW) |
|---------------|---|-------------------------------------|
| Bomba #1 | 3 horas y 15 minutos | 64.05 |
| Bomba #2 | 9 horas y 45 minutos | 194.151 |
| Bomba #3 | 9 horas y 45 minuto | 196.393 |
| Peristáltica | 24 horas | 147.602 |
| Compresor | 24 horas | 149.816 |

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo monetario del consumo de los equipos se consultó las tarifas establecidas por el Consejo Nacional de Fuerza y Luz las cuales se pueden apreciar en la Tabla 4.4 y también aparecen en el apéndice A.2 Sección de cálculos.

Tabla 4.4 - Tarifa eléctrica establecida por CNFL

| | Inicio | Final | Inicio | Final | Tarifa (KW/h) |
|-----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|----------------------|
| Punta | 10:00 | 12:30 | 17:30 | 20:00 | ₡ 61.88 |
| Valle | 6:00 | 10:00 | 12:30 | 17:30 | ₡ 30.94 |
| Nocturno | 20:00 | 6:00 | - | - | ₡ 22.28 |

Fuente: Consejo Nacional de Fuerza y Luz

4.3 Requerimientos

Par establecer el alcance del proyecto se elaboró una lista de prioridades definidas por el supervisor de facilidades de la planta Cargill en San Rafael y por los encargados de la PTAR

que forman parte de la empresa SAUBER la cual es contratada por CARGIL para el manejo de la planta de tratamiento, a continuación se aprecian los principales puntos a cubrir:

Tabla 4.5 - Requerimientos de la solución

| Parámetro | Especificación |
|-------------------------------------|--|
| Bombas de extracción. (#1,#2,#3) | La regulación de las bombas debe ser a partir del flujo que se desea que ingrese al DAF. El flujo debe ser variable y el operario será quien lo defina. |
| Bomba Nikuni | Posibilidad de arranque y paro remoto de la bomba Nikuni. |
| Paletas | El tiempo de funcionamiento de las paletas del DAF debe ser determinado por el operario a conveniencia. |
| Polímero | Encendido y apagado remoto del sistema de inyección de polímero Regulación del ritmo de trabajo del sistema de preparación de polímero |
| Coagulante | Manipulación remota de la bomba de inyección, específicamente el ritmo de inyección del coagulante. |
| Bomba Diafragma | Funcionamiento de la bomba de acuerdo al nivel de lodos en el tanque. |
| Vibraciones | Tener la capacidad de observar la intensidad de las vibraciones de las bombas en todo momento. |
| Viscosidad | Poder medir la viscosidad de los lodos para evitar que el operario destape la máquina y corra riesgo de lesión. |
| Bomba Peristáltica | Reparación, monitoreo y control de la peristáltica |
| Datos | Registro de datos y que estén disponibles en todo momento. |

Fuente: Elaboración propia

4.4 Descripción de las alternativas

A continuación, se describen las diferentes alternativas que existen para llevar a cabo el proyecto divididas en subsecciones de modo que se pueda realizar una comparación de manera más clara, al final de cada sección se explica porque se escoge la alternativa seleccionada.

4.4.1 Equipo de protección vs sensores de vibraciones

Para brindar el correcto mantenimiento preventivo al equipo de la planta de tratamiento se requiere de un sistema de monitoreo en tiempo real que muestre qué está ocurriendo y cómo está trabajando el sistema. La forma en la que se implemente este panel de control y las virtudes que ofrezca va a depender del tipo de componentes que se adquieran, para el caso de los motores de la planta de tratamiento se ha tomado en consideración dos propuestas: la primera es una red de sensores de vibración presentada por la empresa Electromecánica Oviedo E.M.O. S.A. La segunda propuesta consiste en un Limitador de Par EL-FI M20 de Emotron por la empresa Potencia Fluida y Mecánica.

La opción propuesta por Electromecánica Oviedo consiste en un sensor de vibraciones (también podría incluir temperatura) en algunos de los motores que se utilizan en la planta (ejemplo: la bomba NIKUNI). Sin embargo, debido a que el sistema de bombeo consiste en la bomba como tal y del motor que la hace funcionar se ha decidido incluir sensores para ambos dispositivos, es decir un total de seis sensores (dos por equipo). Los sensores se conectan mediante un cable hacia el PLC; existen una serie de módulos opcionales como la caja de conexiones y el módulo de alarma, sin embargo debido a que se va a construir un mecanismo integro con un SCADA se considera que estos módulos no van a ser necesarios ya que se caería en la redundancia de funciones, además de que aumentan el costo de la inversión. La Figura 4.2 es proveída por Electromecánica Oviedo y detalla el diagrama de los dispositivos.

Permanent Machine Protection: Physical Layout Scheme II

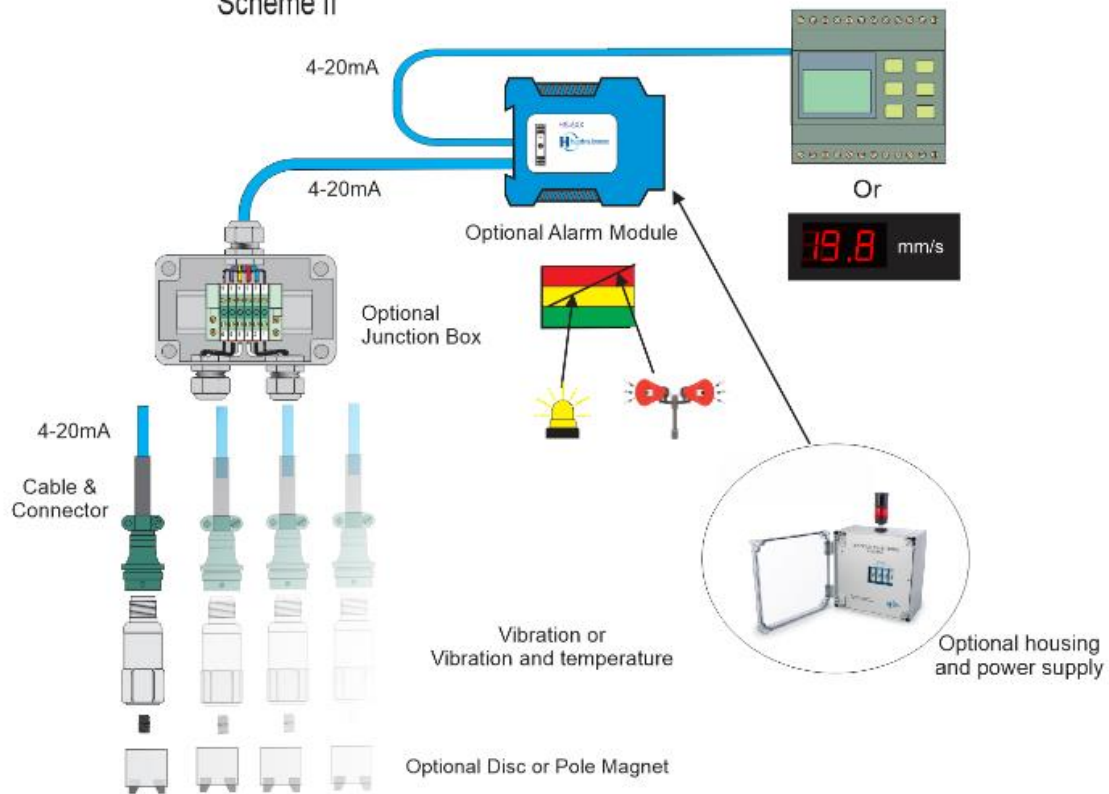


Figura 4.2 - Sistema de sensores de vibración

Fuente: Electromecánica Oviedo

El equipo EL-FI M20 de Emotron consiste en un limitador de par que advierte sobre “las condiciones de sobrecarga y subcarga anormales del proceso son detectadas de manera exacta y fiable mediante el principio de medición de “potencia en el eje” exclusivo de EL-FI.” (Emotron AB). Mediante la potencia del motor y tomando en consideración las pérdidas de éste se calcula la potencia del eje el módulo trabaja con dicha potencia lo que permite conocer el estado del motor con respecto a la carga y a la potencia suministrada. Este dispositivo utiliza el motor como sensor por lo que no se requiere de ningún módulo extra. La Figura 4.3 muestra el diagrama de conexión que eventualmente tendría.

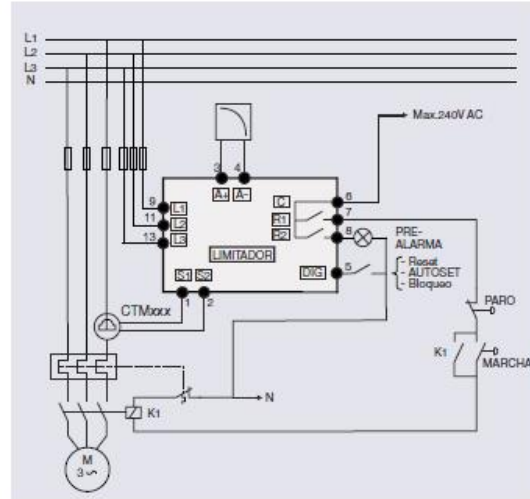
El EL-FI M20 al ser un dispositivo complejo más que un simple sensor cuenta con un sistema de alarmas que pueden ser programadas dependiendo de las necesidades del operador, la Figura

4.4 muestra las cuatro alarmas que el sistema ofrece, dos en modo de pre-alarma y las otras dos cuando se alcanza el punto máximo (sobrecarga) o el punto mínimo (subcarga).

Conexión del EL-FI M20 de Emotron



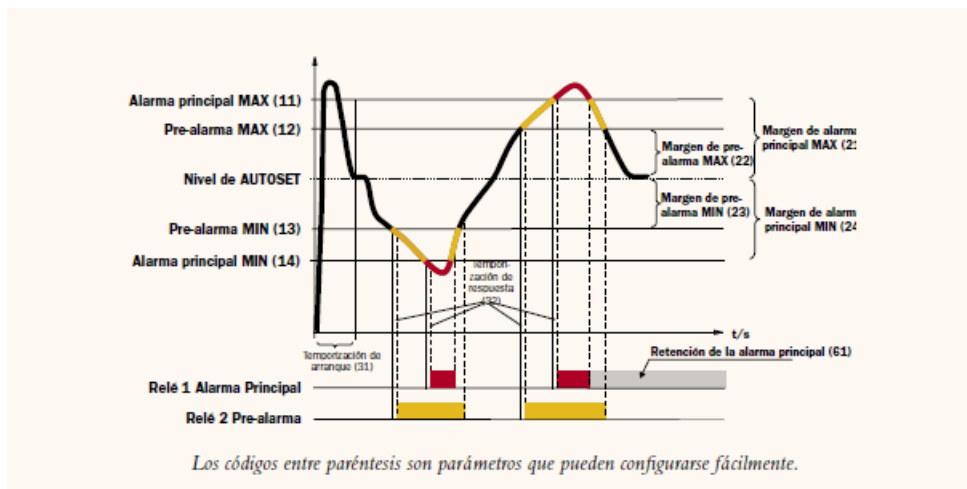
El EL-FI M20 de Emotron se instala fácilmente en cuadro de maniobra.



Ejemplo de conexión.

Figura 4.3 - Diagrama de conexión Emotron

Fuente: EL-FI M20 Limitador de Par



Los códigos entre paréntesis son parámetros que pueden configurarse fácilmente.

- 11. Alarma principal MAX (sobrecarga)
 - 12. Pre-alarma MAX (señal de aviso/alarma de sobrecarga)
 - 13. Pre-alarma MIN (señal de aviso/alarma de subcarga)
 - 14. Alarma principal MIN (subcarga)
- (La pre-alarma proporciona una señal de aviso/alarma antes de que se active la alarma principal)

Figura 4.4 - Alarmas del Emotron.

Fuente: EL-FI M20 Limitador de Par

En la Tabla 4.6 que se muestra a continuación se puede encontrar el valor cotizado para cada uno de los equipos por parte de la empresa proveedora respectivamente. Se debe señalar que para el caso de Emotron la cotización se hizo para un solo equipo. En el caso de los sensores de vibración cada uno tiene un precio de ¢ 1 510 083.33.

Tabla 4.6 - Costo económico de implementación

| Equipo | Cantidad | Cotización |
|------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Sistema de sensores de vibraciones | 6 | ¢ 9 096 500.00 |
| Limitador de Par | 1 | ¢ 1 002 117.90 |

Fuente: Cotización de Electromecánica Oviedo y Potencia Mecánica y Fluida. Elaboración propia

4.4.2 Sensor de nivel vs tiempo de trabajo de paletas

Como medida para disminuir el consumo eléctrico que genera el proceso de mover los lodos desde el tanque del DAF Garita hasta el tambor espesador se plantea que la bomba que realiza esta función no trabaje de forma continua, sino que espere a que el tanque llegue a cierto punto para activarse. Tal y como se ve en la Figura 4.5.

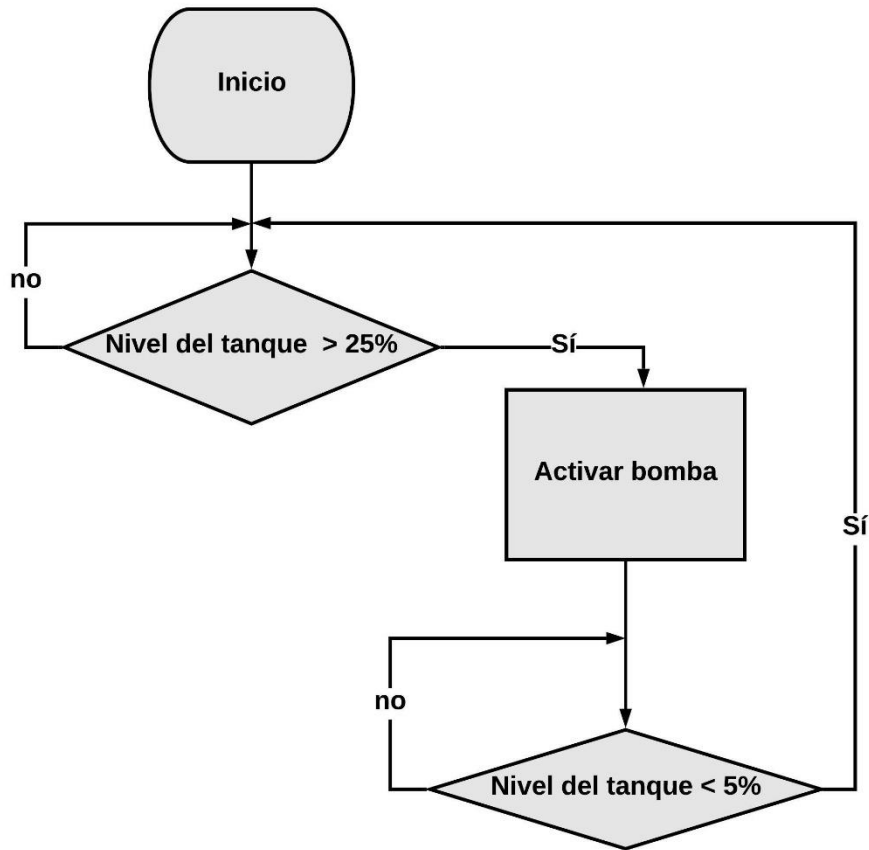


Figura 4.5 - Diagrama que muestra la lógica para el funcionamiento de la bomba que se plantea siguiendo el modelo del sensor de nivel.

Fuente: Elaboración propia

Para lograr esto se debe de adquirir un sensor de nivel que permita conocer el porcentaje de llenado del tanque de lodos. Dicho sensor debe de cumplir una serie de requerimientos:

- Comunicación analógica 4-20mA.
- Funcionamiento por radiofrecuencias para evitar contacto con el lodo y posible deterioro.
- Soportar temperaturas entre los 10 °C y los 40 °C.
- De fácil instalación y uso.

Se encontraron dos sensores que cumplen con los requisitos expuestos anteriormente, el primero es el Vegaspuls64 que se aprecia en la Figura 4.6 y el segundo es el Micropilot FMR20 que se puede observar en la Figura 4.7.



Figura 4.6 - Vegapuls 64

Fuente: Guía rápida Vegapuls 64



Figura 4.7 - Micropilot FMR20

Fuente: Technical Information Micropilot FMR20

Tabla 4.7 - Costo económico de la implementación de los sensores

| Equipo | Cotización |
|------------------|-------------------|
| Vegapuls 64 | € 2,100,000.0 |
| Micropilot FMR20 | € 709,188.0 |

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.8 que se muestra a continuación muestra los datos técnicos relevantes de cada sensor a modo de comparación con el fin de lograr una inclinación hacia un equipo de manera más sencilla.

Tabla 4.8 - Comparación de datos técnicos entre ambos sensores

| Dato técnico | Vegapuls 64 | Micropilot FMR20 |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Alcance | 30 m | 20 m |
| Conexión | 4 a 20mA / HART. Dos hilos. | 4 a 20mA / HART |
| Alimentación | 12 a 35 V DC | 10.5 a 30 V DC |
| Temperatura de proceso | -196 a 200 °C | -40 a 80 °C |
| Temperatura ambiente | -40 a 80 °C | -40 a 80 °C |

Fuente: Hoja de datos del Vegapuls 64 y del Micropilot FMR20

El segundo planteamiento para reducir el tiempo de trabajo de la bomba de extracción de lodos y mejorar la efectividad del químico, a su vez reduciendo el costo del proceso, es el de activar la bomba de extracción en función del tiempo de trabajo de las paletas del DAF. En este caso se considera encender la bomba 30 segundos después de activar las paletas y detenerla 30 segundos después de que las paletas se inmovilicen. Considerando que el tiempo de trabajo de las paletas va a ser de dos minutos y un minuto de paro, se espera que el trabajo de la bomba sea de la misma medida. La lógica de esta solución se puede ver en el diagrama de la Figura 4.8.

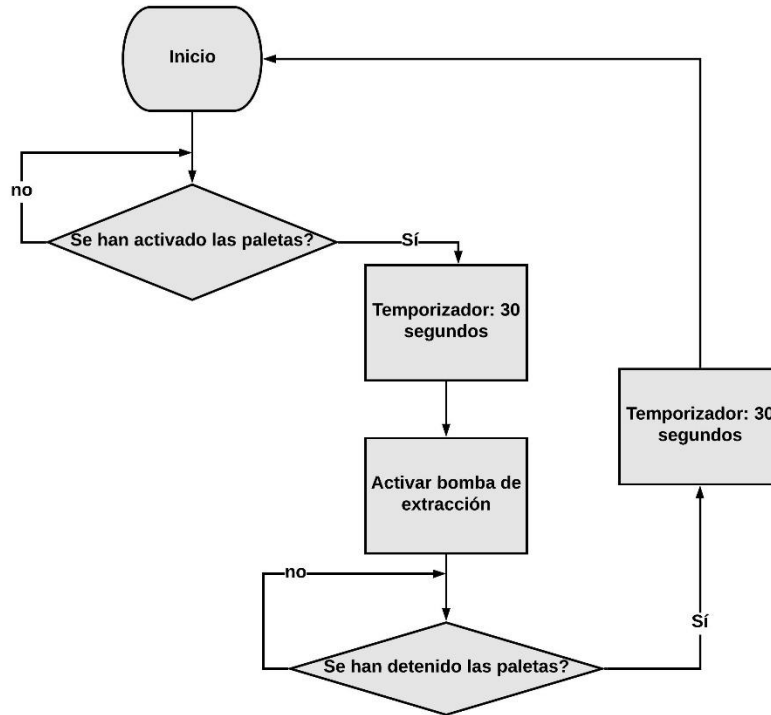


Figura 4.8 - Diagrama que muestra la lógica para el funcionamiento de la bomba que se plantea siguiendo el modelo de imitar tiempo de trabajo de las paletas.

Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Bomba Peristáltica vs bomba diafragma

Para movilizar los lodos que se generan en el DAF Garita hacia el tambor espesador se utilizaba una bomba peristáltica, sin embargo, al dañarse esta se empezó a utilizar una bomba de tipo diafragma. Se debe de determinar si lo mejor es continuar con la bomba de diafragma o si se debe de reparar la bomba peristáltica.

La bomba diafragma funciona mediante un compresor que le inyecta aire comprimido haciendo que una membrana interna genere succión y empuje, lo que en este caso permite movilizar los lodos. Mientras que la bomba peristáltica funciona a través de un motor convencional, transforma la energía eléctrica en energía mecánica. En síntesis, ambos sistemas requieren de un suministro eléctrico para llevar a cabo la tarea, es por este motivo que se compara el consumo eléctrico de ambos, el compresor y el motor de la peristáltica. La Tabla 4.9 desglosa el costo eléctrico de cada aparato dividido por horas y al final de esta se muestra el total del gasto

por semana y por mes, los detalles de estos cálculos se encuentran en la sección A.2.3 Cálculo de comparación entre peristáltica y bomba diafragma. Se puede determinar que el compresor consume aproximadamente ₡74.78 más por día que el motor de la peristáltica, lo que significa un consumo de ₡2 093.91 extra por mes.

Tabla 4.9 - Comparativa económica entre el consumo de las bombas

| | | |
|----------------------|-------------|-------------|
| Total diario | ₡5,060.39 | ₡4,985.61 |
| Total semanal | ₡35,422.74 | ₡34,899.27 |
| Total mensual | ₡141,690.97 | ₡139,597.06 |

Fuente: Elaboración propia

Otro dato importante para considerar es el posible mantenimiento que se va a tener que llegar a dar al equipo, la bomba diafragma contempla el mantenimiento de tres secciones: el compresor, las tuberías y la bomba misma. Mientras que la bomba peristáltica requiere mantenimiento en la bomba y el motor. En ambos casos se le debe de dar mantenimiento a la manguera que transporta el lodo por lo que este apartado se deja fuera de la discusión.

Tabla 4.10 - Ventajas y desventajas de los equipos de bombeo de lodo.

| Equipo | Ventajas | Desventajas |
|---------------------|---|--|
| Peristáltica | <ul style="list-style-type: none"> Menor cantidad de partes a las cuales se les debe de dar mantenimiento. Permite un mejor monitoreo y control debido a que su funcionamiento depende únicamente del suministro eléctrico. | <ul style="list-style-type: none"> No hay equipo de repuesto en el almacén por lo que no se puede reparar de forma inmediata ante una eventualidad. Su reparación tiene un costo de ₡10 293 630. |
| Diafragma | <ul style="list-style-type: none"> La empresa utiliza de este tipo de bombas en diferentes sectores, por lo que existe una mayor probabilidad de encontrar un repuesto en el | <ul style="list-style-type: none"> El compresor que alimenta a la bomba actualmente solo se utiliza para esta tarea. |

| | | |
|--|--|--|
| | <p>almacén en caso de que se necesite de forma urgente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presenta una ligera facilidad de recambio cuando se compara con la bomba peristáltica. | <ul style="list-style-type: none"> • Se requiere estar revisando las tuberías con el fin de evitar fugas de aire comprimido, en promedio se estima que las fugas en este tipo de aplicación son de aproximadamente 15%. |
|--|--|--|

Fuente: Elaboración propia

4.4.4 Bomba #1 como bomba principal

Actualmente se utiliza la bomba #2 para movilizar el agua del Igualador #1 al DAF Garita, cuando el ingreso de las aguas residuales de San Rafael, Kimby y PIPASA Fácil sobre pasa la capacidad de la bomba, cuando el nivel del igualador alcanza el 65% se desactiva la bomba #2 y entra a trabajar la bomba #1, esto es porque la bomba #1 tiene una mayor capacidad de flujo. La bomba #3 funciona como respaldo.

Cuando se planteó el proyecto se propuso que se colocaran variadores de frecuencia en las bombas con el fin de regular el flujo y evitar arranques y paros de los motores lo que influye en la demanda. El planteamiento inicial es que la bomba #2 y #3 se rotaran con cierta periodicidad y que la bomba #1 funcionara únicamente cuando las otras dos bombas no dieran abasto. Esta idea implicaría adquirir tres variadores de frecuencia, lo cual tiene un costo de ₡ 8 068 207.18 sin impuesto de venta incluido.

Considerando que la bomba #1 está diseñada para trabajar con variador de frecuencia, y además tiene la capacidad para cubrir cualquier demanda de flujo, se plantea la posibilidad de dejar esta bomba como la principal y la bomba #2 como un respaldo en caso de que alguna eventualidad ocurra. La bomba #3 quedaría como back up en caso de que alguna de las otras dos bombas esté en mantenimiento. Esta solución permitiría que solo la bomba #1 tenga que utilizar el variador de frecuencia, lo que disminuiría la inversión, sin embargo debido a que ahora trabajaría por tiempo prolongado el mantenimiento de dicha bomba tenderá a aumentar.

4.4.5 Motores de reluctancia vs motores actuales

Existe una gama de motores de reluctancia de Siemens que presentan un nivel eficiencia muy alta en la industria (superior a 90), en esta sección se plantea la viabilidad de sustituir los motores de las bombas #1, #2 y #3 con estos nuevos.

La Tabla 4.11 muestra la información de los motores que impulsan las bombas encargadas de trasladar el agua del Igualador #1 al DAF Garita.

