

**Optimización del reúso de agua reciclada mediante tecnologías industriales para
reducir el consumo de agua de pozo**

José Alejandro Velandia Gómez

Asesor

Iván Camilo Nieto Sánchez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo constante, su paciencia y por ser siempre mi motor en este camino, este logro no habría sido posible sin ustedes.

Agradezco a Vidrio Andino S.A.S. por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto dentro de sus instalaciones, así como por el acompañamiento y los recursos técnicos facilitados durante su ejecución.

Agradezco especialmente al señor Liscer Gómez, técnico del área de utilidades de Vidrio Andino S.A.S., por su valiosa colaboración durante la recolección de información y la ejecución de pruebas en campo, así como por su disposición permanente para apoyar el desarrollo de este proyecto.

De igual forma, agradezco a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), y al tutor y director del proyecto, Iván Camilo Nieto Sánchez, por su dedicación, compromiso y orientación académica a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Resumen

El presente proyecto consistió en el diseño e implementación de un sistema de automatización para una planta de tratamiento de aguas residuales industriales, con el propósito de optimizar su operación, garantizar la estabilidad de las variables críticas del proceso y contribuir al aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. La solución desarrollada integró tecnologías de control industrial, incluyendo un PLC y una interfaz HMI, que permiten monitorear y controlar en tiempo real variables como el nivel, el pH y la conductividad del agua, así como gestionar automáticamente los procesos de tratamiento, la automatización permitió reducir la necesidad de supervisión manual constante, mejorar la eficiencia operativa del sistema y aumentar la capacidad de recuperación de agua tratada para su reúso en procesos industriales.

Las pruebas realizadas durante la puesta en marcha confirmaron el correcto funcionamiento del sistema, permitiendo una operación estable, segura y confiable. Desde una perspectiva ambiental, el proyecto aporta a los objetivos de sostenibilidad empresarial a disminuir el consumo de agua de pozo y promover la reutilización del agua tratada. Asimismo, sienta las bases para futuras mejoras tecnológicas, como la implementación de monitoreo remoto.

Palabras clave: Automatización, optimización, ahorro, ODS, agua.

Abstract

This project involved the design and implementation of an automation system for an industrial wastewater treatment plant, aimed at optimizing its operation, ensuring the stability of critical process variables, and contributing to the sustainable use of water resources. The developed solution integrated industrial control technologies, including a PLC and an HMI interface, enabling real-time monitoring and control of variables such as water level, pH, and conductivity, as well as the automatic management of treatment processes. Automation significantly reduced the need for constant manual supervision, improved the operational efficiency of the system, and increased the plant's capacity to recover treated water for reuse in industrial processes.

The tests conducted during commissioning confirmed the proper functioning of the system, allowing for stable, safe, and reliable operation. From an environmental perspective, the project supports corporate sustainability goals by reducing groundwater consumption and promoting the reuse of treated water. Furthermore, it establishes the foundation for future technological improvements, such as the implementation of remote monitoring systems.

Keywords: Automation, optimization, savings, ODS, water.

Tabla de Contenido

Introducción	10
Planteamiento del Problema	11
Justificación	14
Objetivos	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos.....	17
Marco Teórico	18
Marco Conceptual.....	18
Estado del Arte.....	22
Estado Actual de la PTARI Vidrio Andino	25
Descripción de los Elementos que Componen la Planta.....	25
Medición de Consumo de Agua de Pozo y Agua Tratada.....	43
Funciones Manuales del Técnico de Utilidades en la PTARI.....	45
Diseño de la Solución	47
Diseño del Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID).....	47
Programación de PLC	54
Programación de HMI.....	62
Justificación de la Selección de Sensores y Elementos de Control	69

Evaluación de Funcionamiento del Sistema Automatizado en la Implementación Final	72
Pruebas manuales de las entradas digitales.....	72
Pruebas Manuales de las Salidas Digitales	73
Pruebas de funcionamiento integral.....	76
Identificación de Posibles Oportunidades de Mejora	81
Conclusiones.....	82
Recomendaciones para futuras investigaciones.....	84
Realizar una planificación detallada de señales desde el inicio del proyecto.....	84
Continuar una programación modular y escalable.....	84
Documentar todas las configuraciones y cambios realizados.....	84
Buenas prácticas en la disposición de sensores y equipos	85
Referencias.....	86

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Posición de Válvulas Según el Estado del Filtro</i>	43
Tabla 2 <i>Consumos de Agua de Pozo y Recuperación de Agua. m3 2024</i>	44
Tabla 3 <i>Variables Digitales de Entrada</i>	60
Tabla 4 <i>Variables Digitales de Salida</i>	61
Tabla 5 <i>Señales Análogas de Entrada al PLC, y Memorias</i>	62
Tabla 6 <i>Variables de la HMI Para Enlazarlas a las Variables del PLC</i>	64
Tabla 7 <i>Pruebas de las Entradas Digitales</i>	73
Tabla 8 <i>Pruebas de las Salidas Digitales</i>	75
Tabla 9 <i>Consumos de Agua de Pozo y Recuperación de Agua m32025</i>	80

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Tanque Inicial, Recolecta las Aguas a Tratar</i>	26
Figura 2 <i>Primera Etapa de Sedimentación</i>	27
Figura 3 <i>Segunda Etapa de Sedimentación</i>	28
Figura 4 <i>Tanque de Acumulación Salida de Sedimentación</i>	29
Figura 5 <i>Primer Filtro, Etapa de Filtrado</i>	30
Figura 6 <i>Etapa Final de Filtrado</i>	31
Figura 7 <i>Tanque de Salida Etapa de Filtrado</i>	32
Figura 8 <i>Bomba de Envío Agua a Recuperar</i>	33
Figura 9 <i>Bomba Dosificadora de Coagulante</i>	34
Figura 10 <i>Bomba Dosificadora de Flocculante</i>	35
Figura 11 <i>Bomba, que Impulsa el Agua a la Etapa de Filtrado</i>	35
Figura 12 <i>Bomba de Envío del Agua Recuperada</i>	36
Figura 13 <i>Tanque Agitador de Lodos</i>	37
Figura 14 <i>Bomba de Extracción de Lodos del Fondo de los Sedimentadores</i>	38
Figura 15 <i>Bomba Dosificadora de Flocculante para Lodos</i>	38
Figura 16 <i>Filtro Prensa Para Compactar Lodos</i>	39
Figura 17 <i>Aireador Para Mezcla Homogénea de Flocculante y Coagulante</i>	39
Figura 18 <i>Tablero de Potencia PTARI</i>	40
Figura 19 <i>Diagrama de Flujo del Proceso de Recuperación de Agua Industrial</i>	41
Figura 20 <i>Contraste de Consumo de Agua de Pozo y Agua Recuperada.m3</i>	45
Figura 21 <i>P&ID PTARI</i>	48

Figura 22 <i>Sensores de Nivel Tipo Flotador</i>	49
Figura 23 <i>Sensores de Nivel Tipo Horquilla</i>	49
Figura 24 <i>Actuadores Neumáticos Control de Válvulas</i>	50
Figura 25 <i>Sensores de pH y Conductividad</i>	51
Figura 26 <i>PLC Siemens S7-1200</i>	52
Figura 27 <i>HMI Interfaz de Operación</i>	52
Figura 28 <i>Tablero de Control PTARI</i>	54
Figura 29 <i>Programa General por Bloques, Subrutinas y Datos</i>	55
Figura 30 <i>Rutina de Encendido Bomba TK-1</i>	56
Figura 31 <i>Encendido Bomba TK-2</i>	57
Figura 32 <i>Pantallas Inicio, Retro Lavado y Extracción de Lodos</i>	66
Figura 33 <i>Etapa 1 de Recuperación de Agua</i>	67
Figura 34 <i>Etapa 2 de Recuperación de Agua</i>	68
Figura 35 <i>Mandos Manuales</i>	69
Figura 36 <i>Consumo de Agua de Pozo y Agua Recuperada.m3Después de la Implementación..</i> 80	

Introducción

El crecimiento industrial ha intensificado la necesidad de gestionar de manera eficiente los recursos hídricos, especialmente en sectores donde el agua desempeña un papel fundamental en los procesos productivos. En este contexto, la optimización del uso del recurso hídrico se ha convertido en una prioridad tanto desde el punto de vista ambiental como económico. Las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) cumplen un rol esencial en esta estrategia, al permitir la recuperación del agua tratada para su reutilización, reduciendo la dependencia de fuentes subterráneas y minimizando los impactos negativos asociados a los vertimientos. En el caso de Vidrio Andino S.A.S., la operación actual de la PTARI presenta limitaciones relacionadas con el monitoreo manual de sus procesos, particularmente en el control de niveles, lo cual exige vigilancia constante por parte del personal técnico. Esta condición incrementa el riesgo de errores operativos, desbordamientos y un uso ineficiente de los recursos. Frente a este escenario, surge la necesidad de automatizar los procesos de monitoreo y control, mediante la integración de tecnologías industriales como sensores de nivel, controladores lógicos programables (PLC) y una interfaz Hombre-Máquina (HMI), que permitan gestionar el sistema de manera precisa, eficiente y remota. El presente proyecto propone el diseño de un sistema automatizado que optimice la operación de la PTARI y aumente la capacidad de reúso del agua tratada en los procesos de producción. Esta iniciativa está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Organización de las Naciones Unidas, en particular el ODS 6: Agua limpia y saneamiento, el cual promueve la disponibilidad, gestión sostenible y acceso universal al recurso hídrico. De esta forma, se fortalece el compromiso institucional con la sostenibilidad y se sientan las bases para la adopción de tecnologías inteligentes en la gestión del agua en la industria.

Planteamiento del Problema

El acceso al agua y su gestión sostenible son desafíos centrales del siglo XXI. A nivel global, más de 2.200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura, mientras que el 80 % de las aguas residuales se vierten al ambiente sin tratamiento previo (Naciones Unidas, 2023a). Este panorama refleja una crisis hídrica de escala planetaria, donde el agua no solo es esencial para la vida, sino también para el desarrollo económico, la salud, la seguridad alimentaria y la estabilidad ambiental. El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Naciones Unidas, 2023b) reconoce esta urgencia, planteando como meta garantizar la disponibilidad del recurso y su gestión sostenible para todos.

En América Latina y el Caribe, la problemática se agrava por la desigualdad en la distribución del agua y la baja cobertura de sistemas de tratamiento. Colombia, por ejemplo, es uno de los países con mayor consumo per cápita en la región, alcanzando los 1.988 litros por persona al día, muy por encima del promedio de países vecinos (Díaz Rico, 2024). Sin embargo, esta cifra contrasta con la realidad de millones de colombianos: para 2023, 3,2 millones de personas en el país aún no tenían acceso a agua potable, y más del 50 % de los municipios carecen de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales (Vivienda & Territorio Informe De Rendición De Cuentas, 2023). A nivel local y nacional, los indicadores reflejan un rezago preocupante en esta materia. En Bogotá, por ejemplo, el Observatorio Ambiental reporta que, frente a una meta de tratamiento de 100 m³/s, solo se alcanza un volumen de 4,4 m³/s (Observatorio Ambiental, 2025). A nivel país, De los 1.103 municipios en Colombia, **492** cuentan con algún sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR). De estos, el **17,3%** son sistemas preliminares o primarios, mientras que el **82%** corresponde a tratamientos secundarios, principalmente no convencionales como lagunas de oxidación, humedales y fosas

sépticas (Andrés et al., 2023). Esta situación se ve agravada por fenómenos climáticos como El Niño, que intensifican las sequías, reducen los caudales hídricos y generan racionamientos tanto para uso doméstico como industrial y agrícola.

A nivel regional, entidades como la CAR han proyectado para 2035 una gestión resiliente del recurso hídrico mediante un ordenamiento territorial centrado en el agua y la recuperación de ecosistemas estratégicos. Sin embargo, el rezago en la cobertura efectiva de plantas de tratamiento y en la modernización de sus tecnologías representa una barrera crítica. Casos documentados como el de la PTAR Doris Mendoza en Perú (Pacheco et al., 2024) o la planta de La Sierra EPM (Calle Villegas, 2022) en Colombia demuestran que la obsolescencia tecnológica, la falta de monitoreo continuo y la baja eficiencia operativa siguen siendo comunes en muchas infraestructuras de tratamiento, limitando su capacidad de respuesta y la posibilidad de aprovechar el agua tratada para reúso industrial.

En este contexto, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) de Vidrio Andino S.A.S. enfrenta un reto técnico y ambiental significativo. Actualmente, la planta opera bajo un esquema manual, donde el técnico de utilidades debe realizar de forma constante el monitoreo de niveles, pH, conductividad y operación de válvulas. Esta dependencia del factor humano no solo incrementa el riesgo de errores operativos, desbordamientos o incumplimiento de parámetros normativos, sino que también impide una trazabilidad eficiente de la calidad del agua y limita el potencial de reúso dentro del proceso industrial. A esto se suma el elevado consumo diario de aproximadamente 120 m³ de agua subterránea, lo cual refuerza la urgencia de adoptar tecnologías limpias y automatizadas que permitan reducir la dependencia del recurso hídrico natural.

El incumplimiento de los estándares ambientales como los establecidos en el Decreto 1076 de 2015 y la Ley 1333 de 2009 (Función Pública, 2015) no solo conlleva sanciones económicas y administrativas, sino que compromete la sostenibilidad de la operación. Además, la falta de un sistema de control en línea y automatizado dificulta al área ambiental de la empresa responder de manera oportuna ante desviaciones en los parámetros, afectando la capacidad de cumplir con las metas institucionales de sostenibilidad y eficiencia hídrica.

Basado en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede mejorar el reúso del agua reciclada para la optimización de los procesos en la empresa a partir del uso de tecnologías aplicadas a la industria, reduciendo el consumo de agua de pozo?

Abordar esta problemática implica no solo avanzar en la automatización del sistema de tratamiento, sino también contribuir a la gestión sostenible del recurso hídrico, en línea con los compromisos establecidos por la agenda global del desarrollo sostenible.

Justificación

La implementación de un sistema automatizado de monitoreo y control en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) de Vidrio Andino S.A.S. no solo responde a una necesidad operativa y ambiental inmediata, sino que también se alinea estrechamente con los compromisos globales de sostenibilidad de Saint-Gobain. La empresa ha establecido metas ambiciosas para reducir su huella ambiental, incluyendo la neutralidad en emisiones de carbono para 2050 y una reducción del 50 % en la extracción de agua para 2030, en comparación con los niveles de 2017 (Saint-Gobain, 2023).

