UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR, JOSÉ MIGUEL CARRERA
Ingeniería (E) en Control e Instrumentación Industrial

PROYECTO DE CONTROL Y MONITOREO DE PH EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero de Ejecución en CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:
Sebastian Leiva Villanueva

Profesor Guía:
Martín García Gutiérrez

Profesor Correferente:
Franz Yurjevic Perin

2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR, JOSÉ MIGUEL CARRERA
Ingeniería (E) en Control e Instrumentación Industrial

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: PROYECTO DE CONTROL Y MONITOREO DE PH EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

Nombre del candidato(a): Sebastian Ignacio Leiva Villanueva

Carrera / Grado: Ingeniería de ejecución en Control e Instrumentación Industrial

Campus: Viña del Mar **Departamento:** ___Electrotecnia e Informática ELINF_____

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, _____Martín García Gutiérrez _____, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: _____24 de octubre 2025_ **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: _____24 de Octubre 2025_ **Firma:**

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

ÍNDICE

índice 2
resumen 5
índice de ilustraciones 7
índice de tablas 8
siglas y simbología 9
introducción 1
capítulo 1: antecedentes generales 2
1 introducción al tratamiento de aguas servidas y el problema del ph 3
1.1 principio de funcionamiento de una ptas y la criticidad del ph 3
1.2 impacto de ph alterado 5
1.3 objetivos del proyecto 7
1.4 soluciones propuestas y justificación de la elección 7
1.5 comparativa de soluciones 9
1.6 justificación de la solución seleccionada 10
capítulo 2: diseño de propuesta de control y monitoreo de ph 12
2 diseño de la propuesta de ingeniería para el control y monitoreo de ph 13
2.1 arquitectura general del sistema 13
2.2 componentes clave del sistema 16
2.3 lógica de control del sistema (diagrama de flujo y pseudocódigo) 19
2.4 filosofía de control 21
2.5 consideraciones de diseño y seguridad 22
capítulo n°3: “evaluación económica del proyecto” 23
3 evaluación económica del proyecto 24
3.1 carta gantt del proyecto e impacto en costos de mano de obra 24
3.2 costo de materiales 26
3.3 costo de implementación (CAPEX) 27

3.4 evaluación financiera 28
3.5 metodología de evaluación financiera: VAN y TIR 31
3.6 análisis de flujo de caja por escenario 32
3.7 costos de no implementación 36
3.8 costos indirectos y tangibles/intangibles: 36
3.9 tabla resumen de costos 37
conclusión 38
bibliografía 40

RESUMEN

El presente proyecto de tesis aborda esta problemática fundamental. Su objetivo general es diseñar un sistema de control y monitoreo de pH para el agua cruda de ingreso de una PTAS, optimizando la neutralización, protegiendo la infraestructura y asegurando la calidad del agua para las etapas de tratamiento posteriores. Para lograrlo, la tesis se estructura en la descripción de la situación actual, el diseño de una propuesta de ingeniería robusta y una evaluación económica exhaustiva de la solución. Tras un análisis comparativo de diversas alternativas, se ha seleccionado el Sistema de Monitoreo Continuo, Alarma y Dosificación Automática del Producto Neutralizante (Solución A). Esta elección se justifica por su capacidad de respuesta inmediata y autónoma, su alta innovación tecnológica, la optimización del proceso biológico, su precisión en la dosificación y una seguridad operacional superior. Este documento detalla la implementación de esta solución avanzada, desde su arquitectura y componentes clave hasta la lógica de control, culminando en una profunda evaluación financiera que demuestra su viabilidad y rentabilidad

KEYWORDS:

- PTAS
- pH
- Neutralizante
- Componentes
- Evaluación
- Comunicación

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: “Esquema de Fases de una PTAS” 3
Ilustración 2-1: “Sistema de Recirculación de Lodos” 5
Ilustración 3-1: “Rango de pH y Ejemplos” 6
Ilustración 4-2: “Simbología de P&ID” 14
Ilustración 5-2: “P&ID original” 14
Ilustración 6-2: “P&ID con el Proyecto” 15
Ilustración 7-2: “Resumen de Componentes clave para el sistema” 19
Ilustración 8-2: “Esquema de Lógica de Control” 21
Ilustración 9-3: “Costo Horas-Hombre por cargo” 25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 “Comparativa de Soluciones”..... 10
Tabla 3.2 “Desglose de HH y Costo de Mano de Obra” 26
Tabla 3.3 “Materiales y costos” 27
Tabla 3.4: “Flujo de Caja evitando el 100% de multas”..... 33
Tabla 3.5 “Flujo de Caja evitando el 75% de Multas” 34
Tabla 3.6 “Caja de Flujo evitando el 50% de multas” 35
Tabla 3.7 “Comparativa de escenarios”..... 35
Tabla 3.8 “Resumen de Costos” 37

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLA	Descripción
CAPEX	Capital Expenditures (Gastos de Capital / Inversión).
D.S. N°90	Decreto Supremo N°90 (Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Cuerpos de Agua Superficiales y Subterráneos en Chile).
DI/DO	Digital Input / Digital Output (Entradas Digitales / Salidas Digitales).
EPPs	Elementos de Protección Personal.
FRP	Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforzado con Fibra)
HART	Highway Addressable Remote Transducer (Protocolo de comunicación digital sobre señal analógica 4-20mA).
HH	Horas-Hombre
HMI	Human-Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina)
OPEX	Operational Expenditures (Gastos Operativos)
PEM	Puesta en Marcha
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram (Diagrama de Tuberías e Instrumentación)
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable)
PTAS	Planta de Tratamiento de Aguas Servidas
PVC	Polyvinyl Chloride (Policloruro de Vinilo)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Control de Supervisión y Adquisición de Datos)
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
TIR	Tasa Interna de Retorno
TMAR	Tasa Mínima Aceptable de Retorno
UTA	Unidad Tributaria Anual (Unidad de medida económica utilizada en Chile para multas y sanciones)
VAN	Valor Actual Neto

Simbología	Descripción
pH	Potencial de Hidrógeno (medida de acidez o alcalinidad).
m^3	Metro cúbico (unidad de volumen)
l/h	Litros por hora (unidad de caudal)
ml/l	Mililitros por litro (unidad de concentración/dosificación)
mm^2	Milímetro cuadrado (unidad de sección de cable
°C	Grados Celsius (unidad de temperatura)
%	Porcentaje
~	Aproximado a (en valores numéricos)
>	Mayor que
<	Menor que
ΔpH	Cambio o diferencia de pH
∑	Sumatoria
t	Tiempo (en el contexto de años para flujos de caja)
(1 + i) t	Factor de descuento para el cálculo del valor presente de un flujo futuro
i	Tasa de descuento (TMAR)

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas servidas constituye un proceso esencial para la salud pública y la protección ambiental. En las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), la etapa biológica es crítica, y su operatividad depende de mantener condiciones estables. De los diversos parámetros, el pH del agua de ingreso es uno de los más sensibles. Una variación sostenida fuera de los rangos óptimos desequilibra el sistema, resultando en fallas operacionales y el consecuente incumplimiento de la normativa ambiental vigente.