Tabla 4.11 - Información de los motores actuales.

| Nombre | PF | Voltaje(V) | Amperaje(A) | Potencia(kW) | Eficiencia | Consumo(kW/h) |
|----------|-------|------------|-------------|--------------|------------|---------------|
| Motor #1 | 0.85 | 460 | 29.1 | 18.5 | 93.6 | 19.707 |
| Motor #2 | 0.853 | 460 | 29.3 | 18.5 | 92.4 | 19.913 |
| Motor #3 | 0.857 | 460 | 29.5 | 18.5 | 91 | 20.143 |

Fuente: Placa de información de los motores

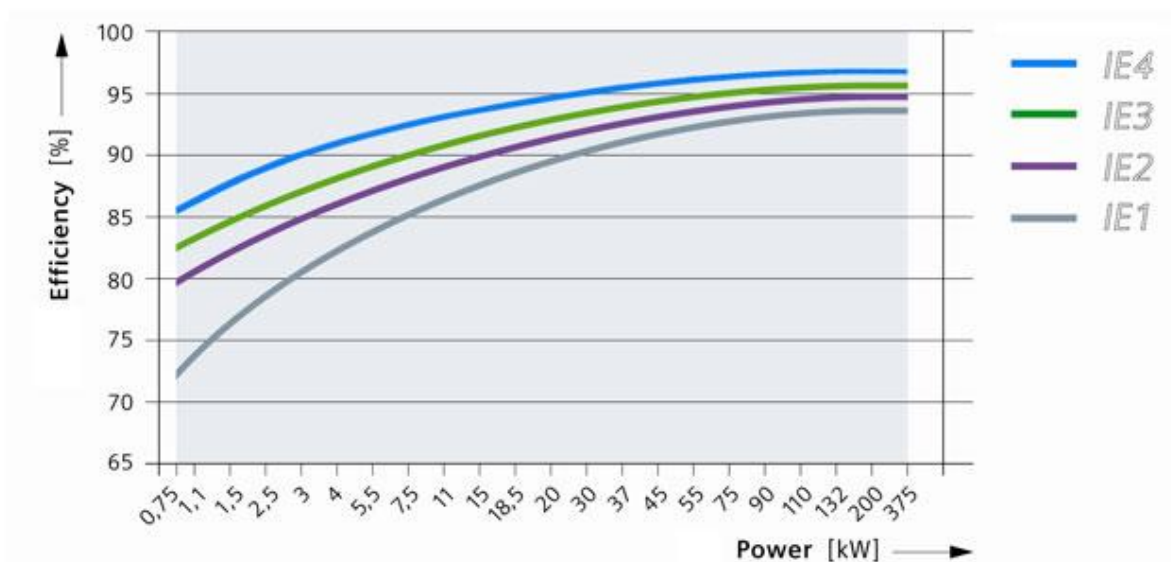


Figura 4.9 - Grafica comparativa sobre la eficiencia en función de la potencia de los motores de reluctancia IE de Siemens.

Fuente: Siemens: *Low voltage motors with Super Premium Efficiency IE4*. Obtenido de: <https://w3.siemens.com/drives/global/en/motor/low-voltage-motor/efficiency-standards/ie4-super-premium-efficiency/pages/ie4-super-premium-efficiency.aspx>

La Figura 4.9 muestra la comparativa entre las diferentes versiones de los motores de reluctancia que ofrece Siemens en términos de la eficiencia vs la potencia. La nueva versión IE4 es la que presenta el mejor rendimiento y se puede ver que para todos los casos el mejor rendimiento se alcanza cuando conforme la potencia del motor aumenta.

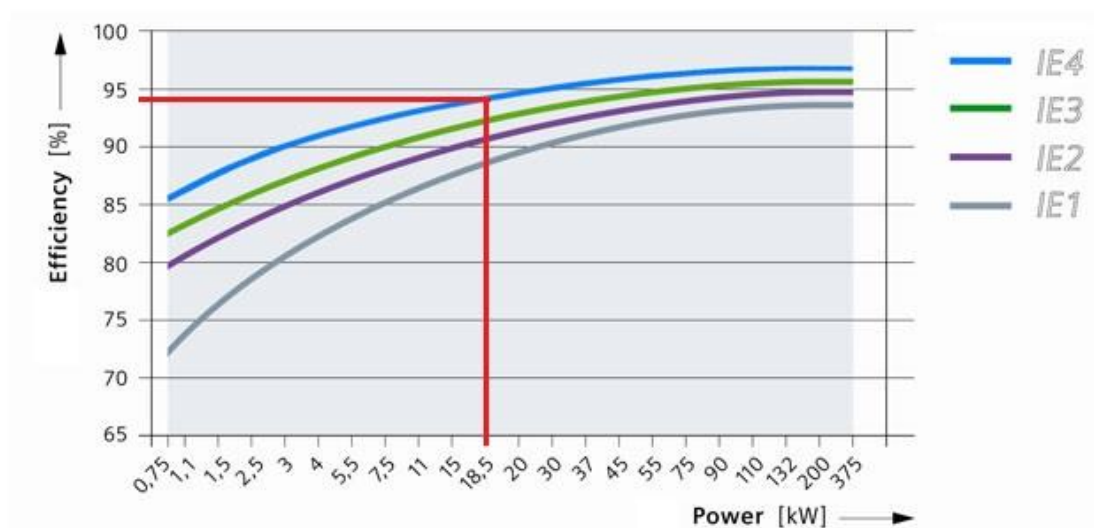


Figura 4.10 - Análisis de la eficiencia para un motor de 18.5 kw.

Fuente: Siemens: *Low voltage motors with Super Premium Efficiency IE4*. Elaboración propia.

De la Figura 4.9 se deriva la Figura 4.10, en la cual se puede calcular la eficiencia para un motor de 18.5 kW para las diferentes versiones de los motores de reluctancia presentados por Siemens. De la Tabla 4.10 se puede apreciar que la eficiencia de los motores es superior a 91, donde el motor con el mayor valor es de 93.6, por lo que se descartan las versiones IE1 e IE2, la versión IE3 se descarta de igual manera debido que se encuentra en el mismo rango que los motores actuales, lo que deja como alternativa a la IE4 que cuenta con una eficiencia entre 94 y 94.5.

4.5 Evaluación y selección de las alternativas

En esta sección se van a evaluar las alternativas presentadas en el punto 4.4 Descripción de las alternativas con el fin de escoger la que mayor beneficio le presenta a la realización del proyecto. Dicha evaluación contemplará diferentes temas (funcionalidad, complejidad de instalación, factor económico, entre otros.) según la situación.

4.5.1 Equipo de protección vs sensores de vibraciones

Tabla 4.12 - Ventajas y desventajas de los equipos de monitoreo para los motores y bombas

| Equipo | Ventajas | Desventajas |
|-------------------------|--|--|
| Sensores de vibraciones | <ul style="list-style-type: none"> • Contemplan tanto los motores como las bombas, por lo que el rango de monitoreo es más amplio que el EL-FI M20. • Permite monitorear desgaste en rodamientos, contacto anormal en las caras rotativas, fallo en sellos mecánicos. | <ul style="list-style-type: none"> • Sólo posee la lectura de una variable, es decir el único dato que provee son las vibraciones del motor. • Posee un precio mayor por equipo que el EL-FI M20. |
| EL-FI M20 | <ul style="list-style-type: none"> • Permite prevenir las sobrecargas y las subcargas evitando paros inesperados o daños en los equipos. • El sistema ya cuenta con un sistema de alarma incorporado, por lo que no hay necesidad de realizar la programación en el PLC. | <ul style="list-style-type: none"> • Debido a la forma de monitoreo que utiliza el equipo, sólo se puede utilizar en los motores dejando por fuera las bombas. • La instalación del equipo es mayor complejidad debido a que cuenta con un número de conexiones más amplio |

| | | |
|--|--|--|
| | | a diversos puntos de la instalación eléctrica. |
|--|--|--|

Fuente: Elaboración propia

Considerando todos los puntos expuestos en la Tabla 4.12 así como su costo de implementación de acuerdo con la Tabla 4.6 se decide utilizar el EL-FI M20, es decir el equipo de protección, por dos motivos importantes: el primero es que este módulo permite prevenir que una bomba trabaje en vacío o bien que permita la operación de esta cuando exista un exceso de torque lo que puede inducir a daños severos en el equipo. El segundo punto, que a su vez es el de mayor peso, es que el análisis de vibraciones puede ser realizado por un tercero (esta es la forma en la que se está trabajando actualmente), de igual manera el registro de datos lo puede llevar la empresa que ejecuta el análisis y debido a que la recolección de los mismos no necesitan ser en línea (todas las horas, todos los días) sino que con la periodicidad adecuada se puede brindar un mantenimiento preventivo correcto no existe un riesgo con adoptar esta medida.

Se ha considerado inviable sustituir la contratación de terceros por los sensores de vibración debido al bajo costo que representa para la empresa y la inversión tan grande que significaría la compra del nuevo equipo, aparte de que la empresa monitorea todas las plantas de Cargill del país.

4.5.2 Sensor de nivel vs tiempo de trabajo de paletas

La Tabla 4.8 muestra que las características de ambos sensores son muy similares, por lo que la parte técnica no cuenta con criterios suficientes para determinar cuál es el mejor sensor, principalmente porque los dos son capaces de llevar a cabo la tarea deseada. Es por esto que para escoger la mejor alternativa se ha utilizado la Tabla 4.7 como punto concluyente, en esta tabla se puede ver como el costo de adquirir e implementar el Micropilot FMR20 es mucho menor que el del Vegapuls 64.

Realizando un mejor análisis sobre este punto se ha determinado que existe una serie de limitantes ante esta lógica:

- Los lodos tienden a secarse cuando se dejan en el tanque por tiempo prolongado, esto requiere que los técnicos tengan que rociar agua con el fin de hidratarlos nuevamente. Este hecho se ha presentado usualmente cuando la bomba que los extrae está en mantenimiento.
- El tiempo de llenado del tanque es de aproximadamente 30 minutos, sin embargo, dependiendo si hay matanza y de que tan sucia venga el agua, este periodo de tiempo puede variar.
- Se debe adquirir el sensor y el mecanismo que permita detener y arrancar la bomba (un contactor en el caso de la bomba peristáltica y una electroválvula o regulador de presión para la bomba diafragma).

Considerando la inversión tan grande que significa un sensor de nivel y el bajo consumo de los equipos, la mejor opción a desarrollar es la de utilizar el tiempo de las paletas como medida de arranque y paro de la bomba de extracción. Sin embargo, esta solución tiene como problemática el hecho de que la bomba no logre extraer todo el lodo antes de que se detenga, corriendo el riesgo de que estos se sequen y se vuelvan sólidos. Como una medida de precaución se propone verificar que los 30 segundos de desfase entre las paletas y las bombas sea suficiente para realizar la extracción correcta de los lodos, en caso de no ser así se recomienda ajustar el tiempo de desfase para lograr el mejor resultado posible.

4.5.3 Bomba Peristáltica vs bomba diafragma

Considerando que las medidas del tanque son: 2.55 m de largo, 0.8 m de ancho y 1.1 m de alto y según los cálculos del apartado A.2.1 Tiempos de ejecución de las paletas y llenado del tanque se determina que el volumen es de $2.244 m^3$

Según las pruebas realizadas de manera experimental el tanque de lodos llena $0.14272 m^3$ (6.36% del volumen total) en 2 minutos, sabiendo que $1m^3$ es equivalente a 220 galones, se puede establecer que el volumen del tanque es de 493,68 galones, y que el flujo de llenado es de aproximadamente 15.6992 GPM.

De acuerdo con la hoja de datos de la bomba peristáltica el flujo máximo que esta puede alcanzar es de 77.05 GPM. De manera teórica el compresor tiene un volumen de 35.8 CFM (Cubic Feet per Minute), lo que es igual a 1013.7422 L/min. Utilizando la gráfica de la Figura 4.11 y sabiendo que la presión mínima de operación es de 0.2Mpa (2 Bar) se determina que la máxima capacidad de extracción de la bomba diafragma es de aproximadamente 120 L/min o 31.70 GPM, a pesar de esto, debido a las condiciones de la planta se calculó de forma experimental que le toma aproximadamente 1 minuto con 18 segundos para descargar el 5.088% del tanque (esto porque la forma física del contenedor no facilita la extracción de lodos), es decir que tiene un flujo de 19.316 GPM.

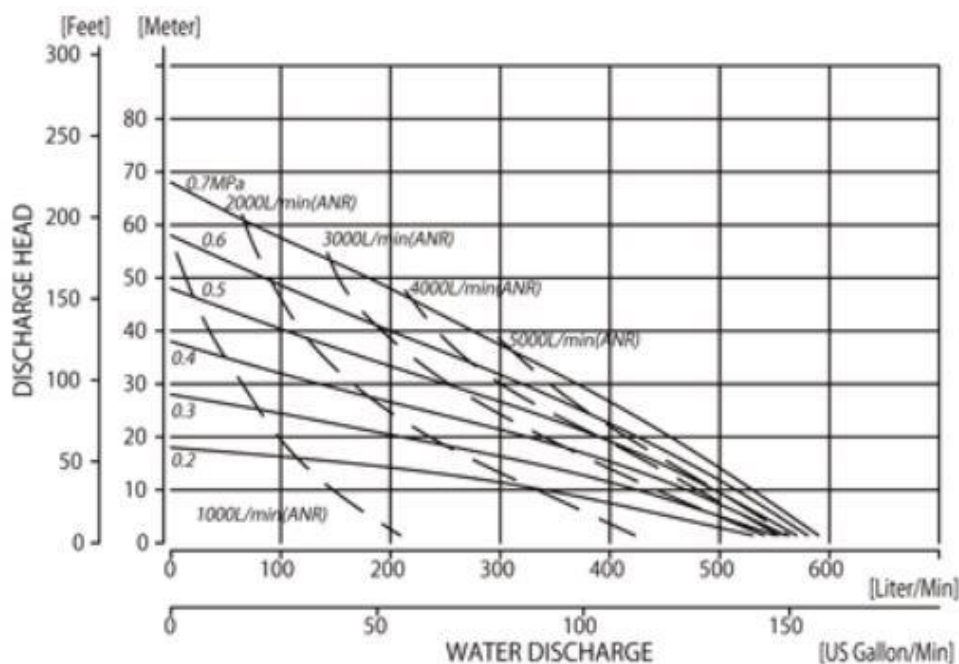


Figura 4.11 - Gráfica de descarga de la bomba diafragma

Fuente: Operation Manual Flap Valve Diaphragm Pumps NDP-50FAN

Al realizar una comparación entre lo teórico y lo experimental se puede ver que la bomba tiene la capacidad de extraer a un mayor ritmo del que lo hace, posiblemente porque las condiciones físicas donde se encuentran los lodos no son las ideales para llevar a cabo la tarea de la manera más eficiente.

Considerando todo lo mencionado en el punto 4.4.3 Bomba Peristáltica vs bomba diafragma junto con lo expuesto en la Tabla 4.10, se ha llegado a la conclusión de que la mejor opción es

la de continuar con la bomba diafragma. El principal factor por el que se ha escogido es por la capacidad que tiene esta para manejar el flujo de lodos sin tener que realizar una gran inversión (únicamente un regulador de presión el cual tiene un costo de ₡63 802.06) mientras que en el caso de la peristáltica se requiere un regulador de frecuencia cuyo costo es de aproximadamente 1 millón de colones. Otro factor decisivo es ha sido la poca capacidad de extracción que tiene la bomba peristáltica a máxima capacidad (77.05 GPM).

4.5.4 Motores de reluctancia vs motores actuales

Considerando que la bomba que mayor tiempo pasara activa es la bomba #1, la cual posee una eficiencia de 93.6, es decir que la diferencia con la IE4 es de apenas 1 en el mejor de los casos. Para la bomba #2 la diferencia seria de aproximadamente 2 y para la bomba #3 3.5. Porcentualmente hablando la mejora seria de 0.95% para la bomba #1, 2.22% para la bomba #2 y 3.7% para la bomba #3.

Una unidad más en la eficiencia del motor de la bomba #1 equivale a una mejora de aproximadamente 0.2 kW/h. En un año se tendría un ahorro eléctrico de 1752 kW lo que significaría a un ahorro económico aproximado a ₡114,694.72 de acuerdo a las tarifas de la **Tabla 4.4 - Tarifa eléctrica establecida por CNFL**

El motor actual tiene un consumo aproximado de ₡5 426 139.04 al año (ver apéndice A.2.2 Cálculo de consumo y ahorro Bombas #1, #2, #3); la empresa DITESA brindó la cotización del motor de reluctancia el cual tiene un costo de ₡3 276 405.17, es decir que la inversión del nuevo motor representa el 60.38% del gasto eléctrico anual mientras que el ahorro es de apenas el 2.11%. Junto con los supervisores de la planta se ha considerado que la inversión es muy grande en comparación de la mejora que se va a obtener (de 93.6 a 94.5 en la eficiencia) y se a estimado que la recuperación de la inversión es prácticamente inexistente, por lo que se ha decido continuar con los motores actuales.

Capítulo 5 : Descripción detallada de la solución

El capítulo 5 consiste en la descripción detallada de los equipos que se utilizan en la solución planteada, esto incluye tanto la descripción de hardware como el software con el que se programan los mismos, así como la interfaz de usuario del SCADA.

Considerando que los variadores de frecuencia permiten disparar alarmas en el caso de carga y subcarga, el equipo de protección se va a poder utilizar en otros equipos que se necesitan verificar, esto debido a que el departamento de facilidades ha adquirido el EL-FI M20 como modo de prueba. Para el caso del DAF Garita y el control de los lodos se utilizará una electroválvula para activar y desactivar la bomba diafragma durante el periodo de tiempo que las paletas del DAF Garita no se encuentran activas, por lo que no se necesita adquirir un sensor de nivel nuevo. Debido a que el aporte en la eficiencia de los motores de reluctancia es muy bajo y el precio de los mismos es elevado se ha optado por mantener los motores actuales.

5.1 Descripción de Hardware

5.1.1 Modicon M221

El controlador lógico programable (PLC) con el que se cuenta y por ende con el que se ha desarrollado el proyecto es el M221 de Schneider Electric y se puede apreciar en la Figura 5.1.



Figura 5.1 - Modicon M221

Fuente: Schneider Electric. Obtenido de <https://www.se.com/mx/es/product-range/62128-logic-controller---modicon-m221/>

Tabla 5.1 - Parámetros del M221

| Parámetro | Descripción |
|--------------------------|--|
| Alimentación | De 100 a 240 VAC |
| Entrada digital | 4 entradas rápidas (HSC) y 10 entradas normales |
| Salida digital | 10 salidas de relé |
| Entrada analógica | 2 entradas analógicas |
| Salida analógica | 0 |
| Reloj | Sistema de reloj en tiempo real (RTC) |
| Comunicación | 1 puerto de línea serie, 1 puerto de programación USB mini-B, 1 puerto Ethernet |
| Software de programación | SoMachine |
| RAM | 512 Kbytes de memoria RAM |
| Memoria no volátil | 1.5 Mbytes de los cuales 256 Kbytes se utilizan para realizar una copia de seguridad de la aplicación y de los datos en caso de corte de alimentación. |

Fuente: Modicon M221 Logic Controller Guia de Hardware

La Tabla 5.1 muestra los principales datos del controlador que deben de ser conocidos para la realización del proyecto. Como se puede ver este equipo presenta limitantes en cuanto a la cantidad de entradas y salidas, es por esto que se cuenta con tres módulos de expansión los cuales serán descritos a continuación.



Figura 5.2 - Módulo de expansión TM3DM24R.

Fuente: TM3DM24R Product Data Sheet.

La Figura 5.2 muestra el módulo TM3DM24R mientras que la Tabla 5.2 presenta las principales características de este bloque de expansión de 24VDC el cual está conformado por 16 canales de entrada con 1 línea común y 8 canales de salida tipo relé de 2A con dos líneas comunes. Este es un bloque de terminal removible.

Tabla 5.2 - Parámetros principales del TM3DM24R.

| Parámetro | Descripción |
|-------------------------------|--|
| Tipo de producto | Módulo de E/S discretas |
| Rango de compatibilidad | Modicon M221, Modicon M241, Modicon M251 |
| Número de entradas discretas | 16 entradas conformando a IEC 61121-2 tipo 1 |
| Lógica de entrada discreta | Positivo/Negativo |
| Voltaje de entrada discreta | 24V |
| Corriente de entrada discreta | 7mA |
| Tipo de salida discreta | Rele normalmente abierto |

| | |
|------------------------------|---------------------|
| Número de salidas discretas | 8 |
| Lógica de salidas discretas | Positivo o negativo |
| Voltaje de salida discreta | 24VDC / 240 VAC |
| Corriente de salida discreta | 2000 mA |

Fuente: TM3DM24R Product Data Sheet.



Figura 5.3 - Modulo de expansión TM3AQ4.

Fuente: Schneider Electric TM3AQ4. Obtenido de: <https://www.amazon.es/Schneider-Electric-TM3AQ4-Salidas-Anal%C3%B3gicas/dp/B00ZEEZFW>

El módulo TM3AQ4 que se puede apreciar en la Figura 5.3 es una expansión que cuenta con cuatro salidas analógicas (+- 10V, 0-10V, 0-20mA, 4-20mA), 12 bits. Este es un bloque de terminal removible. La Tabla 5.3 muestra los parámetros más importantes que se deben de conocer sobre este módulo.

Tabla 5.3 - Parámetros principales del TM3AQ4.

| Parámetro | Descripción |
|------------------------------|-------------|
| Número de canales de entrada | 4 salidas |
| Voltaje de entrada | 24 VDC |

| Tipo de señal | Voltaje y Corriente |
|------------------|---|
| Rango de entrada | 0 a 10VDC -10 a 10 VDC 0 a 20mA 4 a 20mA 0 a 20mA extendida 4 a 20mA extendida |

Fuente: Modicon TM3 Analog I/O Modules Hardware Guide



Figura 5.4 - Modulo de expansión TM3AI8

Fuente: TM3AI8 Product Data Sheet

La Figura 5.4 muestra el TM3AI8 el cual es el último Modulo de expansión con el que se cuenta y consiste de 8 entradas analógicas (+- 10V, 0-10V, 0-20mA, 4-20mA), 12 bits. Este es un bloque de terminal removible y sus características principales se exponen en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 - Parámetros principales del TM3AI8.

| Parámetro | Descripción |
|------------------------------|---------------------|
| Número de canales de entrada | 8 entradas |
| Voltaje de entrada | 24 VDC |
| Tipo de señal | Voltaje y Corriente |

| | |
|------------------|---|
| Rango de entrada | 0 a 10VDC -10 a 10 VDC 0 a 20mA 4 a 20mA 0 a 20mA extendida 4 a 20mA extendida |
|------------------|---|

Fuente: Modicon TM3 Analog I/O Modules Hardware Guide

En conjunto, tanto el PLC M221 como los bloques de expansión forman un solo gran dispositivo que es el encargado de controlar la planta de tratamiento de agua. La Tabla 5.5 y la Tabla 5.6 muestra las entradas y salidas respectivamente de todo el sistema, así como la descripción y el tipo.

Tabla 5.5 - Descripción de las entradas del sistema de control

| Entrada | Tipo | Descripción |
|---------|-----------|--|
| %IW3.2 | Analógica | Lectura de presión |
| %IW3.4 | Analógica | Lectura del equipo de protección EL-FI M20 |
| %IW3.5 | Analógica | Sensor de nivel Igualador #1 |
| %IW3.6 | Analógica | Sensor de flujo entrada de agua San Rafael |
| %IW3.7 | Analógica | Sensor de flujo DAF Garita |
| %IO.3 | Digital | Disparo_G113 (bomba de lodos) |
| %IO.4 | Digital | Prensa cerrada |
| %IO.7 | Digital | Confirmación VDF |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.6 - Descripción de las salidas del sistema de control

| Salida | Tipo | Descripción |
|--------|---------|-------------------------------------|
| %Q0.3 | Digital | Activar bomba G113 (bomba de lodos) |
| %Q0.4 | Digital | VDF Baja velocidad |
| %Q0.5 | Digital | Bomba G113 A activa |
| %Q0.6 | Digital | Bomba G113 B activa |
| %Q1.0 | Digital | Asignación Bomba 1 |
| %Q1.1 | Digital | Asignación Bomba 2 |

| | | |
|--------|-----------|---|
| %Q1.2 | Digital | Asignación Bomba 3 |
| %Q1.3 | Digital | Asignación Alarma |
| %Q1.4 | Digital | Activación de las paletas DAF Garita |
| %Q1.5 | Digital | Señal de activación/desactivación del variador de frecuencia |
| %Q1.6 | Digital | Señal de feedback interno para el variador de frecuencia |
| %Q1.7 | Digital | Señal de feedback interno para el variador de frecuencia |
| %QW2.0 | Analógica | Salida al Variador de frecuencia de las bombas de lodo (G113) |
| %QW2.1 | Analógica | Señal de la bomba coagulante |
| %QW2.3 | Analógica | Lectura del sensor de flujo del DAF Garita |

Fuente: Elaboración propia

La comunicación entre el PLC y el software del SCADA se realiza mediante el protocolo de TCP Modbus. Para llevar a cabo dicha comunicación se deben de seleccionar los registros del PLC que van a ser utilizados en la transferencia de variables; la Tabla 5.7 muestra el registro dentro del PLC, el sentido (si es desde el SCADA hacia el PLC o viceversa) y la descripción.