Actualmente, la operación manual de la PTARI implica una supervisión constante por parte del personal técnico, lo que incrementa la carga operativa y el riesgo de errores humanos. La automatización del sistema permitirá un control continuo de variables críticas como el pH y los niveles de los tanques, optimizando los recursos humanos y mejorando la eficiencia operativa de la planta.

Desde una perspectiva ambiental, el proyecto contribuye significativamente a la sostenibilidad del proceso industrial, al permitir el reúso del agua tratada dentro del sistema, se proyecta una reducción del 7 % en el consumo diario de agua subterránea, lo que representa un avance concreto hacia el uso responsable del recurso. Este ahorro no solo implica beneficios económicos, sino que también contribuye activamente a la conservación de fuentes naturales, en un contexto nacional marcado por el estrés hídrico y las crecientes restricciones al uso de agua de pozo.

Además, esta iniciativa está en consonancia con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6: Agua limpia y saneamiento, promoviendo la disponibilidad y gestión sostenible del agua, al reducir la extracción de agua y fomentar su reúso mediante tecnologías limpias, el

proyecto fortalece la contribución del sector industrial a los compromisos ambientales globales y nacionales.

Complementariamente, la ejecución de este proyecto habilita a la empresa para acceder a diversos beneficios tributarios y financieros en Colombia:

Deducción por inversiones en control y mejoramiento del ambiente: Según el artículo 158-2 del Estatuto Tributario, las personas jurídicas que realicen inversiones directamente en control y mejoramiento del ambiente pueden deducir el valor total de dichas inversiones de su renta líquida en el año gravable en que se efectúen, siempre que no sean obligatorias por mandato de una autoridad ambiental y cuenten con la certificación correspondiente de la autoridad ambiental competente, (FENAVI, 2017).

Exclusión de IVA para equipos de control y monitoreo ambiental: De acuerdo con el numeral 7 del artículo 424 del Estatuto Tributario y el Decreto 1625 de 2016, los equipos y elementos nacionales o importados destinados a la construcción, instalación, montaje y operación de sistemas de control y monitoreo del medio ambiente pueden estar excluidos del Impuesto al Valor Agregado (IVA), previa certificación de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Acceso a líneas de financiamiento verde: Entidades como Bancóldex y Findeter ofrecen líneas de crédito y programas de financiamiento para proyectos que promuevan la sostenibilidad ambiental, incluyendo la eficiencia en el uso del agua y la implementación de tecnologías limpias. Por ejemplo, Bancóldex cuenta con el programa "Vincúlate y Crece Sostenible", (Bancóldex, 2025), y Findeter financia proyectos que cumplan con los criterios de taxonomía verde de Colombia, (Findeter, 2025).

En conclusión, este proyecto no solo aborda una problemática operativa puntual, sino que también representa un paso estratégico hacia una industria más eficiente, automatizada y comprometida con la sostenibilidad y el cumplimiento normativo ambiental, en línea con los valores y objetivos de Saint-Gobain. Además, permite a la empresa beneficiarse de incentivos tributarios y financieros que respaldan su inversión en tecnologías limpias y sostenibles.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema automatizado de monitoreo y control para la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de Vidrio Andino S.A.S., optimizando el uso del recurso hídrico mediante la implementación de estrategias para el aprovechamiento del agua tratada en los procesos industriales.

Objetivos Específicos

Realizar un análisis del estado del arte sobre soluciones automatizadas aplicables al monitoreo y control de plantas de tratamiento de agua residual que sean viables en el sector de construcción de vidrio.

Reconocer el estado actual de la PTARI Vidrio Andino, estableciendo sus características, necesidades y variables críticas del proceso.

Diseñar una solución automatizada que facilite el control eficiente de las variables del tratamiento de agua residual industrial.

Evaluar el funcionamiento del sistema automatizado, garantizando su efectividad en la implementación final.

Marco Teórico

Para comprender adecuadamente el desarrollo del proyecto, resulta indispensable abordar los conceptos fundamentales que orientan su diseño, implementación y objetivos, estos principios teóricos permiten identificar los elementos esenciales del sistema, comprender sus dinámicas operativas y proporcionar una base sólida para el análisis crítico y la toma de decisiones técnicas durante las distintas fases del proceso.

Marco Conceptual

PTARI

Una PTARI es una instalación especializada en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos industriales en la agroindustria. Estas plantas eliminan contaminantes como sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y metales pesados, asegurando que el agua tratada cumpla con las normativas ambientales más estrictas, (INNTECO, 2024).

Automatización

La automatización de procesos se define como el uso de software y tecnologías para automatizar procesos y funciones del negocio a fin de lograr objetivos organizacionales definidos, tales como elaborar un producto, contratar e incorporar personal, o prestar servicio al cliente, (SAP, 2025).

PH

Es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14. Un incremento de una unidad en la escala logarítmica equivale a una disminución diez veces mayor en la concentración de iones de hidrógeno. Con una disminución del pH, el agua se hace más ácida y con un aumento de pH el agua se hace más básica, (California State Water Resources Control Board, 2025a).

Conductividad Eléctrica o Salinidad

La salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en agua. La salinidad y la conductividad está relacionada porque la cantidad de iones disueltos aumentan los valores de ambas. La conductividad se mide con una sonda electrónica que aplica un voltaje entre dos electrodos. La disminución del voltaje se usa para medir la resistencia del agua que se traduce a conductividad. La conductividad es el valor inverso de la resistencia y se mide como la cantidad de conductancia en una distancia determinada. Las unidades son mhos/cm o Siemen", (California State Water Resources Control Board, 2025b).

Coagulante

Según (Velandia Zuluaga Javier Leandro, 2021), los coagulantes son sustancias químicas, usualmente sales de aluminio o hierro, que neutralizan las cargas negativas de las partículas suspendidas en el agua mediante iones positivos. Al reaccionar con la alcalinidad del agua, forman un precipitado voluminoso que facilita la eliminación de impurezas.(Velandia Zuluaga Javier Leandro, 2021)

Floculante

De la mis manera (Velandia Zuluaga Javier Leandro, 2021), dice que los floculantes son una sustancia que favorece la formación de flóculos, facilitando la agrupación de partículas suspendidas en el agua. En el caso de la floculación orto cinética la cual es inducida por el movimiento del fluido y la agitación, las partículas colisionan, se acercan y vencen las fuerzas de repulsión eléctrica, permitiendo su aglomeración y posterior sedimentación.

PLC

“Dispositivo de automatización donde se almacena un programa lógico y se ejecuta según sus entradas dando salidas y controlando un proceso (control lógico programable). Se puede

definir como un dispositivo digital electrónico con una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones, que permite la implementación de funciones específicas como pueden ser: lógicas, secuenciales, temporizadas, de conteo y aritméticas; con el objeto de controlar máquinas y procesos inmunes a los ruidos eléctricos y resistentes a la vibración e impacto". (Rockwell, 2025).

P&ID o Diagrama de Tuberías e Instrumentación

Es un diagrama detallado que utiliza símbolos estandarizados para representar la interconexión entre equipos de proceso, tuberías, sensores, actuadores y otros instrumentos dentro de un sistema de control, estos símbolos, definidos en la norma ANSI/ISA 5.1-2024, permiten identificar claramente los lazos de control, las señales y la configuración técnica del sistema, facilitando su diseño, construcción, operación y mantenimiento (ANSI, 2024)

Sostenibilidad

“Es la búsqueda de un equilibrio entre el desarrollo económico y los consumos de recursos naturales tratando de impactar de la menor manera posible dichos recursos y tratando de garantizar la recuperación de estos mismo en la mayor cantidad posible. El desarrollo sostenible requiere un enfoque integral que tome en consideración las preocupaciones ambientales junto con el desarrollo económico”. (Naciones Unidas, 2023c).

ODS

El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos 15 años.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles

“1) Fin de la pobreza, 2) Hambre cero, 3) Salud y bienestar, 4) Educación de calidad, 5) Igualdad de género, 6) Agua limpia y saneamiento, 7) Energía asequible y no contaminante, 8) Trabajo decente y crecimiento económico, 9) Industria innovación e infraestructura, 10) Reducción de las desigualdades, 11) Ciudades y comunidades sostenibles, 12) Producción y consumo responsables, 13) Acción por el clima, 14) Vida submarina, 15) Vida de ecosistemas terrestres, 16) Paz, justicia e instituciones sólidas, 17) Alianzas para lograr los objetivos”.(Naciones Unidas, 2015)

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI)

“Estas plantas están diseñadas para tratar aguas residuales provenientes de procesos industriales. Su objetivo es reducir contaminantes como materia orgánica, nutrientes y metales pesados para cumplir con normativas ambientales y proteger el medio ambiente”. (INNTECO, 2024).

Osmosis Inversa

“Existen múltiples métodos para la purificación del agua, pero el más utilizado es la ósmosis inversa (OI). La OI es un proceso que elimina especies indeseables, como sales y contaminantes, de soluciones líquidas (como agua de mar, ríos o aguas residuales)”.(Serrano-Florez et al., 2024)

Estado del Arte

La creciente necesidad de mejorar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales industriales ha impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a la automatización de procesos, la reducción de impactos ambientales y el reúso del agua tratada. Diversos estudios han abordado estos desafíos desde enfoques técnicos, económicos y operativos, sentando una base teórica sólida para la implementación de soluciones como la que propone este proyecto en la PTARI de Vidrio Andino S.A.S.

En primer lugar, la investigación desarrollada por (Pacheco et al., 2024) sobre la planta de tratamiento de aguas residuales “Doris Mendoza” aplicó una reingeniería de procesos con base en un diagnóstico técnico-operativo, lo que permitió mejorar el desempeño hidráulico y garantizar el cumplimiento de parámetros de vertimiento. Esta experiencia demuestra la importancia de evaluar las condiciones de diseño y operación para determinar los puntos críticos del sistema, algo directamente relacionado con el objetivo del presente proyecto en su fase de análisis de situación actual.

Así mismo, el estudio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Silva, 2024), aunque enfocado en el suministro de agua potable urbana, propone un modelo de gestión basado en la integración de tecnologías como sensores inteligentes, plataformas de monitoreo y herramientas de análisis predictivo. Estos elementos tecnológicos son completamente aplicables a un entorno industrial, permitiendo un control eficiente de variables clave como el caudal, la calidad del agua y los tiempos de operación. Su inclusión en plantas industriales facilita la toma de decisiones en tiempo real y la optimización del uso del recurso hídrico.

Por otro lado, (Calle Villegas, 2022) documenta la modernización de la planta de tratamiento de la central termoeléctrica La Sierra, donde se incorporaron sistemas automáticos de control, sensores de calidad del agua, y PLCs para la regulación de procesos. Este caso es especialmente relevante por su enfoque en un entorno de alta demanda hídrica y estrictos estándares ambientales, tal como ocurre en la industria del vidrio. La estrategia implementada por EPM demuestra que, además de reducir el consumo de agua fresca, la automatización mejora la eficiencia energética y la trazabilidad operativa.

Desde una perspectiva económica, el trabajo (Córdova Mendoza, 2021) evalúa cómo la recirculación del agua tratada impacta los costos operativos. Aplicando herramientas de simulación y análisis de costos marginales, el estudio evidencia que el reúso del agua residual industrial no solo es viable técnicamente, sino rentable. Este hallazgo respalda directamente la propuesta de reinyección del agua tratada en Vidrio Andino, con beneficios tanto económicos como ambientales a corto y mediano plazo.

Del mismo modo el proyecto desarrollado por (Axl & Fonseca, 2021) en una refinería del departamento de Loreto, Perú, muestra el diseño e implementación de una planta de tratamiento totalmente automatizada. Se destaca la utilización de sensores de pH y conductividad, válvulas motorizadas, PLCs y sistemas SCADA, tecnologías que también serán consideradas en el presente proyecto. Su enfoque integral en la automatización, desde la captación hasta la disposición o reúso, es un referente técnico claro para diseñar un sistema robusto, adaptable y de fácil supervisión.

Complementando estos estudios, (Rodríguez-Silva et al., 2024) presentan el diseño de un sistema automatizado para una planta de tratamiento de agua potable, con una metodología basada en la recolección y análisis de datos operativos, definición de puntos de control críticos y

diseño de una arquitectura de control basada en sensores y PLCs. Aunque el contexto es agua potable, su propuesta metodológica y los elementos de automatización aplicados resultan perfectamente extrapolables al entorno industrial. Este estudio permite visualizar cómo se estructura un sistema de automatización desde sus fases iniciales hasta su implementación, aportando una guía estructural que puede ser replicada y adaptada al caso de Vidrio Andino.

Asimismo, la Directiva (García García, 2025) del Parlamento Europeo y del Consejo refuerza el marco conceptual del proyecto al establecer lineamientos más estrictos sobre el tratamiento y reutilización de aguas residuales urbanas. Esta normativa promueve, entre otros aspectos, el uso de tecnologías avanzadas para alcanzar la neutralidad energética en las plantas de tratamiento, la implementación obligatoria de tratamientos cuaternarios para remover micro contaminantes, y la reutilización sistemática del agua tratada en zonas de estrés hídrico. Aunque su ámbito es europeo, sus principios ofrecen una visión clara sobre el futuro de la regulación ambiental, que puede servir como guía para la adopción de buenas prácticas en contextos industriales latinoamericanos. La alineación con este tipo de normativas anticipadas fortalece la proyección del presente proyecto hacia estándares internacionales de sostenibilidad, eficiencia y cumplimiento ambiental.

En conjunto, estas investigaciones muestran que la aplicación de tecnologías de automatización, monitoreo en línea y control inteligente no solo permite cumplir con la normativa ambiental vigente, sino que también facilita el reúso del agua y la sostenibilidad de los procesos industriales. El presente proyecto se enmarca en esta tendencia tecnológica, proponiendo una solución automatizada para la PTARI de Vidrio Andino S.A.S. que permita reducir la carga operativa, reutilizar el agua tratada en los procesos industriales y disminuir el consumo de agua de pozo, en línea con el ODS 6 de la Agenda 2030.

