INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR de Ciudad Hidalgo

“AUTOMATIZACION DE PLANTA TRATADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL TECNM CAMPUS CIUDAD HIDALGO”

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA MECATRÓNICA

PRESENTA:

YAZARET MARTINEZ GONZALEZ

ASESOR ACADEMICO:

ING. JOSÉ SAMUEL GÓMEZ CORREA

CD. HIDALGO, MICH. 02-2026

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En ciudad Hidalgo, Michoacán el día 23 del mes de 9 del año **20**26, el (la) que suscribe **_Yazaret Martinez Gonzalez_____.**
Alumno(a) del programa de **INGENIERÍA MECATRÓNICA** con **número de control _M19030266__**, manifiesta que es autor(a) intelectual del trabajo de tesis bajo la dirección del **ING. JOSÉ SAMUEL GÓMEZ CORREA**
y cede los derechos del trabajo intitulado "**AUTOMATIZACIÓN DE PLANTA TRATADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL TECNM CAMPUS CIUDAD HIDALGO** " al TecNM / Instituto Tecnológico Superior de Ciudad Hidalgo para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráfico o de datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede obtenerse escribiendo a la siguiente dirección: **subdireccion_academica@cdhidalgo.tecnm.mx.** Si el permiso se otorga, el usuario deberá expresar su agradecimiento correspondiente y citar la fuente.



Yazaret Martinez Gonzalez

Nombre y Firma

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE CIUDAD HIDALGO

Lugar y fecha: 10/08/2026

Asunto: Liberación de proyecto para la Titulación Integral

C. GABRIEL CASARRUBIAS GUERRERO
JEFE DE DIVISIÓN DE MECATRÓNICA
P R E S E N T E.

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación Integral

Nombre del estudiante y/o egresado:	**YAZARET MARTÍNEZ GONZÁLEZ**
Carrera :	**INGENIERÍA MECATRÓNICA**
Número de control:	**M19030266**
Nombre del Proyecto	**"AUTOMATIZACION DE PLANTA TRATADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL TECNM CAMPUS CIUDAD HIDALGO"**
Producto:	**TESIS**

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

A T E N T A M E N T E

Ing. José Samuel Gómez Correa	MI. Cristopher Marta Gutierrez	Ing. Hector Roman Medina Parra
Nombre y firma del asesor	Nombre y firma del revisor	Nombre y firma del revisor

c.c.p. Expediente

Agradecimientos.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que formaron parte de este proceso. En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mis padres, por su apoyo incondicional, su esfuerzo y confianza que siempre depositaron en mí. Gracias por acompañarme en cada etapa de mi formación, por motivarme a seguir adelante aun en los momentos más difíciles y por ser el principal impulso para alcanzar esta meta.

A mi familia, gracias por su compresión, sus palabras de ánimo y el apoyo brindado a lo largo de este camino académico y personal. Su compañía y confianza fueron fundamentales para continuar creciendo y superando cada reto.

De igual manera, agradezco a mis profesores y asesores, quienes compartieron sus conocimientos, su experiencia y orientación durante mi tiempo de estudio. Gracias por su paciencia, dedicación y por contribuir de manera importante en mi formación profesional.

También de una manera muy importe a mis amigos y compañeros, por su apoyo, consejos y por acompañarme durante cada etapa. Cada experiencia compartida y cada palabra de motivación hicieron este proceso más llevadero y significativo.

Resumen.

Dentro de este proyecto se desarrolla la propuesta de automatización para la planta tratadora de aguas residuales del TecNM campus Ciudad Hidalgo, con el propósito de mejorar la supervisión y el control de las diferentes etapas que conforman el proceso de tratamiento. A partir del análisis del funcionamiento actual de la planta, se identificaron áreas susceptibles de mejora relacionadas principalmente con el monitoreo manual, el control del flujo de agua y los problemas de desbordamiento presentes en algunos tanques.

Con base a este análisis, se realizó una propuesta de automatización que integra sensores de nivel, electroválvulas, bombas y diferentes elementos de instrumentación y control. Asimismo, se desarrolló el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI), los diagramas eléctricos y una arquitectura de control distribuida mediante un PLC maestro y tres PLC esclavos, encargados de gestionar las diferentes etapas del tratamiento.

Dicha estrategia se basa principalmente en una lógica de control ON/OFF, mediante la cual las señales provenientes de los sensores permiten determinar las condiciones de operación y ejecutar acciones sobre válvulas y equipos asociados al proceso. Como parte del desarrollo, se utilizaron representaciones mediante Factory I/O e interfaces HMI para visualizar el comportamiento esperado del sistema automatizado y la supervisión de las diferentes etapas.

Los resultados obtenidos permitieron representar y analizar el funcionamiento esperado de la propuesta, particularmente la trasferencia de agua entre las distintas etapas y las condiciones establecidas para el control de nivel. De esta manera, se establece una propuesta de automatización orientada a reducir la intervención manual, prevenir condiciones de desbordamiento y proporcionar la base para una futura implementación física y ampliación del sistema de supervisión y control.

Índice.

Agradecimientos. 3
Resumen. 4
Índice. 5
Índice de cuadros. 6
Introducción. 8
Capítulo I 9
El Problema. 9
1.1 Objetivo general. 10
Diseño de propuesta de un sistema automatizado, aplicando conocimientos de control, instrumentación, electricidad y programación. 10
1.2 Objetivos específicos. 10
1.3 Justificación. 10
Capítulo II 11
Fundamento Teórico. 11
2.1 Marco Teórico. 12
2.1.1 Aguas Residuales. 12
2.1.2Tratamiento de Aguas Residuales. 12
2.1.3.1 Tratamiento físico. 13
2.1.3.2 Tratamiento químico. 14
2.1.3.3 Tratamiento biológico. 14
2.1.4 Parámetros de calidad del agua (DBO, DQO, pH, turbidez). 15
2.1.5 Organismos importantes en sistemas de tratamiento biológico. 16
2.1.6 Aplicación del tratamiento biológico en plantas de tratamiento. 17
2.1.7 Normatividad aplicada en Mexico. 18
2.1.8 Instrumentación y control de procesos. 19
2.1.9 Automatización Industrial. 22
2.1.9.1 Controladores lógicos programables. 23
2.1.9.2 Sistemas SCADA. 23
2.1.9 Diseño eléctrico y documentación técnica. 24
2.1.9.1 Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI). 25
2.2 Marco Conceptual 27
Capítulo III 30
Metodología usada. 30
3.1 Fase de Diagnostico. 31
3.2 Fase de Diseño. 33
3.2.1. Descripción general del sistema propuesto. 34
3.3 Fase de implementación y simulación. 34
3.3.1. Integración propuesta de la instrumentación y actuadores. 35
3.3.2. Diagramas del sistema automatizado. 36

3.3.2.1. Descripción de la jerarquía de control. 39
3.3.3. Lógica de control ON/OFF. 40
3.3.3.1. PLC Esclavo 1. 41
3.3.3.2. PLC Esclavo 2. 42
3.3.3.2. PLC Esclavo 3. 42
3.3.4. Lista de instrumentos 42
3.3.5. Descripción funcional de área de proceso. 44
3.3.5.1. Primera sedimentación. 45
3.3.5.2. Lodos activados. 46
3.3.5.3. Segunda sedimentación. 46
3.3.5.4. Torres de absorción. 47
3.3.5.5. Cloración. 48
3.3.5.6. Almacenamiento. 48
3.3.6. Simulación del sistema automatizado 48
Capítulo IV 53
Análisis y discusión de resultados. 53
4.1. Resultado de propuesta de automatización. 54
4.1.1. Resultado de diseño eléctrico. 54
4.1.2. Resultados de simulación. 58
4.1.3. Resultados de HMI (SCADA). 60
4.2. Conclusiones. 61
4.2. Recomendaciones. 62
4.3. Bibliografías. 63

Índice de cuadros.

Ilustración 1 Agua residual 12
Ilustración 2 Cribas para tratamiento físico. 13
Ilustración 3 Tratamiento Químico 14
Ilustración 4 Reactor Biológico. 14
Ilustración 5 Aplicación tratamiento biológico. 17
Ilustración 6 Tratamiento de agua residual (automatizado) 22
Ilustración 7 Ejemplo de DTI. 26
Ilustración 8 Planos de agua residual. 31
Ilustración 9 DTI del proceso actual de planta 32
Ilustración 10 Desbordamiento en el tanque 1 y llenado excesivo del tanque 2. 33
Ilustración 11 Diagrama lineal del sistema 36
Ilustración 12 DTI general. 37
Ilustración 13 Diagrama de arquitectura general del sistema 39
Ilustración 14 Vista de redes en TiA Portal Arquitectura PROFINET 49

Ilustración 15 Simulación del proceso en el software Factory I/O..... 50
Ilustración 16 HMI principal. 50
Ilustración 17 Pantalla referente a las etapas 1 y 2 (PLC esclavo 1)..... 51
Ilustración 18 Pantalla referente a las etapas 3 y 4 (PLC esclavo 2). 52
Ilustración 19 Pantalla referente a las etapas 5 y 6 (PLC esclavo 3). 52
Ilustración 20 DTI General. 54
Ilustración 21Diagrama unifilar del PLC maestro. 55
Ilustración 22 Diagrama unifilar Esclavo1 55
Ilustración 23 Diagrama unifilar Esclavo 2 56
Ilustración 24 Diagrama unifilar Esclavo 3 56
Ilustración 25 Diagrama multifilar del PLC maestro. 57
Ilustración 26 Diagrama multifilar del esclavo 1. 57
Ilustración 27 Diagrama multifilar del esclavo 2. 58
Ilustración 28 Diagrama multifilar del esclavo 3 58
Ilustración 29 Primera condición de simulación. 59
Ilustración 30 llenado del 2 tanque. 59
Ilustración 31 Flujo del agua hacia el tercer tanque. 60

Tabla 1 Instrumentación Principal..... 20

Introducción.

El tratamiento de aguas residuales es un tema de gran importancia debido a los problemas de contaminación y a la creciente demanda de agua en distintos sectores. Al tratarse de un recurso indispensable para la vida y el desarrollo de las actividades humanas, resulta necesario implementar estrategias que permitan un uso más eficiente y responsable del agua, así como reducir el impacto ambiental generado por su descarga sin tratamiento adecuado, no obstante, el correcto funcionamiento de estos sistemas depende del control continuo de diversas variables del proceso, tales como el nivel, el flujo y otros parámetros operativos, los cuales, cuando se supervisan de manera manual, pueden presentar deficiencias o inconsistencias.

En este contexto, la automatización se presenta como una alternativa viable para mejorar la operación de las plantas tratadoras, al permitir un mayor control, una supervisión constante y una reducción en la intervención humana. La incorporación de tecnologías como sensores, actuadores y controladores lógicos programables ha demostrado ser una solución efectiva para optimizar este tipo de sistemas.

Dentro del Instituto Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Hidalgo, cuenta con una planta tratadora de aguas residuales que puede beneficiarse de la implementación de un sistema automatizado. Por ello, el presente proyecto tiene como finalidad proponer la automatización de dicha planta, enfocándose en el diseño de un sistema de control que permita mejorar su funcionamiento y eficiencia operativa.

Finalmente, en este documento se describen las etapas correspondientes al desarrollo de la propuesta, abarcando desde el análisis del proceso y el diseño del sistema hasta la descripción conceptual de su implementación.

Capítulo I

El Problema.

1.1 Objetivo general.

Diseño de propuesta de un sistema automatizado, aplicando conocimientos de control, instrumentación, electricidad y programación.

1.2 Objetivos específicos.

1. Analizar el sistema manual y generar un diagrama del proceso automatizado (DTI).
2. Diseñar los diagramas eléctricos y de control.
3. Programar la lógica de control y simulación del proceso.
4. Diseñar el sistema SACADA (diseño de pantallas y alarmas).

1.3 Justificación.

El tratamiento de aguas residuales es un proceso esencial para reducir el impacto ambiental causado por las actividades humanas y garantizar la disponibilidad de agua limpia para uso secundario en las instalaciones del ITSCH. Los métodos tradicionales, aunque efectivos, suelen ser intensivos en recursos, requieren supervisión constante y no siempre alcanzan la máxima eficiencia. La implementación de tecnologías automatizadas basadas en procesos bioquímicos puede optimizar el tratamiento, permitiendo un monitoreo preciso y una mejora en la calidad del agua tratada. Este proyecto busca desarrollar una propuesta de sistema automatizado para el tratamiento de aguas residuales, desde la entrada del agua residual hasta el reusó de la misma, utilizando procesos bioquímicos controlados por tecnologías de última generación.

Capítulo II

Fundamento Teórico.

2.1 Marco Teórico.

2.1.1 Aguas Residuales.

El agua residual es aquella que ha sido usada en nuestras viviendas o industrias y que, tras su uso, presenta una serie de contaminantes y que deben ser tratadas antes de ser devueltas al medio ambiente. *(Equipo editorial Etecé, 2024).*



Ilustración 1 Agua residual

Estas se producen diariamente, tanto en nuestras casas, como en nuestros trabajos, en escuelas, fabricas e industrias, básicamente en casi todas las actividades humanas y estas pueden clasificarse en:

- **Aguas servidas.**
- **Aguas contaminadas.**

Una diferencia fundamental entre ambos tipos de agua radica en su origen y en el nivel de alteración de su calidad.

Las aguas residuales pueden contener una gran de contaminantes, variando desde bacterias y virus hasta metales pesados, pasando por compuestos químicos y materia orgánica. *(Equipo editorial Etecé, 2024)*

2.1.2Tratamiento de Aguas Residuales.

Las aguas residuales pueden tratarse en centros dedicados exclusivamente a ello, conocidas como plantas de tratamiento de aguas residuales. También puede tratarse de manera preventiva en los propios lugares de uso y contaminación, mediante mecanismos y procesos localizados.

El tratamiento de aguas residuales se refiere al proceso que puede ser físico, químico o biológico que permite convertir el agua contaminada a agua tratada, para que así, el ser

humano pueda volver a utilizarla o para poder devolverla al medio ambiente de manera segura. *(Equipo editorial Etecé, 2024).*

Los métodos de tratamiento se clasifican en tratamientos físicos, químicos y biológicos cada uno con funciones específicas dentro del proceso de depuración del agua.

2.1.3.1 Tratamiento físico.

El tratamiento físico se basa en la remoción de sólidos y materiales suspendidos mediante procesos mecánicos o físicos, sin alterar la composición química del agua. Su objetivo principal es eliminar solidos grandes, arena, grasas y materiales flotantes presentes en el agua residual.



Ilustración 2 Cribas para tratamiento físico.

Entre los procesos más comunes se encuentran:

- Cribado o desbaste.
- Desarenado.
- Sedimentación.
- Filtración.

Este proceso generalmente es la etapa inicial del tratamiento, ya que se encarga de separar el agua para los procesos posteriores al reducir la carga de solidos que podrían afectar o retardar el funcionamiento de otros sistemas de tratamiento. *(Equipo editorial Etecé, 2024).*

2.1.3.2 Tratamiento químico.

El tratamiento químico consiste en la adición de reactivos químicos con el objetivo de transformar o precipitar contaminantes presentes en el agua. Este tipo de tratamiento se utiliza principalmente para remover partículas coloidales, neutralizar el pH o desinfectar el agua.

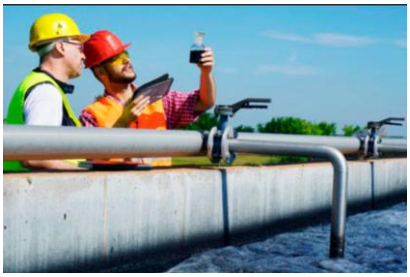


Ilustración 3 Tratamiento Químico.

Entre los procesos químicos más utilizados se encuentran:

- Coagulación.
- Floculación.
- Neutralización.
- Desinfección.

Aunque estos métodos pueden ser altamente efectivos, suelen implicar costos asociados al uso de reactivos y generación de lodos, por lo que muchas plantas combinan estos procesos con tratamientos biológicos. *(Equipo editorial Etecé, 2024).*

2.1.3.3 Tratamiento biológico.

El tratamiento biológico se basa en la acción de microorganismos que degradan la materia orgánica presente en el agua residual, transformándola en compuestos más simples como dióxido de carbono, agua y biomasa. *(Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2019).*



Ilustración 4 Reactor Biológico.

Este tipo de tratamiento es ampliamente utilizado debido a su alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica, medida generalmente mediante parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Entre los sistemas biológicos más utilizados se encuentran:

- Procesos de lodos activados.
- Filtros percoladores.
- Biodiscos.
- Lagunas de estabilización.

En estos sistemas, los microorganismos requieren condiciones adecuadas para su funcionamiento requieren condiciones adecuadas para su funcionamiento, como disponibilidad de oxígeno, temperatura adecuada, pH controlado y tiempo de retención suficiente.

Debido a que estos parámetros deben mantenerse dentro de rangos específicos para garantizar la eficiencia del proceso, el tratamiento biológico resulta especialmente adecuado para la implementación de sistemas de monitoreo y control automatizado, mediante el uso de sensores, actuadores y sistemas de control industrial.

2.1.4 Parámetros de calidad del agua (DBO, DQO, pH, turbidez).

Los parámetros de calidad del agua varían dependiendo del uso que se le vaya a dar, sin embargo, hay algunos que son generales y son indicativos de su pureza y aptitud para el consumo.