Tabla 5.7 - Descripción de las variables utilizadas en la comunicación con el SCADA

| Variable | Sentido | Descripción |
|----------|-----------|--|
| %MW130 | SCADA-PLC | Almacena la variable que indica cuantos L/h de coagulante se debe de inyectar |
| %MW132 | PLC-SCADA | Variable que indica el estado de la bomba de coagulante. ON/OFF |
| %MW135 | PLC-SCADA | Variable que contiene el flujo de entrada del DAF Garita |
| %MW136 | PLC-SCADA | Variable que contiene el flujo de entrada de San Rafael |
| %MW137 | PLC-SCADA | Variable que indica el porcentaje de llenado del Igualador #1 |
| %MW138 | PLC-SCADA | Variable que indica el porcentaje de potencia en el eje del motor de la bomba 1. |
| %MW139 | PLC-SCADA | Variable que indica el estado del agitador. ON/OFF |
| %MW142 | PLC-SCADA | Variable que indica el estado de la filtro prensa. ABIERTA/CERRADA |
| %MW144 | PLC-SCADA | Variable que indica el estado de la bomba de logos A. ON/OFF |
| %MW146 | PLC-SCADA | Variable que indica el estado de la bomba de logos B. ON/OFF |
| %MW148 | PLC-SCADA | Variable que indica el estado de la bomba G111. ON/OFF |

| | | |
|--------|-----------|--|
| %MW150 | PLC-SCADA | Variable que contiene la señal de advertencia sobre el mantenimiento de la bomba de lodos A. |
| %MW152 | PLC-SCADA | Variable que contiene la señal de advertencia sobre el mantenimiento de la bomba de lodos B. |
| %MW154 | PLC-SCADA | Variable que contiene la señal de alarma sobre el mantenimiento de la bomba de lodos A. |
| %MW156 | PLC-SCADA | Variable que contiene la señal de alarma sobre el mantenimiento de la bomba de lodos B. |
| %MW158 | PLC-SCADA | Variable que contiene la señal de alarma de nivel muy alto en el Igualador #1 |
| %MW160 | PLC-SCADA | Variable que contiene la alarma de paro por nivel muy bajo en el Igualador #1 |
| %MW162 | PLC-SCADA | Variable que indica el estado de la bomba 1. ON/OFF |
| %MW164 | SCADA-PLC | Variable que contiene señal de paro de emergencia |

Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Altivar 630D18N4

El dispositivo que se puede apreciar en la Figura 5.5 es el variador de frecuencia ATV630D18N4, el nombre está conformado por la siguiente nomenclatura:

- **ATV:** Altivar
- **630:** Producto Estándar
- **D:** Potencia x1
- **18:** Potencia nominal
- **N4:** 400 VAC (de 380 a 480 VAC)



Figura 5.5 - Variador de frecuencia ATV630

Fuente: <https://www.se.com/mx/es/product/ATV630D18N4/variable-speed-drive-atv630---18.5kw-25hp---380...480v---ip21-ul-type-1/>

La principal función de este dispositivo es la de variar la frecuencia con la que está trabajando el motor con el fin de que, en este caso, la bomba alcance el caudal deseado bajando el trabajo del motor en lugar de utilizar una llave manual. El utilizar este dispositivo para esta tarea permite un ahorro en el consumo eléctrico ya que ahora el motor no va a trabajar al 100% de su capacidad, sino que se espera que en la mayoría del tiempo se trabaja en menos de un 65% de la capacidad.

La Tabla 5.8 muestra los datos eléctricos del variador de frecuencia obtenidos del manual de instalación que deben ser tomados en consideración a la hora de realizar la implementación.

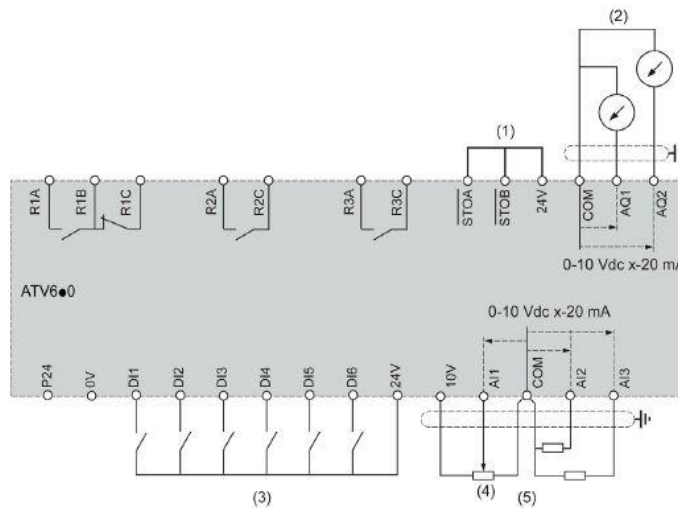
Tabla 5.8 - Datos eléctricos del ATV630D18N4

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------------|--------|
| Potencia (kW) | 18.5 |
| Potencia (HP) | 25 |
| Corriente de entrada máxima a 380 VAC | 33.4 A |
| Corriente de entrada máxima a 480 VAC | 28.9 A |
| Potencia aparente | 24 kVA |

| | |
|------------------------------|--------|
| Corriente interna máxima | 75.5 A |
| Corriente nominal | 39.2 A |
| Corriente transitoria máxima | 43.1 A |

Fuente: ATV600 Manual de instalación.

La Figura 5.6 muestra el diagrama donde se identifican las secciones de cableado del variador de frecuencia que son fundamentales para lograr la implementación. Se puede observar que el dispositivo cuenta con salidas y entradas analógicas, entradas digitales, potenciómetro de referencia y desactivación de par segura. Las entradas analógicas y digitales permiten que se puede configurar de tal manera que sea un sistema 100% autónomo.



(1) Desactivación de par segura, (2) salida analógica, (3) entrada digital, (4) potenciómetro de referencia (ejemplo: SZ1RV1002), (5) entrada analógica

Figura 5.6 - Diagrama de cableado del bloque de control

Fuente: ATV600 Manual de instalación.

5.1.3 Bomba de coagulante

La bomba con la que se cuenta para inyectar el coagulante al flujo de agua que ingresa al Igualador #1 es del modelo Hi-Techno Pump IX-C060TCN-TB-U de la marca IWAKI Pumps. Esta bomba se puede apreciar en la Figura 5.7 y tiene un flujo de entre 0.08 y 60 L/H.

La bomba puede ser accionada de dos maneras, la primera es la forma manual la cual es la que se utiliza en estos momentos y para utilizarse se debe de desplazar un operario hasta espacio físico donde se encuentra la bomba y mediante un panel de control se coloca el valor en que se

desea inyectar; la segunda manera es mediante un control externo que puede ser de varias maneras: control analógico, control de pulso, control por lote, control mediante señal auxiliar.

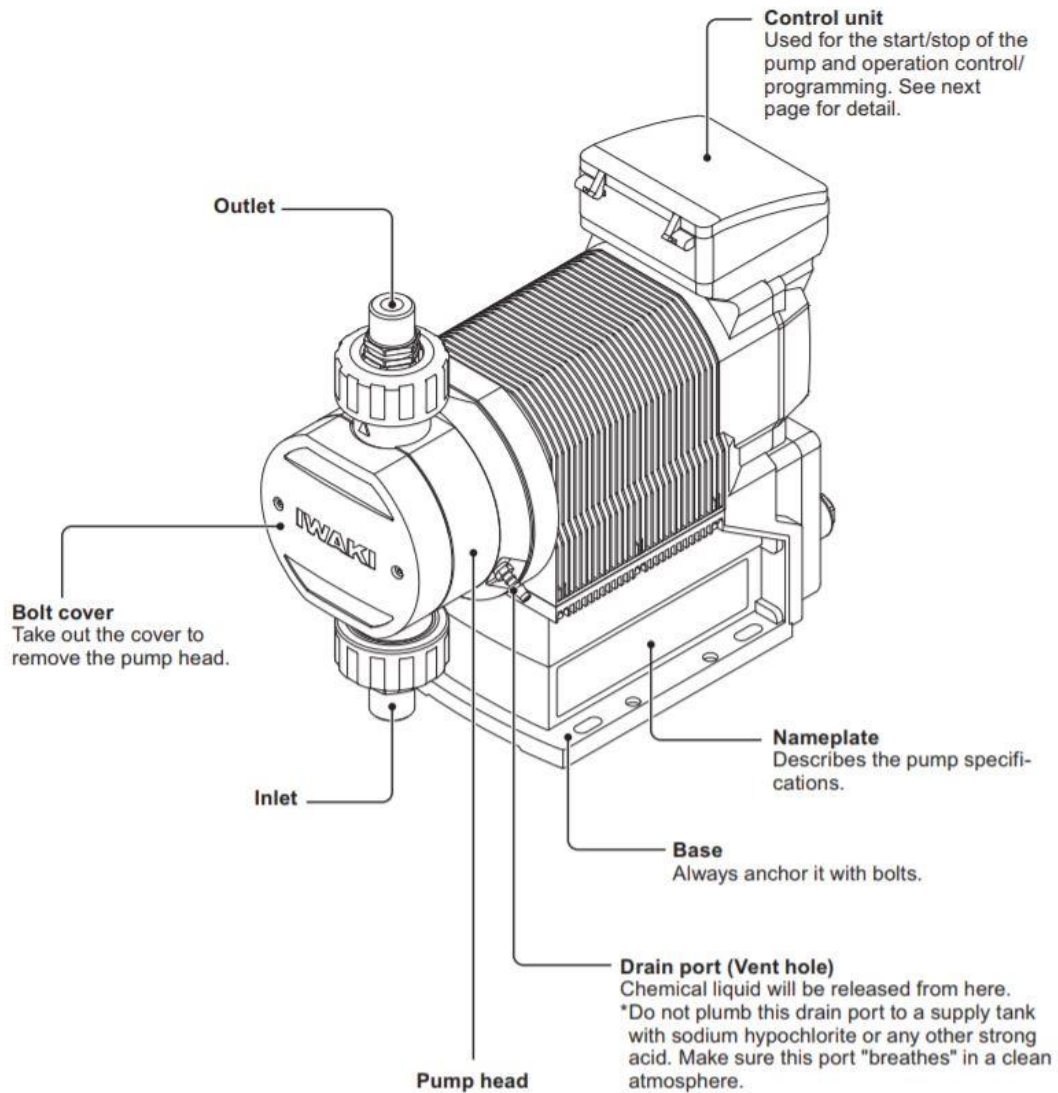


Figura 5.7 - Bomba de inyección de coagulante

Fuente: Hi-Techno Pump IX-C series (North America) Manual

Para la realización del proyecto se va a trabajar con el control analógico el cual a su vez cuenta con cuatro configuraciones:

- 4 – 20 mA
- 20 – 4 mA
- 0 - 20 mA
- 20 – 0 mA

La Figura 5.8 muestra de manera gráfica las cuatro posibles configuraciones en términos del flujo L/H que puede otorgar la bomba. La Figura 5.9 muestra la conexión eléctrica que se debe de realizar a la hora de la implementación, se puede apreciar que para el caso analogico el cable positivo de la señal se coloca al pin 3 mientras que el lado negativo se conecta al pin 4. La bomba cuenta con una resistencia interna de 200Ω.

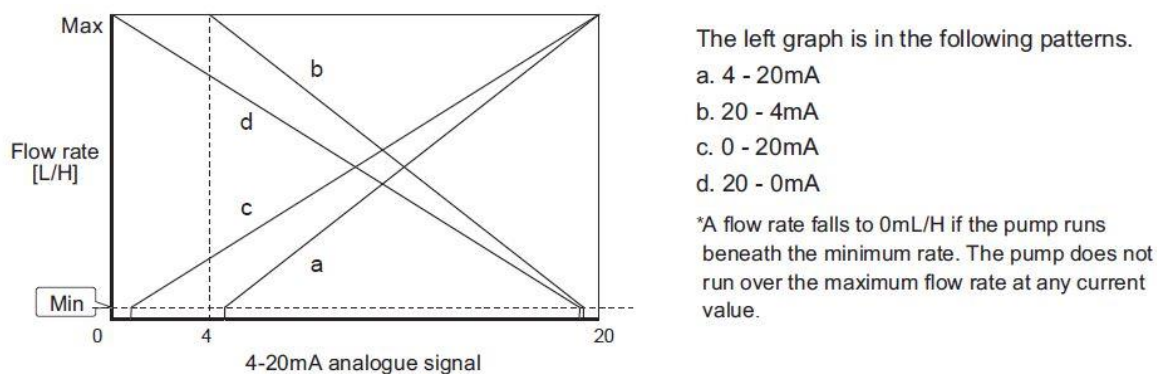


Figura 5.8 - Configuración de control analógico

Fuente: Hi-Techno Pump IX-C series (North America) Manual

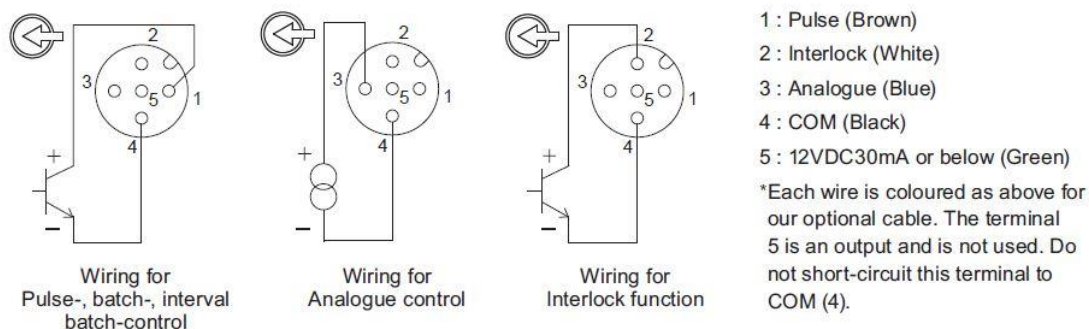


Figura 5.9 - Conexión eléctrica para la entrada analógica

Fuente: Hi-Techno Pump IX-C series (North America) Manual

Para realizar el control a modo externo se debe realizar la configuración en el panel de control de la bomba, la Figura 5.10 permite visualizar la secuencia que hay que seguir para llevar a cabo dicha configuración. En el menú principal se debe seleccionar la opción “Program EXT”, para luego seleccionar la opción “Analog”. Por default la bomba está configurada a la señal

estándar 4 – 20 mA, sin embargo en caso de que se haya modificado se debe seleccionar la opción 4 – 20 mA ya que así es como se va a trabajar en el proyecto.

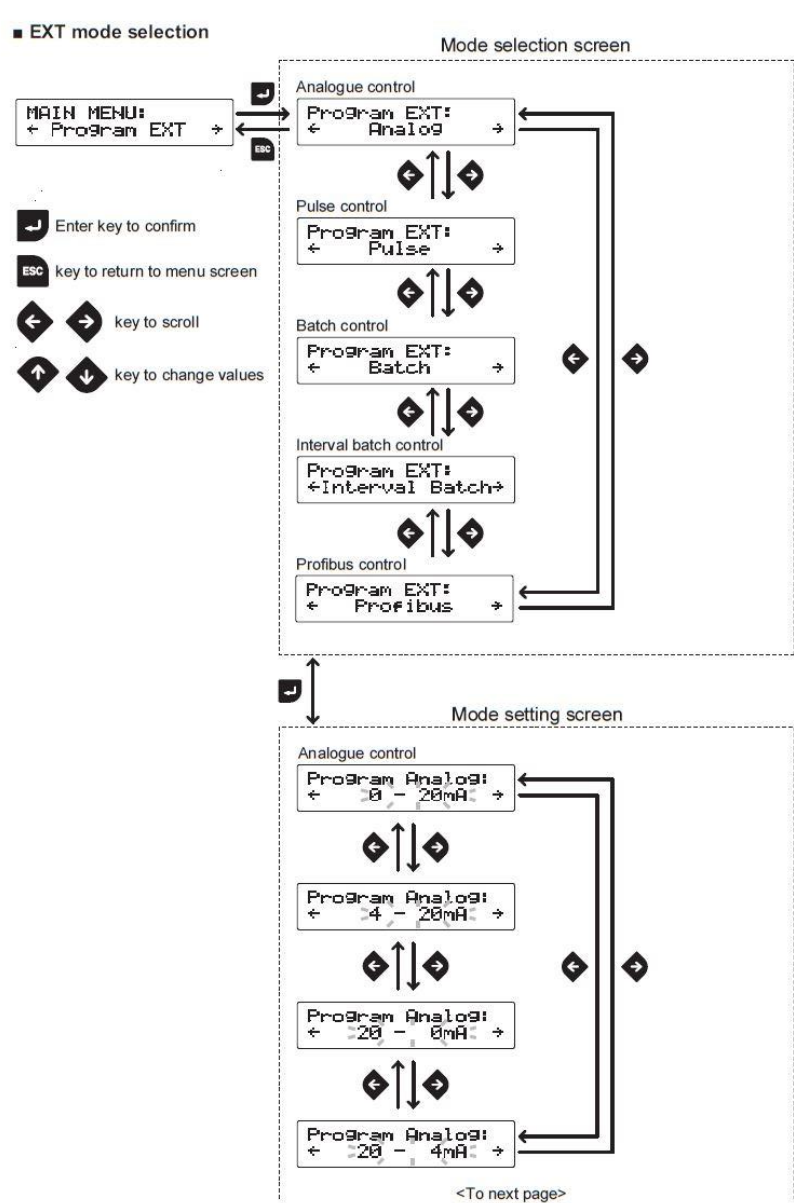


Figura 5.10 - Configuración de control Externo

Fuente: Hi-Techno Pump IX-C series (North America) Manual

5.1.4 Sensores de flujo

Los sensores de flujo con los que cuenta la planta de tratamiento son el iMAG 4700p – 8” que se ilustra en la Figura 5.11. Estos sensores se ubican uno en la entrada de agua de San Rafael (PIPASA) y el otro en la entrada del DAF Garita, ambos son exactamente iguales.

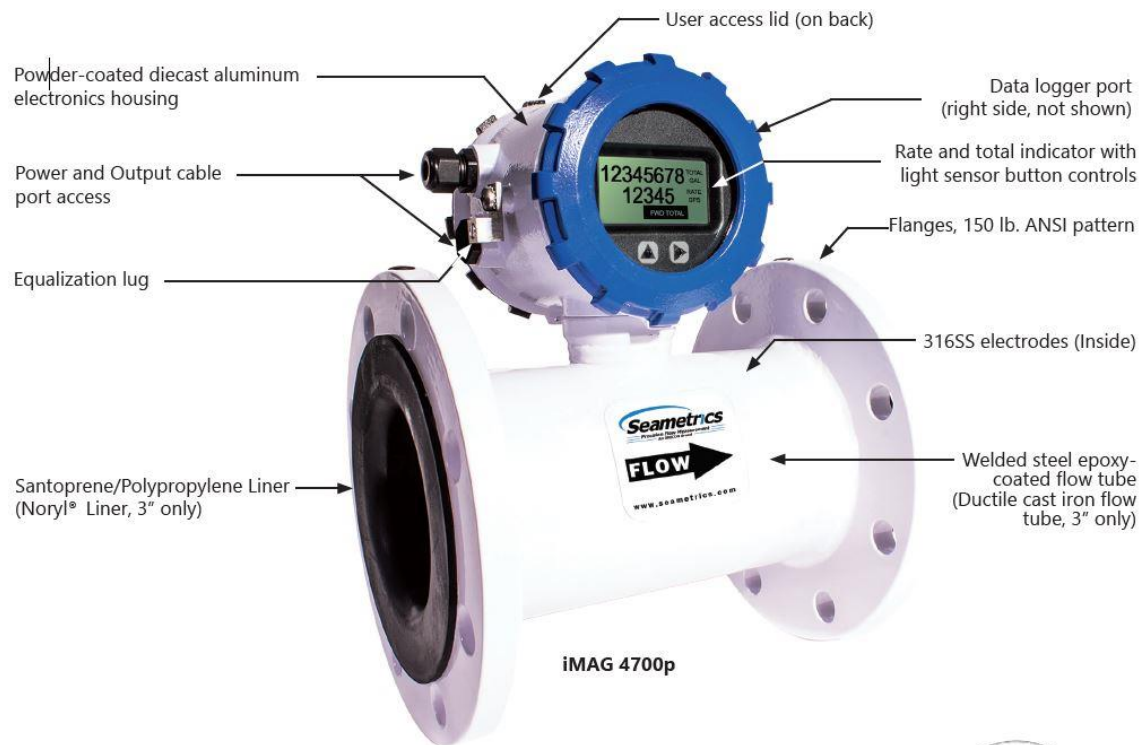


Figura 5.11 - Sensor de flujo iMAG 4700p

Fuente: iMAG 4700p Municipal/Industrial Magmeter Instructions.

Para el caso de 8 pulgadas de diámetro se tienen las características de flujo que se presentan en la Tabla 5.9. Actualmente las unidades de medida que se utilizan en la planta son m^3/h , por lo que el flujo máximo sería de $1167.42 m^3/h$ y el de corte o mínimo $5.837 m^3/h$.

Tabla 5.9 - Características de flujo

| Característica | Valor |
|---------------------------------|-------|
| Flujo máximo (GPM) | 5140 |
| Flujo de corte (mínimo) (GPM) | 25.70 |
| Flujo máximo (L/s) | 324 |
| Flujo de corte (mínimo) (L/s) | 1.62 |
| Velocidad de flujo máxima (m/s) | 10 |

Fuente: iMAG 4700p Municipal/Industrial Magmeter Instructions.

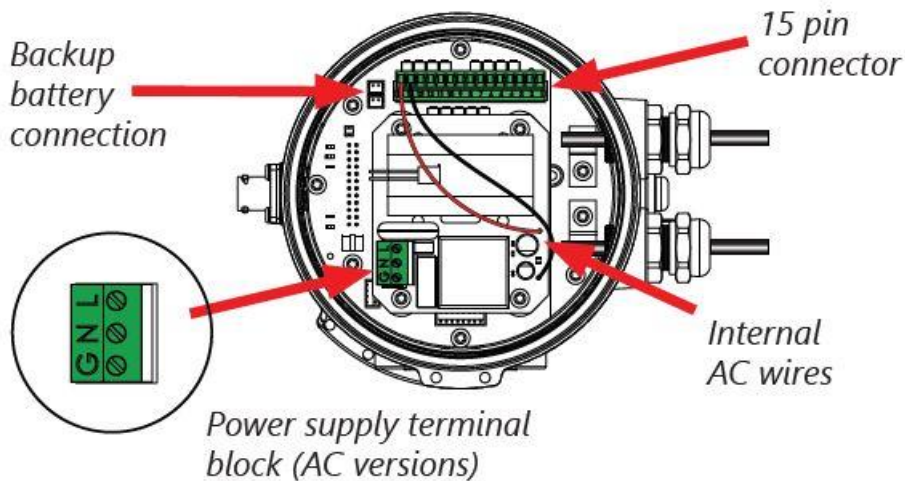


Figura 5.12 - Panel de conexión del sensor de flujo

Fuente: iMAG 4700p Municipal/Industrial Magmeter Instructions.

La Figura 5.12 muestra el panel interno del sensor donde se pueden apreciar las distintas conexiones con las que cuenta, entre ellas están los cables internos de AC, la terminal de poder AC, la conexión de batería de respaldo y el panel de 15 pines que se puede observar de forma más clara en la Figura 5.13.

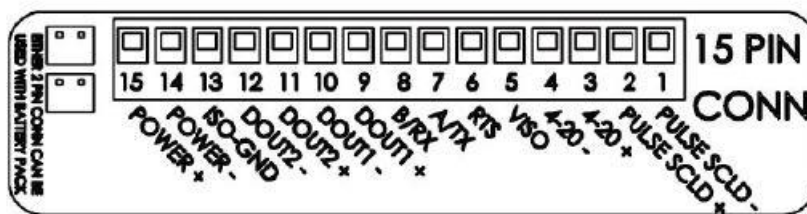
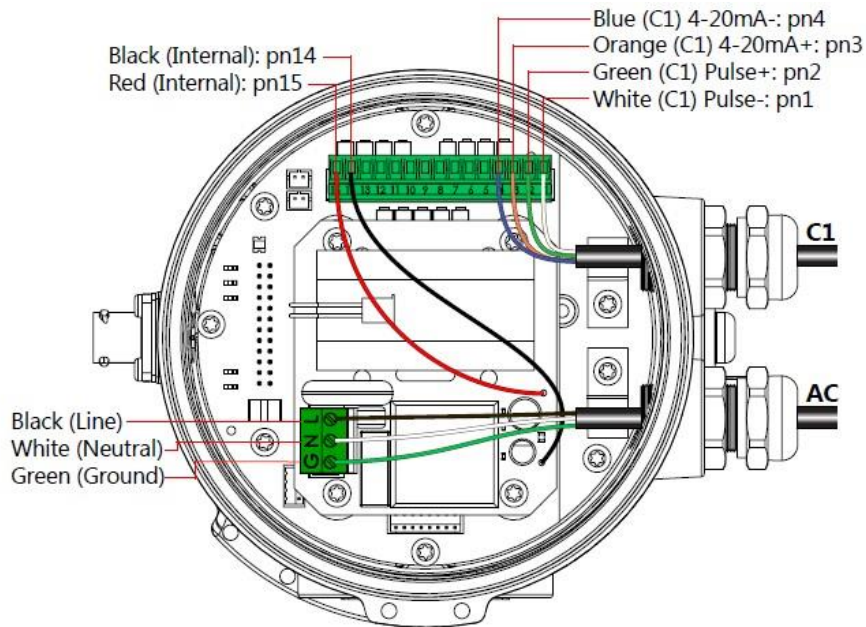


Figura 5.13 - Panel de pines de conexión

Fuente: iMAG 4700p Municipal/Industrial Magmeter Instructions.



AC Power with Pulse and 4-20mA (A1X/A2X)

Figura 5.14 - Diagrama de conexión para control analógico

Fuente: iMAG 4700p Municipal/Industrial Magmeter Instructions.

Al utilizarse una salida analógica de 4 – 20 mA se debe realizar la conexión eléctrica según se muestra en la Figura 5.14, donde el cable positivo se conecta en el pin 3 y el cable negativo se conecta en el pin 4; todo el cableado de salida analógica sale al exterior mediante la terminal C1, por lo que no es necesario mantener abierto el sensor. La Figura 5.15 muestra el diagrama sobre cómo se debe de conectar la fuente de alimentación DC para obtener la señal de salida analógica. Este sensor cuenta con una señal de alerta preestablecida para avisar cuando no detecta flujo, en dado caso se envía una señal de 22.8mA

Analog (4-20mA Current Loop) Output Application

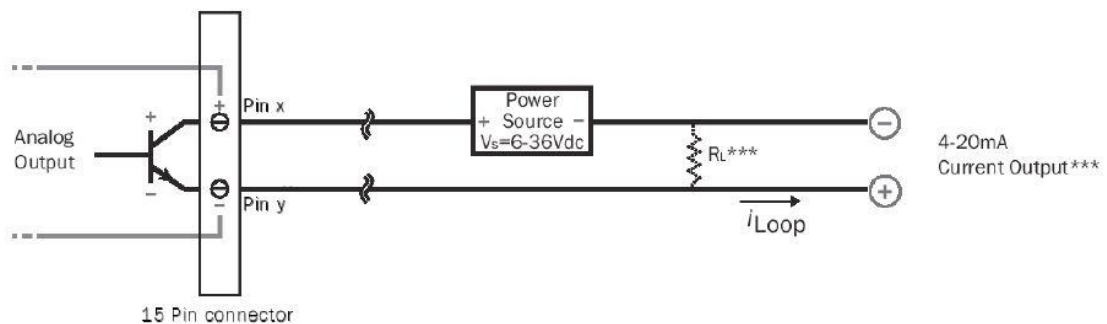


Figura 5.15 - Conexión de salida analógica

Fuente: iMAG 4700p Municipal/Industrial Magmeter Instructions.