La PTAS en estudio ha experimentado una inestabilidad recurrente y significativa del pH en el agua cruda, un hecho diagnosticado y cuantificado mediante el análisis de datos operativos registrados entre los años 2023 y 2024. Esta recurrencia ha derivado en sanciones regulatorias y ha impuesto la necesidad de realizar costosas intervenciones de vaciado e inoculación del reactor biológico (con un historial de 13 eventos en los últimos cinco años), lo cual representa un costo anual de no implementación de la solución que supera los 85 millones de pesos chilenos.

En respuesta a esta necesidad operativa y regulatoria, el presente trabajo de título se establece con el objetivo general de diseñar un sistema automático de control y monitoreo de pH para el agua cruda. Esta iniciativa busca optimizar el proceso de neutralización, proteger la infraestructura crítica de la planta y garantizar la calidad del agua para las etapas de tratamiento posteriores.

El trabajo de título se estructura en tres componentes principales: el diagnóstico de la situación actual y la justificación técnica; el desarrollo de una propuesta de ingeniería robusta; y la evaluación económica exhaustiva de la solución. Tras un análisis comparativo de diversas alternativas, se selecciona el Sistema de Monitoreo Continuo, Alarma y Dosificación Automática del Producto Neutralizante (Solución A). Dicha elección se fundamenta en su capacidad de respuesta inmediata y autónoma, su alta innovación tecnológica, la optimización demostrada del proceso biológico, la precisión en la dosificación y la maximización de la seguridad operacional. Este documento detalla la implementación de esta solución avanzada, desde su arquitectura y componentes clave hasta la lógica de control, culminando con una evaluación financiera que valida su viabilidad y excepcional rentabilidad, incluso bajo la consideración de escenarios conservadores de mitigación de riesgo.

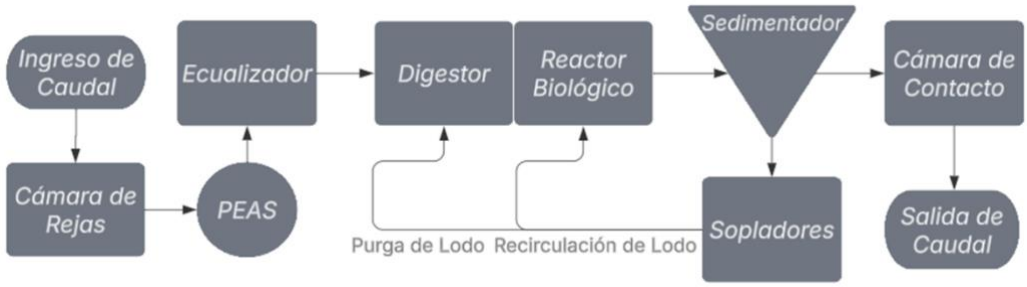
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1 INTRODUCCIÓN AL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS Y EL PROBLEMA DEL PH

El tratamiento de aguas servidas (PTAS) constituye un pilar fundamental en la protección del medio ambiente y la salud pública, asegurando la remoción de contaminantes antes de la descarga de los efluentes. En Chile, la regulación en esta materia es estricta, siendo el Decreto Supremo N°90 (D.S. N°90) la normativa clave que establece los límites máximos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Si bien este decreto se enfoca en los parámetros del agua a la salida del proceso de tratamiento, su cumplimiento es directamente dependiente de la estabilidad y eficiencia de las etapas internas de la PTAS.

1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PTAS Y LA CRITICIDAD DEL PH

Una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) opera mediante una secuencia de etapas diseñadas para remover progresivamente los contaminantes orgánicos e inorgánicos. A continuación, se presenta imagen con el trayecto que recorre el agua de ingreso de la planta (Afluente) y salida (Efluente):



Fuente: https://lucid.app/lucidchart/dcd7d349-8354-44af-bde2-0b15f70d0eac/edit?invitationId=inv_5decbe9e-3b91-4d47-89e2-aa70d0d064e9&page=0_0#

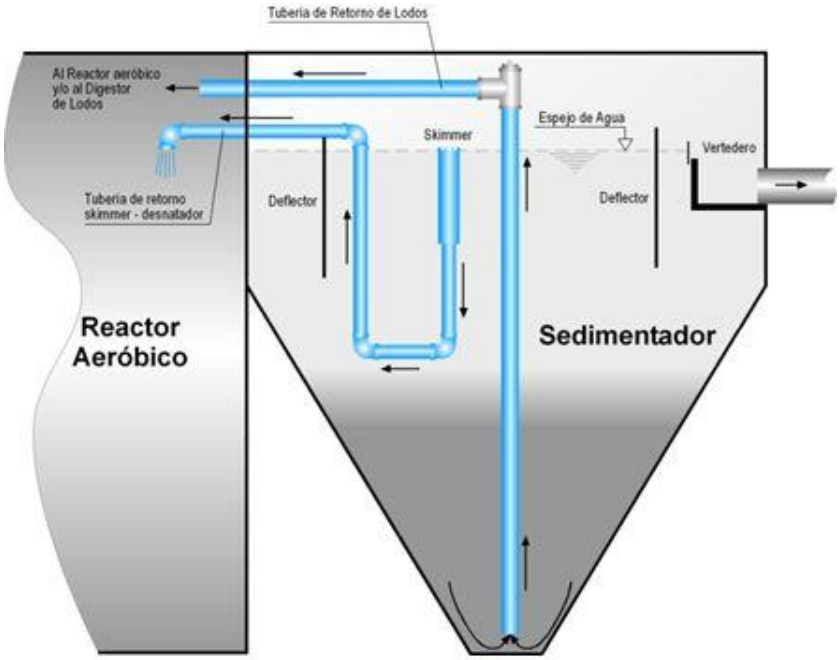
Ilustración 1-1: “Esquema de Fases de una PTAS”

- **Pretratamiento (Cámara de Rejas):** Remoción de sólidos gruesos (rejillas, desarenadores).

- **Tratamiento Primario (PEAS/Ecualizador):** Decantación de sólidos suspendidos y materia orgánica.

- **Tratamiento Secundario (Reactor Biológico):** Proceso fundamental donde microorganismos degradan la materia orgánica disuelta. Aquí se incluyen sistemas como lodos activados, filtros percoladores o reactores biológicos de membranas.

- **Recirculación:** Los sopladores, aparte de realizar la oxigenación del agua en Reactor Biológico, también incorpora un sistema llamado “Air Lift”. El sistema Air Lift funciona bajo el principio de la diferencia de densidades. Cuando se inyecta aire comprimido en la parte inferior del tubo sumergido, se forman burbujas de aire. Estas burbujas se mezclan con el líquido dentro del tubo, creando una mezcla de aire y líquido que es menos densa que el líquido circundante fuera del tubo. Debido a esta diferencia de densidad, la mezcla de aire y líquido asciende por el tubo, impulsando el líquido hacia arriba. Una vez que la mezcla llega a la parte superior y las burbujas de aire escapan, el líquido es liberado.