Dentro de los parámetros de calidad del agua, existen algunos que resultan fundamentales para el adecuado diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales. Estos parámetros permiten dimensionar correctamente los procesos y garantizar la eficiencia del sistema.

Uno de los aspectos más importantes es la variabilidad del caudal, la cual considera los valores mínimos, medios y máximos del flujo del agua. Asimismo, es necesario analizar

las variaciones horarias y los incrementos asociados a procesos intermitentes, ya que estos factores influyen directamente en el dimensionamiento de las unidades de tratamiento. Un diseño adecuado debe evitar tanto el sobredimensionamiento como la insuficiencia del sistema.

Otro parámetro esencial es la carga contaminante del agua, la cual se determina a partir de la caracterización de su composición. En este sentido, se evalúan indicadores como la Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO), la Demanda Química de Oxigeno (DQO), los sólidos suspendidos y sediméntales, así como la presencia de grasas, aceites y materia orgánica en general. Estos parámetros permiten estimar el grado de contaminación y definir el tipo de tratamiento requerido. *(Instituto del Agua, 2024)*

Adicionalmente, el color del agua y la presencia de compuestos refractarios son aspectos relevantes, ya que pueden indicar la existencia de sustancias orgánicas no biodegradables. La eliminación de este tipo de contaminantes suele requerir la aplicación de procesos avanzados, tales como la adsorción con carbón activado, la oxidación avanzada a los tratamientos terciarios de filtración.

Finalmente, es importante identificar aquellos contaminantes que no son removidos mediante tratamientos biológicos convencionales. Para ello, se realizan análisis específicos que permiten detectar la presencia de metales pesados, compuestos fenólicos, pesticidas, colorantes sintéticos, entre otros. La identificación de estos elementos es fundamental para la selección de tecnologías de tratamiento complementarias que aseguren el cumplimiento de los estándares de calidad del agua.

2.1.5 Organismos importantes en sistemas de tratamiento biológico.

Los microorganismos se pueden clasificar según distintos criterios. Dichos microorganismos necesitan una fuente de carbono, nutrientes (nitrógeno, fosforo y otros elementos en menor medida) y energía para su crecimiento. Las condiciones ambientales que más afectan al desarrollo de los microorganismos son la temperatura y el pH. *(CONAGUA, 2019).*

El metabolismo de los microorganismos comprende le conjunto de reacciones bioquímicas que se desarrollan en el interior de las células y que permiten llevar a cabo sus funciones vitales. Estas reacciones metabólicas se dividen principalmente en dos procesos relacionados: catabolismo y anabolismo.

Otra clasificación de los microorganismos se realiza en función del compuesto que utilizan como aceptor de electrones. Según este criterio los microorganismos se dividen en:

- Aerobias.
- Anaeróbicos.

2.1.6 Aplicación del tratamiento biológico en plantas de tratamiento.

El tratamiento bilógico constituye una de las etapas más importantes dentro de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que permiten la eliminación de una gran parte de la materia orgánica que se encuentra disuelta en el agua. Este proceso se genera, debido a la actividad de los microorganismos que utilizan dicha materia como fuente de energía y nutrientes, transformándolos en sustancias más simples como lo es el dióxido de carbono, agua y biomasa. *(CONAGUA, 2019).*



Ilustración 5 Aplicación tratamiento biológico.

Dicho tratamiento suele ser empleado después de las etapas de pretratamiento y tratamiento primario, donde se encargan de remover solidos gruesos y parte de los sólidos suspendidos. Una vez el agua residual entra al sistema biológico, se crean condiciones controladas que ayudan al crecimiento y la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la degradación de contaminantes.

Entre los sistemas biológicos más utilizados en las plantas de tratamiento se encuentras los procesos de lodos activados, los filtros de percoladores, los Biodiscos y las lagunas de estabilización. Estos sistemas permiten reducir de una manera significativa parámetros de contaminación como la Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO) y la Demanda Química de Oxigeno (DQO), contribuyendo a mejorar la calidad del agua antes de su descarga o reutilización. *(CONAGUA, 2019).*

Para su correcto funcionamiento es importante el control de diversas variables operativas, como por ejemplo el suministro del oxígeno, el pH, la temperatura y el tiempo de retención hidráulica. Por esta razón, actualmente muchas plantas de tratamiento incorporan sistemas de monitoreo y control automatizado que permiten optimizar las condiciones de dicho proceso y mejora la eficiencia del tratamiento.

2.1.7 Normatividad aplicada en Mexico.

La NOM-001-SEMARNAT es una de las normativas más relevantes en materia de tratamiento de aguas residuales en Mexico. Esta normativa oficial establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas industriales y urbanas a cuerpos receptores de aguas nacionales. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2022).

El cumplimiento de esta normativa es fundamental para la protección del medio ambiente y la salud pública, ya que regula parámetros clave de la calidad del agua, tales como la Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO), La Demanda Química de Oxigeno (DQO), los sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, pH, así como la presencia de metales pesados y otros contaminantes.

Existen diversos métodos y tecnologías que permiten cumplir con los límites establecidos por esta norma. Estos tratamientos incluyen procesos físicos (filtración, sedimentación), químicos (coagulación, desinfección) y biológicos (lodos activados, Biodiscos).

Tomando en cuenta dicho contexto, el diseño y operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales deben orientarse al cumplimiento de los parámetros establecidos en la normativa vigente, lo que implica la implementación de sistemas eficientes de tratamiento, así como el monitoreo y control continuo de las variables del proceso. *(SEMARNAT, 2022).*

2.1.8 Instrumentación y control de procesos.

La instrumentación y el control de procesos son elementos importantes dentro de la operación de plantas de tratamiento residuales. Ya que estos sistemas permiten regular y monitorear gran parte de las variables del proceso con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento y las condiciones necesarias para la correcta depuración del agua.

La instrumentación se refiere al conjunto de dispositivos y equipos utilizados para medir variables físicas y químicas dentro del proceso. Dichos instrumentos proporcionan información en tiempo real sobre el estado del sistema, permitiendo detectar variaciones que puedan afectar la eficiencia del tratamiento. *(Ingeniería Mecafenix, 2023).*

Para dar una correcta representación de los elementos dentro de un sistema de control, es necesario implementar una simbología estandarizada que permita identificar de manera clara cada uno de los dispositivos empleados en el proceso. Esta simbología es fundamental en la elaboración de diagramas técnicos, como el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI), ya que facilita la interpretación del sistema y la comunicación entre los diferentes profesionales involucrados en su diseño y operación.

Dentro de la simbología básica de la instrumentación se incluyen elementos como sensores, controladores y actuadores, los cuales se representan mediante símbolos específicos que indican su función dentro del proceso. Asimismo, se emplean distintos tipos de líneas para diferenciar las conexiones de proceso, las señales eléctricas y las señales de control lo que permite comprender de manera integral el flujo de información y energía en el sistema.

El uso adecuado de esta simbología permite no solo documentar el sistema de forma clara y estructurada, sino también facilitar tareas de análisis, mantenimiento y diagnóstico, contribuyendo a una mejor operación de los procesos industriales. *(International Society of Automation [ISA], 2024).*

Nombre.	Símbolo.
Tanque	
Bomba	
Válvula	
Sensor de nivel	
Sensor de caudal	
Sensor de pH	
Plc	
Líneas de señal	
Líneas de Proceso	

Tabla 1 Instrumentación Principal

En la tabla superior se pueden observar los símbolos más utilizados dentro de los diagramas en plantas tratadoras de agua y que serán de gran ayuda en la realización del diagrama propuesto para el presente proyecto.

Por otro lado, el control de procesos consiste en la aplicación de estrategias que permiten ajustar automáticamente las condiciones de operación mediante actuadores y sistemas de control, con el fin de mantener las variables del sistema dentro de los rangos adecuados.

Su objetivo principal es optimizar la producción y garantizar la calidad de los bienes o servicios generados, para lograrlo, este proceso se apoya en una intricada red de sistemas y tecnologías diseñadas para supervisar variables críticas en tiempo real.

Existen diferentes estrategias de control aplicadas en sistemas industriales, entre los cuales resaltaremos el control en lazo abierto y el control en lazo cerrado. El control de lazo abierto no considera retroalimentación del sistema mientras que el control en lazo cerrado utiliza información de los sensores para ajustar continuamente las condiciones del proceso, permitiendo una mayor precisión y estabilidad.

Dentro del contexto del control, una de las estrategias más simples y ampliamente utilizadas es el control tipo ON/OFF, también conocido como control todo o nada. Este tipo de control se opera bajo el principio de activar o desactivar un actuador en función del valor de una variable del proceso respecto a un punto de referencia previamente establecido. Este tipo de control se clasifica dentro de los sistemas de control de lazo cerrado, ya que utiliza la retroalimentación de un sensor para la toma de decisiones. Así, una vez la variable medida alcanza un valor límite superior o inferior, el sistema responde activando o desactivando el elemento final de control ya sea una bomba, una válvula o un motor.

Es importante saber que, para evitar un funcionamiento inestable por las activaciones y desactivaciones contantes, es común implementar un margen de operación, el cual establece dos puntos de referencia, uno de encendido y uno de apagado. A este margen se le conoce como histéresis y esto permite que el funcionamiento del proceso sea más estable y además garantiza o extiende la vida útil de nuestros equipos.

2.1.9 Automatización Industrial.

La automatización industrial es la tecnología aplicada mediante sistemas de control como lo son computadores, robots y tecnologías de la información, para generar un funcionamiento automático de diferentes maquinarias y procesos en la industria, sin la necesidad de operadores humanos. La automatización y control se han convertido en pilares fundamentales para mejorar la eficiencia, reducir errores y optimizar recursos. Debido al avance de la tecnología, las empresas han podido reducir errores de producción, así como supervisar y gestionar procesos complejos en tiempo real, logrando mayor productividad y rentabilidad.



Ilustración 6 Tratamiento de agua residual (automatizado)

La automatización industrial tiene sus inicios en el tiempo de la revolución industrial, en un periodo de cambios sísmicos que se inició a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Durante esta época, la transición de métodos de producción artesanales a sistemas mecanizados trasformo la estructura económica y social de los países industrializados. Cabe mencionar que, aunque la automatización era rudimentaria en ese tiempo, ya se vislumbraban los principios básicos de los sistemas automatizados. Algunos ejemplos de ellos son:

- Máquinas de hilar.
- Sistemas mecánicos de metalurgia.
- Máquina de vapor.

Y gracias a ese inicio se abrieron las puertas a los avances de tecnología que nos permitieron llegar hasta lo que existe actualmente.

Si nos ponemos a analizar la diferencia entre el control manual y el automático, se dan a relucir los beneficios que tiene el sistema automatizado, en especial en entornos

industriales. Destacando así la precisión y la eficiencia de dichos sistemas que superan con mucho las capacidades humanas en términos de repetibilidad y velocidad.

2.1.9.1 Controladores lógicos programables.

Un controlador lógico programable (PLC) es el cerebro oculto detrás de miles de procesos automatizados que nos facilitan la vida cada día. Desde las líneas de producción en fábricas hasta los sistemas de semáforos que ves al salir de casa, este dispositivo es el responsable de que todo funcione con precisión y sin error alguno. Este funciona como una computadora robusta capaz de recibir señales (a través de sensores o interruptores) procesar dichas entradas y activar la salida (como motores, válvulas o luces) dependiendo a lo requerido *(Electrohine, 2026).* Se podría decir que un PLC piensa antes de ejecutar acciones para que las maquinas trabajen de forma autónoma, segura y coordinada.

Una de las ventajas más notorias de los PLC es la capacidad que tienen para trabajar en entornos exigentes, como los es la humedad o temperaturas extremas, además de soportar la vibración, también se pueden reprogramar fácilmente, lo que permite adaptar la maquinaria a nuevas tareas o a nuevos recorridos sin necesidad de reemplazar componentes.

No todos los PLC son iguales. Existen diferentes tipos de controladores lógicos programables, y para poder escoger uno que se acople a las necesidades es importante conocerlos.

- PLC compacto.
- PLC modular.
- PLC distribuido.
- PLC de seguridad.
- PLC de alta velocidad.

2.1.9.2 Sistemas SCADA.

SCADA por sus cifras en ingles significa Supervisory Control and Data Acquisition, que en español significa Control de Supervisión y Adquisición de Datos. Este sistema

recoge datos de campo en varios sensores conectados a través del proceso y luego envía las señales a un ordenador central que gestiona y controla. *(Pais, 2026).*

La estructura del sistema SCADA cuenta con cuatro niveles los cuales desglosaremos a continuación:

- **Nivel de Campo:** en es donde se incluyen los dispositivos que interactúan con el proceso industrial como lo son los sensores, actuadores y controladores. Dichos dispositivos miden variables físicas y las convierten en señales eléctricas que son enviadas al sistema SCADA.

- **Nivel de Control:** dentro de este nivel se encuentran los controladores lógicos programables (PLC) y las unidades terminales remotas (RTU). Estos dispositivos se encargan de procesar la información y de ejecutar las acciones en función de los datos.

- **Nivel de Supervisión:** Dentro de este nivel se encuentra el software SCADA que permite el control y el monitoreo del sistema. Se proporcionan interfaces graficas (HTMI) para obtener la visualización de datos y tener mejor interacción con el sistema.

- **Nivel de gestión:** En este nivel se realiza un análisis de los datos obtenidos y se toman las decisiones estratégicas. Se implementan sistemas de gestión de datos y reportes que ayudan a optimizar el rendimiento del sistema. *(Pais, 2026).*

2.1.9 Diseño eléctrico y documentación técnica.

Se le conoce como diseño eléctrico al proceso de planificación, simulación, implementación y puesta en marcha de equipos que serán alimentados con corriente eléctrica. Esto con el objetivo de conocer los elementos que conformaran y con los que contara el proceso para facilitar la evaluación y la reparación futura del mismo. *(Solo Ingeniería, 2026).*

El diseño eléctrico se divide en los siguientes elementos:

- **Plano eléctrico:** este documento muestra y especifica las conexiones eléctricas del proceso, este debe cumplir con la normativa vigente.
- **Estudio de carga:** establece la cantidad de potencia que cada elemento puede proporcionar.
- **Memoria técnica:** Este apartado detalla los materiales a utilizar, especificaciones de construcción y un presupuesto.

Existen una serie de pasos que se deben realizar para generar un diseño eléctrico eficiente, estos son:

1. Estudio de factibilidad.
2. Cálculos eléctricos.
3. Cumplimiento normativo.

Este tipo de diseños son altamente utilizados dentro de las industrias donde se requiere una planificación técnica completa del sistema eléctrico dentro de las plantas y naves productivas. Donde se debe incluir un cálculo de cargas requeridas, selección de equipos, elaboración de diagramas unifilares y el cumplimiento de normas que deben seguir, con esto facilitando los procesos de mantenimiento o reparación dependiendo el caso, garantizando así la seguridad de dichos procesos. *(Solo Ingeniería, 2026).*

Por otro lado, la documentación técnica en sistemas de automatización es un registro automatizado conformado por manuales, diagramas, esquemas eléctricos/lógicos y protocolos SOP, los cuales definen el diseño, operación y mantenimiento del sistema. La complejidad de estos sistemas requiere un enfoque multidisciplinario. Donde intervienen profesionales de ingeniería eléctrica, mecánica, civil y automatización para lograr un resultado funcional y seguro.

2.1.9.1 Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI).

Un DTI también conocido como P&ID por sus siglas en ingles cuyo significado es “Piping and Instrumentation Diagram”, es un diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos, tuberías y accesorios que conforman una sección de una planta. *(ISA, 2024).*

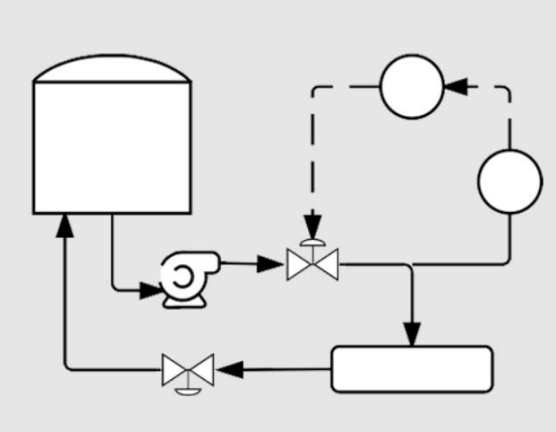


Ilustración 7 Ejemplo de DTI.

Este tipo de diagrama permite visualizar el flujo de los fluidos a traves del sistema, asi como la ubicación y funcion de los diferentes elementos involucrados en el proceso, tales como tanques, bombas, valvulas e instrumentos de medicion. A diferencia de otros diagramas mas generales, el DTI proporciona un nivel de detalle mayor, incluyendo informacion sobre las variables de proceso, los puntos de medicion y las estrategias de control implementadas.

Entre los elementos mas importantes que se representan en un DTI se encuentras las lineas de proceso , que indican que trayectoria del fluido, los equipos principales que son los que participan en las diferentes etapas del tratamiento, los instrumentos de medicion como lo son los sensores de nivel, caudal, presion y pH y finalmente las lineas de señal, que muestran la comunicación entre los dispositivos de campo y los sistemas de control, como los controladores logicos programables.