Estado Actual de la PTARI Vidrio Andino

Descripción de los Elementos que Componen la Planta

Para comprender el funcionamiento integral de la planta de tratamiento de aguas residuales, es necesario identificar y describir los componentes que la conforman cada elemento desempeña un papel específico dentro del proceso, desde la recolección inicial del agua residual hasta su tratamiento y posterior disposición o reúso. A continuación, se presenta una descripción detallada de los principales tanques, sistemas de filtrado y elementos periféricos, los cuales son la base del funcionamiento.

TK-1 Inicio

Tanque subterráneo de recepción inicial con capacidad de $30m^3$, el cual se ve en la Figura 1, diseñado para recolectar y almacenar las aguas residuales generadas en distintos procesos de la planta industrial. Estas incluyen rechazos de sistemas de ósmosis inversa, purgas de fondo de torres de enfriamiento, aguas provenientes del retro lavado de filtros y aguas de retorno de procesos internos de refrigeración. Su función principal es actuar como reservorio de equalización hidráulica, permitiendo un flujo constante hacia las etapas posteriores del tratamiento.

Figura 1

Tanque Inicial, Recolecta las Aguas a Tratar



Nota. Tanque subterráneo.

TK-Sedimentador-1

Tanque de sedimentación primaria de $10m^3$, de capacidad el cual se ve en Figura 2, diseñado con compartimientos internos comunicados alternadamente en la parte inferior y superior. Esta configuración obliga al agua a seguir un trayecto en zigzag, reduciendo su velocidad y favoreciendo la decantación de sólidos suspendidos por gravedad. El tanque incluye una válvula de fondo para el drenaje y extracción periódica de los lodos sedimentados, esenciales para mantener la eficiencia del sistema.

Figura 2*Primera Etapa de Sedimentación*

Nota. Tanque sedimentador 1, en campo.

TK-Sedimentador-2

Unidad de sedimentación secundaria con un volumen útil de $3m^3$, mostrado en Figura 3. De construcción rectangular y abierta en su parte superior, permite la observación directa del comportamiento del flujo y la eficiencia del proceso de clarificación. Este tanque complementa la acción del sedimentador primario al capturar partículas finas o densas que no lograron precipitar en la etapa anterior.

Figura 3*Segunda Etapa de Sedimentación*

Nota. Tanque sedimentador 2, en campo.

TK-2

Tanque intermedio de almacenamiento con capacidad de $2m^3$, mostrado en Figura 4, utilizado como cámara de carga para alimentar el sistema de filtración a presión. Este tanque estabiliza el flujo y facilita la operación continua de las bombas de transferencia hacia los filtros multimedia.

Figura 4*Tanque de Acumulación Salida de Sedimentación*

Nota. Tanque que recibe el agua de los sedimentadores.

Filtro-1

Filtro de lecho profundo que constituye la primera etapa del proceso de purificación física, se puede ver en Figura 5. El agua es distribuida en la parte superior y forzada a descender a través de un medio filtrante compuesto por capas de arena y resina de diferentes granulometrías, ordenadas de mayor a menor tamaño. Esta disposición permite una retención progresiva de partículas suspendidas, mejorando la calidad del agua tratada.

Figura 5*Primer Filtro, Etapa de Filtrado*

Nota. Filtro de etapa 1, en campo.

Filtro-2

Filtro secundario de características similares al Filtro-1, pero orientado a realizar un pulido final del agua, este se ve en Figura 6. Su diseño asegura la retención de impurezas residuales mediante una segunda pasada a través de medios filtrantes, garantizando que el agua efluente alcance los estándares requeridos para su reúso o disposición segura.

Figura 6*Etapa Final de Filtrado*

Nota. Filtro de etapa 1, en campo.

TK-3

Tanque de almacenamiento final con capacidad de $5m^3$, se puede ver en Figura 7, destinado a contener el agua ya tratada. Este volumen está disponible para su reutilización en procesos industriales o para riego de zonas verdes dentro de la planta, cerrando el ciclo de tratamiento con un enfoque de economía circular.

Figura 7*Tanque de Salida Etapa de Filtrado*

Nota. Tanque de acumulación de agua recuperada, en campo.

Bomba Sumergible de TK-1

Equipo de impulsión sumergible de 2.2 kW, trifásico a 480 VAC Figura 8. Su función es transferir el agua desde el TK-1 hasta el sedimentador primario (TK-sedimentador-1), garantizando un flujo continuo y estable para el inicio del tratamiento.

Figura 8*Bomba de Envío Agua a Recuperar*

Nota. Bomba sumergible del TK-1, en campo.

Bomba Dosificadora-1

Dispositivo de dosificación volumétrica mostrado en Figura 9, encargado de inyectar coagulante al flujo de agua que se dirige del TK-1 al sedimentador-1. Este químico promueve la formación de micro flóculos al neutralizar las cargas de las partículas suspendidas, facilitando su posterior agregación y sedimentación.

Figura 9*Bomba Dosificadora de Coagulante*

Nota. Bomba de dosificación de químicos, en campo.

Bomba Dosificadora-2

Equipo similar al anterior pero destinado a la dosificación de floculante, Figura 10. Actúa complementando el efecto del coagulante, promoviendo la aglomeración de los micro flóculos en macro flóculos de mayor densidad, que sedimentan más eficientemente en el sedimentador.

Figura 10*Bomba Dosificadora de Floculante*

Nota. Bomba de dosificación de químicos, en campo.

Bomba TK-2

Bomba de transferencia que impulsa el agua desde el TK-2 hacia los filtros Filtro-1 y Filtro-2, mostrada en Figura 11. Está diseñada para trabajar a presión, asegurando un caudal constante que permita el paso efectivo del agua a través de los medios filtrantes.

Figura 11*Bomba, que Impulsa el Agua a la Etapa de Filtrado*

Nota. Bomba de envío de agua a la etapa de filtración, en campo.

Bomba TK-3

Equipo encargado de enviar el agua tratada y almacenada en el TK-3 hacia los puntos de reutilización definidos, como el sistema de riego, se puede ver en la Figura 12. Opera bajo condiciones de demanda variable y se activa según las necesidades operativas de la planta.

Figura 12

Bomba de Envío del Agua Recuperada



Nota. Bomba de envío de agua recuperada, en campo.

TK-4 Lodos

Tanque de manejo de lodos con sistema de agitación interna mediante paletas el cual se muestra en Figura 13. Recibe los sólidos decantados de los sedimentadores 1 y 2, y permite su homogenización química y física para facilitar la posterior extracción. Tiene la capacidad de preparación de mezclas con floculante para mejorar la decantación de sólidos y su compactación en una etapa posterior.

Figura 13*Tanque Agitador de Lodos*

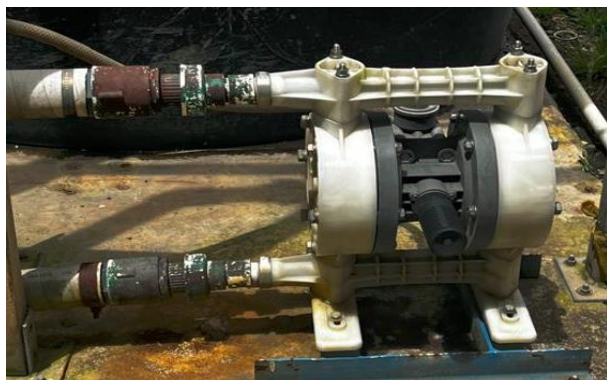
Nota. Tanque de extracción de lodos, en campo.

Bomba de Lodos

Bomba neumática de doble diafragma, mostrada en Figura 14, operada por aire comprimido. Está diseñada para transportar lodos con alto contenido de sólidos desde los sedimentadores hasta el TK-4-lodos, manteniendo una operación segura y confiable aún en condiciones de alta viscosidad o abrasividad.

Figura 14

Bomba de Extracción de Lodos del Fondo de los Sedimentadores



Nota. Bomba de envío de lodos a la etapa de extracción de lodos, en campo.

Bomba Dosificadora-3

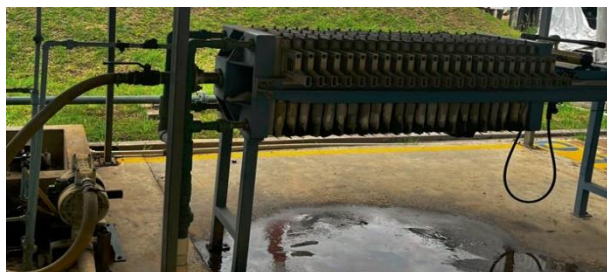
Dosificadora específica para la adición controlada de floculante en el TK-4-lodos, mostrada en Figura 15. Mejora la separación sólido-líquido al provocar la sedimentación de partículas coloidales, facilitando su extracción manual mediante un filtro prensa que se puede ver en Figura 16.

Figura 15

Bomba Dosificadora de Floculante para Lodos



Nota. Bomba que adiciona químico para la separación de lodos, en campo.

Figura 16*Filtro Prensa Para Compactar Lodos*

Nota. Filtro que compacta los lodos a alta presión.

Aireador

Equipo utilizado para la preparación de soluciones químicas, el cual se puede apreciar en Figura 17 principalmente coagulantes y floculantes. Su principio de funcionamiento por aireación permite una mezcla uniforme y evita la sedimentación prematura de los componentes en el tanque de preparación.

Figura 17*Aireador Para Mezcla Homogénea de Floculante y Coagulante*

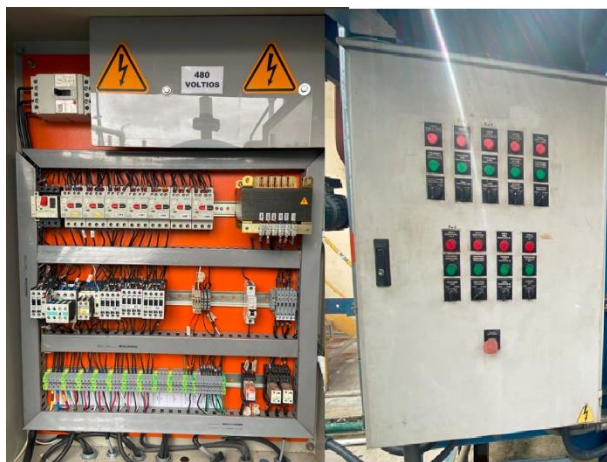
Nota. Equipo que inyecta aire a la preparación de químicos.

Tablero de Potencia

Este tablero, se puede observar en Figura 18, centraliza los dispositivos que suministran energía a las bombas y a los sistemas periféricos de la planta. Asimismo, constituye el punto de operación manual desde el cual el técnico de utilidades gestiona estos equipos y sistemas durante el funcionamiento de la planta.

Figura 18

Tablero de Potencia PTARI



Nota. Tablero que controla manualmente la planta.

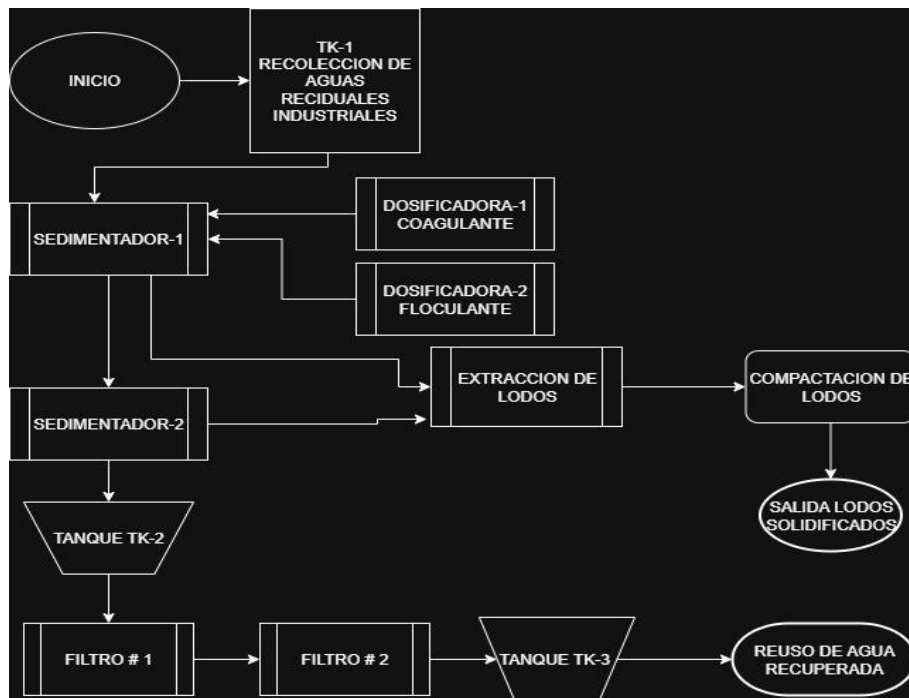
Descripción del Funcionamiento de la Planta

En este contexto, una vez descritos los elementos que conforman la planta, la explicación de su funcionamiento tiene como objetivo fundamental presentar de manera articulada la secuencia operativa del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales. Este análisis permite comprender cómo interactúan los componentes previamente identificados para garantizar la eficiencia del proceso, desde la captación del afluente hasta su tratamiento final.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) de Vidrio Andino S.A.S. opera actualmente bajo un esquema secuencial de procesos físicos y químicos que permiten el tratamiento de las aguas lluvias y los rechazos generados por distintas áreas de producción, se observa un diagrama de flujo del proceso en Figura 19. Toda la operación es ejecutada y supervisada manualmente por el técnico de utilidades, quien se encarga del manejo de válvulas, activación de bombas, dosificación de químicos y control de reboses.

Figura 19

Diagrama de Flujo del Proceso de Recuperación de Agua Industrial



Nota. Diagrama realizado en Canva.

El proceso comienza con el llenado del tanque de inicio, Figura 1, el cual recolecta aguas de rechazo provenientes de diferentes plantas. Desde este tanque, una bomba sumergible, Figura 8, impulsa el caudal hacia el sedimentador 1, Figura 2. En la línea de alimentación de este sedimentador, el técnico realiza manualmente el encendido de las bombas de dosificación de coagulante y floculante, dosificadora-1, Figura 9 y dosificadora-2, Figura 10, productos químicos

necesarios para facilitar la aglomeración y sedimentación de sólidos. Para la preparación de estos reactivos, se utiliza un soplador, Figura 17, cuya operación también es activada manualmente, dependiendo del consumo registrado.