Fuente: https://es.linkedin.com/posts/aquarril_medioambiente-mantenimiento-ingenier%C3%ADa-activity-7038873948683436032-n9LT

Ilustración 2-1: “Sistema de Recirculación de Lodos”

- **Desinfección (cámara de contacto):** Eliminación de patógenos antes de la descarga, se utiliza hipoclorito de sodio al 10%.

1.2 IMPACTO DE PH ALTERADO

El tratamiento secundario o reactor biológico es la etapa más sensible a las variaciones de pH. Los microorganismos responsables de la biodegradación operan óptimamente dentro de rangos de pH específicos (entre 6 y 9, según D.S. 90). Un pH fuera de este rango puede:

- **Inhibir el crecimiento microbiano:** Reduciendo la capacidad de la PTAS para depurar el agua.

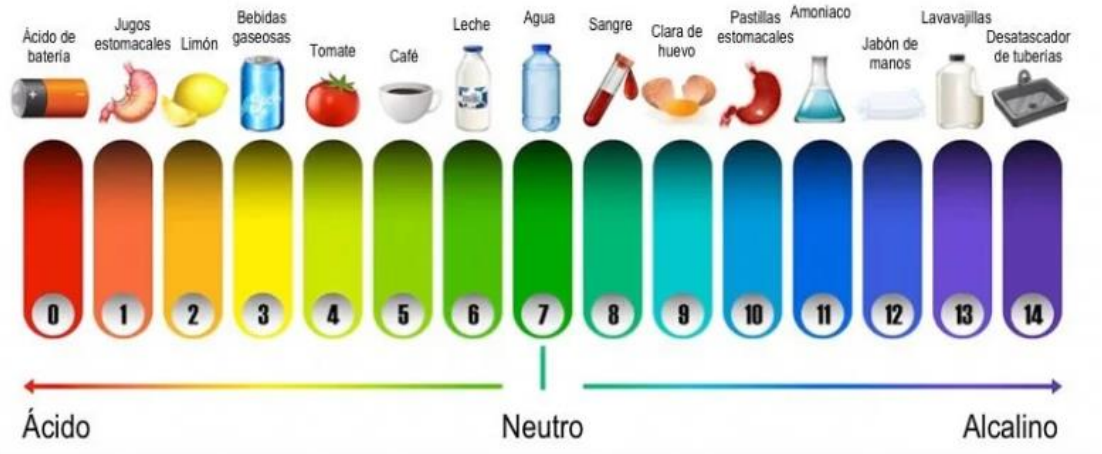
- **Modificar la solubilidad de sustancias:** Afectando la remoción de nutrientes o la precipitación de metales.

- **Generar gases tóxicos:** Como sulfuro de hidrógeno en condiciones ácidas.

- **Provocar corrosión:** Acelerando el deterioro de equipos y tuberías.

Por tanto, un control riguroso del pH en el agua cruda de ingreso es una medida preventiva esencial que impacta directamente la eficiencia y sostenibilidad de todo el proceso de tratamiento, garantizando que el agua a la salida cumpla con los exigentes parámetros del D.S. N°90.

A continuación, se presenta la Ilustración 3-1, la cual detalla la escala de pH. Esta escala es fundamental para la comprensión de la acidez o alcalinidad del agua, ya que sus valores, que abarcan desde 0 a 14, se utilizan para la clasificación. Adicionalmente, la ilustración proporciona ejemplos de sustancias comunes asociadas a cada rango para facilitar la contextualización.



Fuente: https://www.shutterstock.com/es/image-illustration/ph-scale-divided-0-14-acidic-2103403922?dd_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

Ilustración 3-1: “Rango de pH y Ejemplos”

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El presente proyecto de tesis busca abordar la necesidad crítica de un control efectivo del pH en las PTAS mediante el desarrollo de una solución de ingeniería robusta.

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de control y monitoreo de pH para el agua cruda de ingreso de una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS)

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Describir la situación actual de la PTAS en relación con las fluctuaciones de pH en el agua cruda de ingreso, identificando la recurrencia y el impacto potencial de dichas desviaciones.

2. Diseñar la propuesta de ingeniería para un sistema de control automático de pH, detallando los componentes de hardware y software, la lógica de control y los mecanismos de comunicación para su implementación en una PTAS.

3. Realizar una evaluación económica del proyecto de implementación, cuantificando los costos de inversión analizando su viabilidad mediante indicadores financieros.

1.4 SOLUCIONES PROPUESTAS Y JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN

Ante la problemática del pH desequilibrado en el ingreso a la PTAS, se han considerado diversas estrategias de monitoreo y control, evaluando sus ventajas y limitaciones. A continuación, se describen las tres soluciones principales consideradas:

1.4.1 Solución A

Sistema de monitoreo continuo, alarma y dosificación automática del producto neutralizante.

- **Descripción:** Esta solución implica la implementación de sensores de pH en línea, estos estarán montados después del flujómetro y el otro a la mitad del estanque utilizado como reactor biológico, estos van a monitorear constantemente el valor del pH. Al detectar una desviación fuera de un rango predefinido, el sistema activa automáticamente bombas dosificadoras que inyectan el producto neutralizante necesario. Incorpora un sistema de alarmas para notificar al personal sobre anomalías y un registro continuo de datos.

- **Ventajas clave:** Respuesta inmediata, alta precisión en la dosificación, minimización de la intervención humana, protección continua del proceso.

1.4.2 Solución B

Sistema de control automático con alarmas, supervisión remota y dosificación semiautomática de producto neutralizante.

- **Descripción:** Similar a la solución A en el monitoreo continuo y las alarmas, pero la dosificación del producto neutralizante no es completamente automática. El sistema detecta la desviación, activa una alarma y notifica al personal), quien debe intervenir para activar y ajustar manualmente las bombas dosificadoras.

- **Ventajas clave:** Monitoreo en tiempo real, notificación remota, menor costo inicial que la automática completa.

- **Desventajas:** Dependencia de la intervención humana para la corrección, potencial de retrasos en la respuesta y menor precisión en la dosificación.

1.4.3 Solución C:

Sistema de monitoreo continuo con registro de datos y dosificación manual de producto neutralizante.

- **Descripción:** Esta solución se basa en sensores de pH que registran datos de forma continua, los cuales pueden ser visualizados por el operador. Sin embargo, no hay automatización en la dosificación. La corrección de pH se realiza de forma completamente manual, es decir, el operador interpreta los datos y decide cuándo y cuánto neutralizante añadir.

- **Ventajas clave:** Bajo costo de inversión inicial.

- **Desventajas:** No ofrece una respuesta inmediata, alta dependencia del factor humano, mayor riesgo de errores en la dosificación, ineficiente para eventos súbitos y recurrentes de pH alterado.