Dentro de las plantas de tratamiento de aguas residuales, el DTI constituye una herramienta fundamental para el diseño, analisis y operación del sistema, ya que prmite identificar de manera clara los puntos criticos del proceso, asi como las variables que deben ser monitoreadas y controladas. Ademas facilita la integracion de sistemas de automatizacion, al definir la ubicación de sensores y actuadores dentro del proceso.

El principal objetivo de un DTI dentro de un sistema automatizado es representar de manera clara la interacción entre los equipos de proceso, la instrumentación y sistemas de control, permitiendo comprender el funcionamiento integral del sistema antes de su implementación física.

Para representar de mejor manera un DTI es importante conocer las siguientes normas:

- ISA S5.1 “Símbolos de instrumentación e identificación”
- ANSI/ISA-S5.1 “Identificación y símbolos de instrumentación”
- ANSI/ISA-S5.2 “Diagramas lógicos binarios para operaciones de proceso”
- ISA-S5.3 “Símbolos gráficos para control distribuido”

Dentro de esta propuesta, la implementación de los DTI permitirá representar las diferentes etapas del tratamiento de aguas residuales, donde se incluirán las etapas que conforman el proceso y nos ayudara a identificar las actualizaciones que se presentan de una manera más ilustrativa.

2.2 Marco Conceptual.

Dentro de este apartado se presentan las definiciones de los conceptos clave utilizados en el desarrollo de la investigación. Se proporcionarán con el fin de comprender de manera más clara los términos técnicos relacionado con el tratamiento de aguas residuales y de su propuesta de automatización.

Aguas residuales: agua que ha sido utilizada en actividades humanas y que contiene contamines que alteran su calidad original, por lo que requiere tratamiento antes de su disposición final.

Aguas Servidas: se le llama así al agua de origen domestico o sanitario, que contienen materia orgánica, detergentes y microorganismos.

Aguas contaminadas: se le llama así al agua de origen industrial o con descargas químicas que pueden contener metales pesados, sustancias químicas o compuestos tóxicos.

Cribado o desbaste: Elimina solidos grandes mediante rejillas o mallas.

Desarenado: permite remover partículas pesadas como arena o grava.

Sedimentación: separa solidos suspendidos por efecto de la gravedad.

Filtración: retiene partículas finas mediante materiales filtrantes.

Coagulación: adición de sustancias químicas para agrupar partículas finas.

Floculación: formación de flóculos más grandes que pueden sedimentar.

Neutralización: ajuste del pH del agua mediante sustancias químicas.

Desinfección: eliminación de microorganismos mediante cloro, ozono o radiación ultravioleta.

DBO: (Demanda biológica de oxígeno) Mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua mediante procesos biológicos aeróbicos, que suele referir al consumo en 5 días (DBO5), también puede emplearse por lo menos de 21 días. Este se mide en ppm de 02 que se consume.

DQO: (Demanda Química de oxígeno) Mide la capacidad de consumo de un oxigeno químico, dicromato, permanganato, etc... por el total de materiales oxidables orgánicas e inorgánicas. Es un parámetro más rápido que el DBO, ya que es de medición casi inmediata, la unidad de medida son ppm de 02.

pH: El pH indica si el agua es acida o alcalina, esta se mide por la concentración de iones de hidrógeno. El pH ideal para el agua potable suele estar entre 6.5 y 8.5.

Turbidez: la turbiedad se refiere a la claridad del agua. Si el agua es turbia, puede contener partículas en suspensión que alteran su calidad. Estos se eliminan a través de procesos de coagulación, decantación y filtración.

Aerobias: estas bacterias requieren oxígeno disuelto para realizar sus procesos metabólicos. Son las principales responsables de la degradación de materia orgánica en sistemas como los reactores de lodos activados.

Anaeróbicos: se desarrollan en ausencia de oxígeno y participan en procesos de digestión anaerobia, donde transforman la materia orgánica en gases como metano y dióxido de carbono.

Sensor: Son dispositivos electrónicos que se utilizan para poder detectar las diferentes magnitudes físicas que se encuentran en cualquier parte del mundo. Pueden medir magnitudes físicas o químicas y transformarlas en magnitudes eléctricas. Otra forma de decirlo sería que, leen variables como temperatura, distancia, fuerza, presión, humedad, etc. Y una vez que tiene la lectura, procede a convertirlas en señales eléctricas que nos ayudan a un sinfín de tareas en nuestro día a día.

Controlador: Son componentes fundamnetales de la automatizacion industrial que regulan y gestionan el comportamiento de maquinas, procesos y sistemas mediante la recepcion de datos de sensores, el procesamiento de informacion de informacion según algoritmos predefinidos y la emision de señales de control hacia actuadores. Estos dispositivos electronicos o sistemas computarizados funcionan como el cerebro de los sistemas automatizados, permitiendo la ejecucion de operaciones sin intervencion humana constante y garantizando la precision, eficiencia y seguridad en entornos industriales.

Actuador: es un dispositivo que recibe una entrada de energía y la convierte en movimiento o fuerza, siendo un componente esencial en muchas tecnologías modernas y campos de la ingeniería. Los actuadores se presentan en diversas formas, y cada tipo tiene una función específica en función de la aplicación. Existen dos categorías principales definen los actuadores: el tipo de movimiento y la fuente de energía.

PLC (Controlador Logico Programable): Equipo electronico programable que recibe informacion de sensores, procesa datos según un programa y envia señales a actuadores para controlar procesos industriales o sistemas automatizados.

Capítulo III

Metodología usada.

3.1 Fase de Diagnostico.

Como primer paso para la identificación de las mejoras, es necesario conocer el proceso que se realiza en la institución, conociendo los pasos que sigue el agua desde su llegada a la planta hasta su salida al medio ambiente, conociendo su estructura, sus componentes y el estado en el que se encuentra actualmente.

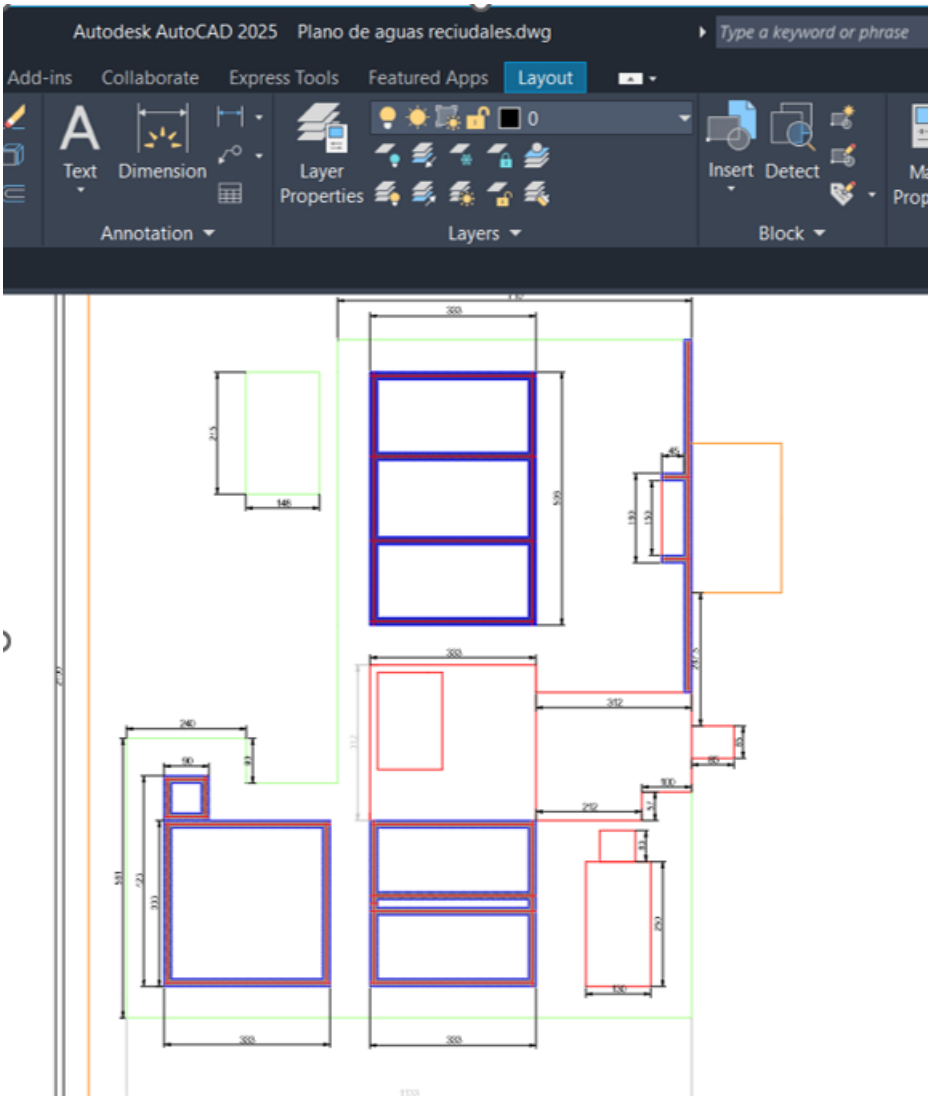


Ilustración 8 Planos de agua residual.

A través del siguiente diagrama podremos visualizar de una manera general la distribución que tiene la planta, tomando en cuenta la ubicación de tanques y equipos principales, así como su labor dentro del proceso.

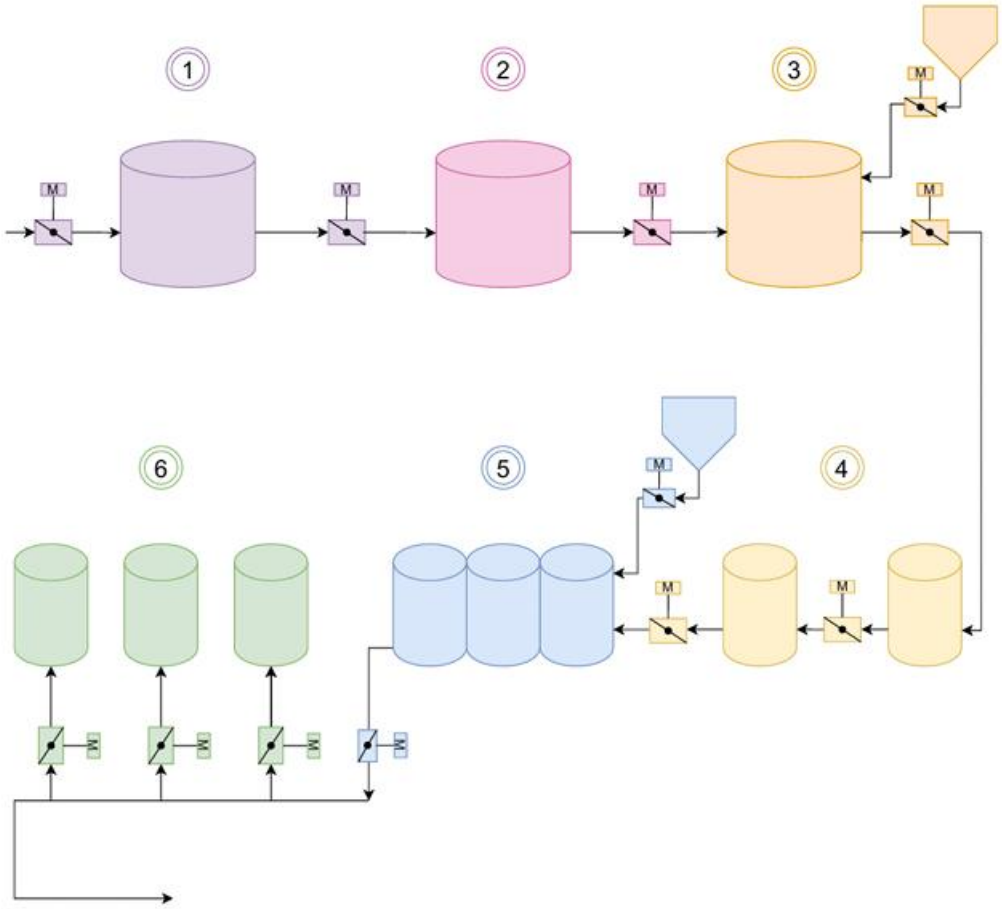


Ilustración 9 DTI del proceso actual de planta

La planta está conformada por 6 etapas como lo son; Sedimentación, lodos activados, segunda sedimentación, absorción, cloración y almacenamiento, cada etapa está representada mediante símbolos que identifican los elementos principales, como lo son los tanques, líneas de conducción y dispositivos auxiliares que intervienen en el proceso.

Cada etapa es llevada a cabo dentro de tanques independientes que están interconectados por gravedad y que actualmente son operados mediante válvulas de funcionamiento manual, bombas locales y equipos como mixeres, aireadores y filtros de presión. Sin embargo, la ausencia de instrumentación adecuada, como sensores de nivel, medidores de caudal, sistemas de automatización en válvulas, temporización de equipos y monitoreo centralizado, limita significativamente la operación continua del sistema. Esta condición provoca una baja capacidad de control sobre el proceso, lo que puede

derivar en un funcionamiento ineficiente, así como en posibles desbordamientos o perdidas de agua en los tanques.

A continuación, se muestra un conjunto de imágenes que muestran los problemas actuales que presenta la planta y sobre los cuales se propone trabajar.



Ilustración 10 Desbordamiento en el tanque 1 y llenado excesivo del tanque 2.

3.2 Fase de Diseño.

Una vez concluida la etapa de diagnóstico, se identificó que el proceso actual presenta diversas limitaciones que afectan el funcionamiento y disminuyen la eficiencia operativa del sistema. Entre las principales deficiencias detectadas se encuentran la operación manual de las válvulas, la ausencia de monitoreo continuo de variables críticas, la falta de supervisión centralizada y la inexistencia de un sistema automatizado que permita coordinar las diferentes etapas del proceso.

Con base en el análisis realizado, se desarrollo una propuesta integral de automatización orientada a mejorar la operación de la planta mediante la incorporación de instrumentación industrial, sistemas de control y herramientas de supervisión. Para ello, se plantea el diseñó de un sistema compuesto por un diagrama de tuberías e instrumentación (DTI), una arquitectura de control basada en PLC, un sistema SCADA para supervisión del proceso, diagramas eléctricos desarrollados en EPLAN y una simulación de la planta, con el propósito de validar el comportamiento esperado de la propuesta antes de una posible implementación física.

Finalmente, la propuesta incorpora condiciones de seguridad para proteger la operación del sistema automatizado, incluyendo alarmas por nivel alto en los tanques, supervisión de fallas en bombas, monitoreo de presión y condiciones de bloqueo para evitar la trasferencia de agua cuando no existan niveles mínimos de operación. Estas estrategias buscan garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema propuesto.

3.2.1. Descripción general del sistema propuesto.

Como parte de la propuesta de automatización, se plantea la incorporación de instrumentación industrial distribuida estratégicamente en las diferentes etapas de la planta de tratamiento de aguas residuales, con el propósito de supervisar y controlar las principales variables del proceso. La selección y ubicación de cada instrumento se realizó considerando las condiciones de operación de cada etapa, permitiendo obtener información en tiempo real sobre el comportamiento del sistema y facilitando la toma de decisiones por parte del controlador lógico programable (PLC).

La propuesta contempla la integración de sensores de proceso, actuadores, válvulas automatizadas, equipos de bombeo y demás dispositivos de control representados en el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI), estableciendo una arquitectura que permita la supervisión centralizada mediante un sistema SCADA y la coordinación de las diferentes etapas del tratamiento.

3.3 Fase de implementación y simulación.

Una vez concluida la fase de diseño y definidos los elementos que conforman la propuesta de automatización, se plantea la implementación conceptual del sistema, integrando la instrumentación del campo, los dispositivos de control y los sistemas de supervisión representados en el DTI.

Esta etapa tiene como finalidad establecer la interacción entre los diferentes equipos del proceso, permitiendo coordinar el funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales mediante una estrategia de control automatizada.

3.3.1. Integración propuesta de la instrumentación y actuadores.

Como parte de la propuesta de automatización, se plantea la integración de la instrumentación y los actuadores definidos en el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI), con el propósito de supervisar y controlar de manera automática las diferentes etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales. La incorporación de estos dispositivos permitirá obtener información en tiempo real sobre las principales variables del proceso y facilitará la ejecución de acciones de control mediante un Controlador Lógico Programable (PLC).

Dicha propuesta contempla la instalación de sensores distribuidos estratégicamente en las distintas etapas de la planta para el monitoreo de variables como nivel, caudal, presión, turbidez y potencial de oxidación-reducción (ORP), de acuerdo con los requerimientos operativos de cada proceso. La información obtenida por estos instrumentos será enviada al PLC, el cual procesará las señales recibidas para coordinar el funcionamiento de bombas, electroválvulas, mezcladores, sistemas de aireación y demás actuadores que intervienen en la operación de la planta.

Asimismo, la propuesta considera la integración de dispositivos de control que permitirán regular la transferencia del agua entre las diferentes etapas del tratamiento, garantizando una operación coordinada del sistema. La interacción entre sensores, actuadores y el PLC permitirá establecer una estrategia de control orientada a mejorar la estabilidad del proceso, reducir la intervención manual y facilitar la supervisión mediante un sistema SCADA.

Finalmente, la distribución de los instrumentos y actuadores fue definida con base en las necesidades de operación identificadas durante la etapa de diagnóstico y se encuentra representada en el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI), el cual constituye la base para el desarrollo del diseño eléctrico, la programación del PLC y la simulación propuesta del sistema automatizado.