5.1.5 Zelio

Para controlar el sistema del DAF Garita se utiliza el relé inteligente Zelio SR3B261FU el cual se encarga de manejar la bomba de recirculación de aire, las paletas y realizar el control de arranque y paro cuando se le indique de manera manual. La Figura 5.16 muestra la apariencia física de dicho relé.



Figura 5.16 - Relé inteligente Zelio SR3B261FU

Fuente: Schneider electric. Obtenido de: <https://www.se.com/mx/es/product-range/531-zelio-logic/>

En la Tabla 5.10 se presentan los parámetros que deben de ser conocidos para poder utilizar este dispositivo de manera correcta, sin embargo, en la realización del proyecto solo se va a incorporar una entrada nueva para que las paletas sean activadas cuando el PLC M221 lo ordene por lo que el parámetro principal a considerar son las entradas.

Tabla 5.10 - Parámetros del Zelio SR3B261FU

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------------|---|
| Voltaje de suministro | 100 a 240 V |
| Corriente de suministro | 100mA a 100 V (sin extensión) 50mA a 240 V (sin extensión) 60mA a 240 V (con extensión) 80mA a 100 V (con extensión) |
| Consumo de alimentación | 12 VA sin extensión 17 VA con extensión |
| Número de entradas discretas | 16 |
| Voltaje de entrada discreta | 100 a 240 VAC |
| Corriente de entrada discreta | 0.6 mA |
| Voltaje de estado 1 garantizado | ≥ 79 V para entrada discreta |
| Voltaje de estado 0 garantizado | ≤ 40 V para entrada discreta |
| Corriente de estado 1 garantizado | ≥ 0.17 mA para entrada discreta |
| Corriente de estado 0 garantizado | ≤ 0.5 mA para entrada discreta |
| Impedancia de entrada discreta | 350 kOhm |
| Número de salidas | 10 relé |
| Voltajes límites de salida | 24 a 250 VAC 5 a 30 VDC |
| Corriente térmica de salida | 5A para 2 salidas 8A para 8 salidas |
| Tiempo de respuesta | <ul style="list-style-type: none"> - 10 ms (de estado 0 a estado 1) para relé de salida - 5 ms (de estado 1 a estado 0) para relé de salida - 50 ms con programación de escalera (de estado 0 a estado 1) para relé de entrada discreta - 50 ms con programación de escalera (de estado 1 a estado 0) para relé de entrada discreta - 50 a 255 ms con programación FBD (de estado 0 a estado 1) para relé de entrada discreta - 50 a 255 ms con programación FBD (de estado 1 a estado 0) para relé de entrada discreta |

Fuente: Product data sheet SR3B261FU

En la Tabla 5.10, específicamente en la sección “corriente de estado 1 garantizado” y “corriente de estado 0 garantizado” muestran que para recibir un “1” es necesario que en la entrada discreta (analógica) ingrese una corriente superior a 0.17mA (o un voltaje mayor a 79 V) y que para se identifique un “0” se necesita una corriente menor a 0.5mA (o un voltaje menor a 40 V). Con esta configuración se puede lograr que el Zelio accione las paletas cuando recibe una señal que se envía desde el PLC el cual mediante temporizadores y verificando que la señal de paro no esté activa indica los periodos de trabajo.

5.1.6 Equipo de protección EL-FI M20

El equipo de protección EL-FI M20, que se aprecia en la Figura 5.17, es un dispositivo que permite conocer el porcentaje de la potencia que se entrega en el eje del motor en un rango del 0 al 100%, esto permite determinar cuando existe una sobre carga o cuando se encuentra en sub carga.



Figura 5.17 - Equipo de protección EL-FI M20

Fuente: EL-FI M20 Shaft Power Monitor Instruction Manual

La Figura 5.18 muestra la configuración de relé de salidas que se da cuando se activa una pre-alarma o una alarma (la Figura 4.4 - *Alarmas del Emotron*. permite una mejor visualización de la lógica de alarmas). Cuando se activa una pre-alarma se dispara la conexión de relé 6-8, mientras que para el caso de una alarma se dispara la conexión de relé 6-7. La Figura 5.19 muestra un ejemplo del diagrama de conexión donde se aprecia mejor las salidas 6 (común), 7 (relé 1) y 8 (relé 2).

| Monitor (Protection) | Indication in window 05 | Alarm | Output Relay (default) |
|--------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------|
| OVER- and UNDER-LOAD (default) | — | MAX Main-Alarm | Relay 1 (NC): 6-7 |
| | | MAX Pre-Alarm | Relay 2 (NO): 6-8 |
| | | MIN Pre-Alarm | Relay 2 (NO): 6-8 |
| | | MIN Main-Alarm | Relay 1 (NC): 6-7 |
| OVERLOAD | — | MAX Main-Alarm | Relay 1 (NC): 6-7 |
| | | MAX Pre-Alarm | Relay 2 (NO): 6-8 |
| UNDERLOAD | — | MIN Pre-Alarm | Relay 2 (NO): 6-8 |
| | | MIN Main-Alarm | Relay 1 (NC): 6-7 |

Figura 5.18 - Configuración de relés para alarma y pre-alarma

Fuente: EL-FI M20 Shaft Power Monitor Instruction Manual

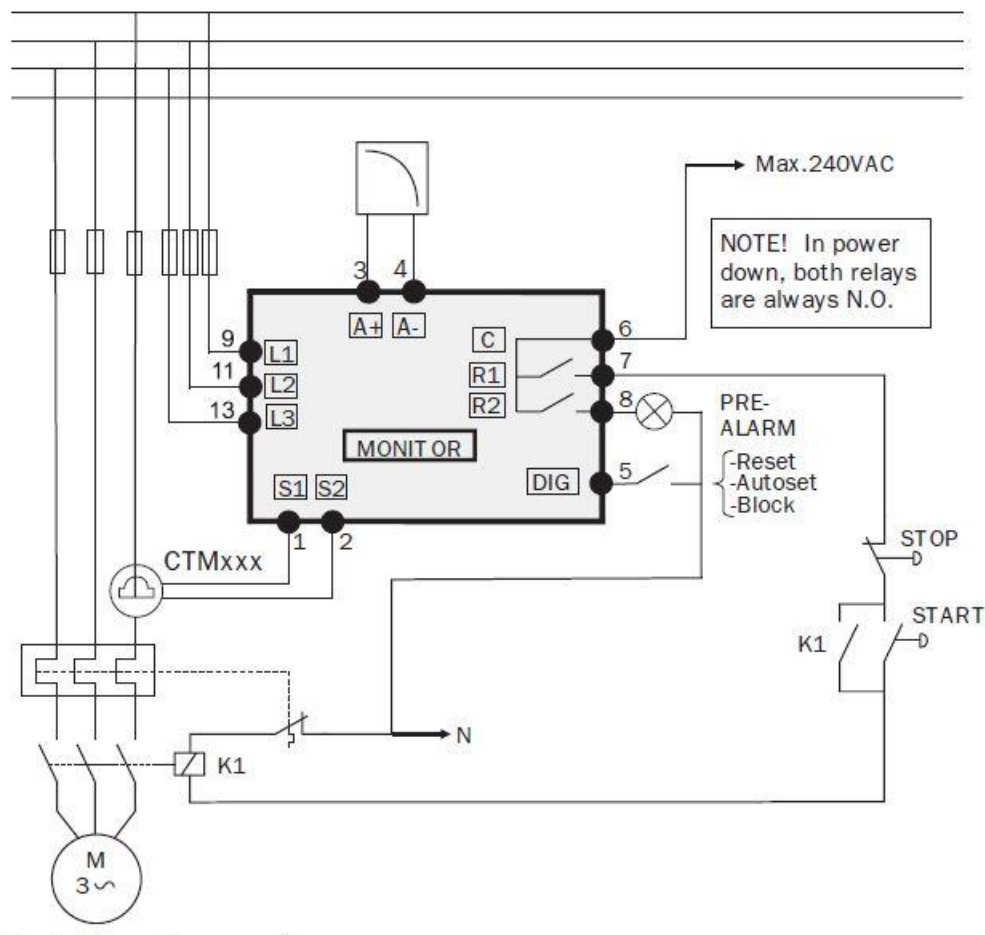


Figura 5.19 - Diagrama de conexión del EL-FI M20

Fuente: EL-FI M20 Shaft Power Monitor Instruction Manual

Se puede apreciar en la Figura 5.18 que, si bien existe un aviso de alarma o pre-alarma no se indica si este sucedió por sobrecarga o subcarga, para determinar esto es necesario conectar la

salida analógica a una etapa de monitoreo donde se muestre el porcentaje de potencia en el eje, la Figura 5.20 muestra las diferentes configuraciones que se pueden manejar:

- 0 – 20 mA
- 20 – 0 mA
- 4 – 20 mA
- 20 – 4 mA

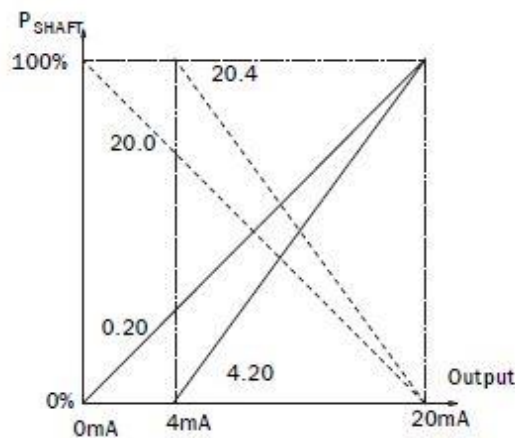


Figura 5.20 - Diferentes configuraciones analógicas del EL-FI M20

Fuente: EL-FI M20 Shaft Power Monitor Instruction Manual

Considerando que el Sistema permite realizar una desconexión (apague) del motor cuando se dispara una alarma, la salida analógica se puede configurar para que su rango no sea de 0% a 100%, sino que se puede modificar el rango con el fin de que se encuentre entre el disparo de las alarmas o en cualquier otra sección que se desee monitorear; la Figura 5.21 muestra dos configuraciones: la primera de 0% al 100% y la segunda de 20% a 55%. Se puede ver como en ambos casos el rango está distribuido en la misma salida analógica (de 0 a 20 mA).

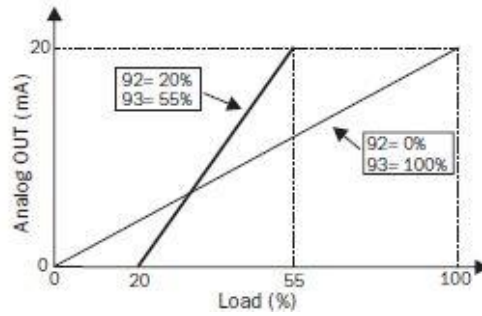


Figura 5.21 - Configuración de porcentaje de potencia en el eje

Fuente: EL-FI M20 Shaft Power Monitor Instruction Manual

5.1.7 Bomba diafragma y válvula solenoide

Para movilizar los lodos del tanque que los almacena una vez son expulsados del DAF Garita hacia el tanque espesador se utiliza la bomba de tipo diafragma NDP-50FAN que se muestra en la Figura 5.22.

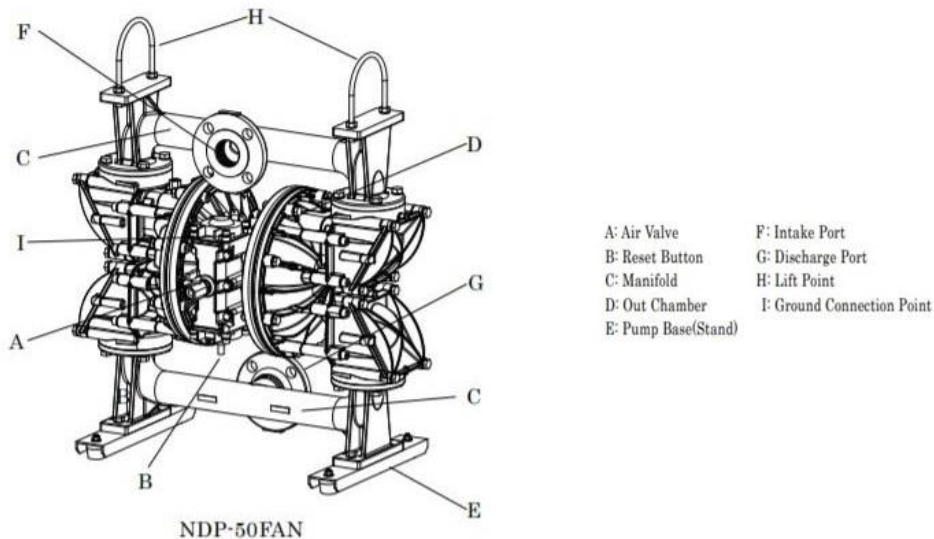


Figura 5.22 - Bomba diafragma NDP-50FAN

Fuente: Operation Manual Flap Valve Diaphragm Pumps NDP-50FAN

Este tipo de bomba se caracteriza por trabajar con aire comprimido, en este caso utiliza un compresor que se encuentra en la planta para alimentarse (el compresor únicamente suministra aire a la bomba diafragma). La Tabla 5.11 muestra las características de operación de esta bomba.

Tabla 5.11 - Parámetros de la bomba diafragma NDP-50FAN

| Parámetro | Valor |
|----------------------------|------------------|
| Presión de operación | 0.2 – 0.7 MPa |
| Presión de descarga máxima | 0.7 MPa |
| Volumen/ciclo de descarga | 2400 mL |
| Volumen de descarga máxima | 600 mL |
| Consumo de aire máximo | 7000 L/min (ANR) |
| Temperatura del fluido | 0 – 70° C |
| Emisión de sonido | 94 – 101 dB |

Fuente: Operation Manual Flap Valve Diaphragm Pumps NDP-50FAN

Para activar o desactivar la bomba simplemente se necesita cerrar cortar o abrir el flujo de aire que le ingresa, es por esto que se va a utilizar una válvula solenoide con el fin de poder realizar esta tarea de forma remota. La Figura 5.23 muestra el aspecto físico que tienen esta clase de válvulas.



Figura 5.23 - Válvula solenoide 120/110V, 1/2 pulg.

Fuente: Grainer Mexico. Obtenido de: <https://www.grainger.com.mx/producto/REDHAT-V%C3%A1lvula-Solenoide,2-2,1-2-pulg-,120-110V/p/4ELF3>

Debido a que la válvula funciona con 110 V, se necesita utilizar un contactor para que puede ser accionada a partir de una señal proveniente del PLC.

5.1.8 Contactor bomba floculante

Un contactor es un dispositivo eléctrico como el mostrado en la Figura 5.24 que se encarga de permitir o bloquear el paso de la corriente dependiendo generalmente de una señal de entrada. En este caso se va a utilizar una señal digital proveniente del PLC para cerrar o abrir el contacto. Actualmente la instalación eléctrica funciona de tal manera que el contactor es activado mediante un switch, por lo que no hay que realizar mayor cambio más que el sustituir el contactor por uno nuevo.



Figura 5.24 - Contactor Eléctrico

Fuente: Schneider Electric. Obtenido de:

<https://www.se.com/cr/es/product/LC1D40AB7/tesys-d-contactor---3p%283-no%29---ac-3---%3C%3D-440-v-40-a---24-v--ac-50-60-hz--coil/>

5.2 Descripción del Software

Las tres primeras partes de esta sección van a describir los softwares de programación para los diferentes dispositivos que se utilizan en el proyecto, el cuarto punto describe el programa que permite diseñar la interfaz gráfica del SCADA, mientras que en el último punto se va a tratar sobre el protocolo de comunicación entre el variador de frecuencia, el PLC y el SCADA.

5.2.1 SoMachine

SoMachine es el software que provee Schneider Electric para programar sus PLC, en este caso el M221. Para realizar la programación se utiliza el lenguaje de escalera, el cual se puede realizar mediante una programación grafica como la que se puede ver en la Figura 5.25.

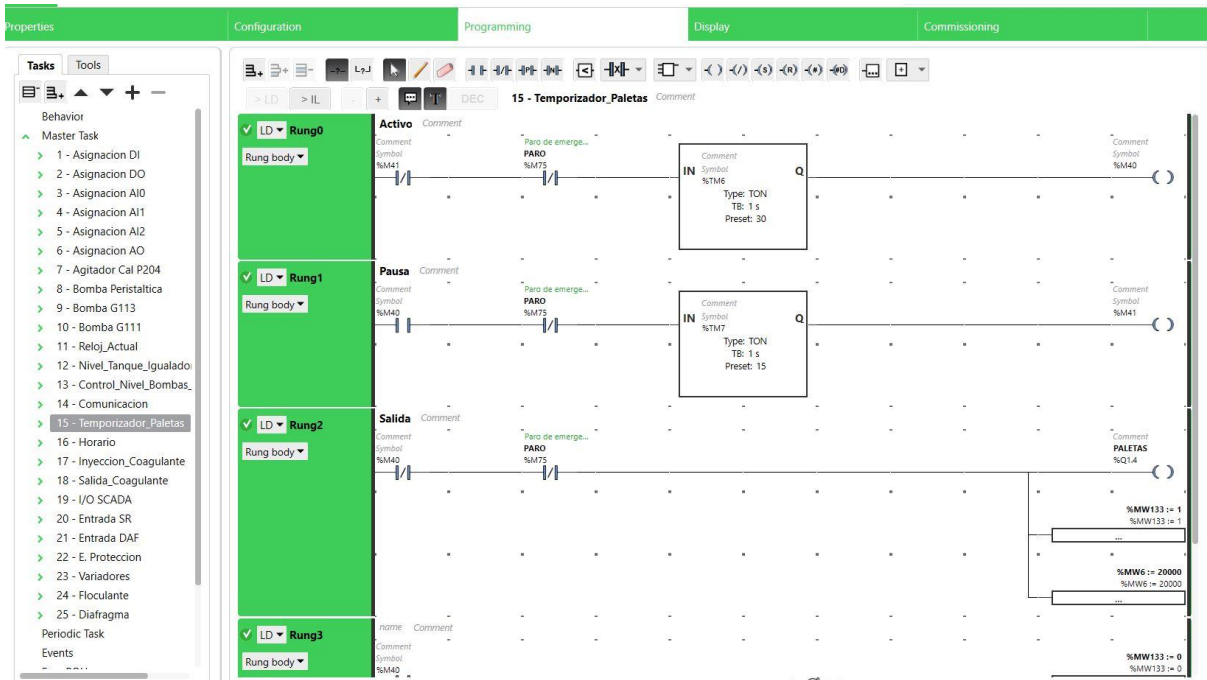


Figura 5.25 - Ventana de programación SoMachine

Fuente: SoMachine. Elaboración propia

Al iniciar el software lo primero que se debe de hacer es seleccionar en la ventana de configuración los componentes con los que se va a trabajar, esto se puede observar en la Figura 5.26, se debe de seleccionar el modelo del PLC y los bloques de expansión cuyas opciones están a disposición en las viñetas de la derecha.

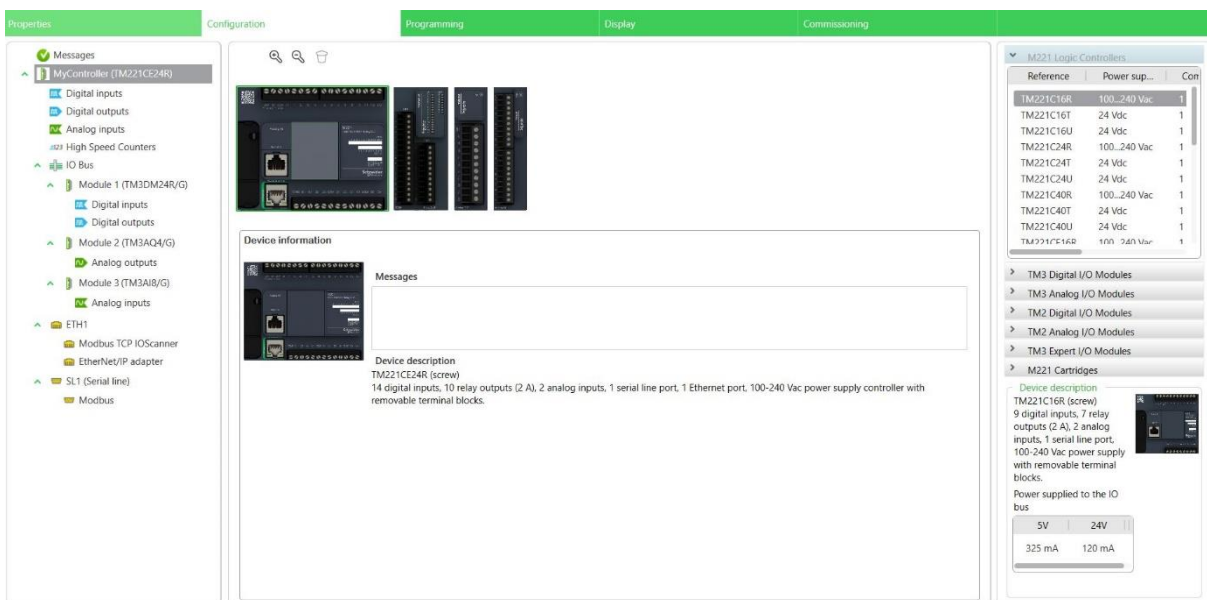


Figura 5.26 - Ventana de configuración SoMachine

Fuente: SoMachine. Elaboración propia

El programa SoMachine cuenta con una gran variedad de funciones disponibles para llevar a cabo un sinnúmero de configuraciones de acuerdo a la necesidad del usuario, las funciones más relevantes que fueron utilizadas en el proyecto se encuentran en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 - Funciones básicas SoMachine

| Operador | Función |
|--------------|---|
| := | [Op1 := Op2] Op1 toma el valor de Op2 |
| > | Comprueba si Op1 es mayor que Op2 |
| >= | Comprueba si Op1 es mayor o igual que Op2 |
| < | Comprueba si Op1 es menor que Op2 |
| <= | Comprueba si Op1 es menor o igual que Op2 |
| = | Comprueba si Op1 es igual que Op2 |
| <> | Comprueba si Op1 es distinto de Op2 |
| BTI | Conversión de BCD a binario |
| ITB | Conversión de binario a BCD |
| INT_TO_REAL | Conversión de una palabra entera a flotante |
| DINT_TO_REAL | Conversión de una palabra doble (entera) a flotante |
| REAL_TO_INT | Conversión de una palabra flotante a entera (el resultado es el valor algebraico más cercano) |
| REAL_TO_DINT | Conversión de una palabra flotante a doble (el resultado es el valor algebraico más cercano) |

Fuente: SoMachine Basic Guía de la biblioteca de funciones genéricas.

El lenguaje de escalera permite realizar ciertas configuraciones que permiten emular comportamientos lógicos, los principales y que más se utilizaron son los representados en la Figura 5.27 (AND lógicos) y en la Figura 5.28 (OR lógicos).



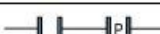

| Operadores | Equivalente del diagrama de contactos | Operandos permitidos |
|------------|---|---|
| AND |  | 0/1 %I, %Q, %M, %S, %X, %BLK.x |
| ANDN |  | %IW:Xk, %QW:Xk, %IWS:Xk, %QWS:Xk, %MW:Xk, %SW:Xk, %KW:Xk |
| ANDR |  | %I, %M |
| ANDF |  | |

Figura 5.27 - Operadores AND lógicos

Fuente: SoMachine Basic Guía de la biblioteca de funciones genéricas.

| Operadores | Equivalente del diagrama de contactos | Operandos permitidos |
|------------|---------------------------------------|--|
| OR | | 0/1 %I, %Q, %M, %S, %X, %BLK.x %IW:Xk, %QW:Xk, %IWS:Xk, %QWS:Xk, %MW:Xk, %SW:Xk, %KW:Xk |
| ORN | | |
| ORR | | %I, %M |
| ORF | | |

Figura 5.28 - Operadores OR lógicos

Fuente: SoMachine Basic Guía de la biblioteca de funciones genéricas.

Una característica que presenta el PLC de Schneider es que cuenta con función de reloj, es decir permite llevar el registro del día de la semana, año, mes, hora... tal y como se muestra en la Figura 5.29

| Codificación | Byte más significativo | Byte menos significativo |
|--|------------------------|--------------------------|
| %MW11 | - | Día de la semana (1) |
| %MW12 | 00 | Segundo |
| %MW13 | Hora | Minuto |
| %MW14 | Mes | Día |
| %MW15 | Siglo | Año |
| (1) 1 = Lunes, 2 = Martes, 3 = Miércoles, 4 = Jueves, 5 = Viernes, 6 = Sábado, 7 = Domingo | | |

Figura 5.29 - Función de reloj SoMachine

Fuente: SoMachine Basic Guía de la biblioteca de funciones genéricas.

Para realizar la programación se siguieron diferentes lógicas dependiendo del equipo que se quería programar. Para configurar la bomba de coagulante se utilizó el registro de datos con el que cuenta la planta y se pudo observar que en el periodo comprendido desde las 8pm y las 7am siempre se tiene una inyección de 8.5L/H de coagulante, sin embargo para el resto de horas la cantidad de líquido a inyectar en la tubería varía bastante, es por esto que se realizó un diseño de tal forma que el encargado del SCADA va a poder seleccionar entre una serie de valores (0, 1.5, 2.5, 4, 5.5, 7) dependiendo de la concentración de químico que se considere necesario; en caso de que no exista un flujo de entrada proveniente de San Rafael entonces la

bomba se va a apagar de manera automática. La Figura 5.30 muestra en forma de diagrama de flujo la lógica utilizada.