1.5 COMPARATIVA DE SOLUCIONES

Para una mejor comprensión de las diferencias y el valor añadido de cada propuesta, se presenta la siguiente tabla comparativa, evaluando los criterios más relevantes en el contexto de este proyecto. La puntuación se asigna en una escala del 1 (mínimo) al 5 (máximo).

Tabla 1.1 “Comparativa de Soluciones”

Criterio de Evaluación	Solución A: Monitoreo, Alarma y Dosificación Automática	Solución B: Control Automático, Alarmas, Sup. Remota y Dosif. Semi-Automática	Solución C: Monitoreo, Registro y Dosificación Manual
Capacidad de Respuesta	(5) Inmediata y autónoma. Corrección en milisegundos, ideal para eventos súbitos y persistentes de pH elevado.	(3) Rápida detección, pero la corrección depende de la rapidez de la intervención humana.	(1) Lenta y reactiva. Basada en la revisión periódica y la acción diferida del operador.
Nivel de Innovación Tecnológica	(5) Muy Alto. Implementación de PLC avanzado, comunicación robusta (HART/Ethernet), algoritmos de control PID, y dosificación proporcional automática.	(3) Medio. Incluye tecnologías de monitoreo y comunicación remota, pero la ejecución de la acción es tradicional (manual).	(1) Básico. Utiliza instrumentación para monitoreo y registro, pero carece de elementos de automatización o control.
Beneficios para el Proceso	(5) Óptima estabilidad del pH. Máxima protección del proceso biológico, reducción drástica de descompensaciones y recuperación de costos asociados.	(3) Buena estabilidad, con riesgo de variaciones ante demoras o errores humanos en la dosificación.	(1) Limitada estabilidad. El proceso biológico queda expuesto a variaciones significativas.
Precisión de la Dosificación	(5) Excelente. Dosificación calculada dinámicamente en tiempo real (0.1 ml/L/punto de pH), optimizando el uso de químicos.	(2) Variable. Sujeta a la interpretación y ajuste manual por parte del operador.	(1) Baja. Muy susceptible a la subjetividad y el error humano.
Seguridad Operacional	(4) Alta. Menor exposición del personal a químicos, alarmas y bloqueos automáticos, previniendo situaciones de riesgo.	(3) Media. Se mantiene la manipulación de químicos en la dosificación, lo que implica riesgo residual.	(2) Baja. Mayor exposición al manejo de químicos y riesgos por fluctuaciones no controladas.
Requerimiento de Mano de Obra	(5) Mínimo. Enfocado en supervisión, mantenimiento preventivo y calibración.	(3) Moderado. Requiere intervención directa y continua de operadores para la dosificación.	(1) Alto. Necesita personal constante para monitoreo, registro y dosificación.
Puntuación Total (Suma de Puntos)	29	17	7
Conclusión	Solución Principal y Recomendada	Solución Intermedia con limitaciones	Solución Básica con altos riesgos

1.6 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN SELECCIONADA

Con base en la problemática diagnosticada en la PTAS y la evaluación comparativa de las alternativas, se selecciona como solución principal y objeto de diseño de este trabajo de título es el sistema de monitoreo continuo, alarma y dosificación automática del producto neutralizante (Solución A).

Esta decisión se fundamenta en su capacidad superior de respuesta inmediata y autónoma a las fluctuaciones de pH, lo cual es crítico dado los 33 eventos de pH anormal documentados en la PTAS de estudio, especialmente aquellos de pH elevado. La alta innovación tecnológica de esta solución, al integrar un control lógico programable y algoritmos de dosificación precisos, garantiza una estabilidad óptima del proceso biológico y la protección continua de la infraestructura. Esta opción, al minimizar la dependencia de la intervención humana, ofrece la mayor precisión en la dosificación y un

nivel de seguridad operacional significativamente superior, siendo la alternativa más robusta y eficiente para asegurar el cumplimiento del D.S. N°90 y la eficiencia general de la PTAS

CAPÍTULO 2: DISEÑO DE PROPUESTA DE CONTROL Y MONITOREO DE PH

2 DISEÑO DE LA PROPUESTA DE INGENIERÍA PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE PH

Este capítulo detalla el diseño conceptual y específico del sistema de control y monitoreo de pH propuesto para la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS). Se abordarán la arquitectura del sistema, los componentes clave seleccionados, la lógica de control desarrollada y los mecanismos de comunicación, los cuales están orientados a resolver la problemática de las fluctuaciones de pH en el agua cruda de ingreso, especialmente los eventos de pH elevado, garantizando la estabilidad operativa y el cumplimiento normativo.

2.1 ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA

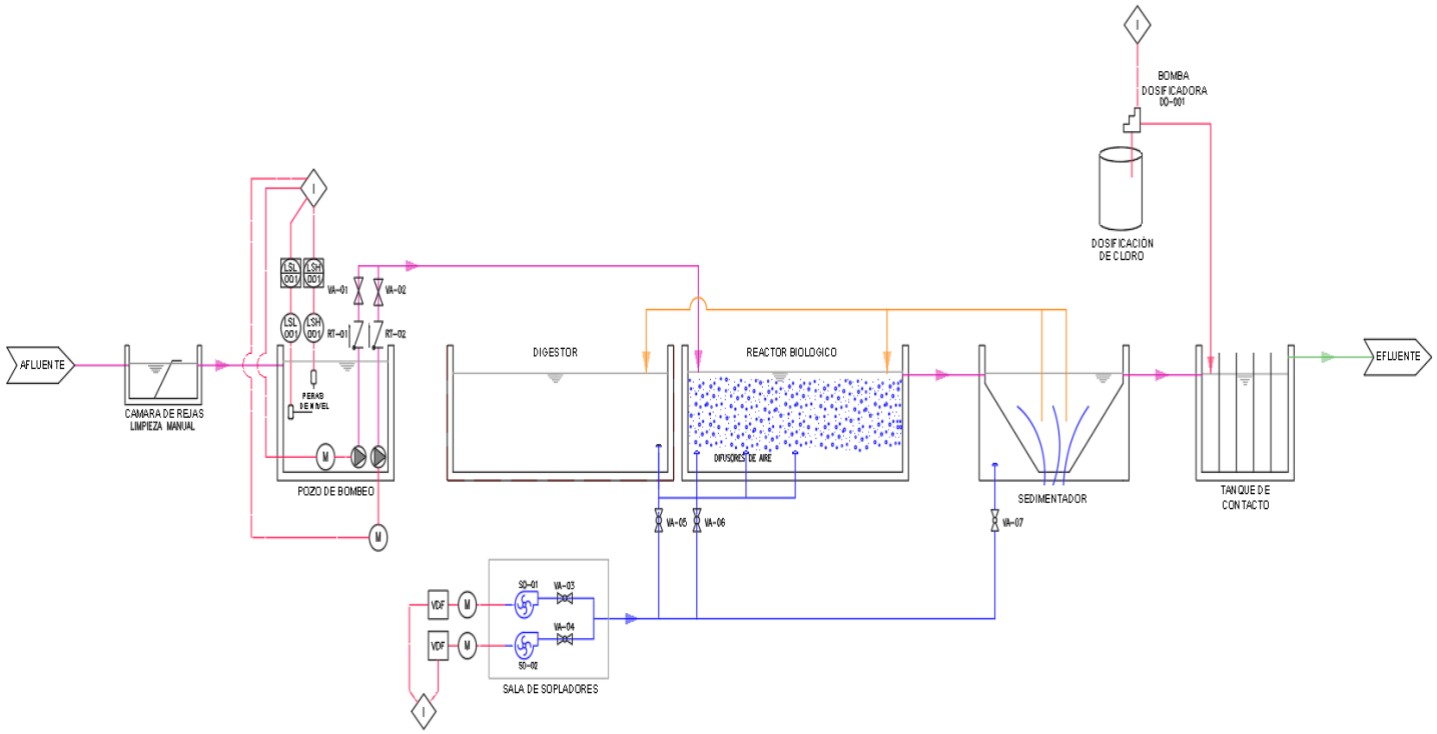
El sistema propuesto se basa en una arquitectura de control distribuido con capacidad de monitoreo y acción automatizada. Su diseño se estructura en capas, desde la instrumentación de campo hasta la interfaz de usuario, para asegurar una operación eficiente y robusta.