3.3.2. Diagramas del sistema automatizado.

Los diagramas del sistema automatizado constituyen la representación gráfica de la propuesta de automatización de la PTAR. Su finalidad es mostrar de forma clara la interacción entre los equipos de proceso, la instrumentación de campo, los actuadores y el sistema de control, permitiendo comprender el funcionamiento integral de la planta antes de su implementación física. Como parte de esta propuesta se incluyen el diagrama general del sistema automatizado y el DTI, los cuales representan la distribución de los equipos, las líneas de proceso, los puntos de medición y los dispositivos de control.

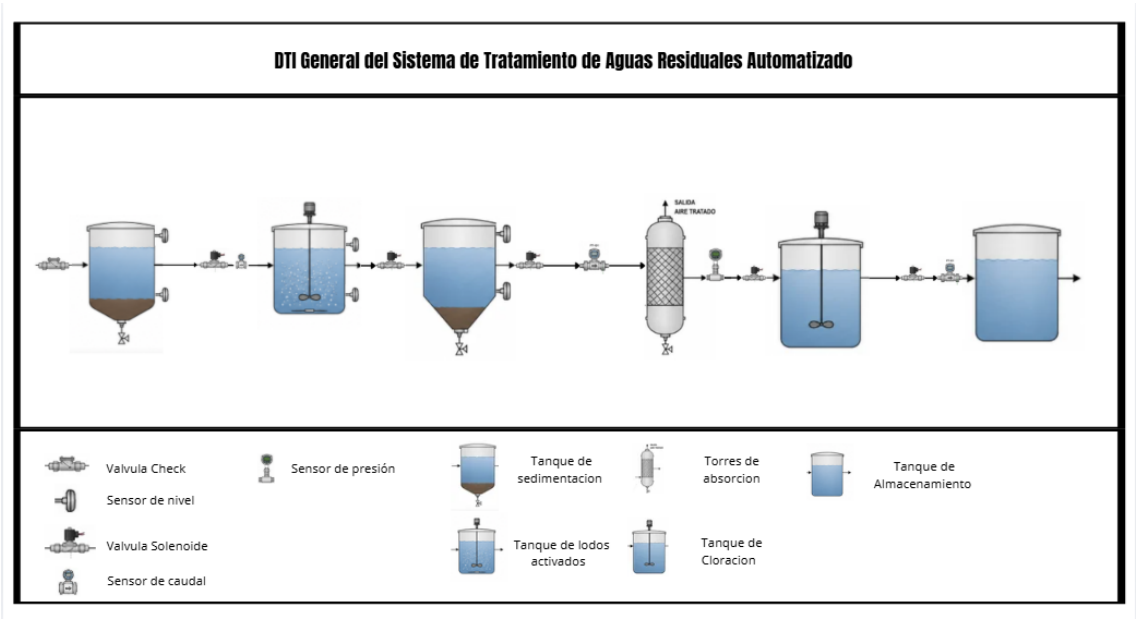


Ilustración 11 Diagrama lineal del sistema

El diagrama lineal representa de manera simplificada la secuencia operativa del proceso de tratamiento de aguas residuales, mostrando el recorrido del agua a través de las diferentes etapas de la planta y la relación funcional entre los equipos principales que conforman la propuesta de automatización. Su finalidad es proporcionar una visión general del sistema, facilitando la comprensión de la distribución de los tanques, líneas de proceso, equipos de bombeo, actuadores e instrumentación. A diferencia del DTI, el diagrama lineal presenta una representación conceptual del proceso, permitiendo identificar de forma clara la interacción entre los elementos principales antes de analizar con mayor detalle la arquitectura de control y la instrumentación del sistema.

Una vez presentado la secuencia general del proceso mediante el diagrama lineal, se presenta a continuación el DTI general. Dentro de este diagrama se detallan las

interconexiones entre los equipos de proceso, las líneas de tubería, la instrumentación de campo y los elementos de control.

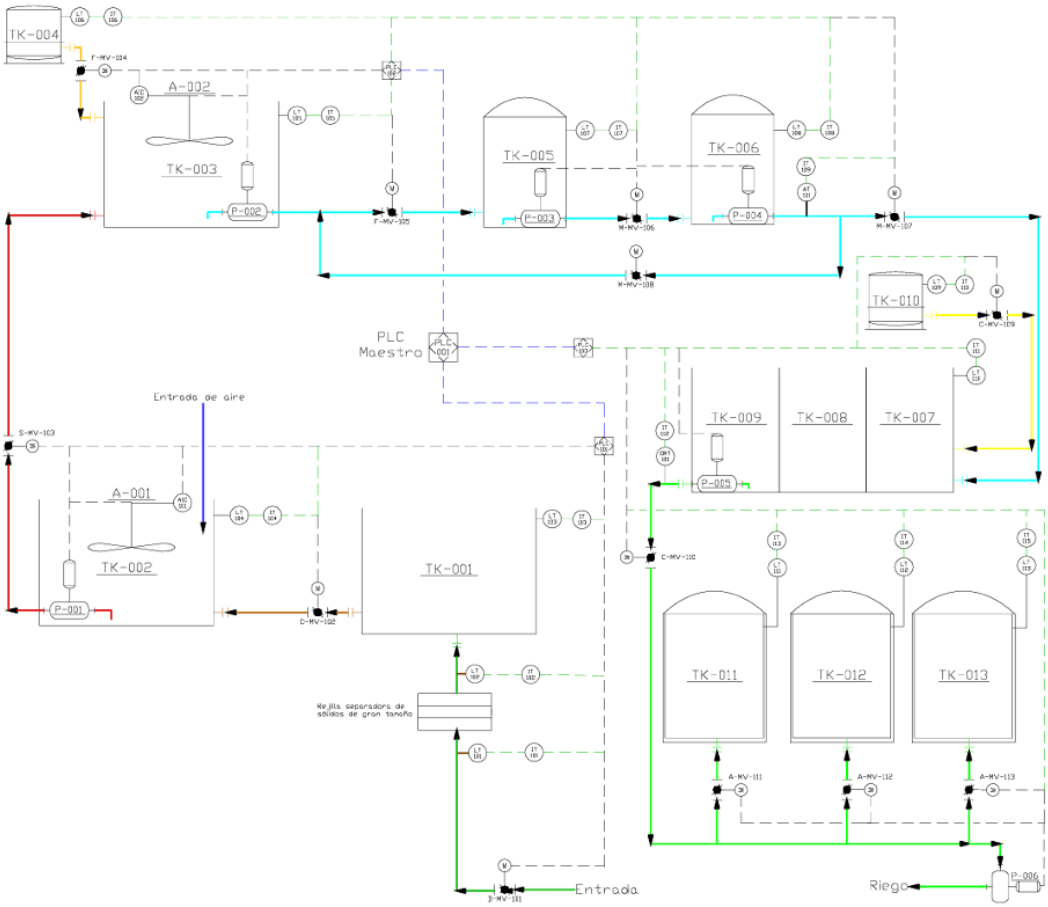


Ilustración 12 DTI general.

Para comprender el diagrama es necesario conocer la lista de componentes para así conocer con precisión cada dispositivo que interactúa en el proceso, clasificándolas mediante su identificación única y asignándolos a su respectiva etapa del tratamiento. La lista abarca desde la instrumentación de campo de alta de precisión, como lo son los sensores de nivel radar (VEGAPULS) y ultrasónicos, analizadores de calidad (turbidímetros y ORP) y transductores de corriente hasta los elementos hasta los elementos finales de control y potencia, incluyendo electroválvulas, bombas de transferencia, mezcladores y sistemas de aireación.

A continuación, se presenta la lista de componentes utilizados en la propuesta de automatización, cada elemento cuenta con una identificación única, y se relaciona con

una etapa del proceso en la que opera. La tabla cuenta con la información técnica necesaria para su integración dentro del proceso.

Una vez identificados los componentes del sistema, se define la forma en que estos se integran para garantizar el funcionamiento coordinado de la planta.

Con base en esta integración, se propone una arquitectura de comunicación con topología en estrella, la cual permite organizar los dispositivos en áreas funcionales independientes, favoreciendo la robustez del sistema, su mantenimiento y la posibilidad de ampliar la infraestructura en futuras etapas de automatización.

El sistema esta estructurado en tres niveles operativos, los cuales se encuentran interconectados mediante una red industrial de alta velocidad (Ethernet Industrial) a través de un switch central gestionable:

- Nivel superior (nivel supervisión): conformado por una estación SCADA (PC) para el almacenamiento de históricos, gestión de alarmas críticas, análisis de tendencias y un panel HMI local para la monitorización del proceso. Estos dispositivos permiten la visualización en tiempo real de todo el proceso y la interacción directa con el operador de control.
- Nivel medio (Nivel de control maestro): es donde se encuentra nuestro PLC maestro, el cual actuara como el cerebro de la planta y es el encargado de la orquestación global, la gestión de la seguridad general (como lo es el paro de emergencia) y la comunicación vertical entre el nivel de campo y el sistema SCADA.
- Nivel inferior (Nivel de campo distribuido): el cual es desarrollado con el fin de optimizar el cableado y reducir la carga de procesamiento del CPU central, por lo cual es necesario implementar tres PLCs esclavos, asignad a cada uno el control directo de dos etapas críticas del proceso.
    - PLC_1: se encargará de gestionar la adquisición de señales y control de actuadores de las etapas 1(sedimentación) y 2 (lodos activados).
    - PLC_2: Se encarga de controlar las etapas 3 (Sedimentación) y 4 (torres de absorción).
    - PLC_3: Se encarga de las etapas 5 (Cloración) y 6 (almacenamiento y riego).

Con esta distribución se asegura que en caso de una falla eventual en alguna etapa no afecte el funcionamiento de las demás etapas, permitiendo una operación mas segura y eficiente. En la siguiente imagen podremos observar un esquema grafico de la estructura descrita con anterioridad.

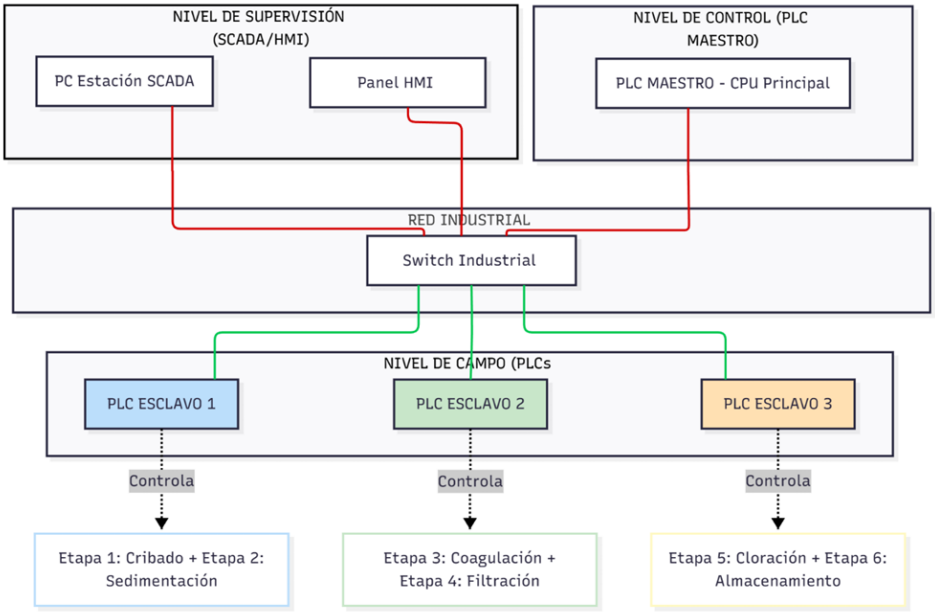


Ilustración 13 Diagrama de arquitectura general del sistema

3.3.2.1. Descripción de la jerarquía de control.

El sistema de control propuesto se basa en una arquitectura jerárquica bajo un esquema maestro-esclavo, diseñada para distribuir las funciones de supervisión, coordinación y ejecución entre los diferentes controladores programables que conforman la propuesta de automatización. Esta organización permite separar las tareas de control global de las operaciones locales de cada etapa del proceso, favoreciendo una comunicación eficiente entre los dispositivos y garantizando un funcionamiento estable de la planta aun cuando existan variaciones en la carga de comunicación de la red.

La arquitectura jerárquica propuesta establece tres niveles de operación: el nivel de supervisión, encargado de la visualización y monitoreo del proceso mediante el sistema SCADA y la interfaz HMI; el nivel de control central, representado por el PLC maestro; y el nivel de control distribuido, conformado por los PLC esclavos responsables de ejecutar las estrategias de control en cada etapa de la planta. Esta distribución permite descentralizar el procesamiento de las señales de campo y facilita la expansión futura del sistema.

- PLC Maestro: El PLC maestro constituye el controlador principal de la arquitectura propuesta y es el responsable de coordinar el funcionamiento general del sistema de automatización. Su función consiste en centralizar la información proveniente de los PLC esclavos, administrar la comunicación con el sistema SCADA y la interfaz HMI, supervisar las condiciones generales de operación y coordinar la ejecución de las estrategias de control implementadas en cada etapa del proceso. Asimismo, permite la gestión de alarmas, el intercambio de información entre controladores y la supervisión integral de la planta.
- PLC esclavo: Los PLC esclavos son responsables del control local de las diferentes etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales. Cada controlador ejecuta de manera autónoma la adquisición de señales provenientes de la instrumentación instalada, procesa la lógica correspondiente a su área de trabajo y controla directamente los actuadores asociados, como bombas, electroválvulas, mezcladores y sistemas de aireación. La comunicación permanente con el PLC maestro garantiza la sincronización entre etapas y permite mantener la continuidad del proceso de tratamiento.

3.3.3. Lógica de control ON/OFF.

La estrategia de control propuesta para la automatización de la Planta de Tratamiento se fundamenta en una lógica de control tipo ON/OFF, la cual permite controlar de manera secuencial el funcionamiento de los equipos que intervienen en cada una de las etapas del proceso. Esta estrategia se basa en la información proporcionada por la instrumentación instalada en la planta, permitiendo que el sistema tome decisiones automáticas para activar o desactivar bombas, electroválvulas, mezcladores y demás actuadores, de acuerdo con las condiciones operativas previamente establecidas.

La ejecución de esta lógica se encuentra distribuida entre los PLC esclavos que conforman la arquitectura de control propuesta, mientras que el PLC maestro se encarga de supervisar el funcionamiento general del sistema, coordinar la comunicación entre los controladores y administrar las condiciones globales de operación. Esta distribución permite que cada etapa del proceso opere de forma independiente, manteniendo la

sincronización necesaria para garantizar la continuidad del tratamiento y una respuesta eficiente ante las diferentes condiciones de operación.

Es importante mencionar también la función que conlleva el PLC maestro dentro del proyecto. Este es el controlador principal de la arquitectura de automatización, su función es coordinara los PLCs esclavos, gestionar la comunicación entre los diferentes niveles de control y supervisar el funcionamiento general del sistema. A diferencia de los PLCs esclavos, el PLC maestro no acciona directamente sensores ni actuadores de campo, sino que su rol es de supervisión y coordinación. Entre sus funciones principales está, gestionar la comunicación con el sistema SCADA y la interfaz HMI, coordinar los modos de operación como manual, automático, mantenimiento, supervisar el estado general del proceso y concentrar la información que viene de los PLCs esclavos. Al igual que sincronizar la operación entre las diferentes etapas para asegurar continuidad en el tratamiento. También puede encargarse de gestionar condiciones generales de seguridad y alarmas, como paros de emergencia si llegasen a ocurrir.

En los siguientes apartados se describe la lógica de control propuesta para cada uno de los PLC esclavos, indicando las condiciones de operación de los equipos asociados, las variables monitoreadas y la secuencia de funcionamiento considerada para cada etapa del proceso.

3.3.3.1. PLC Esclavo 1.

Es el encargado del control distribuido de las primeras dos etapas del proceso, las cuales corresponden a primera sedimentación y lodos activados. Su función principal consiste en coordinar la operación de los equipos asociados a la detección de atascamiento en rejillas y los temporizadores cíclicos de 24 horas para los mixers y aireadores de sedimentación. Al igual que monitorea el llenado de los tanques 1 y 2.

Asimismo, este controlador realiza el monitoreo de las condiciones generales de operación de las etapas bajo su responsabilidad y mantiene una comunicación permanente con el PLC maestro, al cual transmite la información necesaria para la supervisión del proceso mediante el sistema SCADA y la interfaz HMI. Esta distribución de funciones permite descentralizar la ejecución del control, mejorar el desempeño del sistema y facilitar la coordinación entre las diferentes etapas de la planta.

3.3.3.2. PLC Esclavo 2.

El PLC Esclavo **2** es responsable de ejecutar el control distribuido correspondiente a las etapas de segunda sedimentación **y** torres de absorción dentro de la propuesta de automatización de la Planta. Su función principal consiste en coordinar la operación de la secuencia de mezcla (4 horas) y reposo (8 horas) para floculación, controla válvulas automáticas de entrada a filtros.

Asimismo, este controlador supervisa las condiciones generales de operación de las etapas bajo su responsabilidad y mantiene una comunicación permanente con el PLC maestro, proporcionando la información necesaria para la supervisión del proceso mediante el sistema SCADA y la interfaz HMI. Esta distribución de funciones favorece una operación coordinada con el resto de los controladores distribuidos, contribuyendo al funcionamiento eficiente del sistema de automatización.