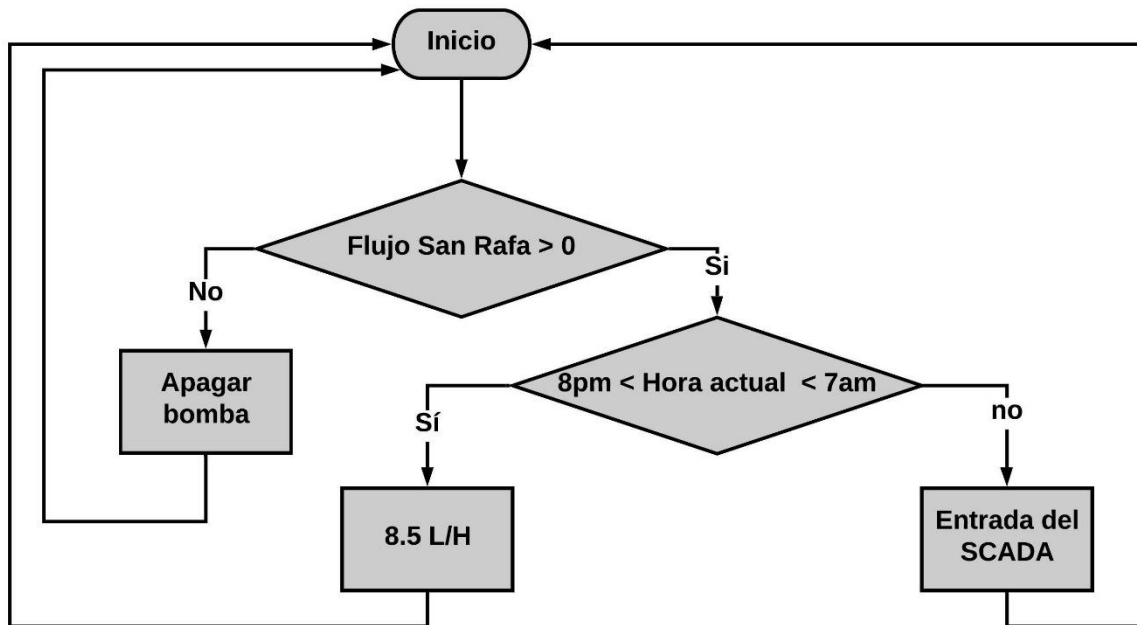


Figura 5.30 - Lógica bomba coagulante

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la mayor consideración es que cuando no exista un flujo de agua no se inyecte químico ya que esto genera un desperdicio, para el caso de la bomba floculante se va a cerrar (cuando se desee inyectar químico) o abrir (cuando se desee que la inyección se detenga) siguiendo la lectura del sensor de flujo del DAF Garita tal y como se muestra en la Figura 5.31.

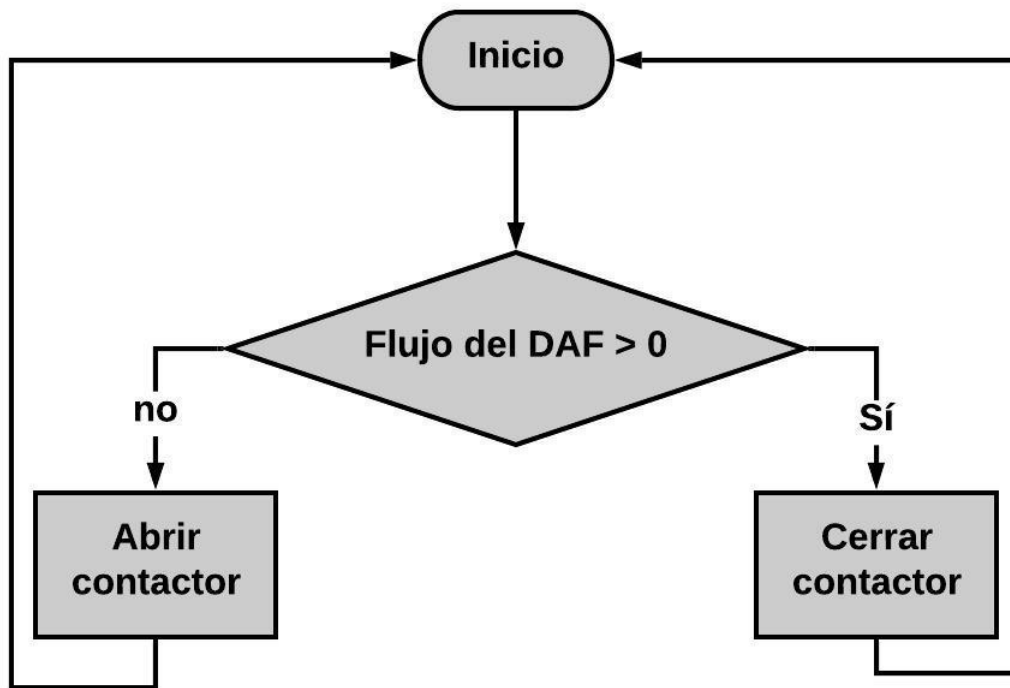


Figura 5.31 - Lógica bomba floculante

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de los variadores de frecuencia se debe tomar en consideración el nivel del Igualador #1, ya que a pesar de que se quiera manejar un flujo constante hacia el DAF Garita si el nivel en el Igualador #1 es muy bajo las bombas se deben de detener para que no se corra el riesgo de dañar los equipos, por el contrario si el nivel es alto las bombas deben de aumentar el flujo de agua con el fin de evitar que se llene el tanque y se dé un derramamiento de aguas. Esta lógica se aprecia en la Figura 5.32.

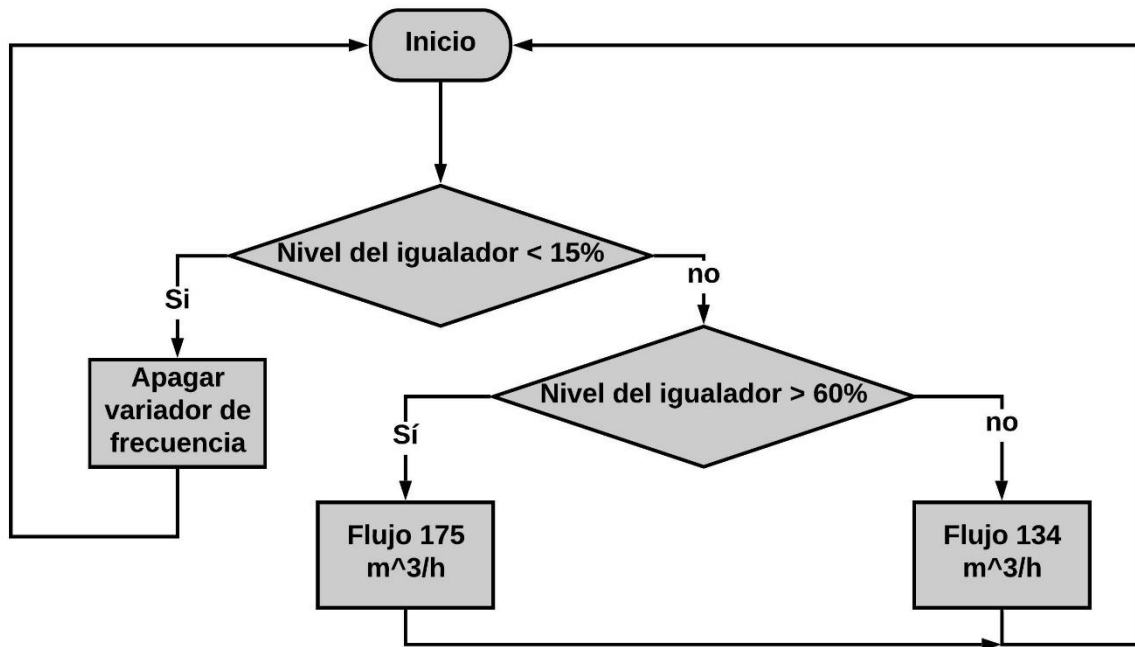


Figura 5.32 - Lógica flujo de los ATV630D18N4

Fuente: Elaboración propia

En el DAF Garita la activación de las paletas y de la bomba diafragma van a actuar de forma paralela, por dos minutos se van a mantener las paletas trabajando mientras la bomba diafragma se encuentra encendida extrayendo el lodo que se deposita en el tanque, cuando las paletas se desactiven la bomba también lo hará, ambos por un periodo un minuto para que nuevamente vuelva a empezar el ciclo, se puede visualizar de mejor forma observando la Figura 5.33. Es importante señalar que este periodo de tiempo puede modificarse de acuerdo con las futuras necesidades simplemente ajustando el periodo de tiempo de los temporizadores en la programación del PLC.

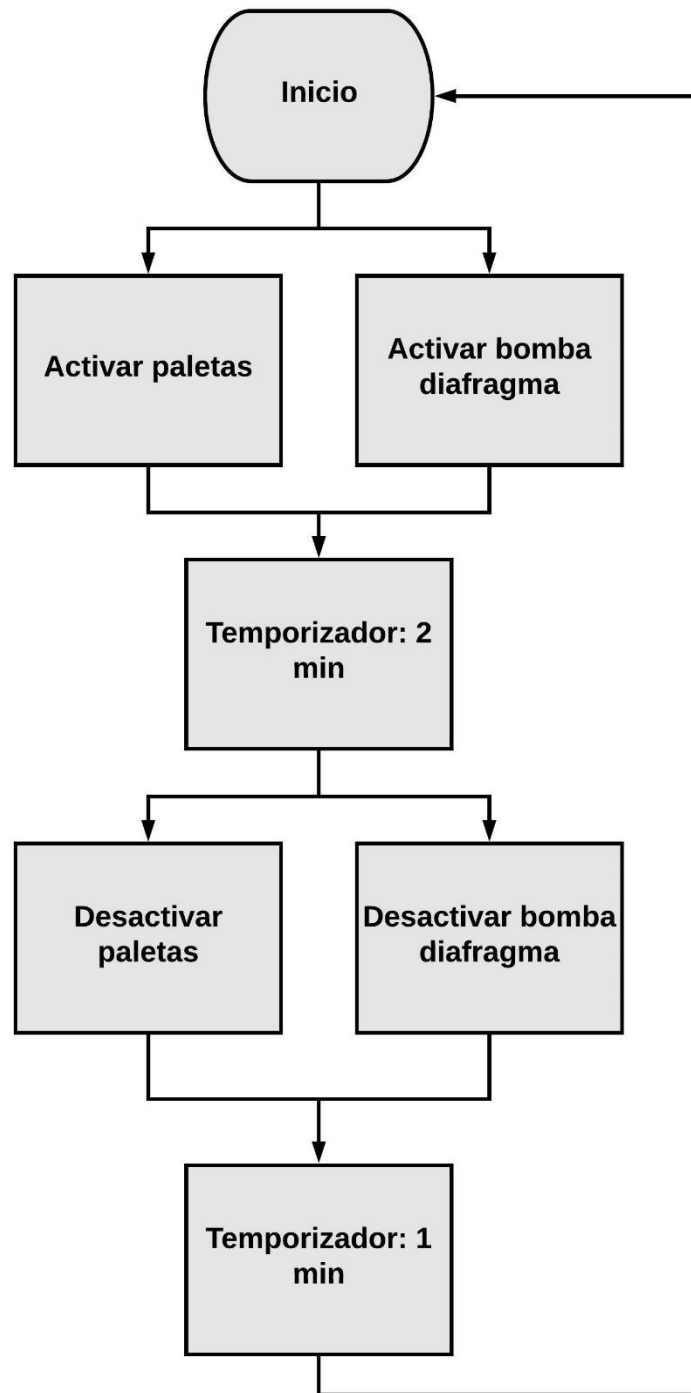


Figura 5.33 - Lógica equipo DAF Garita

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 SoMove

La programación de los Altivar se puede realizar de dos maneras: la primera es de forma manual, instalando el equipo y realizando la configuración mediante la HMI que trae incorporada; mientras que la segunda es mediante el uso del software Somove que se puede apreciar en la Figura 5.34, en dicha figura ya se encuentra configurado el variador ATV630D18N4.

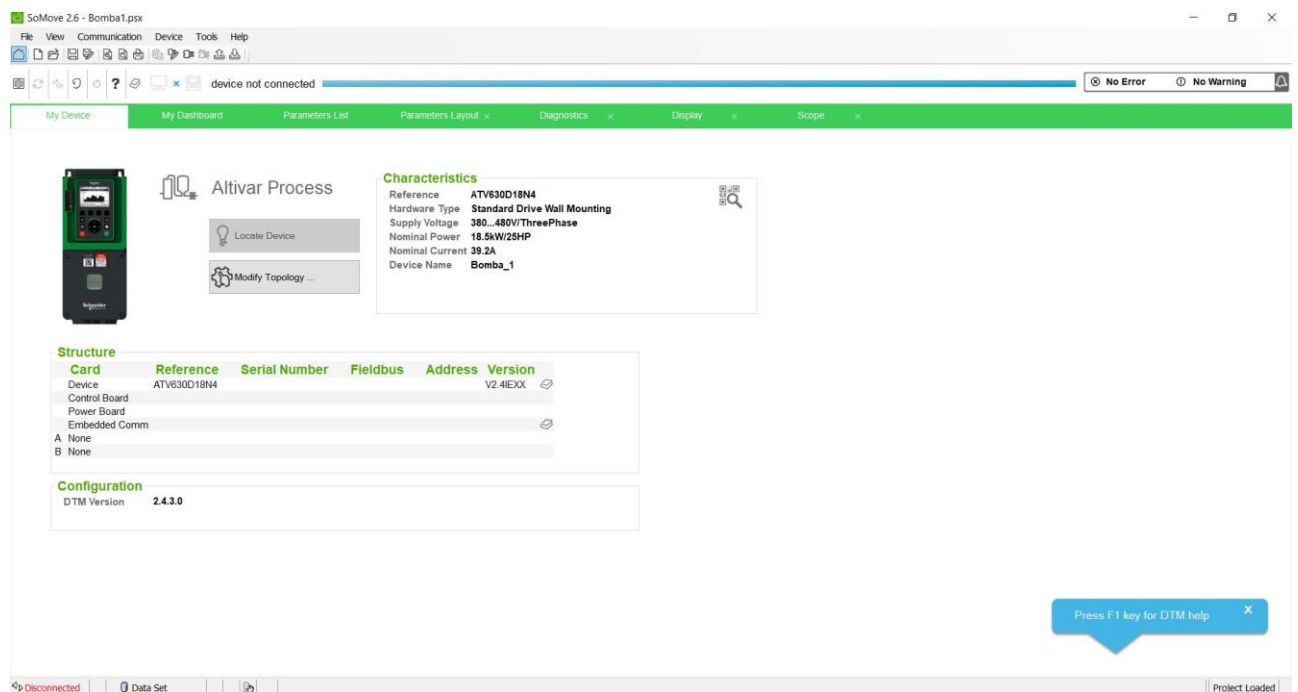


Figura 5.34 - Software SoMove

Fuente: SoMove. Elaboración propia

El variador de frecuencia permite que el control, en específico el PID, se pueda basar en tres tipos: presión, flujo y otro. Para el caso de este proyecto se va a utilizar el control por flujo como se puede apreciar en la Figura 5.35.

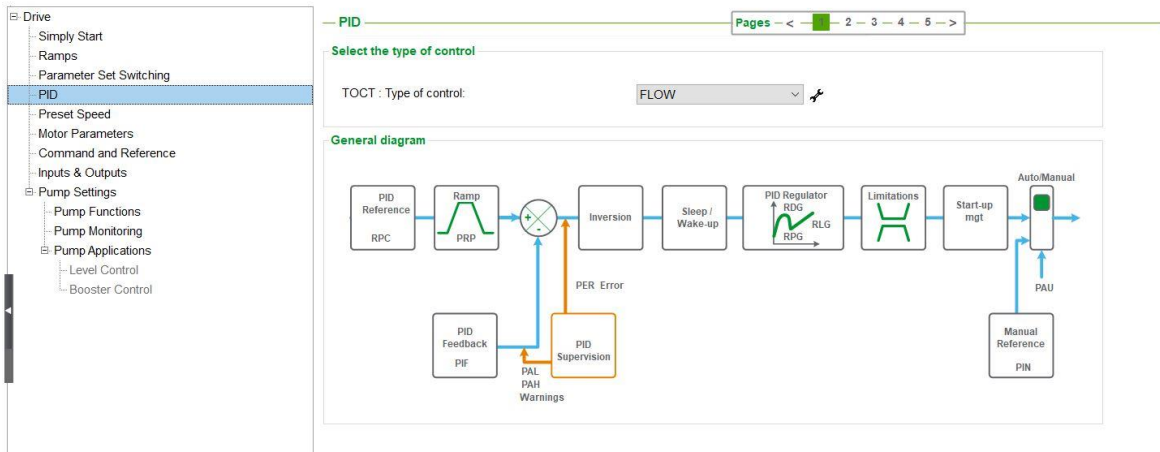


Figura 5.35 - SoMove, Panel de selección del PID

Fuente: SoMove. Elaboración propia

Una vez configurado el control por flujo se debe de establecer el feedback del controlador. En este caso se ha establecido la entrada analógica AI1 como feedback y se conecta al sensor de flujo de DAF Garita. Se debe de establecer el tipo de configuración de la entrada y además los valores mínimos y máximos tanto de la entrada como del proceso, la Figura 5.36 muestra esta configuración.

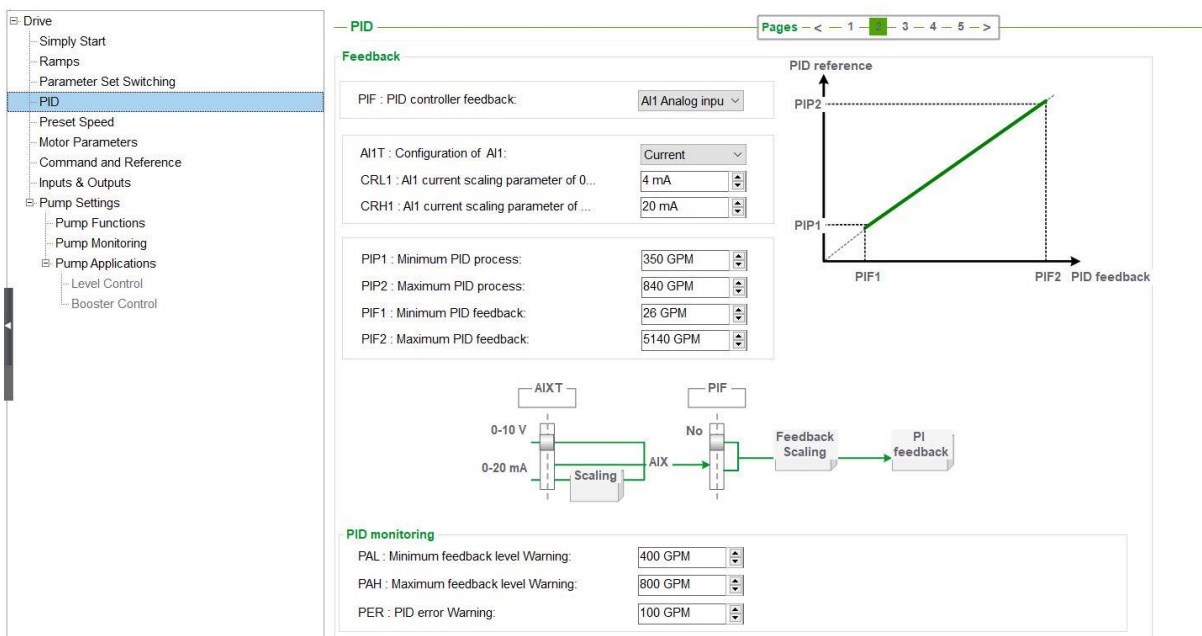


Figura 5.36 - Configuración del proceso del PID

Fuente: SoMove. Elaboración propia

El Altivar, y por ende el Somove, permite que la referencia (valor objetivo) se pueda escoger de acuerdo a las señales de entrada que reciba, cuando no se tiene una señal de entrada el variador de frecuencia se basa en la referencia interna que se ha establecido. La Figura 5.37 muestra la configuración establecida y la Tabla 5.13 muestra las referencias establecidas.

Tabla 5.13 - Configuración de referencia del PID

| Referencia | Valor (m^3/h) | Entrada activa |
|------------|-------------------|-----------------------|
| Interna | 134 | Ninguna |
| Preset 1 | 100 | Digital 2 |
| Preset 2 | 150 | Digital 3 |
| Preset 3 | 175 | Digital 2 y Digital 3 |

Fuente: Elaboración propia

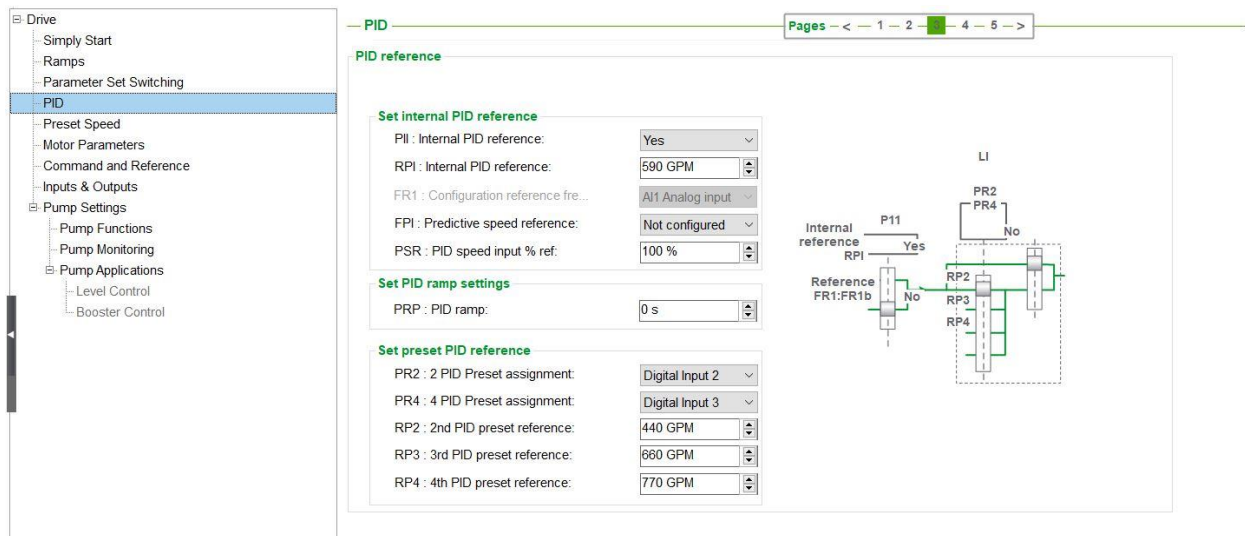


Figura 5.37 - Configuración de referencias del PID

Fuente: SoMove. Elaboración propia

El ATV630D18N4 cuenta con una serie de parámetros genéricos, en este caso parámetros de monitoreo donde se puede llevar control sobre subcarga de proceso, sobrecarga de proceso, monitoreo de pérdida y monitoreo térmico. En la Figura 5.38 se pueden ver las variables que cada proceso de monitoreo lleva, el valor actual y el valor por defecto, así como el valor máximo y mínimo, y además la dirección lógica donde se almacena (esto es útil para términos de comunicación).

| Code | Long Label | Current Value | Default Value | Min Value | Max Value | Logical address |
|---------------------------|---|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------------|
| Process underload | | | | | | |
| ULT | Underld T Delay Detect | 2 s | 0 s | 0 s | 100 s | 14411 |
| LUN | Unid Thr. at Nom. speed | 60 % | 60 % | 20 % | 100 % | 14416 |
| LUL | Unid Thr. at 0 speed | 10 % | 0 % | 0 % | 60 % | 14415 |
| RMUD | Unid. Freq.Thr. Detection | 0 Hz | 0 Hz | 0 Hz | 500 Hz | 14414 |
| SRB | Hysteresis Frequency | 0.3 Hz | 0.3 Hz | 0.3 Hz | 500 Hz | 14401 |
| UDL | Underload Management | Freewheel stop | Freewheel stop | | | 14412 |
| FTU | Unid Time Before Restart | 0 min | 0 min | 0 min | 6 min | 14413 |
| Process overload | | | | | | |
| TOL | Overload Time Detect | 3 s | 0 s | 0 s | 100 s | 14421 |
| LOC | Ovld Threshokt Detection | 110 % | 110 % | 70 % | 150 % | 14425 |
| SRB | Hysteresis Frequency | 0.3 Hz | 0.3 Hz | 0.3 Hz | 500 Hz | 14401 |
| ODL | Ovld Proces Management | Ramp stop | Freewheel stop | | | 14422 |
| FTO | Ovld time Before Restart | 0 min | 0 min | 0 min | 6 min | 14423 |
| Stall monitoring | | | | | | |
| STPC | Stall monitoring activation | Yes | No | | | 9270 |
| STP1 | Motor stall max time | 60 s | 60 s | 0 s | 200 s | 9271 |
| STP2 | Stall monitoring current level | 150 % | 150 % | 0 % | 150 % | 9272 |
| STP3 | Stall monitoring frequency level | 2 Hz | 2 Hz | 0 Hz | 500 Hz | 9273 |
| Thermal monitoring | | | | | | |
| TH2S | Activation of the thermal monitoring on AI2 | No | No | | | 13210 |
| AI2 | Configuration of AI2 | Voltage | Voltage | | | 4403 |
| TH2B | Response to thermal error for AI2 | Ramp stop | Ramp stop | | | 13240 |
| TH2F | Thermal error level for AI2 | 230 °F | 230 °F | 5 °F | 392 °F | 13230 |
| TH2A | Thermal warning level for AI2 | 194 °F | 194 °F | 5 °F | 392 °F | 13220 |
| TH2V | AI2 thermal value | 0 °F | 0 °F | 5 °F | 392 °F | 13250 |
| TH3S | Activation of the thermal monitoring on AI3 | No | No | | | 13211 |
| AI3T | Configuration of AI3 | Current | Current | | | 4404 |

Figura 5.38 - Parámetros de monitoreo genérico

Fuente: SoMove. Elaboración propia

De acuerdo a la información que se obtiene del panel de control mostrado en la Figura 5.38 se pueden configurar una serie de relés de salida para que se activen a modo de alarma cuando algún valor llegue a un punto determinado, en total se tienen seis relés de este tipo y en la Figura 5.39 se puede observar algunas de las posibles asignaciones que se pueden configurar.