2.1.1 Diagramas de tuberías e instrumentación (P&Id)

Para una comprensión detallada de la integración del sistema de control y monitoreo de pH propuesto en la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), esta sección presenta los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID). En primer lugar, se muestra el P&ID que representa la configuración actual de la PTAS (Figura 2.2), ofreciendo una base para identificar los puntos de conexión e interacción del nuevo sistema. Seguidamente, se presenta el P&ID modificado (Figura 2.3), el cual incorpora la instrumentación y los equipos necesarios para la implementación del sistema de control y monitoreo de pH diseñado en esta tesis. Para facilitar la interpretación de ambos diagramas, se incluye la simbología estándar utilizada en los P&ID (Figura 2.1), permitiendo al lector identificar cada uno de los elementos representados, desde tuberías y válvulas hasta instrumentos y equipos de control.

Fuente: Plano P&ID de PTAS

Ilustración 4-2: “Simbología de P&ID”

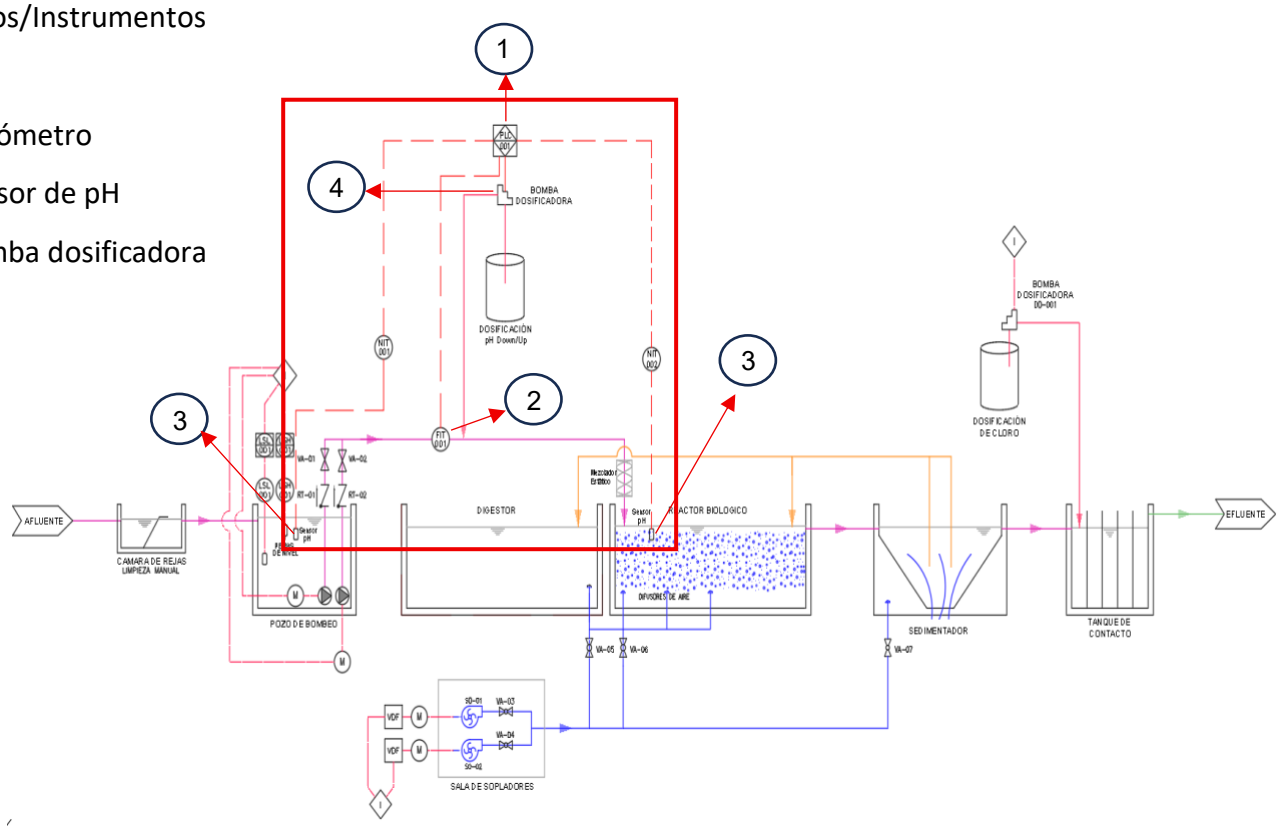


Fuente: Plano P&ID de PTAS

Ilustración 5-2: “P&ID original”

Equipos/Instrumentos

1. PLC
2. Flujómetro
3. Sensor de pH
4. Bomba dosificadora



Fuente: Plano P&ID de PTAS

Ilustración 6-2: “P&ID con el Proyecto”

2.1.2 Explicación del diagrama

El diagrama adjunto ilustra la arquitectura operativa del sistema de control y monitoreo de pH propuesto, diseñado para ser implementado en la PTAS. Se observa que el agua cruda de ingreso, proveniente del ecualizador, es impulsada por dos bombas sumergibles (accionadas por un sensor de nivel tipo pera) a través de una tubería de 2 pulgadas hacia el reactor biológico. En esta línea, el agua transita por una sección donde es objeto de medición continua de su caudal mediante un flujómetro existente, y posteriormente, su pH a través de un nuevo sensor de pH que será instalado aguas abajo del flujómetro.