3.3.3.2. PLC Esclavo 3.

El PLC Esclavo 3 es responsable de ejecutar el control distribuido correspondiente a las etapas de cloración **y** almacenamiento dentro de la propuesta de automatización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Su función consiste en coordinar y supervisar la dosificación de cloro (en un tiempo de 30 min) y gestiona la alternancia de llenado de los tanques de almacenamiento final. Controla la lógica de activación de bombas de riego basada en la humedad del suelo (setpoint > 20%).

De igual manera, este controlador supervisa las condiciones generales de operación de las etapas bajo su responsabilidad y transmite continuamente la información de operación al PLC maestro para su monitoreo mediante el sistema SCADA y la interfaz HMI. Esta organización permite mantener la coordinación entre las etapas finales del tratamiento y garantizar el funcionamiento integral de la planta.

3.3.4. Lista de instrumentos

Con el propósito de identificar los elementos que conforman la propuesta, se presenta la lista de instrumentos y dispositivos considerados en el DTI. La información presentada

corresponde a los dispositivos integrados en la arquitectura de automatización propuesta y será utilizada posteriormente en la programación de los PLC, la simulación del proceso y el sistema de supervisión HMI/SCADA.

- Sensores de proceso: instrumentos destinados a la medición de variables criticas como nivel, turbidez y condiciones hidráulicas en los distintos tanques del proceso.
    - Sensor tipo radar: (modelo VEGAPULS) medición continua de nivel en tanques de sedimentación, lodos activados y almacenamiento (uno por tanque).
    - Sensores ultrasónicos de nivel: (modelo Flowline DL24-01) medición de nivel en etapas donde requiere supervisión sin contacto
    - Turbidímetro: evaluación de la cantidad del agua y verificación de la eficiencia del proceso de filtración (uno por etapa).
- Actuadores electromecánicos y válvulas de control: dispositivos encargados de regular el flujo, direccionar el agua entre etapas y realizar maniobras automáticas del proceso.
    - Válvulas mariposa accionadas: trasferencia entre etapas y control de entrada/salida en tanques.

TAG	TANQUE	DESCRIPCION	SALIDA	TIPO DE SEÑAL	DIRECCION	ESTADO	TABLERO	PLC_NAME	PLC_HOST
LT-101	T1 Sedimentación	Radar	4-20mA	Análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN_U1_PLC1	PLC1
LT-102	T1 sedimentación	ultrasónico	4-20mA	análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN_U1_PLC1	PLC1
EQ-001	T1 Sedimentación	Convertidor	4-20mA a 0-10 V			No conectado	CC1-TC		
MV-101	T1 Sedimentación	Electroválvula		Digital	%Q0.0	Conectado	CC1-TC	ELECTROVALVULA 1	PLC1
LT-103	T2 Lodos activados	Radar	4-20 mA	Análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN_U1_PLC1	PLC1
P-001	T2 Lodos activados	bomba	19.5A	Digital	%Q0.6	Conectado	PTAR fiel	BOMBA_RIEGO	PLC3
EQ-002	T2 Lodos activados	Convertidor	4-20mA a 0-10 V			No conectado	CC1-TC		
MV-102	T2 Lodos activados	Electroválvula		Digital	%Q0.2	Conectado	PTAR fiel	ELECTROVALVULA _COA	PLC2
AR-103	T2 Lodos activados	aireador		Digital	%Q0.2	Conectado	CC1-TC	MIXER1_PLC1	PLC1
MIX-104	T2 Lodos activados	mixer		Digital	%Q0.2	Conectado	CC1-TC	MIXER1_PLC1	PLC1
LT-104	T2 Lodos activados	Transductor de corriente		Digital	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN_U1_PLC1	PLC1
P-001	T2 Lodos activados	Contador		Digital	%Q0.6	No conectado	PTAR fiel	BOMBA_RIEGO	PLC3

AR-103	T2 Lodos activados	Contador		Digital	%Q0.2	Conectado	CC1-TC	MIXER1_PLC1	PLC1
MIX-104	T2 Lodos activados	Contador		Digital	%Q02	Conectado	CC1-TC	MIXER1_PLC1	PLC1
LT-105	T3 Sedimentación	Radar	4-20mA	Análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
P-002	T3 Sedimentación	bomba	19.5A	Digital	%Q0.3	Conectado	CC1-TC	BOMBA1_PLC1	PLC1
EQ-003	T3 Sedimentación	Convertidor	4-20mA a 0-10 V			No conectado	CC1-TC		
MV-105	T3 Sedimentación	Electroválvula		Digital	%Q0.7		PTAR fiel	ELECTROVALVULA 5	PLC2
LT-106	T3 Sedimentación	ultrasónico	4-20mA	Análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
LT-107	T3 Sedimentación	Transductor de corriente		Digital	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
LT-108	T3 Sedimentación	Tolva/tanque		Digital	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN_U1_PLC1	PLC1
MIX-106	T3 Sedimentación	mixer		Digital	%Q0.2	Conectado	CC1-TC	MIXER1_PLC1	PLC1
P-002	T3 Sedimentación	Contador		Digital	%Q0.3	Conectado	CC1-TC	BOMBA1_PLC1	PLC1
MIX-106	T3 Sedimentación	contactor		Digital	%Q0.2	Conectado	CC1-TC	MIXER1_PLC1	PLC1
LT-109	T4 Torres absorción	Radar	4-20 mA	Analog	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
P-003	T4 Torres absorción	bomba	19.5A	Digital	%Q0.0	Conectado	PTAR fiel	BOMBA2_PLC2	PLC2
EQ-004	T4 Torres absorción	convertidor	4-20mA a 0-10 V			No conectado	CC1-TC		
MV-107	T4 Torres absorción	Electroválvula		Digital	%Q0.0	Conectado	PTAR fiel	ELECTROVALVULA_CL	PLC3
LT-110	T4 Torres absorción	turbidímetro		Digital	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
P-003	T4 Torres absorción	contactor		Digital	%Q0.0	Conectado	PTAR fiel	BO,BA2_PLC2	PLC2
LT-111	T5 Cloración	Radar	4-20 mA	Análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
P-004	T5 Cloración	bomba	19.5A	Digital	%Q0.4	Conectado	PTAR fiel	BOMBA3_PLC2	PLC2
EQ-005	T5 Cloración	Convertidor	4-20mA a 0-10 V			No conectado	CC1-TC		
MV-108	T5 Cloración	Electroválvula		Digital	%Q0.2	Conectado	PTAR fiel	ELECTROVALVULA 7	PLC3
LT-112	T5 Cloración	ultrasónico	4-20 mA	Análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
LT-113	T5 Cloración	Tolva/tanque		Digital	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
LT-114	T5 Cloración	orp	4-20 mA	Análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN-U1_PLC1	PLC1
P-004	T5 Cloración	contactor		Digital	%Q0.4	Conectado	PTAR fiel	BOMBA3_PLC2	PLC2
P-005	T6 almacén	bomba	220/440 V	Digital	%Q0.5	Conectado	PTAR fiel	BOMBA4_PLC2	PLC2
MV-109	T6 Almacen	Electroválvula		Digital	%Q0.3	Conectado	PTAR fiel	ELECTROVALVULA_T1	PLC3
LT-115	T6 Almacen	ultrasónico	4-20 mA	Análogo	%IW0	Conectado	CC1-TC	SEN_U1_PLC1	PLC1
EQ-006	T6 Almacen	convertidor	4-20mA a 0-10 V			No conectado	CC1-TC		
P-005	T6 Almacen	contactor		Digital	%Q0.5	Conectado	PTAR fiel	BOMBA4_PLC2	PLC2

Tabla 2 Lista de instrumentos.

3.3.5. Descripción funcional de área de proceso.

El proceso de tratamiento se divide en seis etapas principales, cada una equipada con sensores, actuadores y lógica de control especifica para garantizar eficiencia operativa, seguridad y calidad del agua tratada. La operación de cada etapa es gestionada de manera distribuida mediante los PLC esclavos, mientras que el PLC maestro coordina la supervisión global del sistema, la comunicación y la administración de alarmas y eventos.

A continuación, se describe el funcionamiento detallado a cada etapa considerando la instrumentación implementada (radares, ultrasónicos, turbidímetros, electroválvulas, bombas, transductores y convertidores).

3.3.5.1. Primera sedimentación.

La etapa de sedimentación corresponde al punto inicial del proceso, donde el agua ingresa al sistema y se eliminan solidos mediante rejas para proteger las etapas posteriores, de igual manera se realiza la primera sedimentación mediante procesos gravitacionales, para reducir la carga orgánica y mejorar la eficiencia de las siguientes etapas.

Los instrumentos que serán utilizados en esta etapa serán:

- Sensores ultrasónicos y radar de nivel usados para medir de manera redundante el nivel del tanque de entrada.
- Electroválvulas de control para regular la entrada y salida del agua.

De esta manera el sistema monitorea continuamente el nivel del tanque mediante sensores de nivel. Cuando el nivel entra en la banda operativa, la electroválvula de salida se mantiene abierta para permitir el flujo hacia la sedimentación. Si el nivel excede el límite superior, la válvula se cierra automáticamente para evitar sobrellenado y se genera una alarma al PLC maestro. Si el nivel desciende por debajo del mínimo, se bloquea la salida para evitar el bombeo en vacío. Toda la operación ocurre automáticamente, permitiendo un flujo constante y seguro.

3.3.5.2. Lodos activados.

Esta etapa constituye uno de los procesos biológicos mas importantes del proceso. En esta fase, microorganismos degradan la materia orgánica disuelta y suspendida en el agua residual. Para fortalecer esta actividad, se requiere aireación y mezcla adecuadas, permitiendo el suministro de oxigeno y manteniendo el lodo en suspensión durante el tratamiento. Como resultado de este proceso, se reduce la concentración de materia orgánica del agua, mejorando su calidad previa a la sedimentación secundaria, donde los lodos biológicos son separados del agua tratada, permitiendo continuar con las siguientes fases del proceso.

Para garantizar un control eficiente y seguro, la etapa cuenta con la siguiente instrumentación y equipos principales:

- Radar de nivel para medición continua del nivel dentro del tanque.
- Bomba de transferencia, encargada de enviar el agua clarificada hacia la etapa de coagulación-floculación.
- Electroválvula en la salida del tanque para regular el flujo hacia procesos subsecuentes.
- Mixer utilizado para mantener condiciones hidráulicas homogéneas cuando se requiera reactivación o recirculación del contenido.
- Transductor de corriente que supervisa la carga eléctrica del mixer o de la bomba, protegiendo los equipos contra sobrecarga o fallas mecánicas.

3.3.5.3. Segunda sedimentación.

La segunda sedimentación tiene como finalidad separar los lodos biológicos generados durante la etapa de lodos activados del agua tratada. En esta fase, el agua permanece en reposo durante el tiempo necesario para que los sólidos suspendidos sedimenten por efecto de la gravedad, obteniéndose un efluente con una menor concentración de sólidos y mejores características para continuar con el proceso de tratamiento. Los lodos sedimentados pueden recircularse al proceso biológico o retirarse para su tratamiento y disposición final, mientras que el agua clarificada es conducida hacia la siguiente etapa.

Para garantizar un control eficiente y seguro, la etapa cuenta con la siguiente instrumentación y equipos principales.

- Radar de nivel.
- Electroválvulas de entrada y salida.

Cuando el agua llega desde los lodos activados, el sistema monitorea el nivel con los sensores. Cuando llega al nivel de operación establecido, el PLC habilita el proceso de sedimentación, permitiendo que el agua permanezca el tiempo necesario para que los lodos se separen. Después, el PLC controla la apertura de la electroválvula y la bomba de trasferencia llevando el agua clarificada hacia la etapa de torres de absorción.

3.3.5.4. Torres de absorción.

Las torres de absorción constituyen una etapa destinada a mejorar la calidad del agua tratada mediante un proceso de contacto con el medio absorbente, favoreciendo la remoción de compuestos no deseados antes de la etapa de desinfección. Durante este proceso, el agua circula de forma controlada a través de las torres, optimizando sus características fisicoquímicas y preparándola para la etapa de cloración.

Para garantizar un control eficiente y seguro, la etapa cuenta con la siguiente instrumentación:

- Dos radares de nivel para supervisar los tanques de entrada y salida.
- Dos bombas de operación que impulsan el agua a través de los filtros.
- Un turbidímetro para medir la calidad del agua.
- Convertidores de señal para el acondicionamiento analógico.

Las bombas operan cuando el nivel del tanque anterior alcanza el punto de trasferencia.
El turbimetro mide continuamente la turbidez del agua filtrada; si el sensor reporta turbidez superior al limite preestablecido, el agua debe retornar nuevamente al inicio de la etapa de filtración, generando una alerta para notificar al operario y bloqueando la trasferencia hacia etapas posteriores. Los radares aseguran que no ocurra vacío ni sobrellenado dentro de los tanques. Este control garantiza que solo el agua con calidad adecuada continue el proceso de desinfección.

3.3.5.5. Cloración.

La etapa de cloración se encarga de desinfectar el agua mediante la aplicación de cloro.

Para garantizar un control eficiente y seguro, la etapa cuenta con la siguiente instrumentación:

- Radar de nivel en el tanque.
- Sensor ultrasónico para el contenedor del cloro.
- Bomba de transferencia cloración-almacenamiento.

El tanque se llena automáticamente desde la etapa anterior. Una vez alcanzado el nivel operativo, el sistema solicita la confirmación del operador para iniciar la dosificación. Con la confirmación emitida, el PLC activa la válvula que permite la dosificación de cloro desde el tanque durante el periodo configurado. Posteriormente, el sistema entra en un periodo de reposo para permitir la estabilización del cloro dentro del agua. El radar verifica en tiempo real el nivel del tanque protegiendo la bomba contra operación en vacío y evitando derrames.

3.3.5.6. Almacenamiento.

Corresponde a la parte final del proceso, donde el agua tratada se conserva hasta su reutilización o disposición final, asegurando la continuidad operativa del sistema.

Para garantizar un control eficiente y seguro, la etapa cuenta con la siguiente instrumentación:

- Sensor ultrasónico de nivel en el tanque.
- Electroválvulas que permitan el llenado.

3.3.6. Simulación del sistema automatizado

Con el propósito de validar el funcionamiento de la propuesta de automatización, se desarrolló una simulación del proceso mediante el software Factory I/O, integrado la arquitectura de control diseñada en TiA Portal. Esta simulación permitió representar de manera virtual la operación de las diferentes etapas del proceso, verificando la

interacción entre los PLC distribuidos, el PLC maestro y el sistema de supervisión propuesto.

La comunicación entre los dispositivos que conforman la arquitectura de automatización se estableció mediante una red industrial basada en PROFINET, permitiendo el intercambio de información entre el PLC maestro, los PLC esclavos y el sistema de supervisión HMI/SCADA. La configuración específica de los parámetros de comunicación corresponde a la etapa de implementación del sistema; sin embargo, la arquitectura propuesta garantiza la integración y coordinación de todos los elementos que participan en el proceso automatizado.

A continuación, se presentan las diferentes simulaciones desarrolladas para representar el funcionamiento de cada una de las etapas de la planta, así como la interacción entre los equipos, dispositivos de control y sistema de supervisión que conforman la propuesta de automatización.

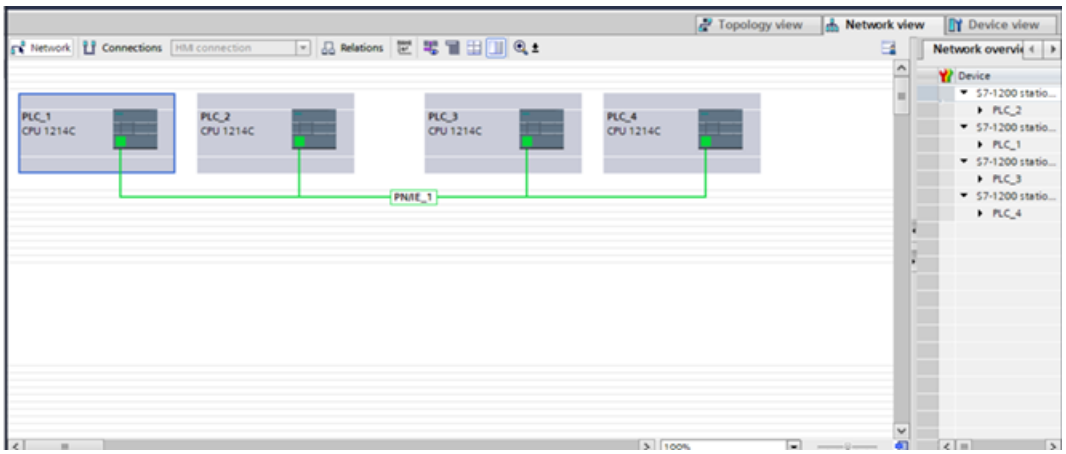


Ilustración 14 Vista de redes en TiA Portal Arquitectura PROFINET

En la imagen superior se muestra la configuración de la red de comunicación industrial desarrollada en TiA Portal, donde se observa la interconexión de los cuatro controladores Siemens S7-1200 mediante una red PROFINET. En esta configuración, PLC_1 correspondería a nuestro PLC maestro, mientras que el PLC_2, PLC_3 y PLC_4 representan los PLC esclavos responsables del control distribuido de las diferentes etapas del proceso. Esta red permite el intercambio de información entre los controladores, garantizando la coordinación de las operaciones y el funcionamiento integrado del sistema automatizado.