El sedimentador 1, Figura 2, está interconectado por rebose con el sedimentador 2, Figura 3, permitiendo el flujo continuo del agua parcialmente tratada.

Posteriormente, el agua decantada fluye hacia un tanque de reserva intermedio, Figura 4, desde donde se impulsa por medio de una bomba centrífuga, Figura 11, al sistema de filtración, compuesto por dos filtros en serie de funcionamiento descendente, Figura 5 y Figura 6. Esta etapa permite la remoción final de sólidos suspendidos y asegura la calidad del agua tratada. Una vez pasa la etapa de filtrado el agua se acumula en el TK-3, Figura 7, donde espera para ser enviada al sistema de riego de las zonas verdes de la planta o es puesta en recirculación en los procesos industriales.

Ambos sedimentadores vistos en Figura 2 y Figura 3 cuentan con válvulas en su parte inferior que permiten la extracción de lodos, operación que el técnico realiza una vez al día utilizando una bomba, Figura 14, que los transfiere al tanque de lodos, Figura 13, donde enciende la dosificación de floculante, Figura 15 y la agitación una vez esté en el nivel óptimo sin rebosarse y solo por 1 minuto, luego de un 1 hora de permanecer estática la mezcla, se decantan los lodos los cuales se compactan en un filtro prensa, visto en la Figura 16.

Una vez al día el técnico de utilidades debe colocar la etapa de filtrado en modo de retro lavado para poder hacer una desincrustación de partículas en los filtros vistos en la Figura 5 y Figura 6, esto se hace colocando manualmente las válvulas en cada una de las posiciones que se requiere para hacer la limpieza así como se deben devolver manualmente a su posición de

filtrado para que continúe el ciclo de recuperación de agua, la posición de las válvulas según su modo de operación se muestran la Tabla 1.

Tabla 1

Posición de Válvulas Según el Estado del Filtro

Válvula	Filtro-1 y 2-Filtrado	Retro-lavado-filtro-1	Retro-lavado-filtro-2
1	abierta	abierta	abierta
2	cerrada	abierta	abierta
3	abierta	cerrada	cerrada
4	cerrada	abierta	cerrada
5	abierta	cerrada	abierta
6	abierta	abierta	cerrada
7	cerrada	cerrada	abierta
8	cerrada	cerrada	abierta
9	abierta	abierta	cerrada

Nota. Como deben estar las válvulas del sistema de filtrado en cada paso.

Medición de Consumo de Agua de Pozo y Agua Tratada

Se realiza un seguimiento constante al volumen de agua extraída del pozo y a la cantidad de agua tratada en la PTARI, con el propósito de controlar y minimizar el consumo de agua subterránea a través del aprovechamiento del agua recuperada.

Los resultados de estas mediciones se presentan en la

Tabla 2, la cual recoge los valores mensuales durante un periodo de un año, junto con los promedios diarios correspondientes para cada una de las variables.

Además, en la Figura 20 se muestra una gráfica comparativa que representa visualmente los valores de consumo y tratamiento de agua registrados en la tabla, facilitando el análisis de tendencias.

Tabla 2

Consumos de Agua de Pozo y Recuperación de Agua.m³ 2024

Mes	Agua de pozo x mes	Promedio pozo día	Agua recuperada x mes	Promedio recuperado día
Enero	3198	106,6	247,0	8,2
Febrero	3390	113,0	174,0	5,8
Marzo	3874	129,1	243,0	8,1
Abril	3940	131,3	251,0	8,4
Mayo	3647	121,6	192,0	6,4
Junio	3503	116,8	357,0	11,9
Julio	3195	106,5	264,0	8,8
Agosto	3635	121,2	254,0	8,5
septiembre	3627	120,9	236,0	7,9
Octubre	3578	119,3	256,0	8,5
noviembre	3523	117,4	212,0	7,1
diciembre	3497	116,6	208,0	6,9
año	42607	116,7	2894,0	7,9

Nota. Agua consumida de pozo y agua recuperada en periodos mensuales

Figura 20

Contraste de Consumo de Agua de Pozo y Agua Recuperada.m³



Nota. Gráfico hecho en Excel.

Funciones Manuales del Técnico de Utilidades en la PTARI

El técnico de utilidades desempeña un papel fundamental en el funcionamiento diario de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI). Su labor requiere la ejecución de múltiples tareas manuales que aseguran el correcto desarrollo del proceso de tratamiento del agua

Debe monitorear visualmente el estado de los filtros (presión, acumulación de sedimentos o necesidad de limpieza) y decidir el momento adecuado para ejecutar el retro lavado. Las configuraciones de válvulas en cada caso se ven en la Tabla 1. El controla manualmente el estado operativo de la etapa de filtrado, que podemos ver en Figura 5 y Figura 6, alternando entre modo de trabajo normal y modo de retro lavado, según sea necesario para mantener la eficiencia del sistema.

Control de reboses: Es necesario que el técnico revise constantemente los niveles de agua en los tanques y actúe rápidamente para evitar desbordamientos o interrupciones del proceso, ya que estos no están automatizados.

Activación de bombas, puesta en marcha o detención de bombas dosificadoras y otras unidades se realiza de manera manual, según el estado del proceso y las necesidades operativas del momento.

Estas acciones exigen la presencia constante del técnico en la planta, limitan la eficiencia operativa y aumentan el riesgo de errores humanos o demoras en la respuesta ante eventos críticos del proceso.

Diseño de la Solución

El diseño de la solución se enfocó en la automatización de los procesos críticos dentro de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI), con el objetivo de optimizar la operación, reducir la intervención manual y garantizar la calidad del agua tratada.

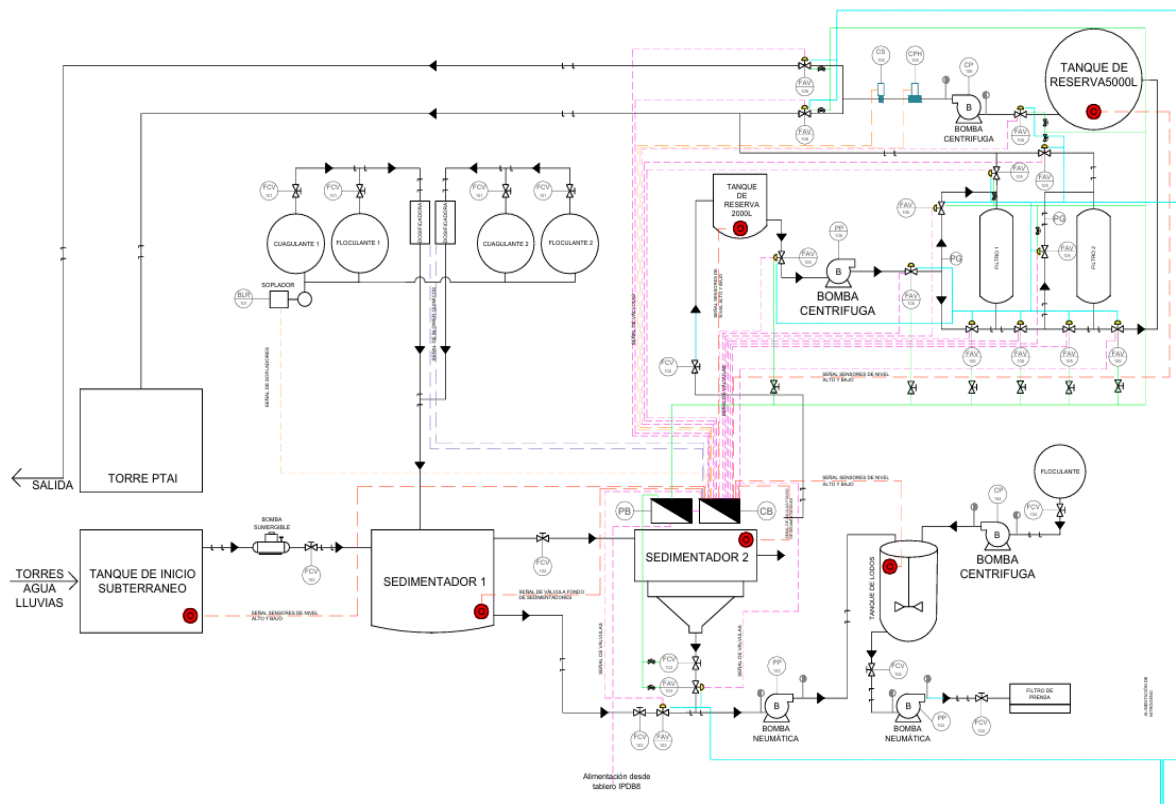
Diseño del Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)

Como parte esencial del proceso de automatización, se elaboró el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) de la PTARI, el cual se ve en la Figura 21 con base en el levantamiento detallado de la configuración física y funcional de la planta. Este diagrama técnico permitió representar gráficamente los componentes del sistema, las conexiones entre ellos y los puntos críticos de monitoreo y control, sirviendo como base para la selección e instalación de los instrumentos.

El P&ID se constituyó no solo como herramienta de documentación, sino como insumo fundamental para el diseño, implementación y mantenimiento del sistema automatizado, permitiendo asegurar la trazabilidad de las señales, el flujo de procesos y la ubicación exacta de los dispositivos instalados.

Figura 21

P&ID PTARI



Nota. Gráfico hecho en AutoCAD. Plano de instrumentación.

El diseño del P&ID incluyó

Sensores de nivel tipo flotador como los podemos ver en la Figura 22 instalados en los tanques principales (TK-1-INICIO, TK-2 y TK-3), para activar automáticamente las bombas asociadas.

Figura 22*Sensores de Nivel Tipo Flotador*

Nota. Sensor de nivel para tanques.

Sensor de nivel por vibración como se muestra en la Figura 23, en el tanque TK-4-lodos, cuya geometría interna y la presencia de agitador de aspas imposibilitan el uso de sensores flotantes.

Figura 23*Sensores de Nivel Tipo Horquilla*

Nota. Sensor usado en tanque de lodos.

Válvulas automáticas conectadas a filtros y sedimentadores, como las podemos ver en la Figura 24, integradas en el esquema para representar su operación en los distintos ciclos (filtrado, retro lavado y purga de lodos).

Figura 24

Actuadores Neumáticos Control de Válvulas



Nota. Elemento que controla las válvulas en campo.

Sensores analógicos de pH y conductividad que se pueden ver en la Figura 25, ubicados en la salida de la planta de proceso industrial, conectados al sistema de control para validar la calidad del agua antes del reúso.

Figura 25*Sensores de pH y Conductividad*

Nota. Sensores de 4 a 20 mA para controlar parámetros del agua.

Automatización del Control de Niveles en Tanques

Como parte fundamental del diseño, se automatizó el monitoreo de niveles en los tanques del sistema. Para ello se implementaron sensores tipo flotador, vistos en la Figura 22, en los tanques principales, mientras que en el tanque de lodos (TK-4-lodos), debido a la presencia de un agitador de aspas que interfiere con los sensores convencionales, se utilizaron sensores de nivel por vibración, mostrados en la Figura 23. El control de nivel en los tanques fue programado priorizando la seguridad de los equipos, evitando que operen en condiciones de vacío que puedan generar daños. Asimismo, se implementaron medidas para prevenir el rebose, asegurando que los tanques no alcancen niveles que puedan provocar desbordamientos.

Control Automatizado de Válvulas en Etapa de Filtrado y Sedimentación

Se desarrolló un sistema de control automático para las válvulas de las etapas de filtración y sedimentación, lo que permitió eliminar la necesidad de intervención manual constante por parte del técnico de utilidades. Estas válvulas son operadas en función del estado

de los filtros y de los niveles en los tanques, asegurando una operación secuencial, segura y eficiente.

Ciclos Automatizados de Retro lavado y Extracción de Lodos

La automatización también incluyó la implementación de ciclos de retro lavado, controlados por el tiempo acumulado de operación de la bomba TK2, que permiten mantener la eficiencia del medio filtrante. Ciclos de extracción de lodos, que integran la dosificación automática de floculante y el encendido del agitador del tanque TK-4-lodos, facilitando la sedimentación y remoción de sólidos.

Programación y Visualización en TIA Portal V13

Todo el sistema fue programado utilizando el entorno de desarrollo TIA Portal V13, tanto para el controlador lógico programable mostrado en la Figura 26, como para la interfaz del operador

Nota. Controlador lógico programable usado.

Figura 27, proporciona al técnico una visualización clara del estado del proceso, con capacidad de control y monitoreo en tiempo real, lo que disminuye la carga operativa manual y mejora la capacidad de respuesta ante eventos del sistema.

Figura 26

PLC Siemens S7-1200



Nota. Controlador lógico programable usado.

Figura 27

HMI Interfaz de Operación



Nota. Pantalla para controlar la planta usada.

Monitoreo de Calidad del Agua Tratada

Se instalaron sensores analógicos de pH y conductividad vistos en Figura 25, en la salida de la planta de proceso industrial. Estos sensores permiten validar que el agua tratada cumple con los parámetros de calidad requeridos antes de su redirección a la torre de inicio del proceso de agua industrial, evitando alteraciones al sistema y posibilitando el reúso responsable del recurso. Cabe destacar que los valores de referencia para pH y conductividad son definidos a partir de mediciones manuales semanales realizadas sobre el agua de pozo, y estos parámetros son configurables desde la interfaz HMI, lo que permite ajustarlos según las condiciones operativas y los requerimientos específicos del proceso.

Tablero de Control

En cuanto al control de potencia, se diseñó un circuito encargado de operar los contactores que suministran energía a las bombas, sistemas dosificadores y agitadores del proceso, vistos en la Figura 18. Toda la automatización se gestiona mediante un PLC Siemens S7-1200, complementado con módulos de expansión de entradas y salidas digitales, lo que

permite centralizar las señales de los sensores y enviar órdenes a los equipos periféricos.

Podemos ver el tablero que se implementó en la Figura 28.