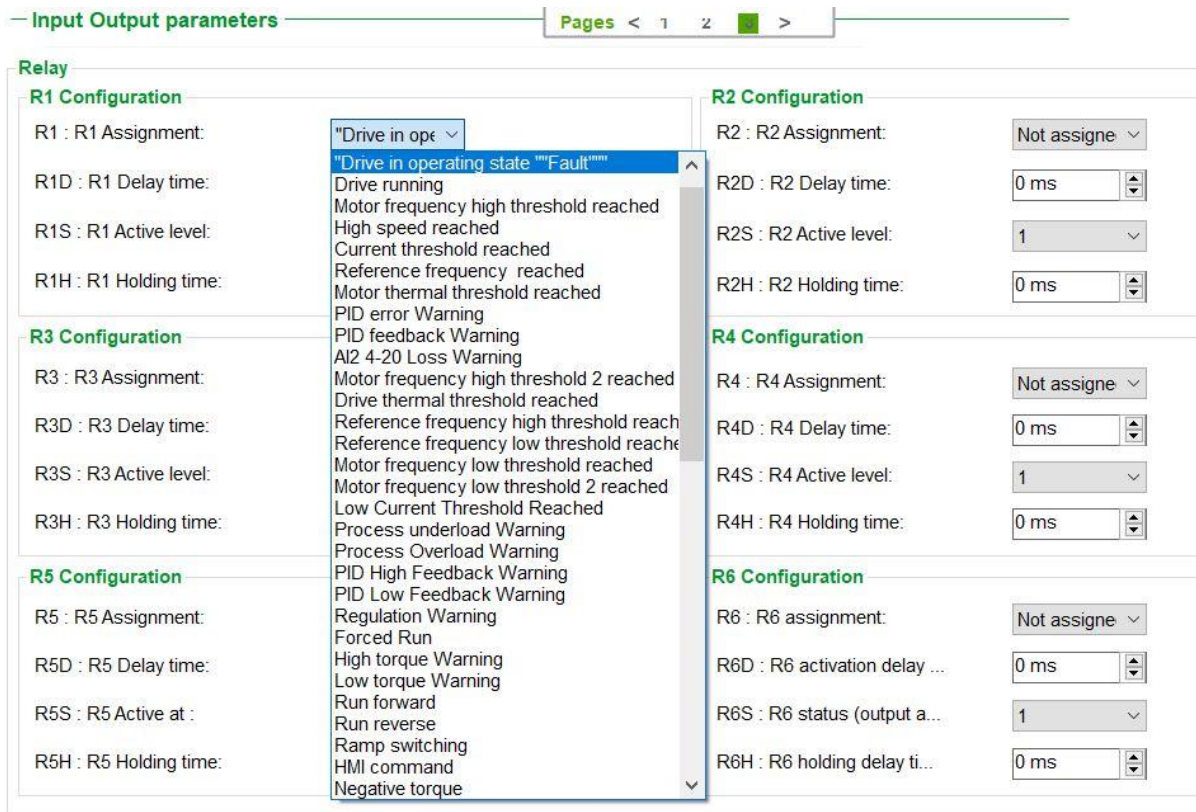


Figura 5.39 - Configuración de relés de salida

Fuente: SoMove. Elaboración propia

5.2.3 ZelioSoft 2

El ZelioSoft 2 es el software que utiliza el relé inteligente SR2B261FU para ser programado, es un software que al igual que el SoMachine y la mayoría de programas para PLCs utiliza el lenguaje de escalera mediante interfaz gráfica. La Figura 5.40 muestra la ventana de programación del software, así como el programa que esta corriente actualmente el controlador en el DAF Garita.

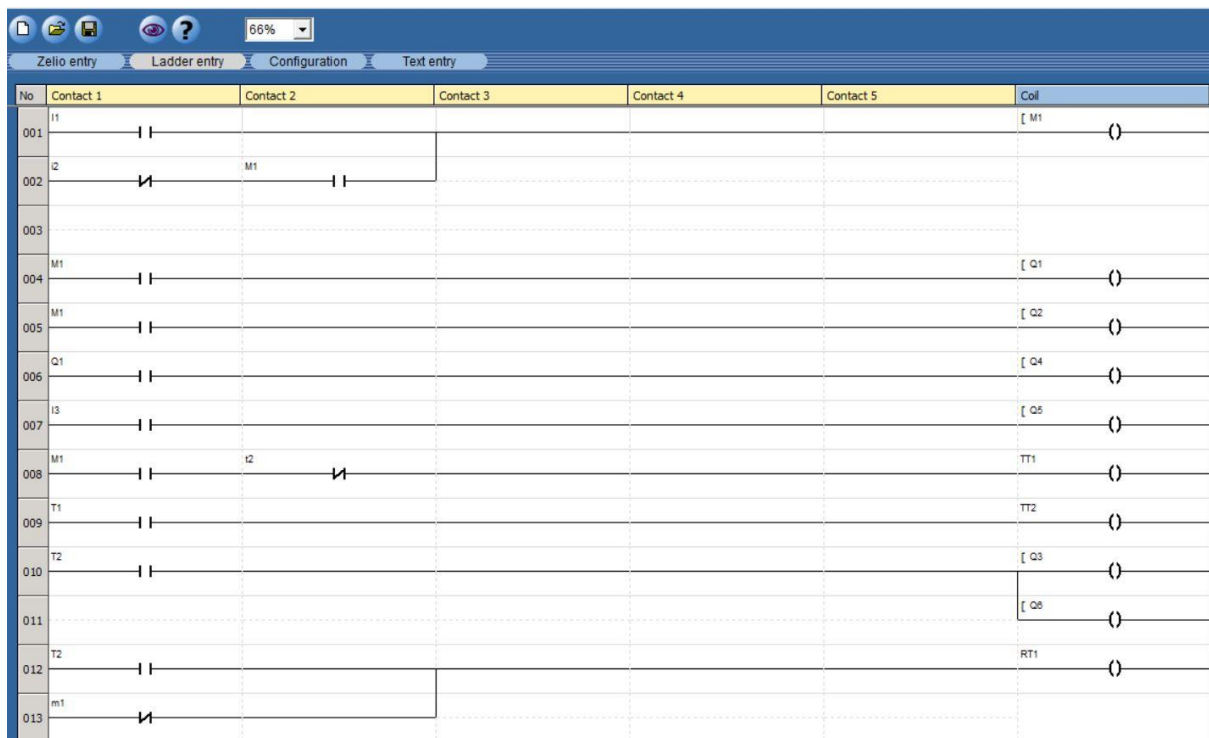


Figura 5.40 - Programación actual del Zelio

Fuente: ZelioSoft 2. Elaboración propia

Para poder modificar el tiempo de las paletas se tuvo que determinar cuál relé es el encargado de activar dicho sistema, se ha llegado a la conclusión (siguiendo la conexión eléctrica) de que es la salida Q2 la activa las paletas, por esto se ha modificado la programación del sistema para incorporar un contacto el cual solo se va a activar cuando reciba una señal proveniente de la entrada seis del controlador. La Figura 5.41 muestra con un recuadro rojo, bajo la columna de contacto tres, la modificación realizada, se puede apreciar como el resto del programa se mantiene sin cambios.

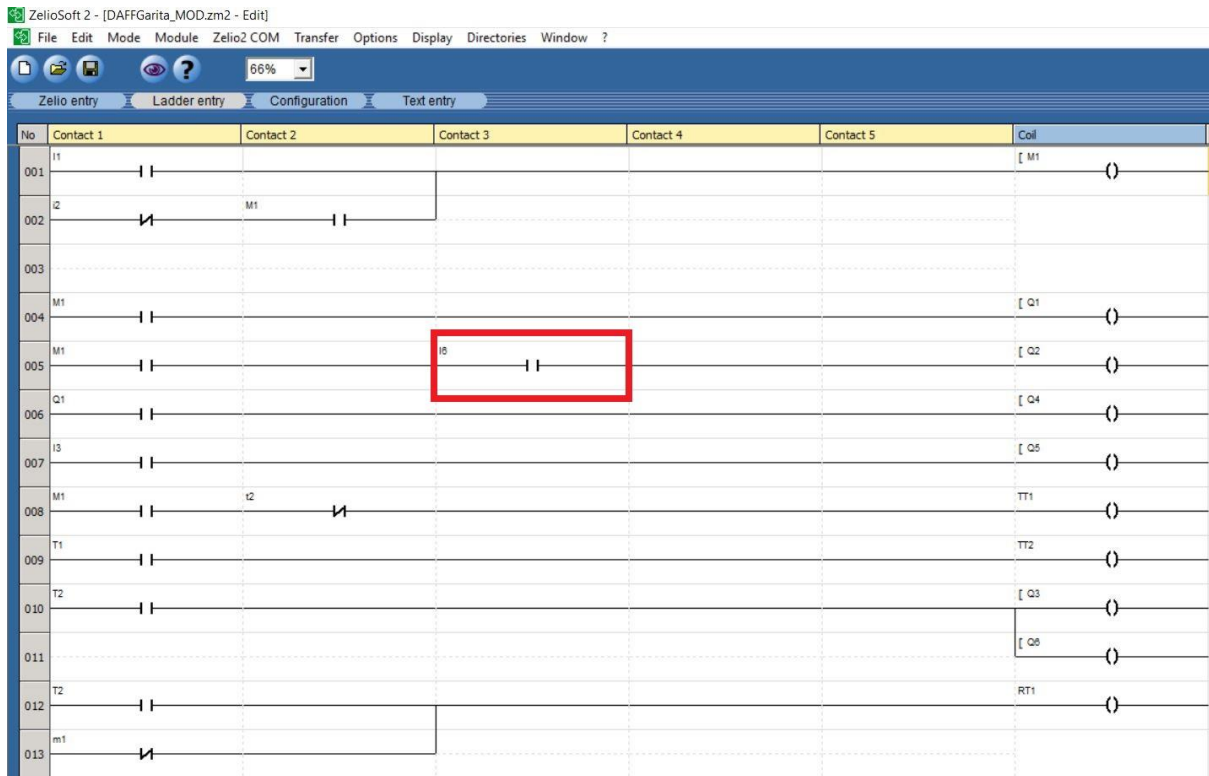


Figura 5.41 - Programación modificada del Zelio

Fuente: ZelioSoft 2. Elaboración propia

5.2.4 Ignition Scada Designer

Para realizar el sistema SCADA se utilizó el software Ignition Scada Designer que permite realizar tanto la interfaz gráfica como la configuración de las variables. La Figura 5.42 muestra el resultado gráfico final donde se incluyen los siguientes parámetros:

- Señal de encendido y apagado de la bomba de coagulante.
- Cantidad de L/H que va a inyectar la bomba de coagulante (Figura 5.43).
- Flujo de entrada de San Rafael.
- Nivel de llenado del Igualador #1.
- Señal de encendido y apagado de las bombas #1, #2 y #3.
- Lectura del equipo EL-FI M20.
- Flujo de entrada del DAF Garita.
- Señal de encendido y apagado de las paletas del DAF Garita.
- Señal de encendido y apagado de la bomba diafragma.
- Nivel de llenado del tanque espesador de lodos.
- Niveles máximos y mínimos del tanque espesador de lodos.

- Señal de encendido y apagado de la bomba G111 (Bomba de polimero).
- Señal de encendido y apagado de las bombas de lodo A y B.
- Señal de encendido y apagado (cerrado y abierto) de la Filtro prensa.
- Lectura de presion de la filtro prensa.

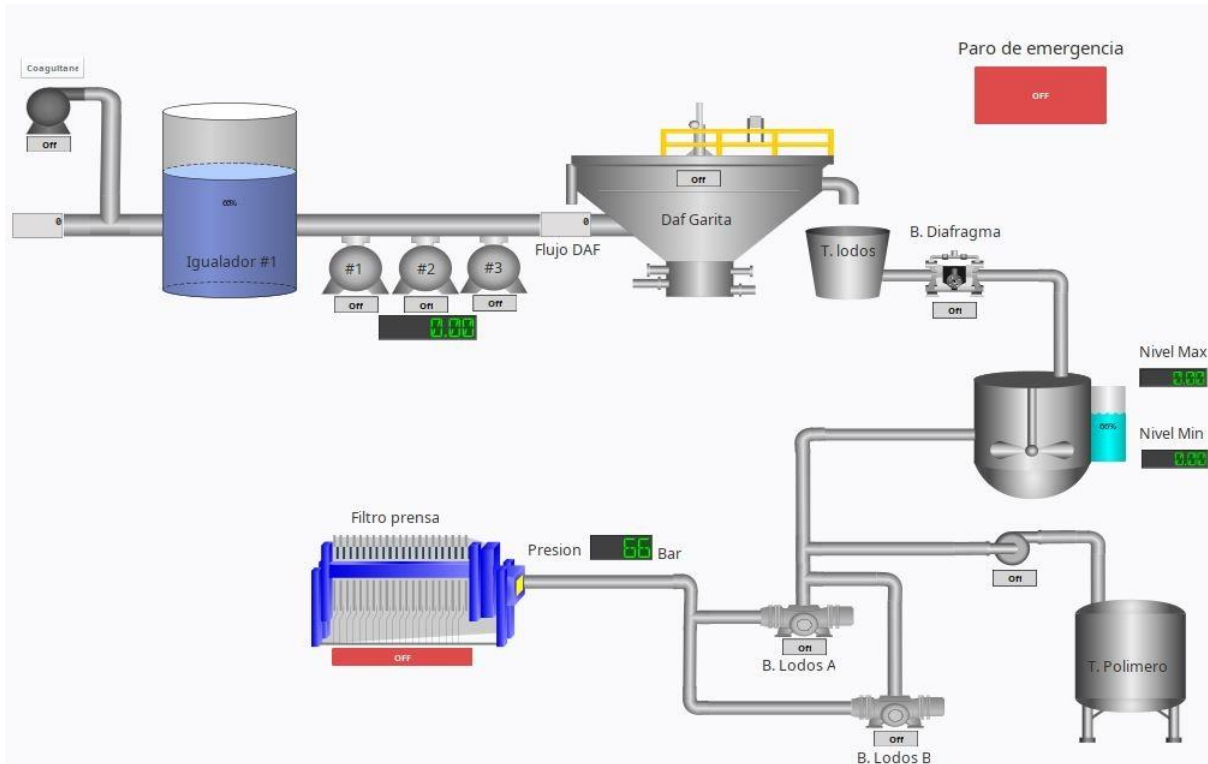


Figura 5.42 - Interfaz gráfica del SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia



Figura 5.43 - Interfaz bomba coagulante

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

Para poder enlazar la interfaz gráfica con los registros del PLC primeramente se debe incorporar el dispositivo mediante la opción que se ve en la Figura 5.44, esta se encuentra en la página web del Ignition Getway establecido.

| Name | Type | Description | Enabled | Status | |
|------|------------|----------------|---------|--------------|-------------|
| M221 | Modbus TCP | M221 Schneider | true | Disconnected | More ▾ edit |

→ Create new Device...

Figura 5.44 - Dispositivos SCADA IGNITION

Fuente: Ignition Gateway Webpage. Elaboración propia

Una vez que se haya seleccionar Create new Device (crear nuevo dispositivo) se debe elegir entre una serie de modelos el que se va a utilizar, en este caso al no encontrarse el M221 de Schneider Electric se selecciona, como se ve en la Figura 5.45, la opción que presenta el mismo tipo de comunicación, el Modbus TCP.

- DNP3 Driver**
Connect to a DNP3 outstation.
- Modbus RTU over TCP**
Connect to devices that implement the Modbus RTU protocol over TCP.
- Modbus TCP**
Connect to devices that implement the Modbus TCP protocol.
- Omron NJ Driver**
Connect to Omron NJ series PLCs.
- Siemens S7-1200**
Connect to Siemens S7-1200 PLCs over Ethernet.

Figura 5.45 - Pantalla de selección del controlador

Fuente: Ignition Gateway Webpage. Elaboración propia

Seguidamente se debe realizar la configuración del dispositivo como se aprecia en la Figura 5.46 donde se debe de establecer el nombre, la descripción, la dirección IP del dispositivo, el puerto y el tiempo de comunicación.

| General | |
|-------------|---|
| Name | <input type="text"/> |
| Description | <input type="text"/> |
| Enabled | <input checked="" type="checkbox"/> (default: true) |

| Connectivity | |
|-----------------------|---|
| Hostname | <input type="text"/> Hostname/IP address of the Modbus device. |
| Port | <input type="text" value="502"/> Port to connect to. (default: 502) |
| Communication Timeout | <input type="text" value="2000"/> Maximum amount of time to wait for a response. (default: 2,000) |

Show advanced properties

[Create New Device](#)

Figura 5.46 - Configuración del nuevo dispositivo

Fuente: Ignition Gateway Webpage. Elaboración propia

Cuando se ha creado y configurado el dispositivo se debe realizar el enlace entre el sistema Scada como tal y el PLC, para esto se debe definir el tipo de registro, la dirección Modbus y el inicio y final de los registros. Si se utiliza más de un dispositivo se debe de especificar la unidad mediante el Unit ID. Para este proyecto se estableció los MW (Memory Word, palabras de memoria) de la 130 y 140, empezando en la dirección 130 del PLC, ver Figura 5.47.

| Prefix | Start | End | Step | Unit ID | Modbus Type | Modbus Address |
|--------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---|---|
| MW | <input type="text" value="130"/> | <input type="text" value="140"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="Holding Register (Int16)"/> | <input type="text" value="130"/> [delete] |
| Radix | <input type="text" value="10"/> | | | | | |

[Add Row](#)

[Save](#)

Figura 5.47 - Selección de registros del controlador

Fuente: Ignition Gateway Webpage. Elaboración propia

Una vez que se haya creado el enlace entre el PLC y el sistema Ignition se debe desarrollar la interfaz gráfica con ayuda del editor, aquí se cuenta con una gran cantidad de recursos gráficos como los mostrados en la Figura 5.48.

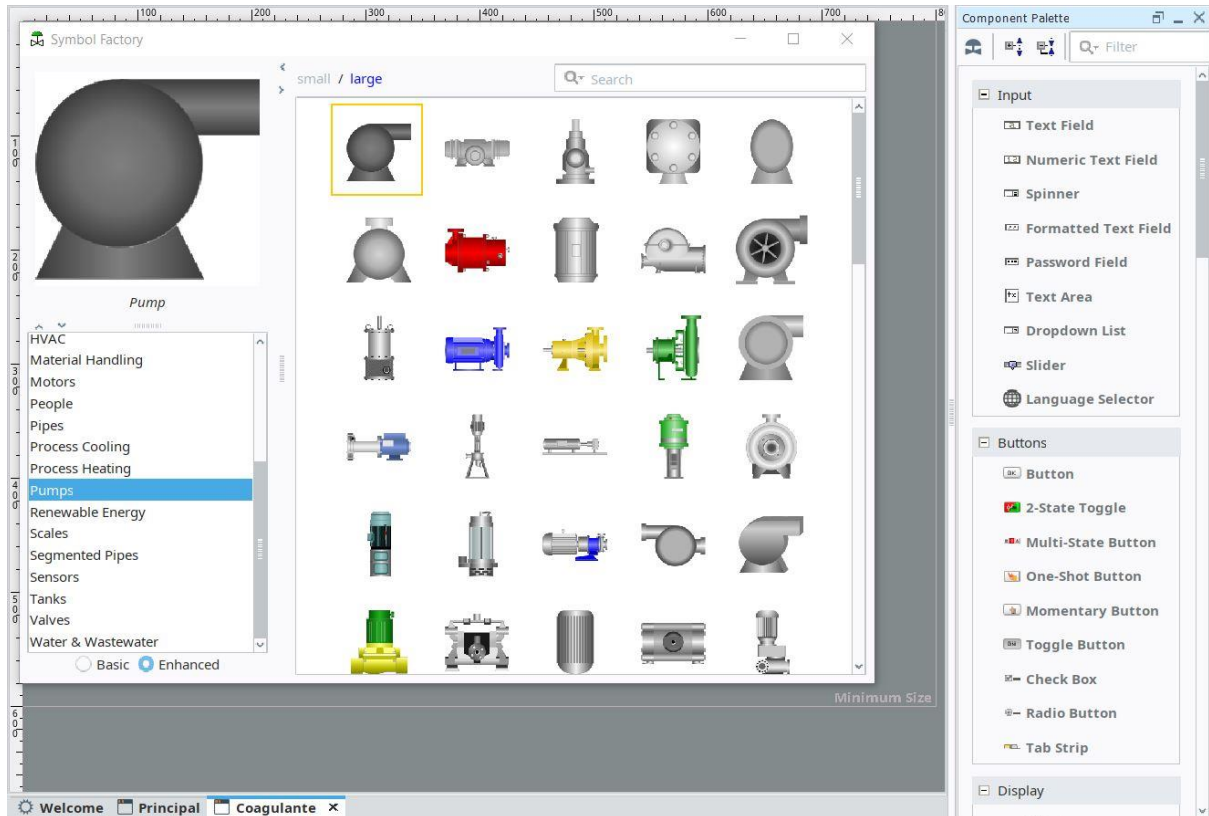


Figura 5.48 - Ventana de selección de componentes

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

Cuando se tiene el resultado deseado, en este caso el mostrado en la Figura 5.42, se debe realizar el enlace entre los componentes y los registros del PLC, para esto se utiliza la herramienta de etiquetas cuya ventana se observa en la Figura 5.49, abriendo la opción del buscador OPC, ver Figura 5.50, se pueden encontrar los registros (etiquetas en esta plataforma) que fueron cargados desde el PLC.

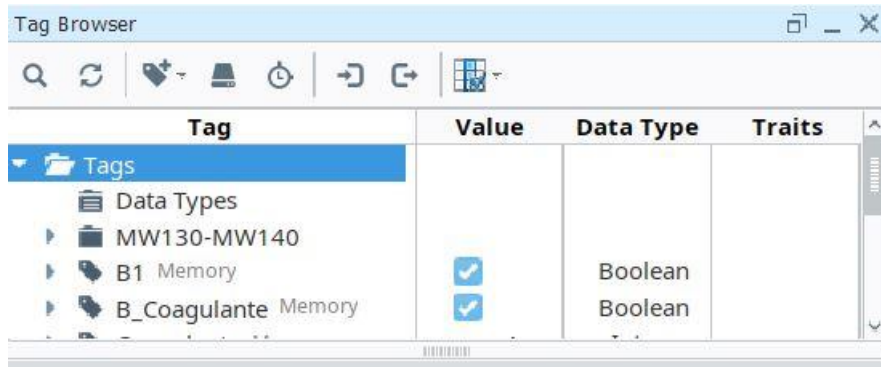


Figura 5.49 - Ventana de etiquetas

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

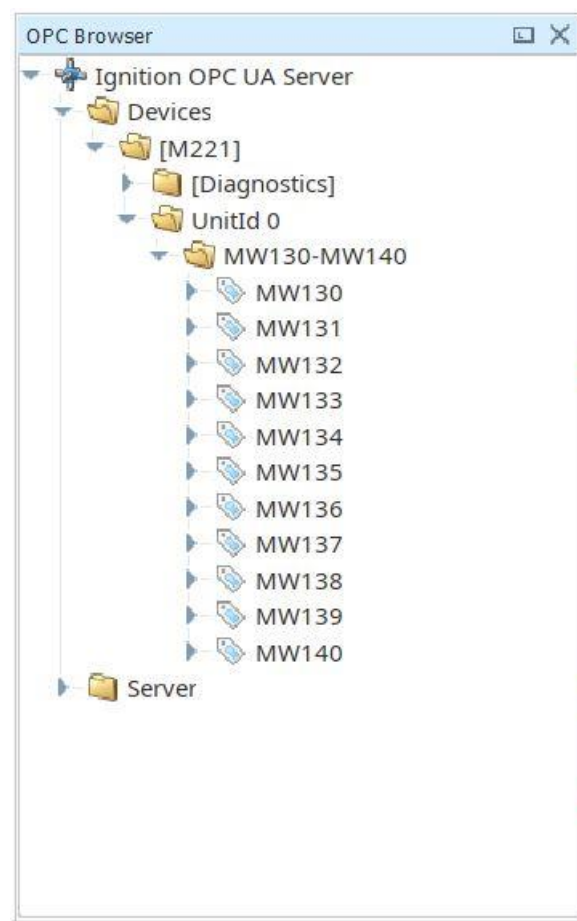


Figura 5.50 - Buscador de etiquetas OPC

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

Finalmente, mediante el editor de etiquetas mostrado en la Figura 5.51 se configura el componente y el registro del PLC (que ahora actúan como uno solo) de acuerdo a la necesidad, se debe establecer el tipo (booleano, entero, flotante...) el valor máximo y mínimo, si es solo

lectura o lectura y escritura, si se desea programar una alarma para cuando se alcance un valor determinado y todos los demás parámetros que sean necesarios.

Una vez realizado todos estos pasos el sistema está listo para ser conectado en línea y empezar a operar. En caso de existir algún error o problema, el mismo software se encarga de alertar al usuario mientras se realiza el diseño.