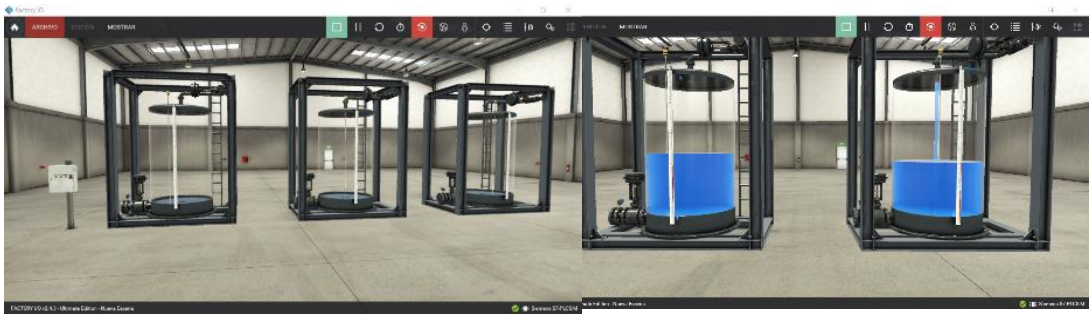


Ilustración 15 Simulación del proceso en el software Factory I/O

Mientras que en la imagen superior se puede observar la representación virtual del sistema, utilizado para validar el funcionamiento de la propuesta. en la simulación se observan las unidades de proceso modeladas mediante tanques interconectados por tuberías, así como el gabinete de control desde el cual se establece la comunicación con el sistema desarrollado en TiA Portal.

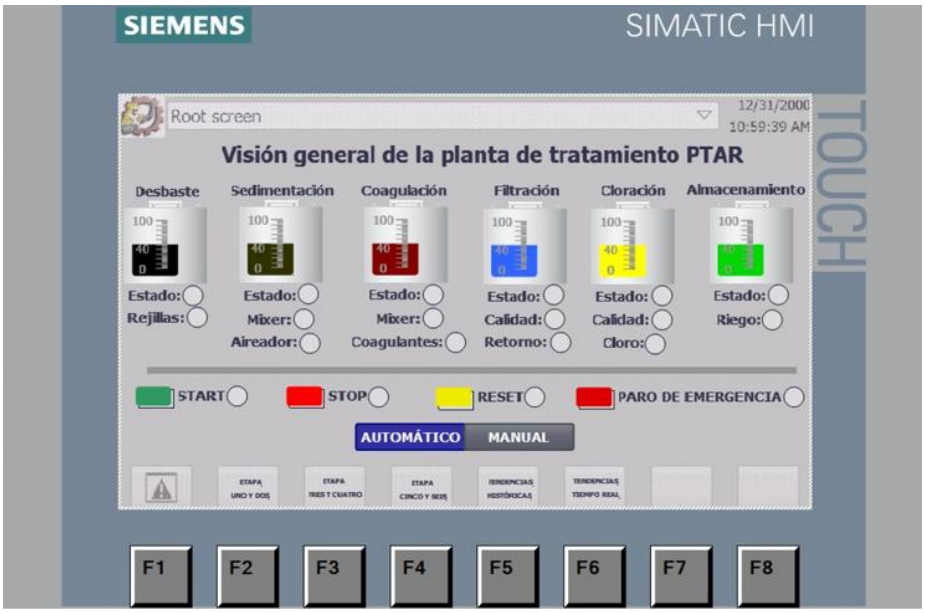


Ilustración 16 HMI principal.

En la ilustración 16 muestra la interfaz desarrollada en SIMATIC HMI, diseñada para la supervisión y operación del sistema automatizado. En la pantalla principal se presentan las diferentes etapas del proceso de tratamiento, incluyendo desbaste, sedimentación, coagulación, filtración, cloración y almacenamiento, permitiendo visualizar el estado general de cada una de ellas.

Asimismo, la interfaz incorpora indicadores de proceso y botones de operación, entre los que se encuentran START, STOP, RESET, PARO DE EMERGENCIA, así como la

selección entre los modos de operación automático y manual. Esta interfaz facilita la interacción entre el operador y el sistema de control, proporcionando un medio para supervisar el comportamiento del proceso y ejecutar acciones de operación desde una única pantalla.

A continuación, se muestran las simulaciones de HMI de cada uno de los PLC involucrados dentro del proceso.

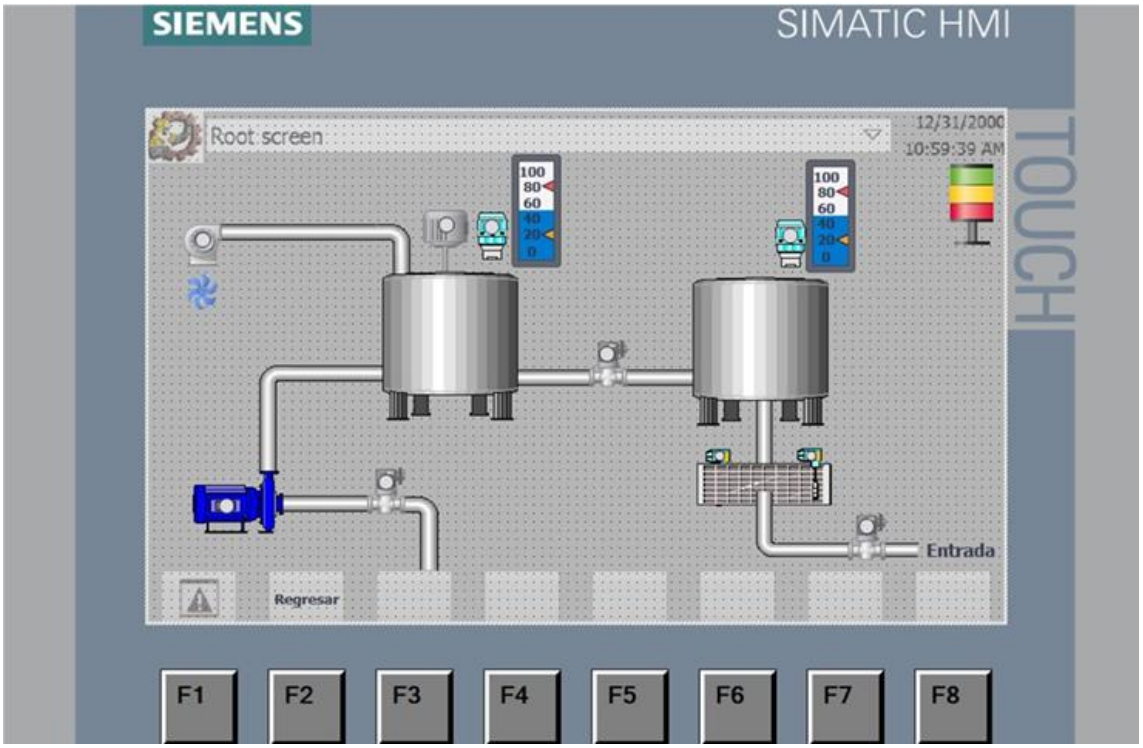


Ilustración 17 Pantalla referente a las etapas 1 y 2 (PLC esclavo 1).

De igual manera se implemento una interfaz para la supervisión del PLC Esclavo 1, donde se muestra el proceso, las tuberías de interconexión, la bomba de impulsión, los indicadores de nivel y los elementos de instrumentación asociados, permitiendo visualizar el estado general de la operación en tiempo real.

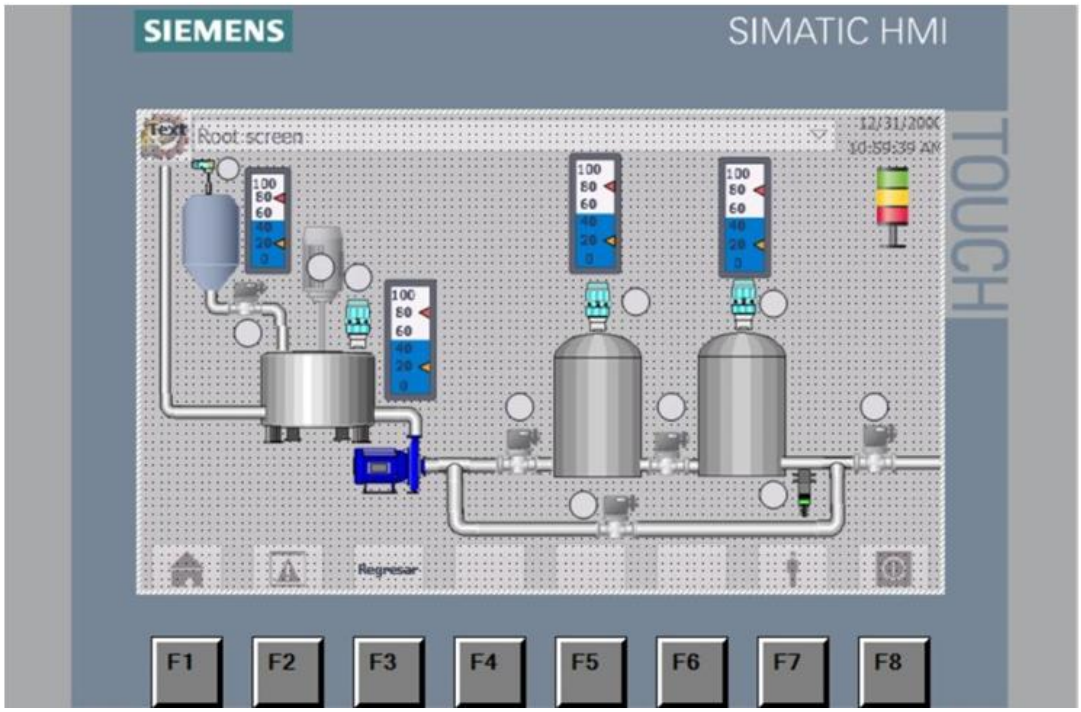


Ilustración 18 Pantalla referente a las etapas 3 y 4 (PLC esclavo 2).

Esto no solo para el primer PLC si no para los otros dos también dándonos un acceso visual a su trabajo.

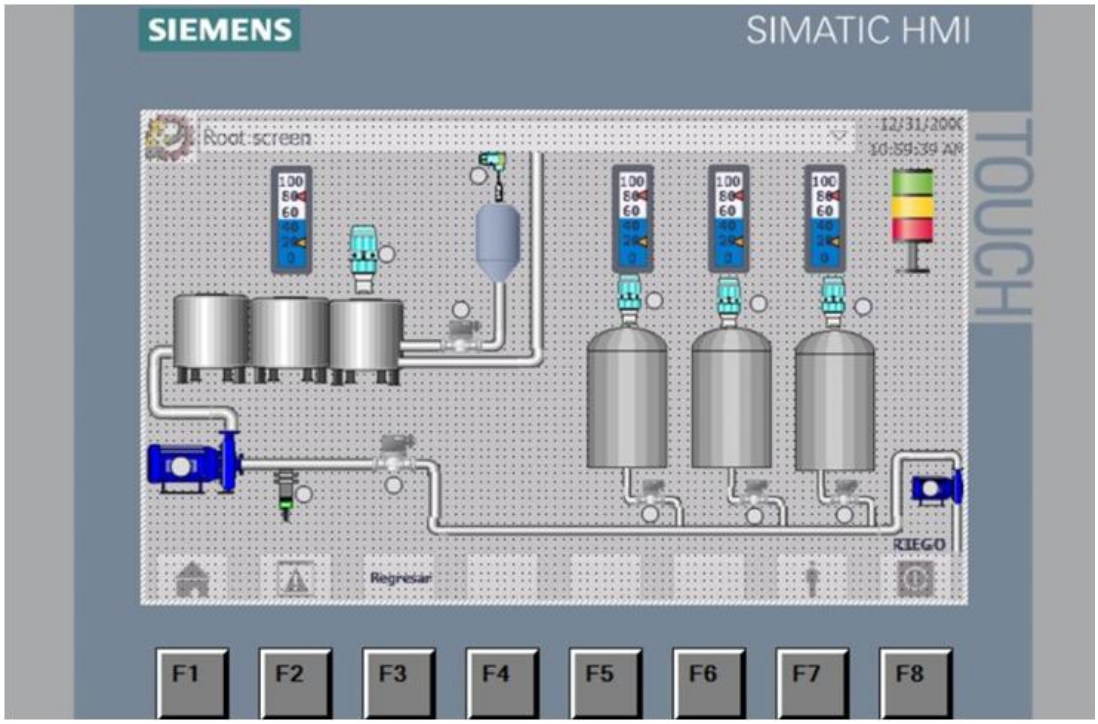


Ilustración 19 Pantalla referente a las etapas 5 y 6 (PLC esclavo 3).

Capítulo IV

Análisis y discusión de resultados.

4.1. Resultado de propuesta de automatización.

Como resultado de la fase de diseño, el DTI del proceso, el cual integra la distribución de equipos, la instrumentación y los elementos de control propuestos para la automatización del proceso.

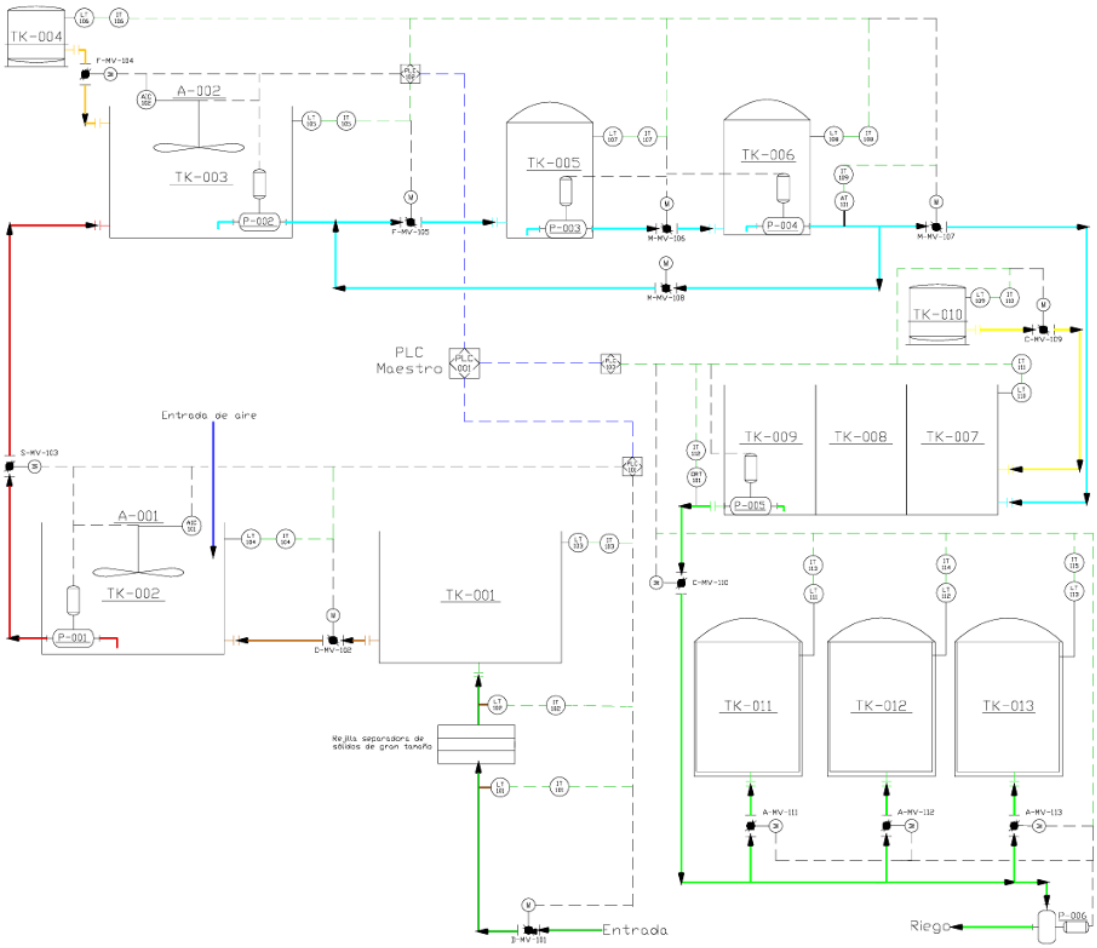


Ilustración 20 DTI General.

4.1.1. Resultado de diseño eléctrico.

Como parte del desarrollo de la propuesta de automatización, se elaboraron los diagramas eléctricos del sistema de control, definiendo la distribución de la alimentación eléctrica e interconexión de los principales dispositivos.

En la siguiente imagen se muestra el esquema de alimentación principal del sistema de automatización, donde se muestra la conexión a la fuente de 24 VDC, el PLC maestro, la HMI y el switch Ethernet para la comunicación entre dispositivos, asegurando el

suministro eléctrico y la interconexión necesaria para la operación coordinada del sistema.