Ante la detección de un pH fuera del rango óptimo, el sistema activa las bombas dosificadoras, las cuales inyectan el producto neutralizante directamente en esta misma tubería de 2 pulgadas. Este neutralizante es rápida y eficientemente homogeneizado con el agua cruda gracias a la acción de un mezclador estático estratégicamente ubicado. La totalidad de este proceso es orquestada por un controlador lógico programable (PLC), encargado de procesar las señales recibidas de los sensores y de emitir los comandos precisos a los elementos de actuación. Finalmente, la interacción y supervisión por parte

del operador se realiza a través de una interfaz hombre-máquina (HMI), que proporciona una visión clara y en tiempo real del estado del sistema

2.2 COMPONENTES CLAVE DEL SISTEMA

La selección de los componentes se realizó considerando la robustez, precisión, confiabilidad y compatibilidad para ambientes industriales como una PTAS.

2.2.1 Instrumentación de campo

2.2.1.1 Sensor de pH en línea

- **Función:** Mide continuamente el pH del agua cruda.

- **Características Técnicas:** Sensor de tipo combinado con electrodo de vidrio y referencia, montado en una carcasa robusta para inmersión o inserción directa en la tubería. Rango de medición de pH 0-14. Salida de señal 4-20mA/HART para compatibilidad con el PLC y capacidad de diagnóstico avanzado. Se recomienda un sensor con limpieza automática (ej. neumática o mecánica) para reducir el mantenimiento.

- **Ubicación:** Pre-mezclador estático, en una sección donde el flujo sea representativo del agua cruda.

2.2.1.2 Flujómetro

- **Función:** Mide el caudal de agua cruda que ingresa al sistema de control de pH. Es crucial para el cálculo de la dosificación proporcional.

- **Características técnicas:** Tipo electromagnético (preferible para aguas servidas por su tolerancia a sólidos y bajo mantenimiento). Rango de caudal acorde al diseño de la PTAS. Salida de señal 4-20mA/HART.

- **Ubicación:** En la línea principal de agua cruda, aguas arriba del punto de inyección de neutralizante.

2.2.1.3 Sensor de nivel para tanque de neutralizante

- **Función:** Monitorea el nivel del producto neutralizante en el tanque de almacenamiento.

- **Características Técnicas:** Tipo ultrasónico o radar (preferible para evitar contacto con el químico). Salida de señal 4-20mA.

- **Ubicación:** Parte superior del tanque de almacenamiento.

2.2.2 Elementos de actuación

2.2.2.1 Bombas dosificadoras (bomba 1 y bomba 2):

- **Función:** Inyectan el producto neutralizante (ácido o base, según la corrección requerida para pH elevado, probablemente un ácido como sulfúrico o clorhídrico) en la línea de agua cruda.

- **Características Técnicas:** Bombas de diafragma o peristálticas, diseñadas para químicos corrosivos. Capacidad de caudal variable y controlable (ej., 0-100 L/h) mediante señal de 4-20mA desde el PLC. La inclusión de una segunda bomba permite redundancia y/o mayor capacidad de dosificación ante picos de pH.

- **Ubicación:** Conectadas al tanque de neutralizante, con puntos de inyección en la línea de agua cruda.

2.2.2.2 Mezclador estático

- **Función:** Asegura una mezcla rápida y homogénea del producto neutralizante con el agua cruda antes de que el agua continúe hacia las etapas de tratamiento.

- **Características Técnicas:** Fabricado en material resistente a la corrosión (PVC, CPVC o FRP). Diseñado para el caudal máximo de la línea, garantizando turbulencia para una mezcla eficiente sin partes móviles.

- **Ubicación:** Inmediatamente después del punto de inyección del neutralizante.

2.2.3 Sistema de control y comunicación

2.2.3.1 Controlador lógico programable (plc)

- **Función:** Es el "cerebro" del sistema. Recibe todas las señales de los sensores, ejecuta la lógica de control programada y envía comandos a las bombas dosificadoras.

- **Características Técnicas:** PLC industrial robusto (Siemens S7-1200). Con módulos de entradas/salidas analógicas (AI/AO) para 4-20mA, y entradas/salidas digitales (DI/DO) para alarmas y control de bombas ON/OFF. Puerto Ethernet para comunicación con la HMI.

- **Ubicación:** Dentro de un tablero de control NEMA 4X (resistente a ambientes hostiles), ubicado cerca del proceso.

2.2.3.2 Interfaz hombre-máquina (hmi)

- **Función:** Permite al operador visualizar el estado del sistema, los valores de pH y caudal en tiempo real, tendencias, alarmas y modos de operación. También permite la interacción (ej., cambiar entre modo automático/semiautomático).

- **Características Técnicas:** Pantalla táctil industrial (ej., Siemens KTP, Rockwell PanelView Plus). Conexión Ethernet al PLC.

- **Ubicación:** En el tablero de control local o en una sala de control centralizada.

2.2.4 Comunicación:

- **Entre Instrumentos y PLC:** Señal estándar industrial 4-20mA para la mayoría de los sensores y actuadores. Los instrumentos más avanzados como el sensor de pH y el flujómetro pueden utilizar protocolo HART sobre la señal 4-20mA para acceso a información de diagnóstico y configuración remota.

- **Entre PLC y HMI:** Comunicación Ethernet (ej., Modbus TCP/IP, Profinet) para intercambio de datos de proceso y control bidireccional, garantizando alta velocidad y fiabilidad.

A continuación, se presenta tabla resumen de

- **Alarmas:** Salidas digitales del PLC conectadas a luces estroboscópicas, bocinas y/o envío de alertas a un SCADA o sistema de gestión de alarmas existente en la PTAS.

A continuación, se presenta resumen de dispositivos a utilizar, tipo de comunicación, rango de operación, etc.

Equipo / Instrumento	Descripción	Tipo de Comunicación	Tipo de Variable	Rangos de Operación	Cantidad
Bomba Dosificadora	Bomba dosificadora electromagnética Operación Manual / Automática	Hart (4 20 mA)	AO	0 - 10 l/h	2
Sensor de pH	Transmisor de nivel sumergible	Hart (4 20 mA)	AI	0 - 14 pH	2
Flujómetro	Flujómetro electromagnéticos Siemens SITRANS FM MAG 3100	Hart (4 20 mA)	AI	0 - 20 m3/h	1
Sensor de Nivel	interruptor de flotador, utiliza un contacto eléctrico para comunicar el nivel del líquido.	Contacto eléctrico	DI	Se instalarán al 10% de la capacidad del estanque de químicos	2
Mezclador Estático	Dispositivo diseñado que aplican el principio de mezcla laminar mediante un diseño helicoidal	N/A	N/A	3.5 - 20 m3/h	1
PLC	Siemnes Sinamic s7 - 1200 con 8 DI / 6 DO / 2 AI	Hart (4 20 mA) / Profinet	N/A	N/A	1
Extensión de PLC	Siemens Sinamic s7-1200 analog I/O SM 1234, 4 AI / 2 AO	Hart (4 20 mA)	N/A	N/A	1
HMI	Pantalla STN de 6" con 4 niveles de grises y una resolución de 320 x 240 píxeles.	Profinet	N/A	N/A	1

Ilustración 7-2: “Resumen de Componentes clave para el sistema”

2.3 LÓGICA DE CONTROL DEL SISTEMA (DIAGRAMA DE FLUJO Y PSEUDOCÓDIGO)

La lógica de control es el corazón del sistema automático, garantizando una respuesta eficiente y segura a las variaciones de pH. El sistema operará en dos modos principales: automático y semiautomático.