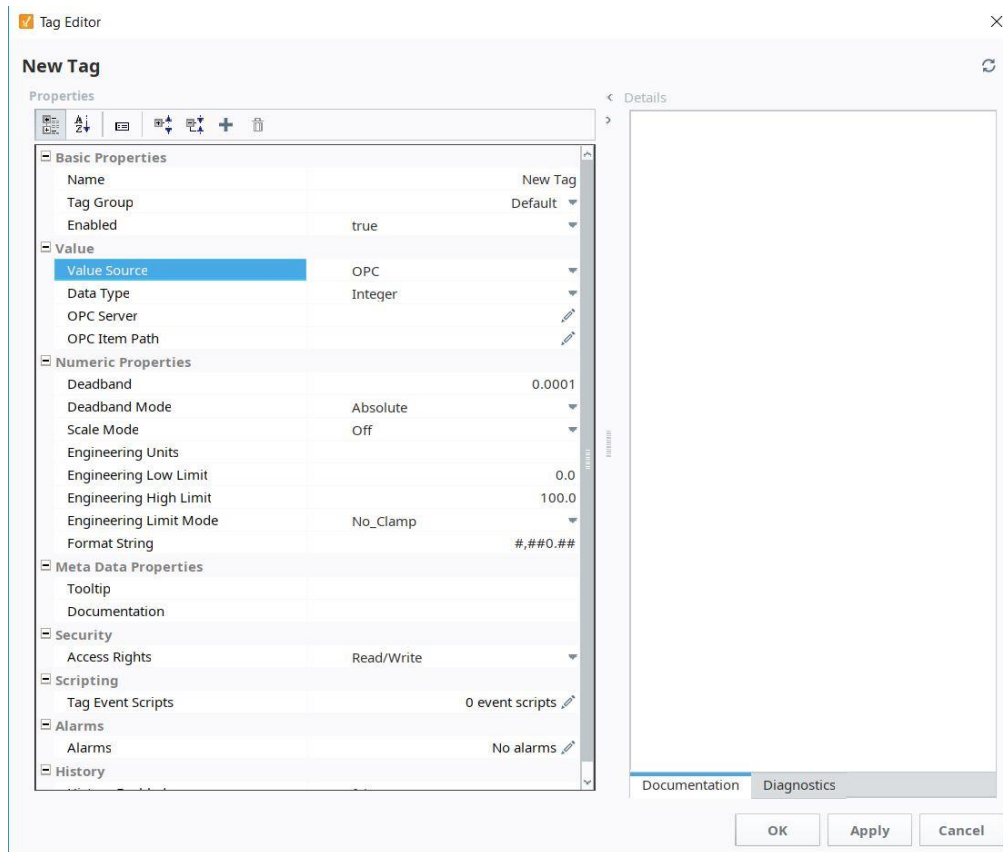


Figura 5.51 - Editor de etiquetas

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

Capítulo 6 : Análisis de resultados

En este capítulo se comenta sobre los resultados obtenidos en la elaboración de este proyecto, en este caso se discute la interfaz gráfica del SCADA.

La Figura 5.42 muestra el resultado final de la interfaz gráfica diseñada para la planta de tratamiento de agua. Esta interfaz se compone por la supervisión y control de las variables descritas a continuación:

- **Bomba de coagulante:** Permite modificar la cantidad de coagulante que se inyecta a la tubería de agua de entrada proveniente de el complejo de San Rafael.
- **Flujo de entrada de San Rafael:** Indica, en metros cúbicos por hora, la cantidad de agua que entra al Igualador #1 y que proviene del complejo de San Rafael.
- **Nivel de llenado del Igualador #1:** Provee el porcentaje de llenado del Igualador #1 de acuerdo a la capacidad máxima de este.
- **Lectura del equipo EL-FI M20:** Indica en un rango de 0 a 100% la potencia que se transfiere al eje del motor.
- **Flujo de entrada del DAF Garita:** Indica, en metros cúbicos por hora, la cantidad de agua que entra al DAF Garita.
- **Nivel de llenado del tanque espesador de lodos:** Indica en porcentaje la capacidad ocupada que tiene el tanque donde se almacenan los lodos luego de ser trasladados del tanque de lodos del DAF Garita.
- **Niveles máximos y mínimos del tanque espesador de lodos:** Proporciona los niveles que se desean manejar en el tanque de espesado de lodos de acuerdo a su capacidad máxima.
- **Lectura de presión de la filtro prensa:** Muestra el valor, en Bar, leído por el sensor de presión ubicado en la Filtro prensa.

Así como las señales de indicación de:

- Encendido y apagado de la bomba de coagulante.
- Encendido y apagado de las bombas #1, #2 y #3.
- Encendido y apagado de las paletas del DAF Garita.
- Encendido y apagado de la bomba diafragma.
- Encendido y apagado de la bomba G111 (Bomba de polimero).
- Encendido y apagado de las bombas de lodo A y B.
- Encendido y apagado (cerrado y abierto) de la Filtro prensa.

La Figura 6.1 muestra el diagrama de conexión final, se puede apreciar que gran parte del equipo se mantuvo y que a excepción de la bomba NIKUNI todos los elementos se han incorporado al controlador para que formen parte del sistema automatizado.

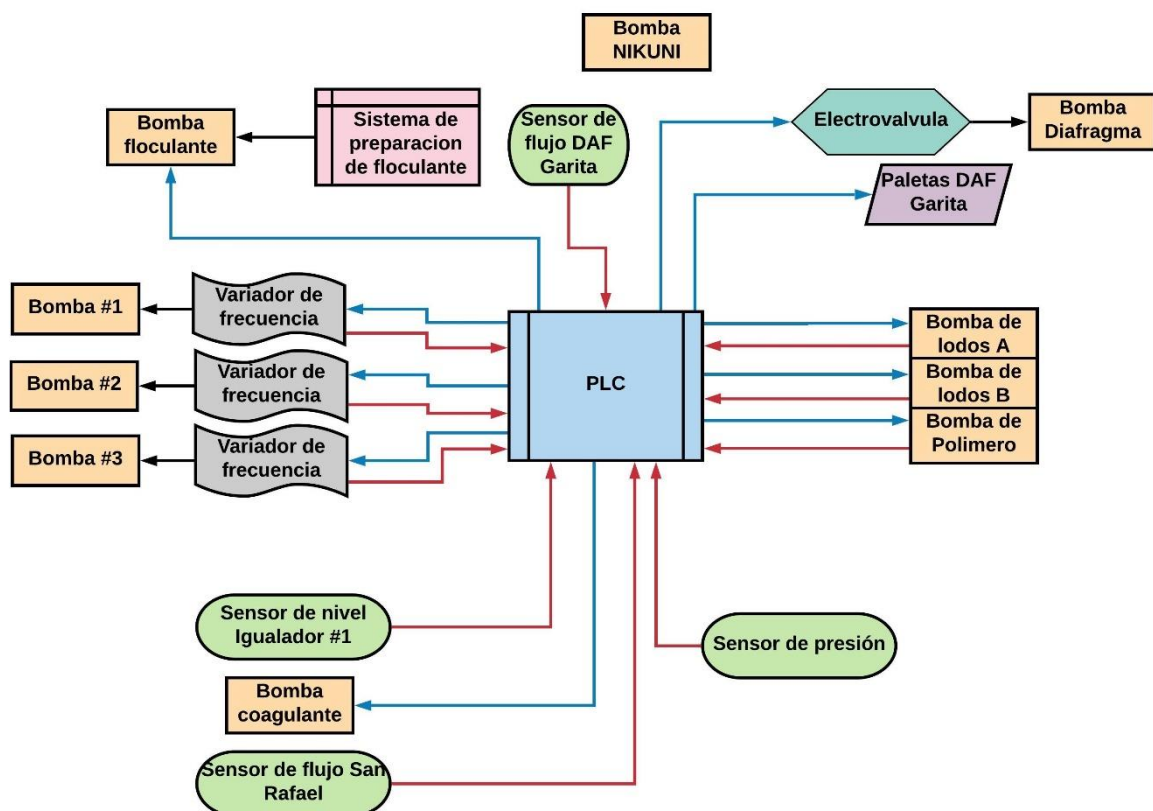


Figura 6.1 - Diagrama previsto de conexión final entre los equipos

Capítulo 7 : Análisis de pre-factibilidad económica

Al apagar la bomba de coagulante de manera automática en el instante en que no se detecte flujo en la tubería de San Rafael se espera que el químico no se desperdicie, mediante los datos provistos por los encargados de la planta de tratamiento se ha calculado, ver apéndice A.2.4 Cálculo de ahorro en coagulante, que en promedio se inyecta coagulante 99 horas al año cuando no se debería, en caso de lograr evitar este hecho se espera llegar a tener un ahorro aproximado de ₡200,355.87 al año.

El primer planteamiento en cuanto la rutina de activación de la bomba diafragma se había establecido para ser de manera independiente al funcionamiento de las paletas de DAF Garita, sin embargo al final se ha decidido optar para que sea durante el periodo en el que las paletas del DAF Garita se encuentran activas, es decir que por cada periodo de tres minutos durante dos minutos la bomba se va a encontrar trabajando y el otro minuto restante se encontrará apagada. Se espera que con este funcionamiento el compresor que alimenta a la bomba diafragma pueda apagarse en el mismo periodo de tiempo, esto se traduce en por cada hora el equipo estará apagado durante 20 min lo cual se convierte que durante 8 horas al día el equipo no estará consumiendo energía eléctrica. Asumiendo que no existen fugas de aire y los equipos se encuentran en buen estado, se espera tener un ahorro de ₡680,116.67 al año según lo calculado en la sección A.2.5 Cálculo de ahorro en con el nuevo tiempo del compresor.

El utilizar variadores de frecuencia permite que el consumo eléctrico de las bombas disminuya, esto porque dicho consumo se ve afectado ya que es proporcional a la frecuencia con la que están trabajando los motores que hacen funcionar las bombas. Considerando que la bomba #1 va a estar activa la mayoría del tiempo dado que cuenta con la capacidad de manejar todos los caudales previstos, los cálculos económicos realizados se efectuaron asumiendo el porcentaje de trabajo de dicha bomba; a partir del análisis realizado y presentado en el apéndice A.2.2 Cálculo de consumo y ahorro Bombas #1, #2, #3 se espera que la bomba trabaje aproximadamente el 13.372% del tiempo a 1276.04 *rpm* lo que equivale a 43.378Hz, y en el 86.628% restante a 977.08 *rpm* que se traduce a 33.215Hz. Según los cálculos realizados en

el apéndice A.2.2 Cálculo de consumo y ahorro Bombas #1, #2, #3 espera que al año se pueda generar un ahorro de alrededor de ¢4,335,391.52 que equivaldría al 79.9% del consumo actual.

Para realizar el análisis económico se ha utilizado la plantilla que viabilidad de proyectos con la que cuenta la empresa Cargill, para ello es necesario conocer el coste de los equipos, la vida útil del equipo por adquirir y los ahorros que se esperan obtener.

Para el valor de inversión necesaria se realizaron cotizaciones de los equipos a implementar, así como el costo del cableado e instalación. La Tabla 7.1 describe los gastos en los que se va a incurrir en caso de llevar a cabo el proyecto. Para determinar la vida útil del equipo se ha utilizado la tabla de depreciación de Cargill donde se indica que para variadores de frecuencia se tiene una vida útil de 12 años, sin embargo debido al formato de la plantilla utilizada se ha basado el cálculo en 10 años de vida útil.

Tabla 7.1 - Desglose de la inversión necesaria

| Gasto | Monto |
|--------------------------|-----------------------|
| Variadores de frecuencia | ¢9,117,074.11 |
| Electro válvula | ¢63,802.06 |
| Cableado e instalación | ¢2,815,140.90 |
| Total | ¢11,996,017.07 |

Fuente: Cotizaciones realizadas. Elaboración propia

Tabla 7.2 - Desglose del ahorro esperado anualmente

| Ahorro | Monto |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Compresor | ¢ 680,116.67 |
| Coagulante | ¢ 200,355.87 |
| Consumo de las bombas de extracción | ¢ 4,335,391.52 |
| Total | ¢ 5,215,864.06 |

Fuente: Elaboración propia

Realizando el compilado de todos los ahorros expuestos en ese capítulo se tiene la Tabla 7.2, en la cual se puede observar que al año se espera tener un aproximado de ¢5,215,864.06 en ahorros. Realizando el estudio económico se obtiene el resultado mostrado en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3 - Resultado del estudio económico

| Variable | Valor |
|-----------------------------------|-----------------|
| Inversión total | €11,996,017.07 |
| VPN (Valor presente Neto) | € 10,200,000.00 |
| TIR (Tasa Interna de Rendimiento) | 28.9% |
| Retorno de la inversión | 3.1 años |

Fuente: Plantilla de estudio económico para proyectos Cargill

De la Tabla 7.3 se tiene que la inversión del proyecto se recuperaría en 3.1 años, con un TIR de 28.9% y un VPN de €10,200,000.

Baca Urbina establece que “para aceptar un proyecto las ganancias deberán ser mayores que los desembolsos, lo cual dará por resultado que el VPN sea mayor que cero” (Urbina, 2010). En este caso se tiene un valor de €10,200,000, por lo que se cumple lo establecido por la documentación como un proyecto rentable. Se le llama tasa interna de rendimiento (TIR) porque supone que el dinero que se gana año con año se reinvierte en su totalidad (Urbina, 2010). En este caso se tiene una Tasa Interna de Rendimiento del 28.9%.

Capítulo 8 : Conclusiones y Recomendaciones

8.1 Conclusiones

- Se logró la configuración de los sistemas de hardware para un diseño de un sistema SCADA considerando los equipos actuales que tiene la empresa además de algunos seleccionados para tal fin.
- Se logró diseñar la interfaz gráfica del sistema SCADA para la automatización de la planta de tratamiento de aguas de la empresa Cargill en San Rafael de Alajuela.
- Se ha determinado que es rentable llevar a cabo el proyecto y que el retorno de la inversión se da en 3.1 años, con un TIR del 28.9%.
- El uso de variadores de frecuencia permite arranques suaves lo que contribuye con que la demanda de la empresa no se aumente.

8.2 Recomendaciones

- Modificar el tanque de lodos del DAF Garita para que su fondo sea una tolva que permita una extracción de lodos efectiva y a una mayor velocidad.
- Determinar los tiempos correctos de activación de las paletas donde se dé el mayor ahorro de químico.
- Para lograr un manejo correcto del nivel en el Igualador #1 lo mejor sería tener un sensor de flujo en cada entrada de agua.
- Mejorar el orden en las instalaciones eléctricas antiguas, principalmente donde se encuentra el panel de la bomba de floculante.

Bibliografía

- Acromag Incorporated. (2005). *Introduction to Modbus TCP/IP*. Wixom: Acromag.
- Bailey, D., & Wright, E. (2003). *Practical SCADA for Industry*. Burlington: Newnes .
- Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers*. Oxford: Newnes.
- Daneels, A., & Salter, W. (1999). *What is SCADA?* Geneva: CERN.
- Emotron AB. (n.d.). *EL-FI M20 Limitador de Par*. Barcelona.
- Emotron AB. (n.d.). *EL-FI M20 Shaft Power Monitor Instruction Manual*.
- Haran, P. S. (2014). *United States of America Patent No. US9281978B1*.
- IWAKI Pumps. (2010). *Hi-Techno Pump IX-C series Instruction Manual*.
- Lloyd, J. W. (1987). *Foundations of Logic Programming*. Melbourne: Springer-Verlag.
- Martinez, P. A. (2002). *Programacion de PLC's*. Nuevo Leon: Universidad Autonoma de Nuevo Leon.
- Ramirez, C. (2001). *Controladores Lógicos Programables*. Santiago: Universidad de Chile.
- Real Academia Española. (n.d.). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado de <https://dle.rae.es/?id=Aech2Ku>
- Schneider Electric. (2016). *Altivar Process Variable Speed Drives ATV630, ATV650, ATV660, ATV680 Programming Manual*. Recuperado de https://prom-electric.ru/media/ATV600_Programming_Manual_EN_EAV64318_04.pdf
- Schneider Electric. (2017). *Modicon M221 Logic Controller Guia de Hardware*. Recuperado de <https://www.se.com/es/es/download/document/EIO0000001387/>
- Schneider Electric. (2017). *Modicon M221 Logic Controller Guia de programacion*. Recuperado de <https://www.se.com/es/es/download/document/EIO0000001363/>
- Schneider Electric. (2017). *Modicon TM3 Modulos de E/S digitales Guia de hardware*. Recuperado de <https://www.se.com/es/es/download/document/EIO0000001411/>
- Schneider Electric. (2017). *SoMachine Altivar/PLCopen/EtherNet/IP Example Guide*. Recuperado de <https://www.schneider-electric.us/en/download/document/EIO0000002553/>
- Schneider Electric. (2017). *SoMachine Basic Guia de la biblioteca de funciones genericas*. Recuperado de <https://www.schneider-electric.com/en/download/document/EIO0000001477/>

- Schneider Electric. (2018). *Modicon TM3 Analog I/O Modules Hardware Guide*. Recuperado de <https://www.schneider-electric.com/en/download/document/EIO0000001414/>
- Schneider Electric. (2018). *SoMachine Guia de programacion*. Recuperado de <https://www.schneider-electric.com/en/download/document/EIO0000000071/>
- Schneider Electric. (n.d.). *SR3B261FU Product Datasheet*. Recuperado de <https://www.schneider-electric.com/en/product/download-pdf/SR3B261FU>
- Schneider Electric. (n.d.). *TM3AI8 Product Datasheet*. Recuperado de <https://www.schneider-electric.com/en/product/download-pdf/TM3AI8>
- Schneider Electric. (n.d.). *TM3DM24R Product Datasheet*. Recuperado de <https://www.schneider-electric.com/en/product/download-pdf/TM3DM24R>
- Seametrics. (2018). *iMAG 4700p Municipal/Industrial Magmeter Instructions*. Kent.
- Siemens. (2019). *Low voltage motors with Super Premium Efficiency IE4*. Recuperado de Siemens IE4 Motors: <https://w3.siemens.com/drives/global/en/motor/low-voltage-motor/efficiency-standards/ie4-super-premium-efficiency/pages/ie4-super-premium-efficiency.aspx>
- Urbina, G. B. (2010). *Evaluacion de Proyectos*. Mexico D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES.
- Wakerly, J. F. (1999). *Digital Design: Principles & Practices*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- WASTECORP Pumps. (2017). *TFCC Performance Curve*.
- YAMADA Corp. (2013). *Operation Manual Flap Valve Diaphragm Pumps NDP-50FAN*.

Apéndices

A.1 Glosario

A: Amperaje. Cantidad de amperios con que funciona un aparato o sistema eléctrico.

a: nomenclatura para definir el ancho.

AC: Corriente alterna. (Alternating Current)

Analógico: Dicho de un aparato o de un sistema: Que presenta información, especialmente medida, mediante una magnitud física continua proporcional al valor de dicha información.

Bar: Unidad de medida de presión.

CNFL: Consejo Nacional de Fuerza y Luz

Coagulante: Agente que produce que se cuaje un líquido.

Controlador: Programa que permite a una computadora manejar los componentes que tiene instalados.

DAF: Unidad de flotación por aire disuelto (Dissolve Air Flotation)

DC: Corriente directa. (Direct Current)

Digital: Dicho de un dispositivo sistema: Que crea, presenta, transporta o almacena información mediante la combinación de bits.

Feedback: Retorno de parte de la energía o de la información de salida de un circuito o un sistema a su entrada.

Floculante: Agente que produce agregación de partículas sólidas en una dispersión coloidal.

Flujo: Acción y efecto de fluir

GPM: Galones por minuto. Unidad de medida de flujo.

H: nomenclatura para definir la altura.

Hardware: Conjunto de aparatos de una computadora.

HART: Transductor remoto direccionable de Carretera (Highway Addressable Remote Transducer)

HP: Caballo de fuerza (Horse Power). Unidad de medida de potencia mecánica.

IP: Protocolo de Internet (Internet protocol)

kW: Kilo Watt. Unidad de medida de potencia eléctrica.

L: Litros. Unidad de medida de líquidos.

l: nomenclatura para definir el largo.

m³: Metros cúbicos. Unidad de medida de volumen.

MW: Palabra de memoria (Memory Word)

N: nomenclatura para definir la velocidad de giro del motor en rpm.

P: nomenclatura para definir la potencia.

PF: factor de potencia (Power Factor). Relación entre potencia activa y potencia aparente.

PLC: Controlador lógico programable. (Programmable Logic Controller)

Polímero: Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y consiste esencialmente en unidades estructurares repetidas.

Q: nomenclatura para definir el caudal.

Relé: Aparato que, mediante el empleo de una corriente auxiliar, permite la regulación y dirección de la corriente principal de un circuito.

RPM: Revoluciones Por Minuto. Unidad para representar la velocidad de giro de los motores.

Software: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.

TIR: Tasa Interna de Rendimiento o Tasa Interna de Retorno.

TPC: Protocolo de control de transmisión (Transmission Control Protocol)

V: Voltaje. Cantidad de voltios que actúan en un aparato o sistema eléctrico.

V: Volumen. Magnitud física que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones: largo ancho y alto.

VDF: Variador de Frecuencia. Dispositivo capaz de regular la frecuencia de salida.

VPN: Valor Presente Neto. Método para evaluar proyectos de inversión a largo plazo.

A.2 Sección de cálculos

Los cálculos realizados en este apartado se realizaron utilizando las tarifas eléctricas establecidas por el Consejo Nacional de Fuerza y Luz para el periodo comprendido entre el 1ro de Abril del 2019 hasta el 30 de Junio del 2019. El precio del dólar se estableció en ¢600 de manera promedio para el periodo de Abril-Mayo del 2019.

Viernes 29 de marzo se publicó en el Alcance N°72 de la Gaceta.
La Modificación Tarifaria que aplica a partir del día Lunes 01 de abril del 2019
(Tarifa Incluye CVC)
Bloques de consumo

| Periodo | Consumo de energía por cada kWh |
|---------------|---------------------------------|
| Energía Punta | ¢ 61,88 |
| Energía Valle | ¢ 30,94 |
| Energía Noche | ¢ 22,28 |

| Periodo | Consumo de Potencia (kW) |
|----------------|--------------------------|
| Potencia Punta | ¢ 10.850,90 |
| Potencia Valle | ¢ 7.720,76 |
| Potencia Noche | ¢ 4.901,28 |

*Los precios anteriores no incluyen cargos tarifarios por alumbrado público, impuesto de ventas, ni importe de bomberos.

Figura A.0.1 - Tarifas eléctricas establecidas por el CNFL

Fuente: Compañía Nacional de Fuerza y Luz. Obtenido de: <https://www.cnfl.go.cr/servicios-industriales-si/tarifas-vigentes-si>

A.2.1 Tiempos de ejecución de las paletas y llenado del tanque

Las dimensiones del tanque de lodos a la salida del DAF Garita son: 2.55m de largo, 0.8m de ancho y 1,1m de alto. A continuación, se muestran los cálculos del volumen total del tanque.

$$V = L * a * h \quad [1]$$

$$V = 2.55m * 0.8m * 1.1m$$

$$V = 2.444m^3$$

La Tabla A.1 muestra los resultados obtenidos de manera experimental respecto al llenado del tanque de lodos.

Tabla A.1 - Datos experimentales sobre llenado del tanque de lodos

| | Tiempo de trabajo (min:seg) | Porcentaje de llenado/vaciado del tanque. | Tiempo total de llenado/vaciado aproximado. |
|------------------------|-----------------------------|---|---|
| DAF Garita | 2:13 | 6.36% (llenado) | 35min |
| Bomba diafragma | 1:18 | 5.088% (vaciado) | 25min |

Fuente: Elaboración propia.

Teóricamente la bomba diafragma posee un volumen de descarga máximo de 600L/min (132 GPM) a 0.7MPa (7 Bar) (YAMADA Corp., 2013).

$$1m^3 = 264.172 \text{ Galones}$$

$$V = 2.444 * 264.172 \text{ Galones}$$

$$V = 645.64 \text{ Galones}$$

Según los cálculos experimentales actualmente se tiene un flujo de llenado de 18.45 GPM y un flujo de vaciado de la bomba de 25.83 GPM.

A.2.2 Cálculo de consumo y ahorro Bombas #1, #2, #3

La Tabla A.2 muestra los datos eléctricos de los motores de las bombas #1, #2 y #3. Para el consumo eléctrico se utilizó la ecuación 2.

$$C = \sqrt{3} * Pf * V * A \quad [2]$$

Tabla A.2 - Datos eléctricos de los motores de las bombas de extracción del Igualador #1

| Nombre | Pf | Vol (V) | Amp (A) | Potencia (kW) | Eficiencia | Consumo (kW/h) |
|-----------------|-------|---------|---------|---------------|------------|----------------|
| Bomba #1 | 0.85 | 29.1 | 29.1 | 18.5 | 93.6 | 19.707 |
| Bomba #2 | 0.853 | 29.3 | 29.3 | 18.5 | 92.4 | 19.91 |
| Bomba #3 | 0.857 | 29.5 | 29.5 | 18.5 | 91 | 20.14 |
| Promedio | | | | | | 19.92 |

Fuente: Placa de información de los motores

Debido a que el consumo eléctrico muy similar y dado que con los datos recolectados no es posible saber cuál bomba estuvo activa a una hora específica, se va a trabajar con el valor promedio del consumo eléctrico y en cuanto al factor de potencia se utiliza el del motor de la bomba #1 ya que se prevé que esta sea la que se utilice la mayoría del tiempo.

Tabla A.3 - Consumo eléctrico de las bombas de extracción del Igualador #1

| Categoría | Tarifa |
|-----------|---------|
| Nocturna | ¢443.84 |
| Nocturna | ¢443.84 |

| | |
|----------------------|---------------|
| Nocturna | €443.84 |
| Nocturna | €443.84 |
| Nocturna | €443.84 |
| Nocturna | €443.84 |
| Valle | €616.36 |
| Valle | €616.36 |
| Valle | €616.36 |
| Valle | €616.36 |
| Punta | €1,232.72 |
| Punta | €1,232.72 |
| Punta | €1,232.72 |
| Valle | €616.36 |
| Valle | €616.36 |
| Valle | €616.36 |
| Valle | €616.36 |
| Valle | €616.36 |
| Punta | €1,232.72 |
| Punta | €1,232.72 |
| Nocturna | €443.84 |
| Nocturna | €443.84 |
| Nocturna | €443.84 |
| Nocturna | €443.84 |
| | |
| Total diario | €16,149.22 |
| Total semanal | €113,044.56 |
| Total mensual | €452,178.25 |
| Total anual | €5,426,139.04 |

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando el variador de frecuencia se espera establecer dos flujos principales, el primer a $134\text{ m}^3/h$ y el segundo a $175\text{ m}^3/h$, este último solo se usará cuando el nivel del Igualador #1 sea muy alto.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad [3]$$

$$n_2 = n_1 * \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad [4]$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3}$$

$$C = \frac{P}{Eficiencia} \quad [5]$$

Mediante las fórmulas 3, 4 y 5 se tiene que para 134 m³/h:

- $Q_1 = 240m^3/h$
- $Q_2 = 134m^3/h$
- $n_1 = 1750 rpm$
- $n_2 = 977.08 rpm$
- $P_1 = 18.5 kW$
- $P_2 = 3.22 kW$
- $C = 3.44 kW/h$

Mientras que para Tarifa a 175 m³/h:

- $Q_1 = 240m^3/h$
- $Q_2 = 175m^3/h$
- $n_1 = 1750rpm$
- $n_2 = 1276.04 rpm$
- $P_1 = 18.5 kW$
- $P_2 = 7.17 kW$
- $C = 7.66 kW/h$

De donde se obtiene como resultado la Tabla A.4.