Figura 28

Tablero de Control PTARI



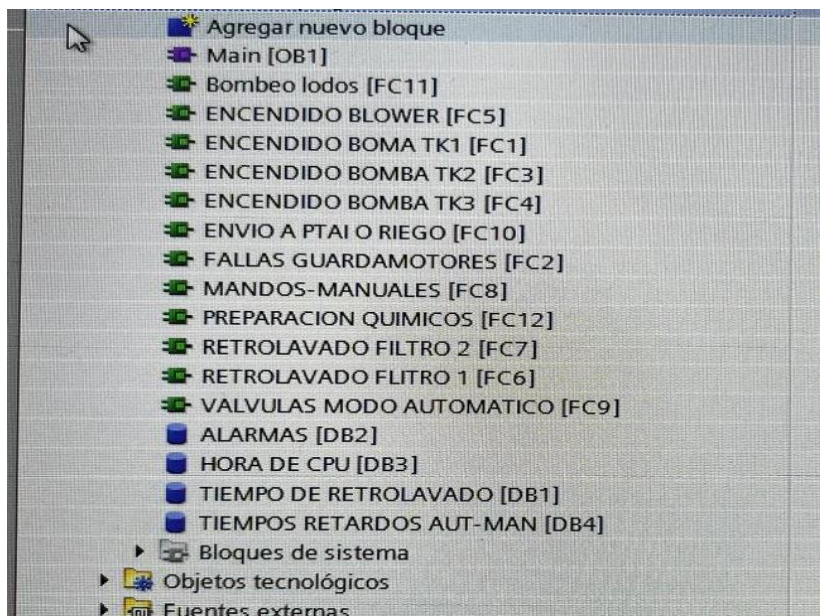
Nota. Tablero de control implementado.

Programación de PLC

El programa de automatización fue diseñado bajo una estructura de programación general secuencial, complementada con subrutinas específicas, como se ve en la Figura 29, que permiten gestionar de manera flexible y eficiente las diferentes etapas del proceso de tratamiento de agua.

Figura 29

Programa General por Bloques, Subrutinas y Datos



Nota. Subrutinas dentro del ambiente TIAportal.

La lógica de control implementada se basa en el monitoreo continuo de variables de proceso clave, particularmente el nivel de llenado de los tanques y los tiempos operativos definidos para los distintos ciclos automáticos, a medida que se cumplen las condiciones de operación preestablecidas, como los niveles mínimos y máximos en los tanques de almacenamiento y proceso, el programa activa de forma automática las subrutinas correspondientes, estas subrutinas controlan de manera autónoma y ordenada los siguientes ciclos operativos:

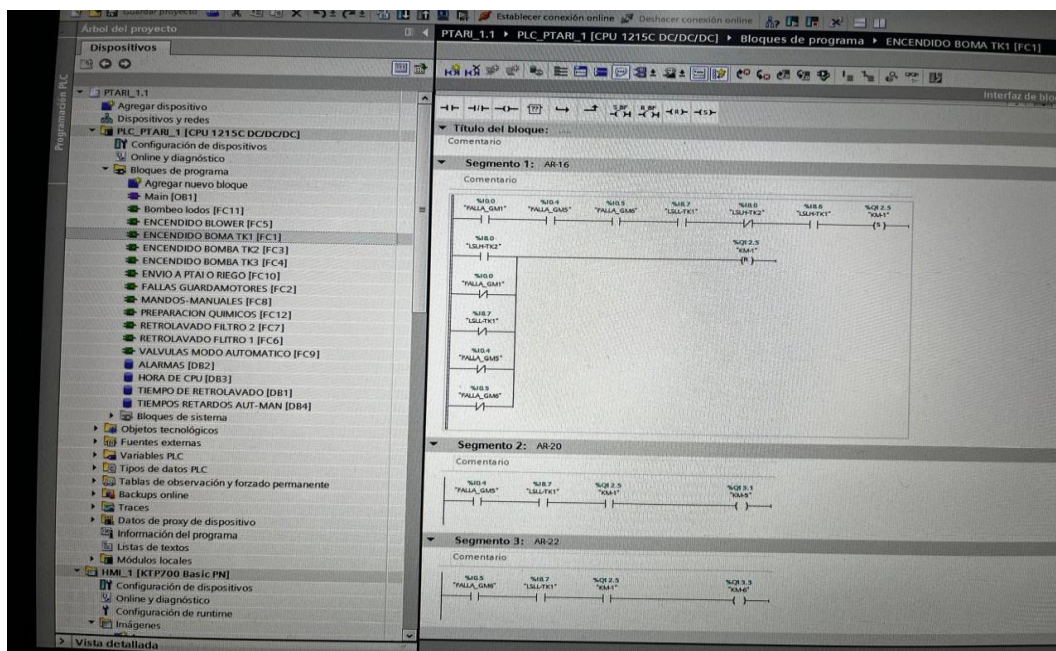
Encendido de Bomba TK-1

Esta subrutina se activa automáticamente cuando el nivel en el tanque inicial TK-1 alcanza el 50 % de su capacidad, siempre que el tanque de destino TK-2 no se encuentre en su nivel máximo, con el fin de evitar reboses y garantizar una transferencia segura del caudal.

Adicionalmente, una vez se enciende la bomba asociada al TK-1, se habilitan de forma simultánea las bombas dosificadoras 1 y 2, encargadas de inyectar coagulante y floculante al flujo de agua. Esta acción permite acondicionar el afluente para optimizar los procesos de sedimentación y separación de sólidos en las etapas posteriores del tratamiento. Como medida de protección, si el nivel en el TK-1 desciende al 20 %, la bomba se detiene automáticamente para evitar que opere en vacío, lo cual podría ocasionar daños al equipo y comprometer la estabilidad del sistema. En la Figura 30 se puede ver la programación con cada condición.

Figura 30

Rutina de Encendido Bomba TK-1



Nota. Programación en TIAPortal.

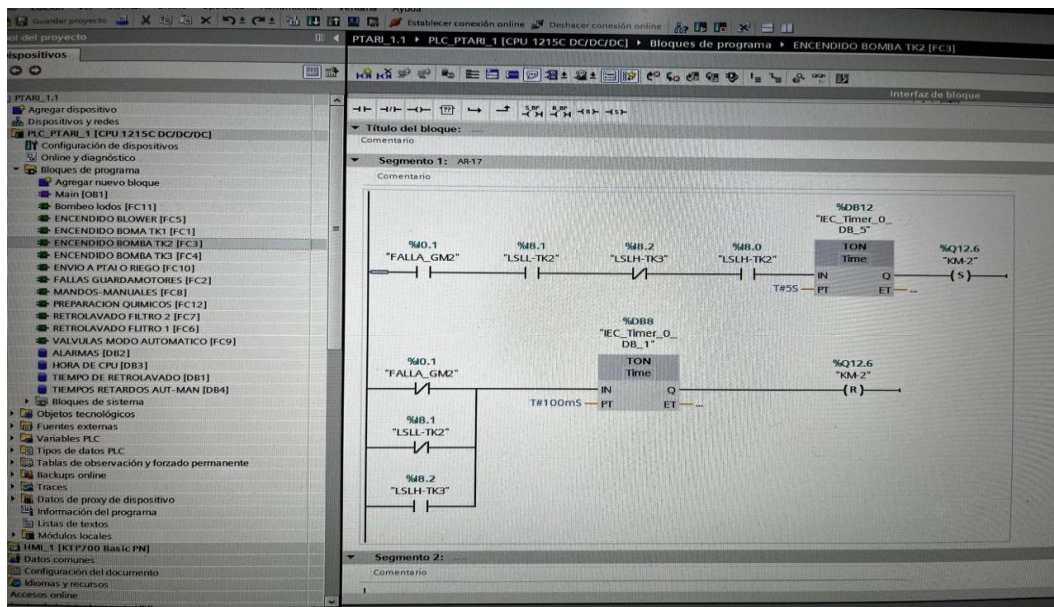
Encendido de Bomba TK-2

Esta subrutina, mostrada en su ambiente de desarrollo en la Figura 31, controlada por el nivel del tanque TK-2, se encarga de accionar la bomba que impulsa el caudal hacia la etapa de

filtración, la bomba se activa automáticamente cuando el tanque de destino TK-3, alcanza un nivel del 10 %, lo que indica la necesidad de reposición de agua tratada, el sistema mantiene la bomba en operación hasta que el nivel de TK-3, alcanza el 90 %, con el fin de garantizar un volumen adecuado para el proceso y, al mismo tiempo, prevenir posibles reboses por sobrellenado. Como medida de protección adicional, la bomba se detiene si el nivel en TK-2 desciende al 10 %, evitando así el funcionamiento en vacío y reduciendo el riesgo de daños al equipo.

Figura 31

Encendido Bomba TK-2



Nota. Programación en TIAportal.

Encendido de Bomba TK-3

Esta rutina se encarga de gestionar el envío del agua tratada hacia su punto de reúso cuando el tanque TK-3 alcanza el 90 % de su capacidad, como parte del control automático, la

bomba se detiene cuando el nivel en TK-3 desciende al 10 %, evitando así el vaciado total del tanque y protegiendo el equipo contra operación en vacío.

Envío a PTARI

Esta rutina determina si el agua tratada debe ser enviada hacia la Planta de Tratamiento de Agua Industrial (PTAI) o recirculada al tanque TK-1 para ser reprocesada, en función de los valores de pH y conductividad medidos en la línea de salida del sistema. La decisión se basa en la comparación de estos parámetros con los rangos establecidos previamente por el técnico a través de la interfaz HMI. Esta lógica garantiza que únicamente el agua que cumple con los criterios de calidad definidos sea redirigida al proceso industrial, mientras que aquella que no alcanza los valores requeridos sea sometida a un nuevo ciclo de tratamiento.

Retro Lavado Filtro 1 y Retro Lavado Filtro 2

Estos ciclos se ejecutan en función de un temporizador de operación o, en su defecto, una vez por día como rutina de mantenimiento preventivo. Cada secuencia incluye la activación de válvulas específicas, según se detalla en la Tabla 1, para cada uno de los filtros, así como el encendido de la bomba correspondiente y la ejecución ordenada del proceso de purga del medio filtrante.

Bombeo de Lodos

Este ciclo se acciona en función del tiempo estimado de acumulación de sólidos en los sedimentadores y se ejecuta, como mínimo, una vez al día para garantizar la eficiencia del proceso. La secuencia incluye la apertura automática de las válvulas de fondo, la activación del agitador en el tanque de lodos y la dosificación controlada de floculante, con el fin de optimizar la separación de sólidos y facilitar su remoción.

Encendido de Aireador

Esta subrutina se habilita únicamente durante fases específicas de preparación de reactivos químicos y su activación es manual, realizada por el operador desde la interfaz HMI. Su propósito es accionar el aireador con el fin de homogeneizar la mezcla previamente preparada, la cual será posteriormente dosificada al proceso mediante bombas dosificadoras.

Fallas de Guardamotores

Monitorea en tiempo real los estados de protección térmica de los motores, generando alertas ante disparos o fallas eléctricas. Además, esta lógica de control detiene automáticamente la etapa del proceso afectada, evitando así que el flujo de agua continúe sin recibir el tratamiento correspondiente.

Control Automático de Válvulas

regula de forma secuencial la apertura y cierre de válvulas asociadas a los distintos ciclos, en función de la lógica operativa y los tiempos establecidos para las subrutinas de retro lavado y bombeo de lodos.

Cada subrutina del sistema ha sido programada bajo una lógica de validación previa que garantiza la seguridad operativa, esta lógica evalúa variables críticas como los niveles mínimos de los tanques, condiciones de parada de emergencia y estados de mantenimiento, permitiendo que los ciclos automáticos se ejecuten únicamente cuando el sistema se encuentra en condiciones seguras y estables.

Gracias a la estructura modular del programa, los ciclos operan de forma independiente y sin interferir con las demás etapas del tratamiento, lo cual contribuye al desempeño eficiente y continuo de la planta, además, la validación previa de condiciones de operación minimiza riesgos y asegura la correcta ejecución de las tareas automatizadas.

Para facilitar el control, la trazabilidad y el mantenimiento del sistema, se documentaron las variables usadas en la programación mediante tablas clasificadas según su tipo y función. La Tabla 3 muestra las entradas digitales del PLC, como sensores de nivel, interruptores de emergencia, estados de contactores y fallas de guardamotores.

Tabla 3

Variables Digitales de Entrada

Name	Path	Data Type	Logical Address	Hmi Visible	Hmi Accessible
FALLA_GM1	VARIABLES DI	Bool	%I0.0	True	True
FALLA_GM2	VARIABLES DI	Bool	%I0.1	True	True
FALLA_GM3	VARIABLES DI	Bool	%I0.2	True	True
FALLA_GM4	VARIABLES DI	Bool	%I0.3	True	True
FALLA_GM5	VARIABLES DI	Bool	%I0.4	True	True
FALLA_GM6	VARIABLES DI	Bool	%I0.5	True	True
KM1_CERRADO	VARIABLES DI	Bool	%I0.6	True	True
KM2_CERRADO	VARIABLES DI	Bool	%I0.7	True	True
KM3_CERRADO	VARIABLES DI	Bool	%I1.0	True	True
KM4_CERRADO	VARIABLES DI	Bool	%I1.1	True	True
KM5_CERRADO	VARIABLES DI	Bool	%I1.2	True	True
KM6_CERRADO	VARIABLES DI	Bool	%I1.3	True	True
KM7_CERRADO	VARIABLES DI	Bool	%I1.4	True	True
FALLA_GM7	VARIABLES DI	Bool	%I1.5	True	True
LSLH-TK2	VARIABLES DI	Bool	%I8.0	True	True
LSLL-TK2	VARIABLES DI	Bool	%I8.1	True	True
LSLH-TK3	VARIABLES DI	Bool	%I8.2	True	True
LSLL-TK3	VARIABLES DI	Bool	%I8.3	True	True
LSLH-TK-LD	VARIABLES DI	Bool	%I8.4	True	True
LSLL-TK-LD	VARIABLES DI	Bool	%I8.5	True	True
LSLH-TK1	VARIABLES DI	Bool	%I8.6	True	True
LSLL-TK1	VARIABLES DI	Bool	%I8.7	True	True
PARO-EMERGENCIA	VARIABLES DI	Bool	%I9.0	True	True

Nota. Se extrae la tabla de variables digitales de entrada al PLC.

La Tabla 4, contiene las variables de salidas digitales, que corresponden al accionamiento de actuadores de válvulas, bombas dosificadoras, solenoides de bombas neumáticas y dispositivos de señalización.