2.3.1 Rango objetivo de ph y límites de alarma

- **Rango de operación óptimo de pH:** 7.0 - 7.5
- **Límite superior de alarma (pH Alto):** pH > 8.8
- **Límite inferior de alarma (pH Bajo - aunque el foco sea pH alto, es crucial tenerlo):** pH < 6.2

2.3.2 Modos de operación

- **Modo automático:** El sistema gestiona la dosificación de neutralizante de forma autónoma.
- **Modo semiautomático:** El sistema monitorea y alerta, pero la activación y dosificación de las bombas es iniciada y controlada manualmente por el operador.

2.3.3 Lógica de dosificación automática (para pH elevado)

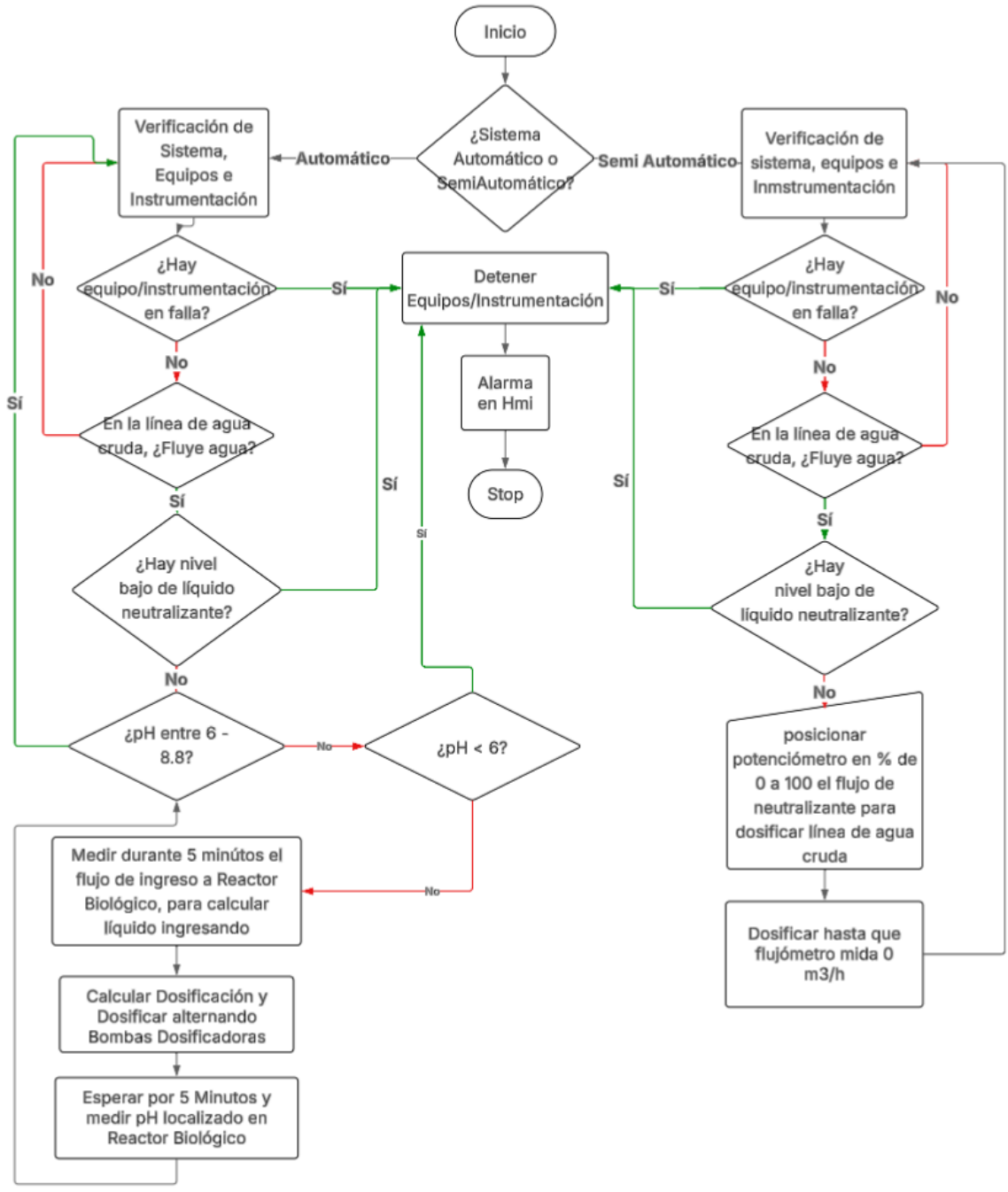
La dosificación se basa en una relación proporcional al caudal de agua cruda y la magnitud de la desviación del pH.

- **Principio:** El caudal de neutralizante a inyectar es proporcional al caudal de agua cruda y a la diferencia entre el pH medido y el pH objetivo.

- **Relación Clave:** Se utilizará la relación de 0.1 ml de líquido neutralizante por litro de agua cruda para bajar 1 unidad de pH. Esta relación es especificada por el fabricante.

2.4 FILOSOFÍA DE CONTROL

A continuación, se presenta lógica de control del proyecto, diseñada en esquema para su mejor comprensión:



Fuente: https://lucid.app/lucidchart/9b44af0e-f4b3-4985-9632-967e11b8eff0/edit?page=0_0&invitationId=inv_2efdff1c-ab2e-4d8b-ac94-24dddf8ccb05#

Ilustración 8-2: "Esquema de Lógica de Control"

2.5 CONSIDERACIONES DE DISEÑO Y SEGURIDAD

- **Robustez del sistema:** Todos los componentes se seleccionan para operar en las condiciones exigentes de una PTAS (humedad, vibraciones, exposición a químicos).

- **Calibración y mantenimiento:** El sistema incorporará facilidades para la calibración periódica de los sensores de pH y caudal, esencial para mantener la precisión.

- **Redundancia:** La inclusión de dos bombas dosificadoras proporciona redundancia, asegurando la continuidad del servicio en caso de falla de una de ellas o permitiendo un mayor rango de dosificación.

- **Bloqueos de seguridad (Interlocks):** Implementación de lógica en el PLC para evitar dosificación si el flujómetro detecta caudal cero (para evitar sobre-dosificación en tuberías estancadas) o si el nivel de neutralizante es críticamente bajo.

- **Modo de fallo seguro:** El sistema debe diseñarse para que, ante una falla crítica (ej., falla de sensor, baja de energía), las bombas dosificadoras se detengan, evitando una dosificación incontrolada.

- **Protección de equipos:** La estabilización del pH protege las tuberías y equipos aguas abajo de la inyección de químicos, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento correctivo.