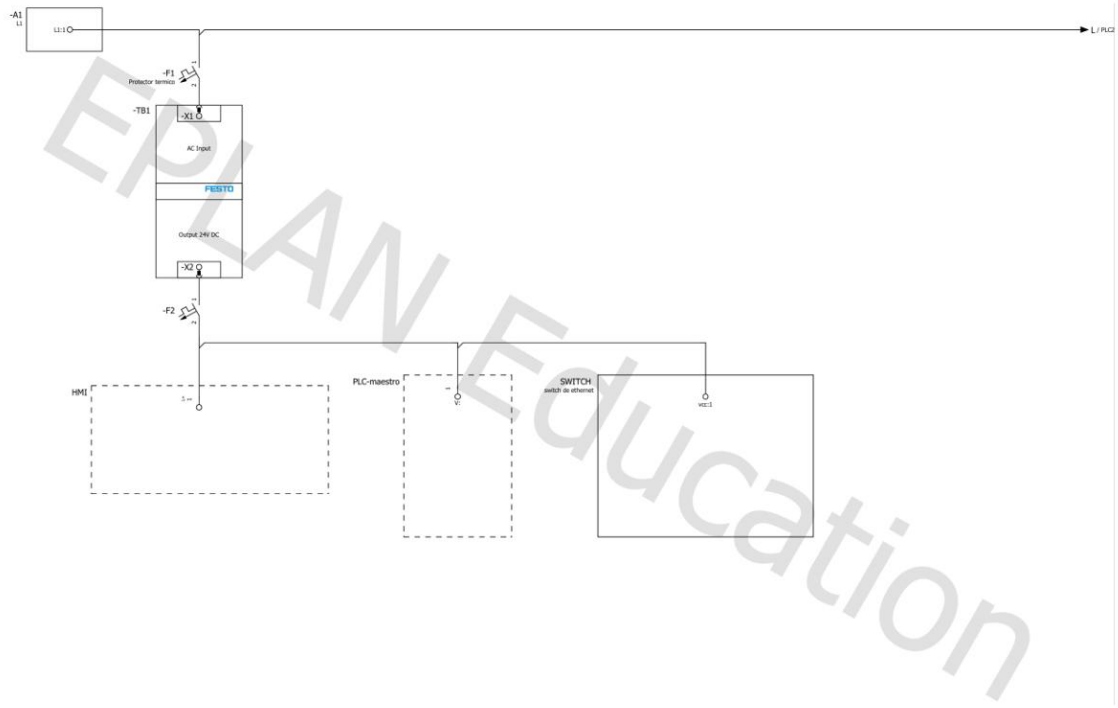


Ilustración 21Diagrama unifilar del PLC maestro.

A continuación, se presentan los diagramas unifilares de los 3 plc esclavo.

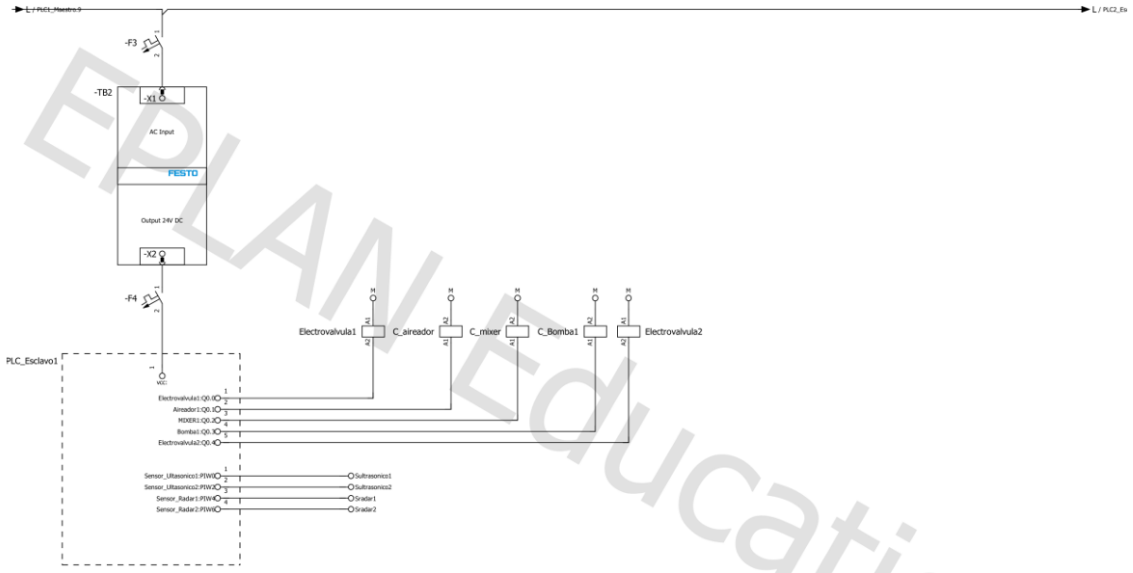


Ilustración 22 Diagrama unifilar Esclavo1.

EPLAN Education

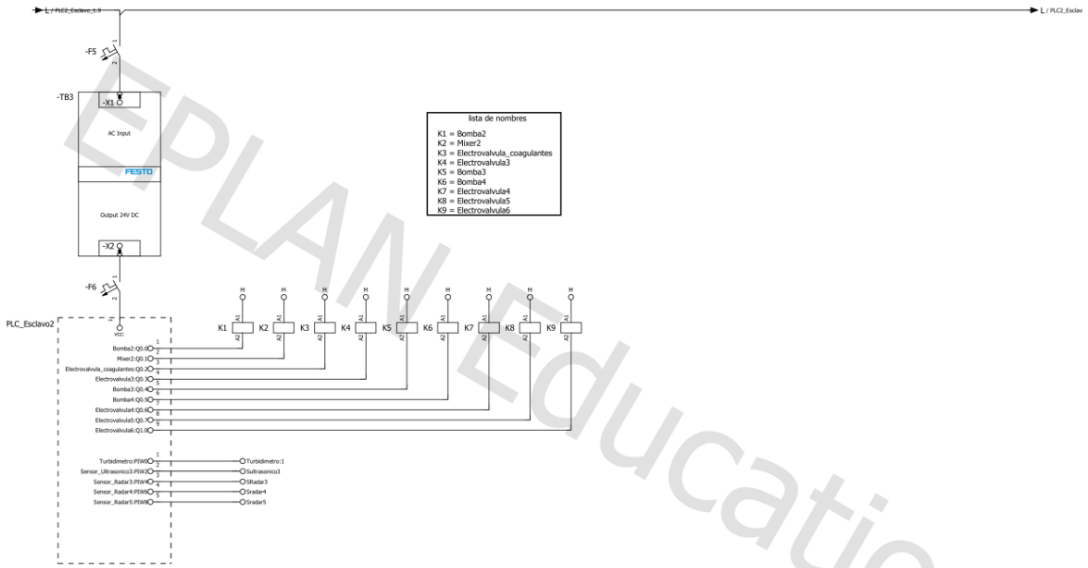


Ilustración 23 Diagrama unifilar Esclavo 2.

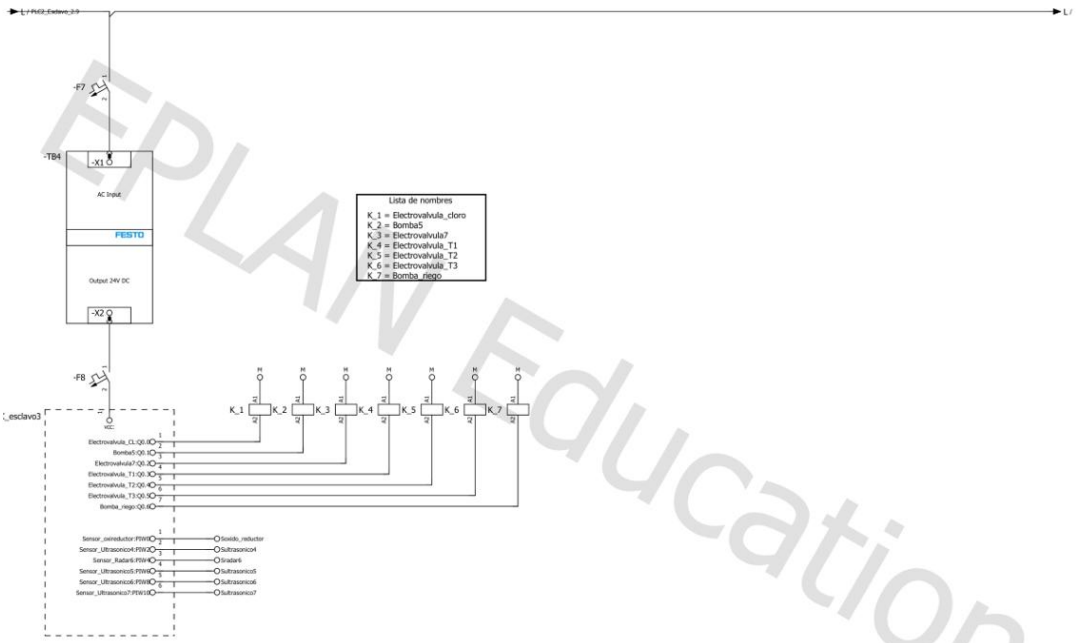


Ilustración 24 Diagrama unifilar Esclavo 3.

Ahora bien, se muestran los diagramas multifilares de los PLCs, iniciando por el PLC maestro y concluyendo con los de cada uno de los diagramas para los PLCs esclavos.

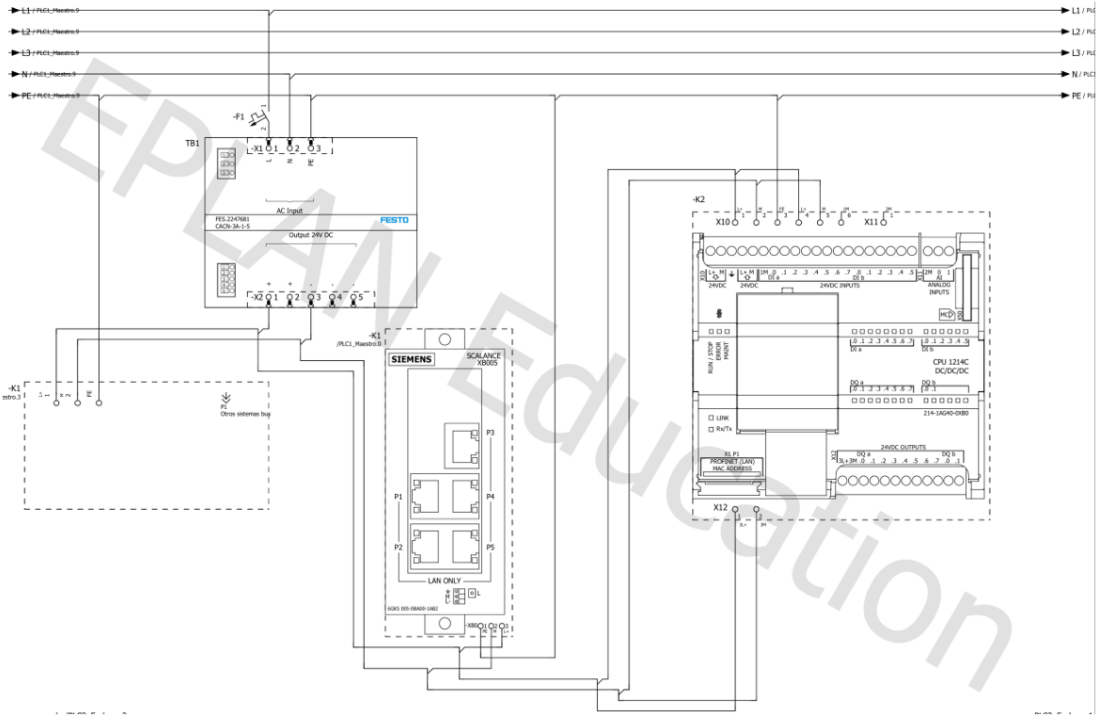


Ilustración 25 Diagrama multifilar del PLC maestro.

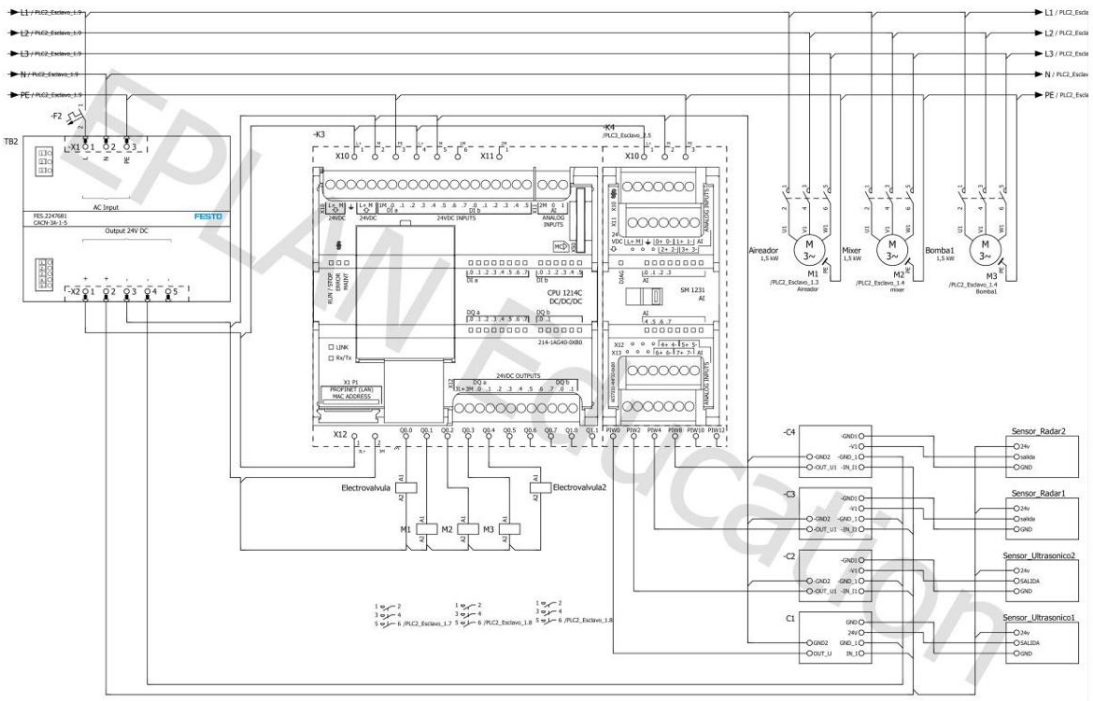


Ilustración 26 Diagrama multifilar del esclavo 1.

EPLAN Education

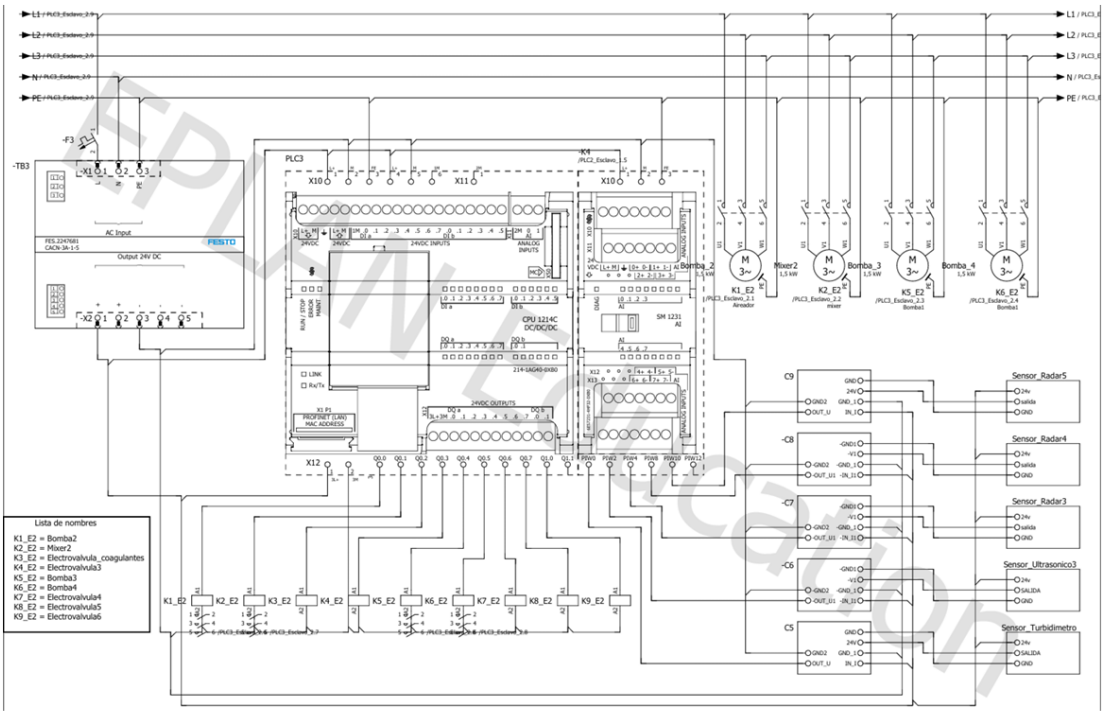


Ilustración 27 Diagrama multifilar del esclavo 2.