Tabla 4

Variables Digitales de Salida

Name	Path	Data Type	Logical Address	Hmi Visible	Hmi Accessible
FY_V1	VARIABLES DQ	Bool	%Q0.0	True	True
FY_V2	VARIABLES DQ	Bool	%Q0.1	True	True
FY_V3	VARIABLES DQ	Bool	%Q0.2	True	True
FY_V4	VARIABLES DQ	Bool	%Q0.3	True	True
FY_V5	VARIABLES DQ	Bool	%Q0.4	True	True
FY_V6	VARIABLES DQ	Bool	%Q0.5	True	True
FY_V7	VARIABLES DQ	Bool	%Q0.6	True	True
FY_V8	VARIABLES DQ	Bool	%Q0.7	True	True
FY_V9	VARIABLES DQ	Bool	%Q1.0	True	True
FY_V10	VARIABLES DQ	Bool	%Q1.1	True	True
FY_V11	VARIABLES DQ	Bool	%Q12.0	True	True
FY_V12	VARIABLES DQ	Bool	%Q12.1	True	True
FY_V13	VARIABLES DQ	Bool	%Q12.2	True	True
FY_BN-1	VARIABLES DQ	Bool	%Q12.3	True	True
FY_BN-2	VARIABLES DQ	Bool	%Q12.4	True	True
KM-1	VARIABLES DQ	Bool	%Q12.5	True	True
KM-2	VARIABLES DQ	Bool	%Q12.6	True	True
KM-3	VARIABLES DQ	Bool	%Q12.7	True	True
KM-4	VARIABLES DQ	Bool	%Q13.0	True	True
KM-5	VARIABLES DQ	Bool	%Q13.1	True	True
BALIZA	VARIABLES DQ	Bool	%Q13.2	True	True
KM-6	VARIABLES DQ	Bool	%Q13.3	True	True
KM-7	VARIABLES DQ	Bool	%Q13.4	True	True

Nota. Se extrae la tabla de variables digitales de salida del PLC.

De la misma manera la Tabla 5, muestra las variables analógicas de entrada, vinculadas principalmente a la medición de parámetros como nivel, pH y conductividad. Adicionalmente, se

incluyen en esta tabla las memorias internas de tipo analógico empleadas en la lógica de programación, las cuales permiten ejecutar operaciones matemáticas y gestionar los cálculos requeridos en los bloques de procesamiento.

Tabla 5

Señales Análogas de Entrada al PLC, y Memorias

Name	Data Type	Logical Address	Hmi Visible	Hmi Accessible
SENSOR DE PH	Int	%IW64	True	True
SENSOR CONDUCTIVIDAD	Int	%IW66	True	True
SALIDA-PH-1	Real	%MD120	True	True
SALIDA-CONDUCTIVIDAD-1	Real	%MD121	True	True
SALIDA-PH-REAL	Real	%MD126	True	True
SALIDA-CONDUCTIVIDAD-REAL	Real	%MD130	True	True

Nota. Se muestran las dos señales de entrada análogas al PLC y sus memorias internas.

Estas tablas no solo permiten una mejor comprensión del funcionamiento del sistema automatizado, sino que también sirven como soporte técnico para futuras modificaciones, mantenimientos o ampliaciones.

Programación de HMI

La integración de la interfaz Hombre-Máquina (HMI), desarrollada en TIA Portal V13, proporciona al operador una plataforma gráfica intuitiva que permite supervisar en tiempo real el estado de los equipos, los niveles de los tanques y los principales parámetros operativos del sistema, además, la HMI está configurada para generar alertas visuales y mensajes de fallo ante cualquier condición anómala, lo cual facilita el monitoreo constante, agiliza la toma de decisiones y contribuye al control eficiente y seguro de la planta.

Para complementar la comprensión de integración entre PLC y HMI, se ve la Tabla 6, que documenta las variables HMI utilizadas en el sistema, estas variables permiten enlazar los comandos operativos y representaciones gráficas de la interfaz con el programa principal del PLC y sus respectivas subrutinas. Este vínculo lógico garantiza que las acciones realizadas por el operador como iniciar o detener equipos, cambiar modos de operación o ajustar parámetros se reflejen directamente en el comportamiento del sistema automatizado, asegurando una operación coherente, segura y centralizada.

Tabla 6*Variables de la HMI Para Enlazarlas a las Variables del PLC*

Name	Path	Data Type	Logical Address	Hmi Visible	Hmi Accessible
V1	VARIABLES-HMI	Bool	%M2.0	True	True
V2	VARIABLES-HMI	Bool	%M2.1	True	True
V3	VARIABLES-HMI	Bool	%M2.2	True	True
V4	VARIABLES-HMI	Bool	%M2.3	True	True
V5	VARIABLES-HMI	Bool	%M2.4	True	True
V6	VARIABLES-HMI	Bool	%M2.5	True	True
V7	VARIABLES-HMI	Bool	%M2.6	True	True
V8	VARIABLES-HMI	Bool	%M2.7	True	True
V9	VARIABLES-HMI	Bool	%M3.0	True	True
V10	VARIABLES-HMI	Bool	%M3.1	True	True
V11	VARIABLES-HMI	Bool	%M3.2	True	True
V12	VARIABLES-HMI	Bool	%M3.3	True	True
V13	VARIABLES-HMI	Bool	%M3.4	True	True
BN1	VARIABLES-HMI	Bool	%M3.5	True	True
BN2	VARIABLES-HMI	Bool	%M3.6	True	True
BLWR	VARIABLES-HMI	Bool	%M3.7	True	True
B-TK1	VARIABLES-HMI	Bool	%M4.0	True	True
B-TK2	VARIABLES-HMI	Bool	%M4.1	True	True
B-TK3	VARIABLES-HMI	Bool	%M4.2	True	True
B-DOS1	VARIABLES-HMI	Bool	%M4.3	True	True
B-DOS2	VARIABLES-HMI	Bool	%M4.4	True	True
STOP-MANDOS- MANUALES	VARIABLES-HMI	Bool	%M4.5	True	True
BOTON-AUTO	VARIABLES-HMI	Bool	%M4.6	True	True
BOTON-MAN	VARIABLES-HMI	Bool	%M4.7	True	True
MODO-AUTO	VARIABLES-HMI	Bool	%M5.1	True	True
MODO-MAN	VARIABLES-HMI	Bool	%M5.2	True	True
AGITADOR-LODOS	VARIABLES-HMI	Bool	%M5.3	True	True
RUN-RETROLAVADO	VARIABLES-HMI	Bool	%M5.4	True	True
retrolavado-1	VARIABLES-HMI	Bool	%M5.5	True	True
retrolavado-2	VARIABLES-HMI	Bool	%M5.6	True	True
FIN-RETROLAVADO1	VARIABLES-HMI	Bool	%M5.7	True	True

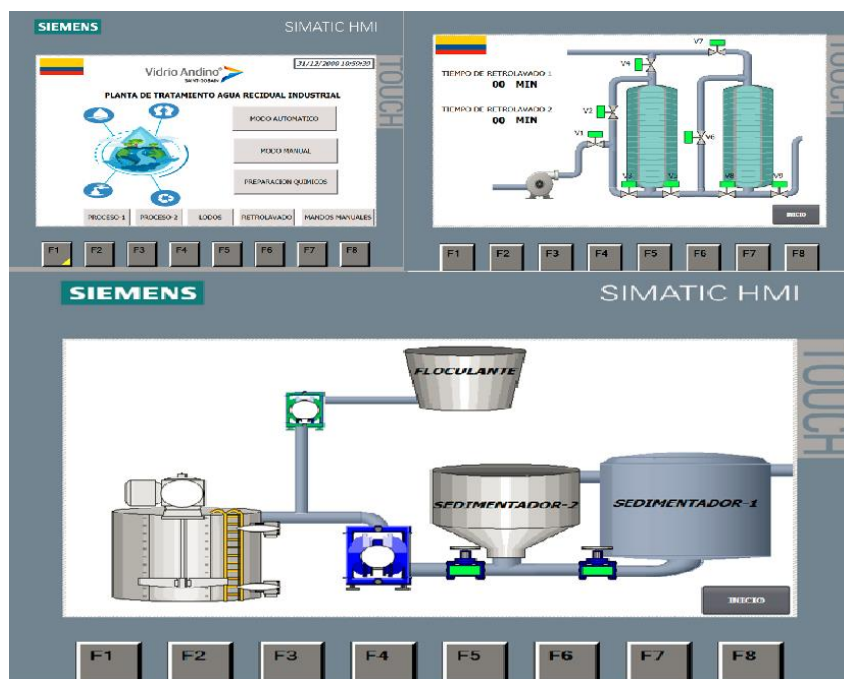
Name	Path	Data Type	Logical Address	Hmi Visible	Hmi Accessible
FIN-RETROLAVADO2	VARIABLES-HMI	Bool	%M6.0	True	True
PREPARACION-	VARIABLES-HMI	Bool	%M6.1	True	True
ENVIO-PTAI	VARIABLES-HMI	Bool	%M6.2	True	True
ENVIO-RIEGO	VARIABLES-HMI	Bool	%M6.3	True	True
BOMBEO-LODOS	VARIABLES-HMI	Bool	%M6.4	True	True
Tiempo-r1	VARIABLES-HMI	Time	%MD6	True	True
Tiempo-r2	VARIABLES-HMI	Time	%MD10	True	True

Nota. Variables usadas para poder enlazar la programación del PLC con los comandos HMI.

Así mismo se ve en la Figura 32, las pantallas de inicio donde se ve la presentación y los diferentes campos que llevan a cada pantalla del proceso, en la parte superior izquierda se ve la pantalla de retro lavado donde se ve el estado de las válvulas y los campos de configuración de los tiempos de retro lavado, así mismo en la parte inferior esta la pantalla del proceso de extracción de lodos.

Figura 32

Pantallas Inicio, Retro Lavado y Extracción de Lodos

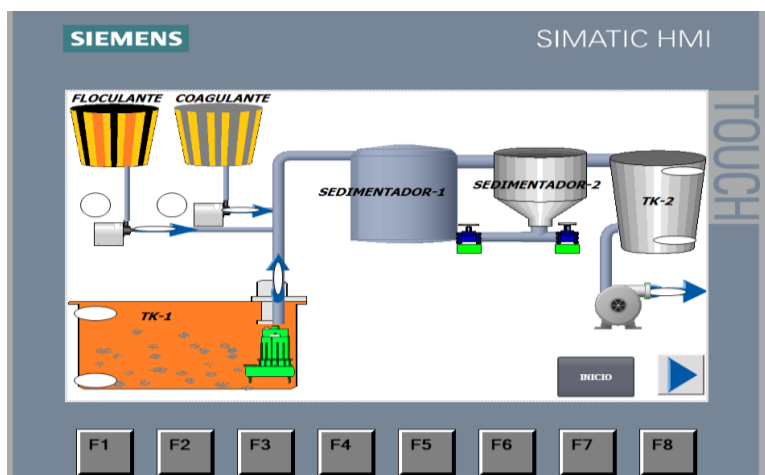


Nota. Pantallas programadas en TIAportal.

Continuando con la descripción de las pantallas implementadas en la interfaz HMI, en la Figura 33, se muestra una vista general del estado de los niveles en los tanques TK-1 y TK-2, así como el estado operativo de las bombas asociadas a dichos tanques y de las bombas dosificadoras.

Figura 33

Etapa 1 de Recuperación de Agua

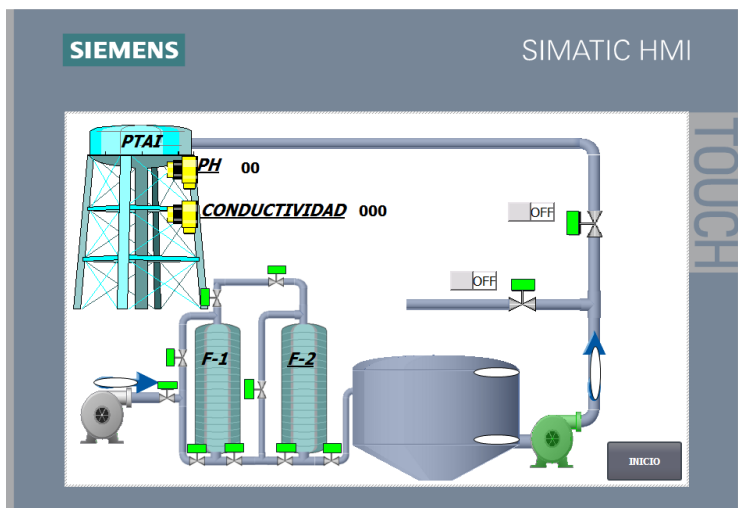


Nota. Pantalla programada en TIAportal.

Asimismo, en la Figura 34, se presenta una pantalla de la HMI donde se visualiza el estado operativo de los niveles de los tanques TK-2 y TK-3, junto con el estado de sus respectivas bombas, además, se muestra la posición de las válvulas del sistema de filtrado, incluyendo las válvulas de salida que dirigen el flujo ya sea hacia la Planta de Tratamiento de Agua Industrial (PTAI) o de regreso al tanque inicial, finalmente, en esta misma pantalla se visualizan los valores en tiempo real de los sensores de pH y conductividad.

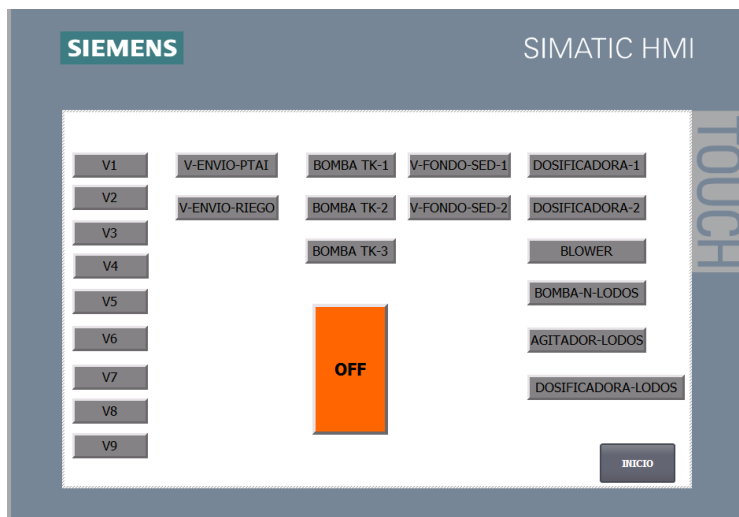
Figura 34

Etapa 2 de Recuperación de Agua



Nota. Pantalla programada en TIAportal.