Tabla A.4 - Comparación de tarifas para los dos flujos más comunes

| Hora | Categoría | Tarifa a 134 m³/h | Tarifa a 175 m³/h |
|----------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 12am | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 1am | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 2am | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 3am | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 4am | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 5am | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 6am | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 7am | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 8am | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 9am | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 10am | Punta | ¢212.88 | ¢474.02 |
| 11am | Punta | ¢212.88 | ¢474.02 |
| 12md | Punta | ¢212.88 | ¢474.02 |
| 1pm | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 2pm | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 3pm | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 4pm | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 5pm | Valle | ¢106.44 | ¢237.01 |
| 6pm | Punta | ¢212.88 | ¢474.02 |
| 7pm | Punta | ¢212.88 | ¢474.02 |
| 8pm | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 9pm | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 10pm | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| 11pm | Nocturna | ¢76.65 | ¢170.67 |
| Total diario | | ¢2,788.81 | ¢6,209.86 |
| Total semanal | | ¢19,521.66 | ¢43,469.04 |
| Total mensual | | ¢78,086.65 | ¢173,876.18 |
| Total anual | | ¢937,039.82 | ¢2,086,514.12 |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla A.4 muestra las tarifas eléctricas para los dos flujos que más se utilizan actualmente y que son los preestablecidos en los variadores de frecuencia.

De un total de 344 datos de medición del flujo a la entrada del DAF Garita se tiene que en 46 veces se dio un flujo superior a $150m^3/h$, lo que equivale al 13.372% de las veces. Asumiendo que este comportamiento es constante para el cálculo de consumo eléctrico anual de las bombas de extracción se va a tomar que el 13.372% del año el flujo va a ser de $175m^3/h$, mientras que el restante 86.628%. Para calcular el consumo total se utiliza la fórmula 6, mientras que para determinar el ahorro se utiliza la ecuación 7.

$$\begin{aligned} \text{Nuevo Consumo total anual} &= 0.13372 * \text{TotalAnual175} + 0.86628 * \text{TotalAnual134} \quad [6] \\ \text{Nuevo Consumo total anual} &= 0.13372 * \text{€}2,086,514.12 + 0.86628 * \text{€}937,039.82 \\ \text{Nuevo Consumo total anual} &= \text{€}1,090,747.52 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ahorro} &= \text{Consumo total actual} - \text{nuevo consumo total anual} \quad [7] \\ \text{Ahorro} &= \text{€}5,426,139.04 - \text{€}1,090,747.52 \\ \text{Ahorro} &= \text{€}4,335,391.52 \end{aligned}$$

Este ahorro significa en %79.9 del consumo eléctrico actual.

A.2.3 Cálculo de comparación entre peristáltica y bomba diafragma

La Tabla A.5 muestra la comparación de consumo eléctrico entre la bomba diafragma y la bomba peristáltica, suponiendo que ambas trabajen las 24 horas del día, todos los días del año.

Tabla A.5 - Comparativa económica entre bomba peristáltica y bomba diafragma

| Hora | Clasificación | Compresor | Peristáltica |
|------|---------------|-----------|--------------|
| 12am | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| 1am | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| 2am | Nocturna | €139.08 | €137.02 |

| | | | |
|----------------|----------|---------------|---------------|
| 3am | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| 4am | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| 5am | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| 6am | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 7am | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 8am | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 9am | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 10am | Punta | €386.27 | €380.57 |
| 11am | Punta | €386.27 | €380.57 |
| 12md | Punta | €386.27 | €380.57 |
| 1pm | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 2pm | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 3pm | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 4pm | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 5pm | Valle | €193.14 | €190.28 |
| 6pm | Punta | €386.27 | €380.57 |
| 7pm | Punta | €386.27 | €380.57 |
| 8pm | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| 9pm | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| 10pm | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| 11pm | Nocturna | €139.08 | €137.02 |
| Diario | | | |
| | | €5,060.39 | €4,985.61 |
| Semanal | | | |
| | | €35,422.73 | €34,899.27 |
| Mensual | | | |
| | | €141,690.92 | €139,597.08 |
| Anual | | | |
| | | €1,700,291.04 | €1,685,164.96 |

Fuente: Elaboración propia.

A.2.4 Cálculo de ahorro en coagulante

De un total de 354 se ha determinado mediante los datos registrados que en al menos 4 horas se inyecta un promedio de 2.125 L/H de coagulante cuando no había flujo de agua en el la tubería. En un año se tienen 8760 horas por lo que en un año se desperdicia químico durante aproximadamente 99 horas.

$$\text{Desperdicio} = \text{horas de inyeccion sin flujo} * \text{cantidad de litros por hora} \quad [8]$$

$$\text{Desperdicio} = 99h * 2.125 \text{ L/h}$$

$$\text{Desperdicio} = 210.375 \text{ L}$$

El costo del Coagultante SWC-5000 es de ¢952.538 el litro.

$$\text{Costo del desperdicio} = \text{total de litros de desperdicio} * \text{costo por litro del quimico} \quad [9]$$

$$\text{Costo del desperdicio} = 210.375 * \text{¢}952.538$$

$$\text{Costo del desperdicio} = \text{¢}200,390.19$$

A partir de las ecuaciones 8 y 9 se tiene como resultado un desperdicio de ¢200,390.19 anuales que se espera ahorrar.

A.2.5 Cálculo de ahorro en con el nuevo tiempo del compresor

El nuevo ciclo de trabajo de la bomba de diafragma espera tener como resultado que el compresor se encuentre apagado la misma cantidad de tiempo que la bomba, es decir el 40% del tiempo. El ahorro producido por este nuevo ciclo se puede apreciar en la Tabla A.6.

Tabla A.6 - Ahorro producido por el nuevo periodo de trabajo del compresor

| Hora | Categoría | Consumo actual | Consumo nuevo | Ahorro |
|------|-----------|----------------|---------------|--------|
| 12am | Nocturna | ¢139.08 | ¢83.45 | ¢55.63 |
| 1am | Nocturna | ¢139.08 | ¢83.45 | ¢55.63 |
| 2am | Nocturna | ¢139.08 | ¢83.45 | ¢55.63 |
| 3am | Nocturna | ¢139.08 | ¢83.45 | ¢55.63 |
| 4am | Nocturna | ¢139.08 | ¢83.45 | ¢55.63 |
| 5am | Nocturna | ¢139.08 | ¢83.45 | ¢55.63 |
| 6am | Valle | ¢193.14 | ¢115.88 | ¢77.25 |
| 7am | Valle | ¢193.14 | ¢115.88 | ¢77.25 |
| 8am | Valle | ¢193.14 | ¢115.88 | ¢77.25 |
| 9am | Valle | ¢193.14 | ¢115.88 | ¢77.25 |

| | | | | |
|----------------------|----------|---------------|---------------|------------|
| 10am | Punta | €386.27 | €231.76 | €154.51 |
| 11am | Punta | €386.27 | €231.76 | €154.51 |
| 12md | Punta | €386.27 | €231.76 | €154.51 |
| 1pm | Valle | €193.14 | €115.88 | €77.25 |
| 2pm | Valle | €193.14 | €115.88 | €77.25 |
| 3pm | Valle | €193.14 | €115.88 | €77.25 |
| 4pm | Valle | €193.14 | €115.88 | €77.25 |
| 5pm | Valle | €193.14 | €115.88 | €77.25 |
| 6pm | Punta | €386.27 | €231.76 | €154.51 |
| 7pm | Punta | €386.27 | €231.76 | €154.51 |
| 8pm | Nocturna | €139.08 | €83.45 | €55.63 |
| 9pm | Nocturna | €139.08 | €83.45 | €55.63 |
| 10pm | Nocturna | €139.08 | €83.45 | €55.63 |
| 11pm | Nocturna | €139.08 | €83.45 | €55.63 |
| | | | | |
| Total diario | | €5,060.39 | €3,036.24 | €2,024.15 |
| Total semanal | | €35,422.73 | €21,253.68 | €14,169.05 |
| Total mensual | | €141,690.92 | €85,014.72 | €56,676.2 |
| Total anual | | €1,700,291.04 | €1,020,176.64 | €680,114.4 |

Fuente: Elaboración propia.

A.3 Manual de usuario

Manual de operaciones

A continuación, se describen cada una de las variables presentes en el sistema SCADA que podrán ser monitoreadas a partir de la interfaz gráfica que se muestra en la Figura A.0.2.

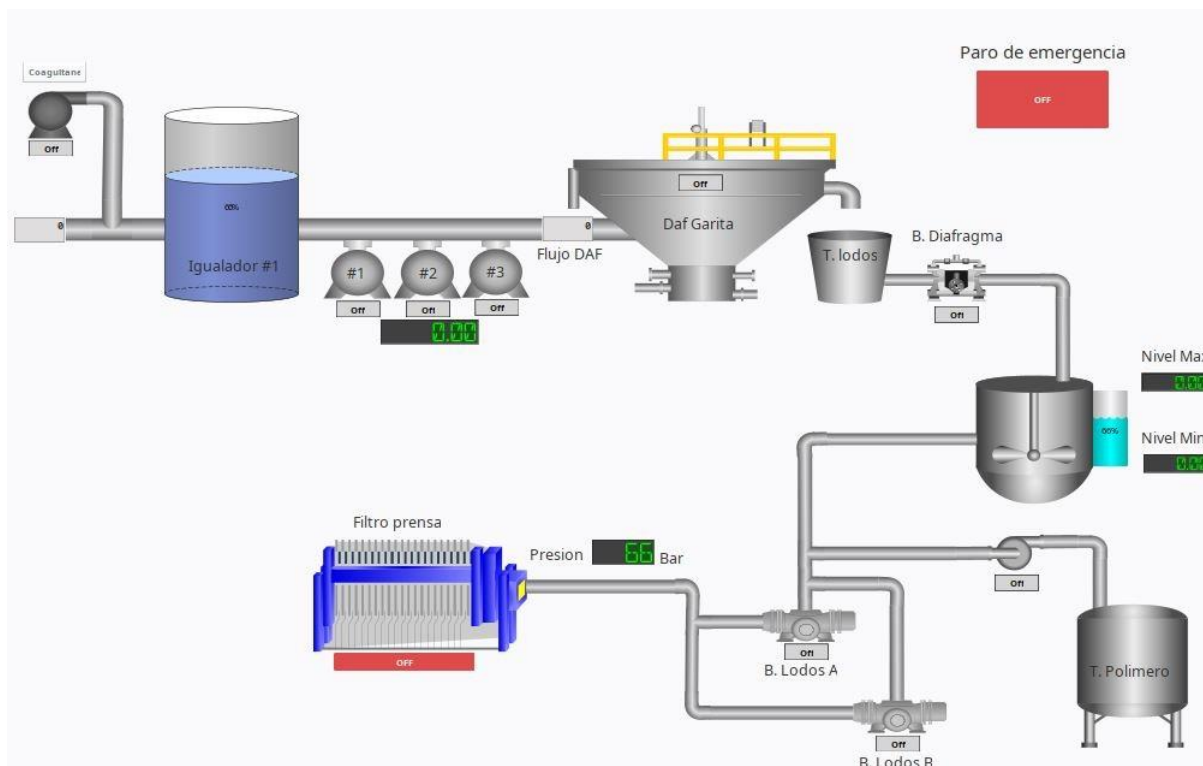


Figura A.0.2 - Interfaz gráfica del SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

La Figura A.0.3 muestra la bomba de coagulante, el botón On/Off muestra el estado en el que la bomba se encuentra en tiempo real (encendida o apagada). Al presionar el botón superior "Coagulante" se abrirá la ventana de Figura A.0.4 donde se podrá escoger la cantidad (en L/h) de coagulante que se desee inyectar a la tubería de San Rafael que ingresa al Igualador #1. El botón que se encuentre en verde es la cantidad actual, mientras que los botones en rojo son las demás opciones disponibles, al seleccionar "0" la bomba se apagará. Al finalizar la selección se debe presionar el botón "Cerrar" para volver a la pantalla principal.



Figura A.0.3 - Bomba de coagulante. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia



Figura A.0.4 - Selección de coagulante. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

La Figura A.0.5 muestra el valor de lectura del sensor de flujo ubicado en la tubería de entrada de agua de San Rafael, únicamente muestra el valor leído.



Figura A.0.5 - Flujo de entrada de San Rafael. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

De igual manera, la Figura A.0.6 muestra el nivel de llenado del Igualador #1 de acuerdo a la lectura del sensor de nivel que se encuentra en el tanque. En este caso se cuenta con una alarma para cuando el valor de la variable alcance el 60% o el 15%.



Figura A.0.6 - Nivel de llenado Iguador #1. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

Las bombas de extracción se exponen en la Figura A.0.7 y similar que en el caso del coagulante, los botones On/Off muestran el estado de las bombas (bomba #1, bomba #2, bomba #3). La lectura que se muestra debajo de los botones de estado On/Off de las bombas es el valor de lectura que se recibe proveniente del equipo de protección EL-FI M20, en este caso el valor va a comprender entre 0.00 y 100.0 dependiendo de la potencia en el eje que exista en el motor.

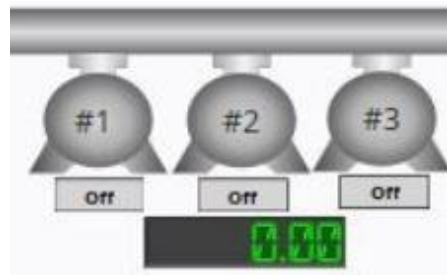


Figura A.0.7 - Bombas de extracción. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

La Figura A.0.8 muestra el valor de lectura del sensor de flujo ubicado en la tubería de entrada de agua del DAF Garita, únicamente muestra el valor leído.



Figura A.0.8- Flujo de entrada de DAF Garita. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia



Figura A.0.9 - DAF Garita. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

En la Figura A.0.9 se aprecia la representación gráfica del DAF Garita, en ella existe un botón de estado On/Off (en la parte superior) que se encarga de avisar sobre el estado de las paletas del DAF, cuando se botón está en On las paletas se encuentran funcionando mientras que en Off las paletas se encuentran apagadas.

La programación original está diseñada de manera de que las paletas del DAF Garita y la bomba diafragma que se representa en la Figura A.0.10 trabajen de manera conjunta, por lo que el botón de estado On/Off debe activarse de manera homologa con el botón de estado de las paletas del DAF Garita mostrado en la Figura A.0.9.



Figura A.0.10 - Bomba diafragma. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia



Figura A.0.11 - Tanque de polímero. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

La Figura A.0.11 muestra el tanque de polímero donde se prepara el químico para espesar los lodos antes de entrar a la filtro prensa junto con la bomba que se encarga de inyectarlo a la tubería, mientras que la Figura A.0.12 expone las dos bombas (Bomba A y Bomba B) que se encargan de mover los lodos de tanque de lodos hasta la Filtro Prensa, en ambos casos existe un botón de estado que indica la activación o no de las bombas, On/Off.

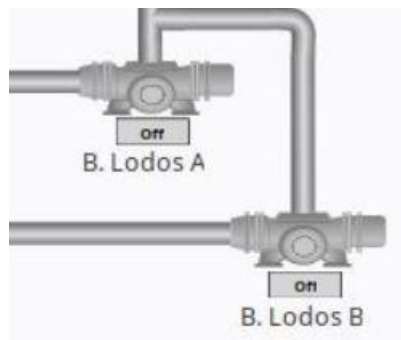


Figura A.0.12 - Bombas de lodo A y B. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

En la Figura A.0.13 se puede ver la Filtro Prensa, en esta figura se muestran dos variables: la primera es el estado de la prensa On/Off donde se representa si la prensa está cerrada (On) o abierta (off); la segunda variable es la lectura de presión que se realiza en la Filtro Prensa.

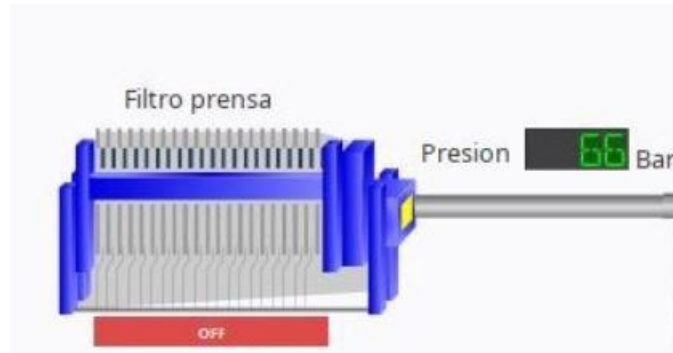


Figura A.0.13 - Filtro prensa. SCADA

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

Como medida de seguridad y emergencia se ha establecido un botón, el cual se aprecia en la Figura A.0.14, con el objetivo de detener el funcionamiento de la planta de manera remota.



Figura A.0.14 - Paro de emergencia

Fuente: Ignition SCADA Designer. Elaboración propia

Configuración del equipo

Seguidamente, se va a detallar la configuración realizada en la programación del PLC y en el variador de frecuencia. La Tabla A.7 detalla las variables del PLC utilizadas en la programación (no contempla aquellas que se utilizan en la programación actual), el tipo de variable y la descripción.

Tabla A.7 - Variables utilizadas en la programación del PLC

| Variable | Tipo | Descripción |
|----------|-----------|---|
| %IW3.2 | Analógica | Lectura de presión |
| %IW3.4 | Analógica | Lectura del equipo de protección EL-FI M20 |
| %IW3.5 | Analógica | Sensor de nivel Igualador #1 |
| %IW3.6 | Analógica | Sensor de flujo entrada de agua San Rafael |
| %IW3.7 | Analógica | Sensor de flujo DAF Garita |
| %I0.3 | Digital | Disparo_G113 (bomba de lodos) |
| %I0.4 | Digital | Prensa cerrada |
| %I0.7 | Digital | Confirmación VDF |
| %Q0.3 | Digital | Activar bomba G113 (bomba de lodos) |
| %Q0.4 | Digital | VDF Baja velocidad |
| %Q0.5 | Digital | Bomba G113 A activa |
| %Q0.6 | Digital | Bomba G113 B activa |
| %Q1.0 | Digital | Asignación Bomba 1 |
| %Q1.1 | Digital | Asignación Bomba 2 |
| %Q1.2 | Digital | Asignación Bomba 3 |
| %Q1.3 | Digital | Asignación Alarma |
| %Q1.4 | Digital | Activación de las paletas DAF Garita |
| %Q1.5 | Digital | Señal de activación/desactivación del variador de frecuencia |
| %Q1.6 | Digital | Señal de feedback interno para el variador de frecuencia |
| %Q1.7 | Digital | Señal de feedback interno para el variador de frecuencia |
| %QW2.0 | Analógica | Salida al Variador de frecuencia de las bombas de lodo (G113) |
| %QW2.1 | Analógica | Señal de la bomba coagulante |
| %QW2.3 | Analógica | Lectura del sensor de flujo del DAF Garita |

| | | |
|--------|---------|--|
| %MW130 | Memoria | Almacena la variable que indica cuantos L/h de coagulante se debe de inyectar |
| %MW132 | Memoria | Variable que indica el estado de la bomba de coagulante. ON/OFF |
| %MW135 | Memoria | Variable que contiene el flujo de entrada del DAF Garita |
| %MW136 | Memoria | Variable que contiene el flujo de entrada de San Rafael |
| %MW137 | Memoria | Variable que indica el porcentaje de llenado del Igualador #1 |
| %MW138 | Memoria | Variable que indica el porcentaje de potencia en el eje del motor de la bomba 1. |
| %MW139 | Memoria | Variable que indica el estado del agitador. ON/OFF |
| %MW142 | Memoria | Variable que indica el estado de la filtro prensa. ABIERTA/CERRADA |
| %MW144 | Memoria | Variable que indica el estado de la bomba de logos A. ON/OFF |
| %MW146 | Memoria | Variable que indica el estado de la bomba de logos B. ON/OFF |
| %MW148 | Memoria | Variable que indica el estado de la bomba G111. ON/OFF |
| %MW150 | Memoria | Variable que contiene la señal de advertencia sobre el mantenimiento de la bomba de lodos A. |
| %MW152 | Memoria | Variable que contiene la señal de advertencia sobre el mantenimiento de la bomba de lodos B. |
| %MW154 | Memoria | Variable que contiene la señal de alarma sobre el mantenimiento de la bomba de lodos A. |
| %MW156 | Memoria | Variable que contiene la señal de alarma sobre el mantenimiento de la bomba de lodos B. |
| %MW158 | Memoria | Variable que contiene la señal de alarma de nivel muy alto en el Igualador #1 |
| %MW160 | Memoria | Variable que contiene la alarma de paro por nivel muy bajo en el Igualador #1 |
| %MW162 | Memoria | Variable que indica el estado de la bomba 1. ON/OFF |
| %MW164 | Memoria | Variable que contiene señal de paro de emergencia |

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de los variadores de frecuencia ATV630D18N4 se realizaron dos configuraciones: la primera es la del control PID para mantener un flujo constante cuyas variables se aprecian en la Tabla A.8; la segunda es el monitoreo genérico cuya configuración se muestra en la Figura A.5.

Tabla A.8 - Configuración del PID del ATV630D18N4

| Variable | Configuración |
|---------------------------------------|----------------------|
| Tipo de control | Flujo (Flow) |
| PID controller feedback | AI1 Analog input 1 |
| Configuration of AI1 | Current |
| AI1 current scaling parameter of 0% | 4mA |
| AI1 current scaling parameter of 100% | 20mA |
| Minimum PID process | 350 GPM |
| Maximum PID process | 840 GPM |
| Minimum PID feedback | 26 GPM |
| Maximum PID feedback | 5140 GPM |
| Minimum PID process | 350 GPM |
| Minimum feedback level Warning | 400 GPM |
| Maximum feedback level Warning | 800 GPM |
| PID error Warning | 100 GPM |
| Minimum feedback level Warning | 400 GPM |
| Internal PID reference | Yes |
| Internal PID reference | 590 GPM |
| 2 PID Preset assignment | Digital Input 2 |
| 4 PID Preset assignment | Digital Input 3 |
| 2nd PID preset reference | 440 GPM |
| 3rd PID preset reference | 660 GPM |
| 4th PID preset reference | 770 GPM |

Fuente: Elaboración propia

| Code | Long Label | Current Value | Default Value | Min Value | Max Value | Logical address |
|-----------------------------|---|----------------|------------------|-----------|-----------|-----------------|
| ▼ Process underload | | | | | | |
| ULT | Underld T. Delay Detect. | 2 s | ✚ 0 s | 0 s | 100 s | 14411 |
| LUN | Unld Thr. at Nom. speed | 60 % | 60 % | 20 % | 100 % | 14416 |
| LUL | Unld Thr. at O speed | 10 % | ✚ 0 % | 0 % | 60 % | 14415 |
| RMUD | Unld. Freq.Thr. Detection | 0 Hz | 0 Hz | 0 Hz | 500 Hz | 14414 |
| SRB | Hysteresis Frequency | 0.3 Hz | 0.3 Hz | 0.3 Hz | 500 Hz | 14401 |
| UDL | Underload Management | Freewheel stop | Freewheel stop | | | 14412 |
| FTU | Unld Time Before Restart | 0 min | 0 min | 0 min | 6 min | 14413 |
| ▼ Process overload | | | | | | |
| TOL | Overload Time Detect. | 3 s | ✚ 0 s | 0 s | 100 s | 14421 |
| LOC | Ovld Threshold Detection | 110 % | 110 % | 70 % | 150 % | 14425 |
| SRB | Hysteresis Frequency | 0.3 Hz | 0.3 Hz | 0.3 Hz | 500 Hz | 14401 |
| ODL | Ovld Proces Management | Ramp stop | ✚ Freewheel stop | | | 14422 |
| FTO | Ovld time Before Restart | 0 min | 0 min | 0 min | 6 min | 14423 |
| ▼ Stall monitoring | | | | | | |
| STPC | Stall monitoring activation | Yes | ✚ No | | | 9270 |
| STP1 | Motor stall max time | 60 s | 60 s | 0 s | 200 s | 9271 |
| STP2 | Stall monitoring current level | 150 % | 150 % | 0 % | 150 % | 9272 |
| STP3 | Stall monitoring frequency level | 2 Hz | 2 Hz | 0 Hz | 500 Hz | 9273 |
| ▼ Thermal monitoring | | | | | | |
| TH2S | Activation of the thermal monitoring on AI2 | No | No | | | 13210 |
| AI2T | Configuration of AI2 | Voltage | Voltage | | | 4403 |
| TH2B | Response to thermal error for AI2 | Ramp stop | Ramp stop | | | 13240 |
| TH2F | Thermal error level for AI2 | 230 °F | 230 °F | 5 °F | 392 °F | 13230 |
| TH2A | Thermal warning level for AI2 | 194 °F | 194 °F | 5 °F | 392 °F | 13220 |
| TH2V | AI2 thermal value | 0 °F | 0 °F | 5 °F | 392 °F | 13250 |
| TH3S | Activation of the thermal monitoring on AI3 | No | No | | | 13211 |
| AI3T | Configuration of AI3 | Current | Current | | | 4404 |

Figura A.15 - Monitoreo de protección del ATV630D18N4

Fuente: SoMove. Elaboración propia