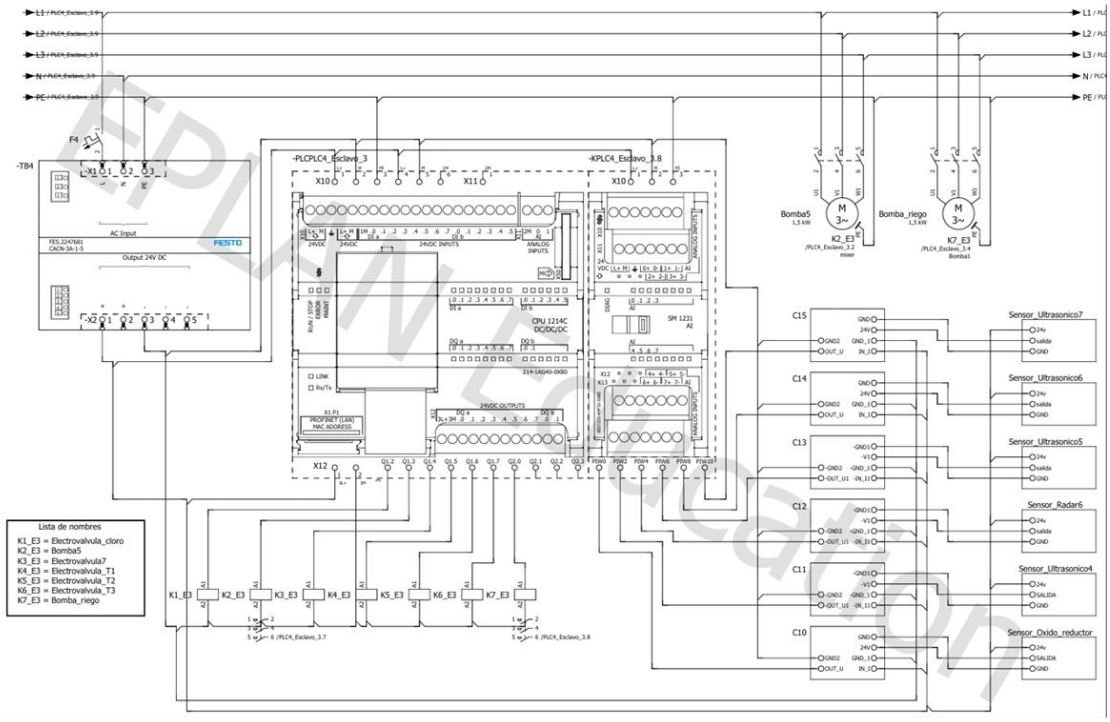


Ilustración 28 Diagrama multifilar del esclavo 3

4.1.2. Resultados de simulación.

En la simulación se aprecia que, una vez que el tanque alcanza el nivel de operación establecido, el sensor envía la señalar PLC, y este ejecuta la lógica de control,

habilitando la apertura de la electroválvula para permitir el paso del agua hacia el siguiente tanque.

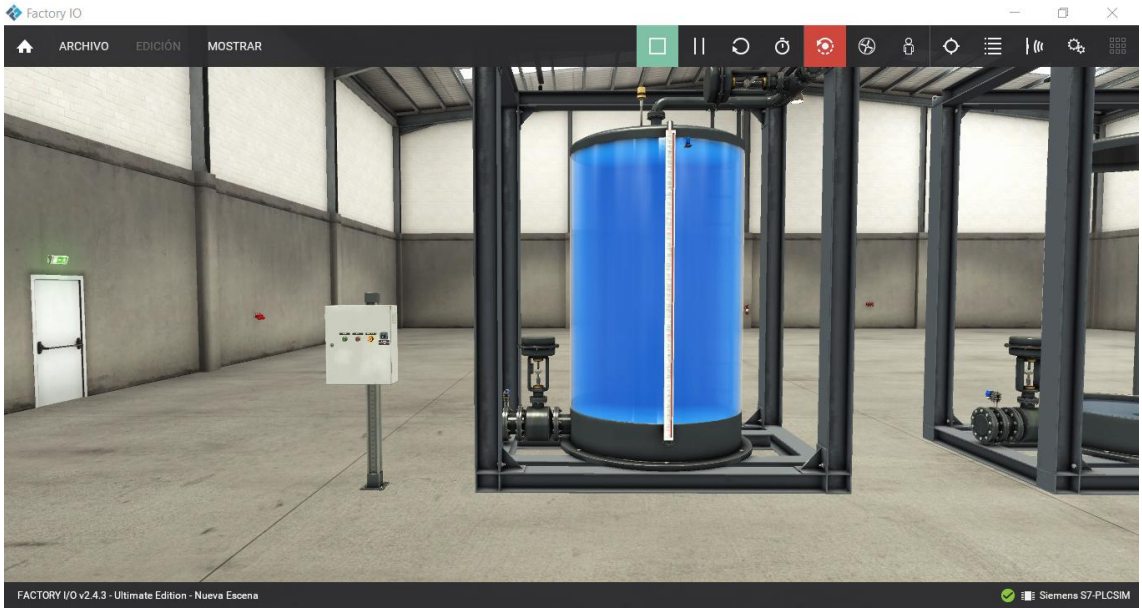


Ilustración 29 Primera condición de simulación.

En las figuras se presentan dos estados de la simulación desarrollada en Factory I/O. En la primera condición se observa el tanque 1 en estado de operación, mientras el tanque2 permanece en espera de recibir el flujo. En la segunda condición, al cumplirse los parámetros definidos por los sensores de nivel, el PLC ejecuta la lógica de control y habilita la transferencia de agua hacia el tanque 2, mediante la apertura de la electroválvula correspondiente. Esta simulación permite verificar la secuencia automática propuesta para el proceso.

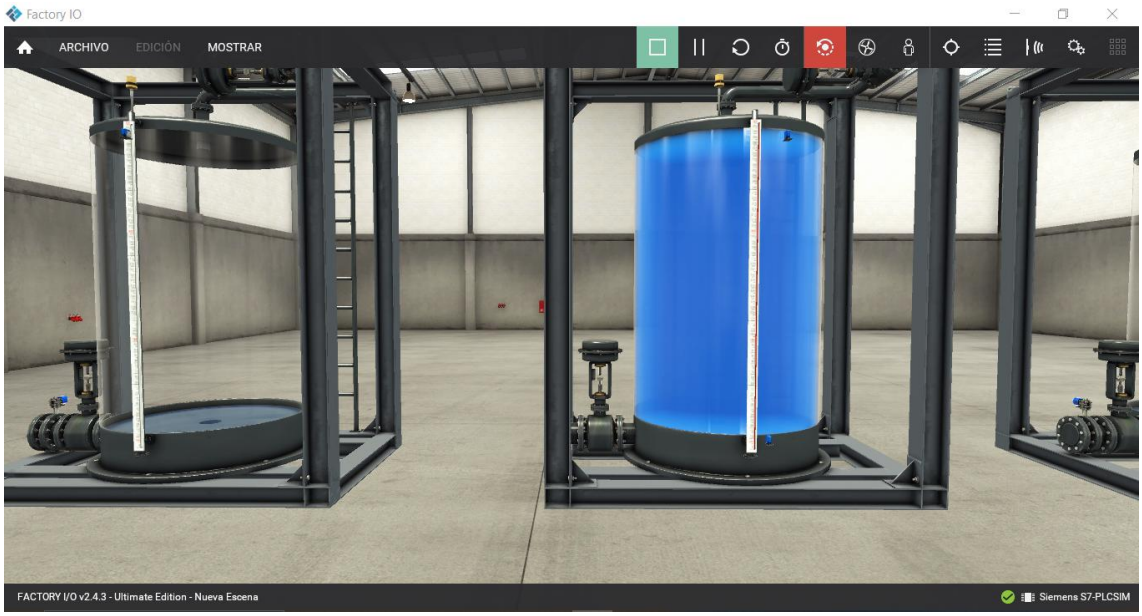


Ilustración 30 llenado del 2 tanque.

De igual manera una vez el tanque 2 realiza su función este activa la válvula para el siguiente tanque para que cumpla con su proceso.

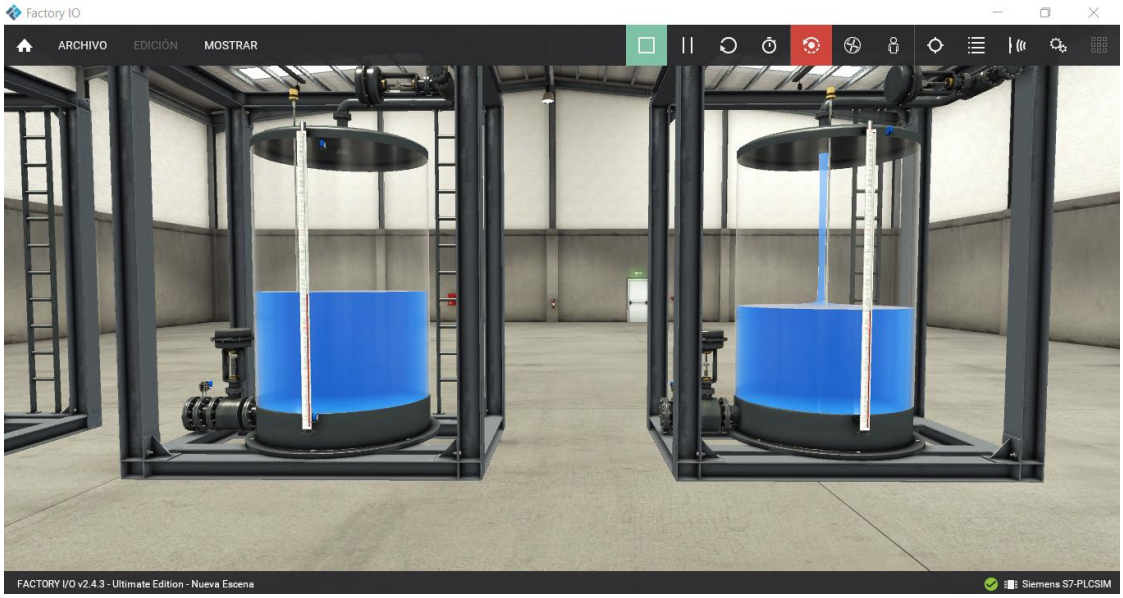


Ilustración 31 Flujo del agua hacia el tercer tanque.

4.1.3. Resultados de HMI (SCADA).

Como resultado del diseño del sistema de supervisión se obtuvo una interfaz HMI general, en la cual se representa de manera gráfica el estado de los principales equipos y tanques que conforman el proceso. Esta pantalla permite al operador visualizar de forma centralizada las condiciones generales de operación, incluyendo los niveles de los tanques y el estado de los diferentes elementos asociados al sistema.

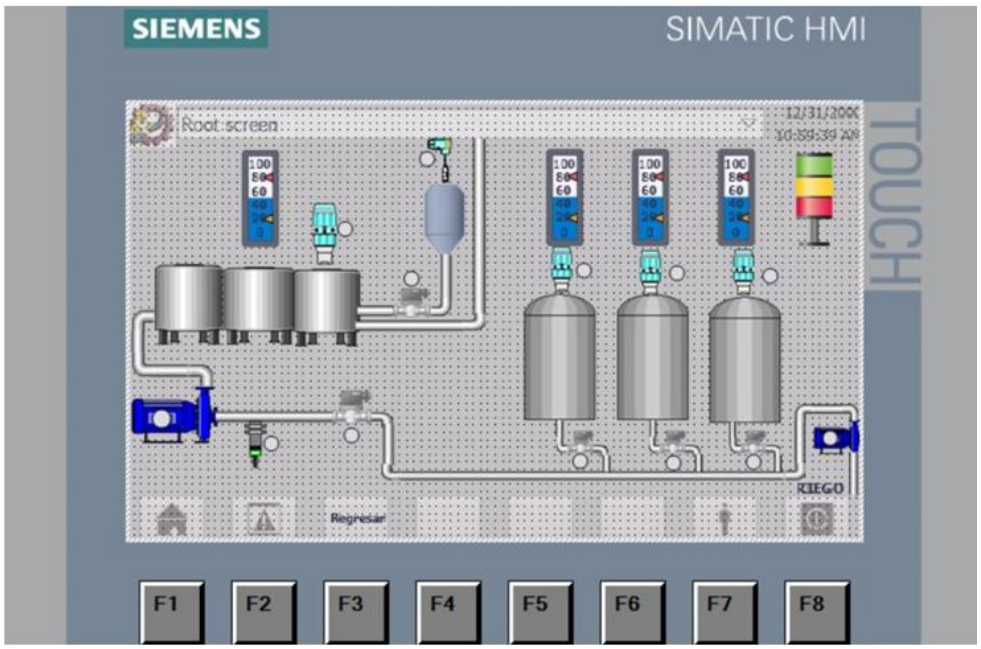


Ilustración 32 HMI general.

La interfaz funciona como una pantalla principal de supervisión, permitiendo identificar visualmente el comportamiento del proceso y facilitando el seguimiento de las variables involucradas. De esta manera, el HMI complementa la propuesta de automatización al proporcionar una representación gráfica de la información procesada por el sistema de control.

4.2. Conclusiones.

La propuesta de automatización desarrollada para la planta de tratamiento de aguas residuales permitió identificar áreas críticas dentro del proceso que actualmente afectan la estabilidad operativa del sistema, principalmente relacionadas con el monitoreo manual, el control limitado del flujo y los problemas de desbordamiento en los tanques.

A partir del análisis realizado, se propuso la integración de sensores de nivel, válvulas automatizadas, caudalímetros y sensores de presión conectados a un controlador (PCL), con el propósito de implementar una estrategia de control ON/OFF orientada al monitoreo continuo y al control automático de las diferentes etapas del proceso. Esta propuesta busca mejorar la supervisión operativa, reducir la intervención manual y aumentar la confiabilidad del sistema de tratamiento.

Asimismo, el desarrollo de diagramas DTI y esquemas de automatización permitió representar de manera clara la interacción entre los diferentes elementos de instrumentación y control, facilitando la comprensión de funcionamiento general de la propuesta y permitiendo identificar los puntos estratégicos para la implementación de sensores y actuadores.

Por otra parte, la simulación del sistema automatizado permitió analizar de manera teórica el comportamiento esperado de la propuesta bajo distintas condiciones operativas, validando la lógica de control planteada y demostrando que la automatización parcial del proceso puede contribuir significativamente a disminuir problemas de desbordamiento, optimizar la trasferencia de agua entre etapas y mantener condiciones de operación más estables y seguras.

Finalmente, se concluye que la automatización enfocada en las etapas críticas del sistema representa una alternativa técnicamente viable para mejorar el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales. Además, esta propuesta establece una base que podrá permitir futuras aplicaciones hacia sistemas de supervisión y control más avanzados, favoreciendo una operación más eficiente, segura y adaptable a las necesidades del proceso.

4.2. Recomendaciones.

Se recomienda que, en futuras etapas del proyecto, la propuesta de automatización sea validada mediante pruebas físicas dentro de la planta de tratamiento, con el fin de analizar el comportamiento real de los sensores, válvulas y estrategias de control bajo condiciones operativas reales. Esto permitirá verificar la efectividad del sistema propuesto y realizar ajustes orientados a mejorar su desempeño.

Asimismo, se recomienda complementar el sistema de supervisión con herramientas de almacenamiento histórico de datos y generación de reportes, permitiendo llevar un mejor seguimiento de variables críticas como nivel, caudal y presión dentro del proceso de tratamiento.

De igual manera, sería conveniente integrar alarmas visuales y auditivas dentro de la interfaz SCADA para alertar al operador ante condiciones anormales de operación, tales como niveles críticos, fallas en sensores, sobrepresión o posibles interrupciones en la transferencia de agua entre etapas.

Finalmente, se recomienda que trabajos futuros evalúen la incorporación de tecnologías de monitoreo remoto, comunicación industrial e Internet Industrial de las Cosas (IIoT), las cuales podrían fortalecer las capacidades de supervisión y control dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales.

4.3. Bibliografías.

- Equipo editorial Etecé. (2024, 6 agosto). *Tratamiento de Aguas Residuales - Concepto, plantas y etapas*. Concepto. https://concepto.de/tratamiento-de-aguas-residuales/
- Institutodelaguaes. (2024, 21 enero). *Parámetros de la Calidad del Agua: Guía Completa para Entender y Medir la Pureza de Tu Agua | Instituto del Agua*. Instituto del Agua. https://institutodelagua.es/calidad-del-agua/parametros-de-la-calidad-del-aguacalidad-del-agua/
- Comisión Nacional del Agua. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida* (Libro 33). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Diario Oficial de la Federación.
- Mecafenix, I. (2023, 22 noviembre). *Que son los sensores, que tipos existen y cómo funcionan*. Ingeniería Mecafenix. https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensores/guia-sensores/
- International Society of Automation. (2024). *ANSI/ISA-5.1-2024: Instrumentation and control—Symbols and identification*.
- Admin, & Admin. (2026, 29 enero). *Controladores*. Electrohine. https://electrohine.com/uncategorized/controladores/#:~:text=Los%20controladores%20son%20componentes%20fundamentales%20de%20la%20automatizaci%

C3%B3n,la%20emisi%C3%B3n%20de%20se%C3%B1ales%20de%20control%20hacia%20actuadores.

- Joy, A. T. (2025, 8 octubre). *Que es un Actuador - Tipos y Aplicaciones*. Tameson.es. https://tameson.es/pages/actuador
- Pais, F. (2026, 29 enero). *SCADA: qué es y cómo optimiza los procesos industriales*. Esain. https://esain.com/es/scada-que-es-y-como-funciona-aplicaciones/
- Soloingenieria. (2026, 24 febrero). *Diseño de instalaciones eléctricas industriales*. Solo Ingeniería. https://www.soloingenieria.org/ingenieria-electrica/diseno-de-instalaciones-electricas-industriales/