Continuando con la descripción de las pantallas, en la Figura 35, se presenta una interfaz destinada al control manual de los elementos periféricos del sistema. Esta pantalla incluye campos que permiten al operador activar individualmente cada uno de los dispositivos, como bombas, válvulas o dosificadores, con el fin de realizar validaciones funcionales de forma aislada o combinada, según la necesidad operativa. Esta funcionalidad resulta especialmente útil durante labores de mantenimiento, pruebas de funcionamiento o verificación de señales de entrada y salida del sistema automatizado.

Figura 35*Mandos Manuales*

Nota. Pantalla programada en TIAportal.

Justificación de la Selección de Sensores y Elementos de Control

La selección de los sensores y dispositivos de control implementados en la solución automatizada de la PTARI de Vidrio Andino S.A.S. se fundamentó en criterios técnicos, operativos y de confiabilidad, considerando tanto las condiciones específicas del proceso como la facilidad de integración al sistema de control programado en TIA Portal V13. A continuación, se detalla la justificación para cada tipo de elemento.

Sensores de Nivel Tipo Flotador

Los sensores tipo flotador fueron seleccionados para los tanques de agua clara, sedimentadores y otros recipientes donde las condiciones del fluido permiten una medición precisa mediante dispositivos de desplazamiento mecánico. Estos sensores ofrecen:

Bajo costo y fácil instalación.

Compatibilidad con señales digitales para entrada directa al PLC.

Alta confiabilidad en líquidos sin turbulencia significativa ni presencia de sólidos en suspensión.

Sensor de Nivel Tipo horquilla

En el tanque TK-4-lodos, se seleccionó un sensor de nivel tipo horquilla debido a que:

La presencia de un agitador de aspas.

Es ideal para líquidos viscosos o con presencia de sedimentos, como lodos industriales.

El sensor tipo tenedor detecta el nivel mediante la variación de frecuencia por contacto con el medio, sin depender del movimiento del líquido.

Sensores de pH y Conductividad (Analógicos)

Para el monitoreo de la calidad del agua tratada, se emplearon sensores analógicos de pH y conductividad por las siguientes razones:

Permiten verificar que el agua esté dentro de los rangos establecidos antes de ser reenviada a procesos industriales.

Son sensores estándar en plantas de tratamiento, compatibles con equipos de automatización industrial.

Su señal analógica facilita una lectura continua y precisa, integrable a registros históricos y alertas en la HMI.

Válvulas Automáticas, actuador neumático

La automatización del sistema de filtrado, retro lavado y extracción de lodos requería una operación secuencial que no dependiera de intervención manual. Por ello se seleccionaron válvulas motorizadas que:

Pueden ser operadas directamente desde el PLC, permiten ciclos de trabajo programados con tiempos y condiciones predefinidas, aumentan la seguridad operativa y reducen la carga del personal técnico.

Controlador Lógico Programable (PLC) e Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

El uso de un PLC Siemens junto con una HMI integrada responde a la necesidad de un sistema:

Robusto, confiable y fácilmente escalable. Capaz de manejar señales digitales y analógicas, temporizadores, secuencias lógicas y alarmas. Que permita una visualización en tiempo real del proceso, brindando autonomía y simplicidad al técnico de utilidades para operar y supervisar la planta.

En conjunto, estos elementos fueron seleccionados por su adecuación técnica al entorno industrial, su capacidad de integración en el sistema automatizado y su contribución directa a la mejora de la eficiencia, seguridad y sostenibilidad del proceso de tratamiento de aguas residuales.

Evaluación de Funcionamiento del Sistema Automatizado en la Implementación Final

Con el fin de garantizar la efectividad del sistema en su implementación final, se realiza una evaluación estructurada que permita validar su desempeño. Para ello, se contemplan las siguientes acciones:

Pruebas manuales de las entradas digitales

En esta etapa se realiza la validación funcional de las señales mediante simulaciones manuales de nivel y el forzamiento mecánico de contactores y guardamotores, con el fin de verificar que las señales ingresen correctamente al PLC y que el direccionamiento físico y lógico sea el adecuado. Estas pruebas confirman que cada señal se registre en la dirección correcta y se visualice correctamente en la HMI. Durante el proceso, se utiliza el estado de forzamiento "1" como referencia. Si la señal es reconocida en el PLC y reflejada adecuadamente en la HMI, se clasifica como "ok"; en caso contrario, se marca como "nok", los resultados se documentan en la

Tabla 7, donde se relacionan las señales evaluadas, el método de prueba y las observaciones respectivas.

Tabla 7*Pruebas de las Entradas Digitales*

Name	Forzado manual	visible plc	visible Hmi
FALLA_GM1	1	ok	ok
FALLA_GM2	1	ok	ok
FALLA_GM3	1	ok	ok
FALLA_GM4	1	ok	ok
FALLA_GM5	1	ok	ok
FALLA_GM6	1	ok	ok
KM1_CERRADO	1	ok	ok
KM2_CERRADO	1	ok	ok
KM3_CERRADO	1	ok	ok
KM4_CERRADO	1	ok	ok
KM5_CERRADO	1	ok	ok
KM6_CERRADO	1	ok	ok
KM7_CERRADO	1	ok	ok
FALLA_GM7	1	ok	ok
LSLH-TK2	1	ok	ok
LSLL-TK2	1	ok	ok
LSLH-TK3	1	ok	ok
LSLL-TK3	1	ok	ok
LSLH-TK-LD	1	ok	ok
LSLL-TK-LD	1	ok	ok
LSLH-TK1	1	ok	ok
LSLL-TK1	1	ok	ok
PARO-EMERGENCIA	1	ok	ok

Nota. Confirmación del estado de las entradas digitales forzadas manualmente.

Pruebas Manuales de las Salidas Digitales

En esta fase se realiza la validación de las salidas digitales del sistema, mediante el forzamiento directo desde el PLC o la activación manual desde la HMI. El objetivo es verificar

que cada salida genere la acción correspondiente en campo, ya sea el encendido de una bomba, la apertura de una válvula o la activación de una señal de alarma.

Durante las pruebas, se evalúa que las señales lleguen correctamente a los dispositivos finales, que el cableado esté en buen estado y que no existan errores de direccionamiento en el programa, la respuesta física del equipo debe coincidir con la instrucción enviada desde el controlador o la interfaz de usuario. Si la acción se ejecuta correctamente, se clasifica como “ok”; de lo contrario, se registra como “nok”. Los resultados de esta validación se documentan en la

Tabla 8, donde se detallan las salidas evaluadas.

Tabla 8*Pruebas de las Salidas Digitales*

Name	Comando HMI	Salida PLC	Contactador o relevo	Elemento de campo
FY_V1	1	Ok	Ok	ok
FY_V2	1	Ok	Ok	nok
FY_V3	1	Ok	Ok	nok
FY_V4	1	Ok	Ok	nok
FY_V5	1	Ok	ok	ok
FY_V6	1	Ok	ok	ok
FY_V7	1	Ok	ok	ok
FY_V8	1	Ok	ok	ok
FY_V9	1	Ok	ok	ok
FY_V10	1	Ok	ok	ok
FY_V11	1	Ok	ok	nok
FY_V12	1	Ok	ok	ok
FY_V13	1	Ok	ok	nok

Name	Comando HMI	Salida PLC	Contactador o relevo	Elemento de campo
FY_BN-1	1	Ok	ok	ok
FY_BN-2	1	Ok	ok	ok
KM-1	1	Ok	ok	ok
KM-2	1	Ok	ok	ok
KM-3	1	Ok	ok	ok
KM-4	1	Ok	ok	ok
KM-5	1	Ok	ok	ok
BALIZA	1	Ok	ok	ok
KM-6	1	Ok	ok	ok
KM-7	1	Ok	ok	ok

Nota. Las señales cruzadas con los elementos finales se cambiaron para hacerlas coincidir

Pruebas de funcionamiento integral

Verificación del comportamiento de cada subrutina

Control de niveles. Durante las pruebas de funcionamiento se verificó que los sensores de nivel mantienen una señal estable y confiable, permitiendo que el sistema automatizado controle de manera efectiva el llenado y vaciado de los tanques. Se evidenció que los niveles se mantienen dentro de los rangos establecidos, sin presentarse desbordamientos ni condiciones de operación en vacío. Esto confirma la correcta configuración de los umbrales de actuación y la adecuada integración con el sistema de válvulas y bombas.

Ciclos de Retro Lavado. Se realizaron pruebas en modo manual para verificar el correcto funcionamiento de cada filtro durante el proceso de retro lavado. Posteriormente, se programó un ciclo automático diario por cada etapa de filtrado, con tiempos de operación configurables desde la HMI. El técnico de utilidades tiene la facultad de ajustar estos tiempos en función de las condiciones del proceso y la acumulación de sólidos observada. Las pruebas demostraron que los ciclos se ejecutan correctamente, permitiendo una limpieza eficiente del medio filtrante sin generar interrupciones en el sistema general.

Ciclos de Extracción de Lodos. Se realizaron pruebas en modo manual para verificar el correcto funcionamiento de las válvulas de drenaje de los sedimentadores, la bomba de extracción de lodos, la dosificadora de floculante y el agitador. Todas las pruebas resultaron satisfactorias, confirmando la operatividad de cada componente del sistema. Posteriormente, se programó el ciclo automático de extracción de lodos, permitiendo configurar desde la HMI los tiempos de operación de cada etapa. El técnico de utilidades puede ajustar estos parámetros según las necesidades del proceso, en función de la acumulación de sólidos y las condiciones de sedimentación observadas. El sistema respondió adecuadamente durante las pruebas, completando el ciclo sin fallas y garantizando una extracción eficiente.

Validación de la Integración entre Sensores y Actuadores

Como se evidenció previamente durante las pruebas manuales de las señales de entrada y salida digitales, y una vez corregidas las señales cruzadas identificadas en los elementos de campo (véase

Tabla 8), se procedió a realizar una prueba integral de funcionamiento. Esta consistió en observar el comportamiento conjunto del sistema en intervalos cortos de tiempo, con el objetivo de verificar la correcta interacción entre sensores y actuadores bajo condiciones reales de operación con flujo de agua, los resultados obtenidos evidenciaron una interacción coherente y sincronizada entre los componentes, lo que refleja una dinámica operativa favorable para el desempeño general de la planta.

Control de Calidad para Reúso del Agua Tratada

Se realizaron pruebas manuales por parte del técnico de utilidades, utilizando instrumentos de medición calibrados para verificar los valores de pH y conductividad del agua tratada. Los resultados fueron favorables, ya que ambos parámetros se mantuvieron dentro de los rangos establecidos para su reúso en los procesos industriales. Esto confirma que el sistema de tratamiento y monitoreo cumple con los requisitos de calidad necesarios para garantizar un reúso seguro y eficiente del recurso hídrico.

Pruebas de Funcionamiento a Largo Plazo

Se llevaron a cabo pruebas de operación continua durante un período de 72 horas, con el objetivo de detectar posibles fallas en la programación y validar la estabilidad del sistema. Durante el primer ciclo de prueba se identificaron inconsistencias en el inicio automático de los ciclos de retro lavado y extracción de lodos, las cuales fueron corregidas mediante ajustes en los temporizadores y condiciones lógicas del programa. Posteriormente, se repitió la prueba, obteniéndose un funcionamiento estable y confiable. El sistema logró mantener un suministro continuo de hasta 15 m³ diarios de agua tratada, cumpliendo con las condiciones requeridas para su reúso en procesos industriales.

Realimentación del Personal Operativo. Técnico de Utilidades

Con el fin de verificar la efectividad del sistema automatizado implementado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI), se realizó una evaluación práctica basada en la experiencia del técnico de utilidades encargado de la operación diaria. Esta evaluación tuvo como propósito identificar mejoras operativas, verificar la confiabilidad del sistema y determinar el impacto en la carga de trabajo del personal.

Durante el periodo de prueba, el técnico reportó que el sistema automatizado mantuvo de manera constante los niveles adecuados en los diferentes tanques, lo que evitó situaciones de rebose o funcionamiento en vacío. Las operaciones de retro lavado y extracción de lodos se ejecutaron de forma automática, siguiendo los tiempos de bombeo programados y sin necesidad de intervención manual. Además, los sensores instalados para el monitoreo del pH y la conductividad presentaron lecturas estables, lo que permitió garantizar que el agua tratada cumpliera con los parámetros de calidad antes de ser reutilizada en la planta de proceso industrial.

En cuanto a la interfaz de operación (HMI), el técnico señaló que esta resultó clara, intuitiva y eficiente para la visualización de variables y el seguimiento de rutinas. La implementación del sistema contribuyó significativamente a la trazabilidad de las acciones realizadas, facilitando el análisis histórico del comportamiento de los equipos. Se destacó también una reducción aproximada del 80 % en el tiempo dedicado a actividades de monitoreo manual, lo que permitió al técnico enfocar sus funciones en tareas de análisis y mantenimiento preventivo.

Como resultado, se concluye que el sistema automatizado responde de forma adecuada a las condiciones operativas de la planta, reduce la carga de trabajo del personal y mejora la eficiencia del proceso. No obstante, se recomienda realizar ajustes finos en los tiempos de ciertos ciclos, e implementar alarmas adicionales que refuercen la seguridad del sistema ante posibles fallos. Esta retroalimentación resulta fundamental para garantizar la mejora continua del proceso y la sostenibilidad del sistema en el largo plazo.

Mediciones Volumétricas de Agua Recuperada

Finalizada la etapa de pruebas funcionales del sistema automatizado, se procede a operar la planta en modo automático, realizando un seguimiento diario del comportamiento del sistema. Para cuantificar el impacto real de la solución implementada, se efectúa la medición del caudal total de agua recuperada a través de un medidor volumétrico mecánico instalado en la línea de salida del sistema de tratamiento.

Este dispositivo permite registrar de forma acumulativa y confiable el volumen de agua que está siendo recuperado para su posterior reutilización en los procesos de la Planta de Tratamiento de Agua Industrial (PTAI). Los resultados obtenidos durante este seguimiento se presentan en la

Tabla 9, donde se evidencia un aumento significativo en la cantidad de agua tratada disponible para reúso. Al comparar estos resultados con los datos históricos consignados en la

Tabla 2, correspondientes al período previo a la automatización, se observa un incremento en el volumen de agua recuperada. Específicamente, se ha pasado de un promedio del 7 % de recuperación respecto al volumen total de agua extraída del pozo, a un promedio del 11 % después de la implementación del diseño automatizado. Este incremento representa una mejora tangible en la eficiencia del sistema de tratamiento y un avance importante en términos de sostenibilidad hídrica. Dicho comportamiento también se puede visualizar de manera clara en la Figura 20, antes y después de la automatización, Figura 36, facilitando la comparación visual del impacto alcanzado.

Tabla 9

Consumos de Agua de Pozo y Recuperación de Agua m³ 2025

Mes	agua de pozo x mes	Promedio pozo día	agua recuperada x mes	promedio recuperado día
-----	--------------------	-------------------	-----------------------	-------------------------

Enero	3537	117,9	385,0	12,8
Febrero	3371	112,4	354,0	11,8
Marzo	3468	115,6	347,0	11,6
Abril	3462	115,4	365,0	12,2
Mayo	3277	109,2	387,0	12,9
Junio	3631	121,0	369,0	12,3
Acumulado	20746	113,7	2207,0	12,1

Nota. Mediciones de consumo posterior a la implementación.

Figura 36

Consumo de Agua de Pozo y Agua Recuperada. m³ Después de la Implementación



Nota. Gráfico Hecho en Excel.

Identificación de Posibles Oportunidades de Mejora

Se recomienda la implementación de sensores de presión diferencial en las etapas de filtrado, con el fin de monitorear en tiempo real la pérdida de carga a través de los filtros. Esta variable permitiría programar las rutinas de retro lavado en función del estado real de saturación del medio filtrante, en lugar de depender únicamente de temporizadores fijos, lo que optimizaría

el uso de agua y energía. Asimismo, se sugiere la incorporación de sensores de nivel de sedimento en los sedimentadores, lo que facilitaría la ejecución de los ciclos de extracción de lodos con base en la acumulación efectiva de sólidos. Esto permitiría una operación más eficiente y ajustada a las condiciones reales del proceso, reduciendo tiempos innecesarios de operación y mejorando el rendimiento global del sistema.

Se propone la ampliación del sedimentador 2 y del tanque TK-2 con el objetivo de incrementar la capacidad hidráulica del sistema y permitir el tratamiento de un mayor volumen de agua. Esta mejora estructural facilitaría una mayor continuidad operativa, especialmente en condiciones de alta demanda o cuando se requiera procesar volúmenes acumulados. Además, al aumentar el tiempo de retención y el volumen útil disponible, se optimiza la eficiencia del proceso de sedimentación y se reduce el riesgo de reboses o interrupciones en el flujo entre etapas.

Se recomienda extender el alcance de la automatización hasta la etapa de compactación de lodos mediante el filtro prensa, con el fin de eliminar la dependencia de la intervención manual por parte del técnico de utilidades. Automatizar esta operación permitiría coordinar de manera precisa la secuencia de llenado, prensado y descarga del lodo deshidratado, optimizando así la eficiencia del proceso de manejo de residuos. Además, esta mejora contribuiría a aumentar la seguridad operativa, reducir tiempos improductivos y garantizar una extracción de lodos más uniforme, continua y controlada.

Conclusiones

La implementación del sistema automatizado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) de Vidrio Andino S.A.S. evidenció mejoras sustanciales en la

eficiencia operativa, el control de procesos y la sostenibilidad del recurso hídrico, la automatización de operaciones críticas como el bombeo entre tanques, el retro lavado de filtros, la dosificación de químicos y la extracción de lodos permitió estandarizar rutinas previamente ejecutadas de forma manual, reduciendo la carga operativa del técnico de utilidades y minimizando la posibilidad de errores humanos. Como resultado de esta intervención, se logró un incremento significativo en el volumen de agua tratada y reutilizada, el promedio diario de recuperación pasó de $7,8 \text{ m}^3$ a $12,1 \text{ m}^3$, lo que representa un aumento del 53 %, esta mejora no solo refleja el impacto positivo de la automatización en términos de eficiencia del sistema, sino que también contribuye directamente a los objetivos de sostenibilidad de la compañía, al reducir la dependencia del agua subterránea y fomentar el reúso responsable del recurso hídrico dentro del proceso industrial.

Uno de los logros más relevantes fue la integración de sensores analógicos de pH y conductividad en la línea de salida de la planta, cuyo monitoreo continuo, junto con la configuración de rangos desde la HMI, posibilita una validación en tiempo real de la calidad del agua tratada. Esta funcionalidad garantiza que el reúso del agua en el proceso industrial solo se realice cuando los parámetros estén dentro de los límites definidos, protegiendo así los equipos de producción y cumpliendo con los requisitos técnicos del sistema de agua industrial.

Asimismo, la lógica programada incorporó condiciones de seguridad como la validación de niveles mínimos y máximos en los tanques, la protección contra operación en vacío de las bombas y la gestión automática de fallas en los guardamotores, lo cual contribuyó a la estabilidad del sistema y la prevención de daños en los equipos.

El diseño modular de la programación permitió ejecutar cada subrutina de forma independiente y secuencial, sin interferencias con otros procesos, facilitando el mantenimiento,

la expansión futura del sistema y su adaptabilidad a diferentes condiciones operativas. Además, el monitoreo permanente de variables clave proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas y la mejora continua del sistema.

En términos ambientales, la automatización implementada promueve el reúso eficiente del agua tratada, reduciendo significativamente el volumen de agua captada de pozo y, por ende, el impacto ambiental asociado al uso excesivo de fuentes hídricas subterráneas. Este resultado se alinea con los objetivos de sostenibilidad del grupo empresarial y con los lineamientos del ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento.

En conclusión, el proyecto demostró la viabilidad técnica y operativa de automatizar una PTARI con recursos accesibles, generando beneficios tangibles tanto en el desempeño de la planta como en el uso responsable del recurso hídrico, sentando un precedente para futuras aplicaciones industriales en el contexto de la gestión eficiente del agua.

Recomendaciones para futuras investigaciones

A partir de la experiencia adquirida durante el desarrollo e implementación del presente sistema de automatización para una planta de tratamiento de aguas residuales industriales, se proponen las siguientes recomendaciones dirigidas a profesionales que emprendan proyectos similares, con el fin de optimizar tiempos de diseño, reducir errores operativos y asegurar una integración eficiente de los componentes del sistema.

Realizar una planificación detallada de señales desde el inicio del proyecto

La planificación estructurada de las señales fue contemplada desde las etapas iniciales del proyecto, mediante el desarrollo de una tabla maestra que consolida las señales digitales, analógicas, de entrada, salida y aquellas asociadas a la interfaz HMI. Esta estrategia metodológica facilitó significativamente la programación y el direccionamiento lógico, al tiempo que permitió optimizar los procesos de validación y puesta en marcha. La organización anticipada de estas variables contribuyó a minimizar errores durante la integración del sistema, fortaleciendo la trazabilidad y la escalabilidad futura de la solución automatizada.

Continuar una programación modular y escalable

Se recomienda estructurar el programa del PLC mediante bloques o subrutinas independientes para cada etapa del proceso. Esto permite una mayor claridad en el código, facilita el mantenimiento y permite futuras ampliaciones sin afectar el núcleo del sistema.

Documentar todas las configuraciones y cambios realizados

Registrar cada ajuste en programación, cableado, direccionamiento o configuración de equipos es fundamental para el soporte técnico futuro. Una documentación clara reduce el

tiempo de respuesta ante fallos y permite una transferencia de conocimiento efectiva entre equipos.

Buenas prácticas en la disposición de sensores y equipos

Considerar desde la etapa de diseño el mantenimiento y la accesibilidad de los sensores y equipos es fundamental para garantizar una operación segura y eficiente. Es recomendable distribuir adecuadamente cada componente dentro del espacio disponible, evitando la congestión de elementos y asegurando una disposición ordenada que facilite las labores de inspección, calibración o reemplazo, una correcta organización no solo mejora la funcionalidad del sistema, sino que también contribuye a una mejor estética y presentación de la instalación.

Referencias

- Andrés, F., Murillo, B., Ervey, Á., Aponte, P., Mauricio, H., & Escobar, R. (2023). Revista Tecnura. *Tecnura*, 27(76), 111–143. <https://doi.org/10.14483/22487638.19390>
- ANSI. (2024). *ANSI/ISA 5.1-2024: Instrumentation Symbols and Identification*. https://blog.ansi.org/ansi/ansi-isa-5-1-2024-instrumentation-symbols/?utm_source=chatgpt.com
- Axl, K., & Fonseca, T. (2021). Diseño y automatización de la nueva planta de tratamiento de aguas residuales en la refinería, departamento de Loreto – Perú. *Repositorio Institucional - UTP*. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/4880>
- Bancóldex. (2025). *Programa Vincúlate y Crece Sostenible*. <https://www.bancoldex.com/es/soluciones-de-fortalecimiento-empresarial/programa-vinculate-y-crece-sostenible>
- California State Water Resources Control Board. (2025a). *Folleto Informativo pH ¿Qué es el pH?*
- California State Water Resources Control Board. (2025b). *¿Qué es la conductividad eléctrica/salinidad?*
- Calle Villegas, D. A. (2022). *Modernización y optimización de la planta de tratamiento de agua residual industrial de la central termoeléctrica La Sierra EPM*. <http://vocabularies.unesco.org/>
- Córdova Mendoza, P. . , B. M. T. O. , C. B. I. C. . , & C. H. D. F. (2021). *Vista de La recirculación del agua residual industrial en el costo de reúso del proceso*. <https://revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/149/385>

Díaz Rico, S. (2024). *Cuántos litros de agua consumen los colombianos* | Finanzas | Economía | Portafolio. <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/cuantos-litros-de-agua-consumen-los-colombianos-599882>

FENAVI. (2017). *Beneficios Tributarios Ambientales*.

Findeter. (2025). *Sostenibilidad en Colombia: Findeter financiará proyectos verdes*.

https://es-us.finanzas.yahoo.com/noticias/sostenibilidad-colombia-findeter-financiar%C3%A1-proyectos-222000306.html?utm_source=chatgpt.com&guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly9jaGF0Z3B0LmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAI9P9fQkCsIVRUqqtkb8pWS9Upqd-QBsbjOzkIH-DE78RNN4T93ozpk6gkQTZZWWIyYXHXqYBDdIAKtrhPnb4xH-o5QJV7B28aR7banzFn_Jsdn1MAWYdbD19815LTN_7N0mi2i-Fd5o5qX9wKSOZTTzZMbdRU7kPaNXl6j6I3k

Función Pública. (2015). *Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Gestor Normativo*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

García García, S. (2025). Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de noviembre de 2024 sobre el tratamiento de aguas residuales y urbanas.

Actualidad Jurídica Ambiental, 153, 116–119. <https://openurl-ebSCO-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/contentitem/lgs:184661024?sid=ebSCO:plink:crawler&id=ebSCO:lgs:184661024&crl=c>

INNTECO. (2024). *PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*

INDUSTRIALES. <https://innteco.com.pe/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-industriales/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Exclusión de IVA por la*

adquisición de equipos y elementos nacionales o importados que se destinen a la construcción, instalación, montaje y operación de Sistemas de Control y Monitoreo del Medio Ambiente. https://beneficios-tributarios.minambiente.gov.co/exclusion-de-iva-por-la-adquisicion-de-equipos-y-elementos-nacionales-o-importados-que-se-destinen-a-la-construccion-instalacion-montaje-y-operacion-de-sistemas-de-control-y-monitoreo-del-medio-ambi/?utm_source=chatgpt.com

Naciones Unidas. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo*

Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Naciones Unidas. (2023a). *Agua*. <https://www.un.org/es/global-issues/water>

Naciones Unidas. (2023b). *Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible*.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Naciones Unidas. (2023c). *Sostenibilidad*. [https://www.un.org/es/impacto-](https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/sostenibilidad)

[acad%C3%A9mico/sostenibilidad](https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/sostenibilidad)

Observatorio Ambiental, B. (2025). *Caudal Medio de Agua Tratada (Entrada) PTAR Salitre*

- CMAT - Cifras e Indicadores de Medio Ambiente en Bogotá.

<https://oab.ambientebogota.gov.co/caudal-medio-de-agua-tratada-entrada-ptar-salitre/>

- Pacheco, K. Y., Espinoza Rojas, W. I., Alhua Lozano, B. J., Cornejo Tueros, J. V., Pacheco, K. Y., Espinoza Rojas, W. I., Alhua Lozano, B. J., & Cornejo Tueros, J. V. (2024). Reingeniería y optimización de los procesos de la planta de tratamientos de aguas residuales “Doris Mendoza.” *Prohominum. Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 6(1), 134–150. <https://doi.org/10.47606/ACVEN/PH0233>
- Rockwell, A. (2025). *Controladores programables de PLC | Allen-Bradley*. <https://www.rockwellautomation.com/es-mx/products/hardware/allen-bradley/programmable-controllers.html>
- Rodriguez-Silva, D. C., Vargas-Figueredo, J. L., & Martinez-Baquero, J. E. (2024). Design of an Automated System for a Drinking Water Treatment Plant. *Visión Electrónica*, 18(2), 154–180. <https://doi.org/10.14483/ISSN.2248-4728>
- Saint-Gobain. (2023). *Principios, valores y objetivos de sostenibilidad en Saint-Gobain Glass*. <https://in.saint-gobain-glass.com/knowledge-center/sustainability>
- SAP. (2025). *Automatización de procesos: la clave para la eficiencia*. <https://www.sap.com/latinamerica/products/technology-platform/process-automation/what-is-process-automation.html>
- Serrano-Florez, D., Felipe Florez, W., & Chejne, F. (2024). *Optimización de un sistema de desalinización de agua por osmosis inversa (OI) en el departamento de La Guajira, Colombia*.
- Silva, J. (2024). Modelo para mejorar la gestión del suministro de agua potable para los habitantes de la Ciudad de México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 15(3), 391–422. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2024-03-09>

Velandia Zuluaga Javier Leandro. (2021). *Evaluación del almidón de maíz y trigo como coagulante-floculante para la remoción de turbiedad y color aparente en acueductos rurales*. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40641>

Vivienda, M. DE, & Territorio Informe De Rendición De Cuentas, C. Y. (2023). *INFORME DE RENDICIÓN DE CUENTAS 2023 Ministerio de Vivienda, Ciudad Y Territorio Del 1 de enero al 30 de septiembre de 2023*.