CAPÍTULO N°3: “EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO”

3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

El presente capítulo aborda la evaluación económica exhaustiva del proyecto de implementación de un sistema de control y monitoreo de pH en la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS). El objetivo primordial de esta sección es determinar la viabilidad financiera y la rentabilidad de la inversión propuesta, proporcionando un sustento cuantitativo para la toma de decisiones. Se analizarán los costos de inversión (CAPEX), los beneficios y costos operativos anuales (OPEX), y se emplearán indicadores financieros clave como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Para ofrecer una visión robusta, la evaluación se realizará bajo tres escenarios distintos de efectividad en la evitación de multas.

3.1 CARTA GANTT DEL PROYECTO E IMPACTO EN COSTOS DE MANO DE OBRA

El cronograma de implementación del proyecto se ha planificado para ejecutarse durante el mes de septiembre de 2025, abarcando 22 días hábiles. Esta planificación considera una semana inicial dedicada a las capacitaciones esenciales en seguridad y procedimientos para el personal involucrado (que incluyen "Hombre Nuevo", Interacción con Energía Eléctrica, Interacción con Energía Hidráulica, Curso de Bloqueo, Trabajo en Altura, Presentación del Proyecto, Difusión de Procedimientos, Entrega de EPPs y Herramientas). Adicionalmente, se ha asignado una semana final para las pruebas de funcionamiento y la Puesta en Marcha (PEM) del sistema. Esta distribución de tiempo busca asegurar una implementación gradual y robusta, minimizando los riesgos operacionales.

La jornada laboral estimada es de 12 horas diarias. El equipo de trabajo se compone de un Especialista Eléctrico/Instrumentista, un Ayudante y un Prevencionista de Riesgos. Los costos promedio por hora-hombre (HH) utilizados para esta estimación corresponden a valores de mercado en Chile a junio de 2025.

Además, se agregarán las horas del especialista que desarrolla la ingeniería de detalles

Rol Profesional	Horas-Hombre (HH)	Costo Promedio (CLP/HH)	Costo Total
Especialista Eléctrico/Instrumentista	226	$ 22.000	$ 4.972.000
Ayudante	206	$ 10.000	$ 2.060.000
Prevencionista de Riesgos	226	$ 18.000	$ 4.068.000
Especialista Ingeniería de Detalle	136	$ 22.000	$ 3.000.000
Total Costo Mano de Obra	658		$ 14.100.000

https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/mercado-laboral/remuneraciones-y-costos-laborales

Ilustración 9-3: “Costo Horas-Hombre por cargo”

3.1.1 Desglose de tareas, horas-hombre y costos

Considerando la duración total del proyecto de 22 días hábiles y una jornada de 11 horas, cada rol tendría un máximo de 22 [días] × 11 [HH/día] = 242 [HH] asignables. A continuación, se presenta la distribución detallada de las horas y los costos asociados a la mano de obra.

Tabla 3.1 “Desglose de HH y Costo de Mano de Obra”

ID	Tarea del Proyecto	HH Especialista	HH Ayudante	HH Prevencionista	Costo Estimado
Semana 1					
1,1	Cursos y Capacitaciones	11	11	11	$ 550.000
1,2	Revisión de Planos y Permisos	15	15	15	$ 750.000
1,3	Preparación del Área de Trabajo	25	25	25	$ 1.250.000
1,4	Ingeniería de Detalle	55	-	-	$ 1.210.000
	Subtotal Semana 1	106	51	51	$ 5.190.000
Semana 2					
2,1	Montaje de Tablero de Control	20	20	20	$ 1.000.000
2,2	Instalación de Flujómetro y Mezclador	20	20	20	$ 1.000.000
2,3	Ingeniería de Detalle	55	-	-	$ 1.210.000
	Subtotal Semana 2	95	40	40	$ 2.360.000
Semana 3					
3,1	Instalación de Sensor de pH	15	15	15	$ 750.000
3,2	Instalación de Sensor de Nivel	15	15	15	$ 750.000
3,3	Tendido de Tuberías y Accesorios (Dosif.)	10	10	10	$ 500.000
3,4	Ingeniería de Proyecto	26			$ 58.000
	Subtotal Semana 3	66	40	40	$ 2.000.000
Semana 4					
4,1	Conexión Eléctrica e Instrumentación	20	20	20	$ 1.000.000
4,2	Programación de PLC	20	20	20	$ 800.000
	Subtotal Semana 4	40	20	40	$ 1.800.000
Semana 5					
5,1	Calibración de Instrumentos	15	15	15	$ 750.000
5,2	Pruebas de Lógica de Control	15	15	15	$ 750.000
5,3	Puesta en Marcha y Ajustes Finales (PEM)	25	25	25	$ 1.250.000
	Subtotal Semana 5	55	55	55	$ 2.750.000
TOTALES DEL PROYECTO		362	226	226	$ 14.100.000

3.2 COSTO DE MATERIALES

A continuación, se presenta en una tabla, el detalle de lo que se utilizará en el proyecto, considerando instrumentación y ferretería necesaria.

Tabla 3.2 “Materiales y costos”

Categoría	Componente / Concepto	Cantidad	Costo Unitario (CLP)	Costo Total (CLP)
Instrumentación de Campo				
	Sensor de pH en línea	2	$ 600.000	$ 1.200.000
	Flujómetro	1	$ 3.500.000	$ 3.500.000
	Sensor de Nivel para Tanque de Neutralizante	2	$ 22.500	$ 45.000
Elementos de Actuación				
	Bombas Dosificadoras (c/ Estanque y Tubing)	2	$ 800.000	$ 1.600.000
	Mezclador Estático	1	$ 850.000	$ 850.000
Sistema de Control				
	PLC	1	$ 400.000	$ 400.000
	Módulos de Entradas/Salidas (E/S) PLC	-	$ 300.000	$ 300.000
	HMI	1	$ 500.000	$ 500.000
	Tablero de Control (NEMA 4X + Internos)	1	$ 2.000.000	$ 2.000.000
Materiales de Instalación				
	Cables de Instrumentación (1PAR x 1.5mm² LF)	20 m	$ 2.000	$ 40.000
	Cable de Fuerza (3x4mm²)	40 m	$ 3.000	$ 120.000
	Cable de Fuerza (3x2.5mm²)	30 m	$ 1.500	$ 45.000
	Canalización PVC (3m por tramo)	39 m	$ 5.000	$ 65.000
	Coplas para Canalización	30 unid.	$ 1.000	$ 30.000
	Cajas de Derivación Galvanizadas	5 unid.	$ 2.000	$ 10.000
	Terminales	10 unid.	$ 500	$ 5.000
	Abrazaderas Caddys	40 unid.	$ 500	$ 20.000
	Tornillos Autoperforantes	100 unid.	$ 60	$ 6.000
Total				$ 10.736.000

3.3 COSTO DE IMPLEMENTACIÓN (CAPEX)

La inversión inicial, o Capital Expenditure (CAPEX), representa el desembolso total requerido para la adquisición de los equipos, materiales, la contratación de mano de obra y los servicios de ingeniería necesarios para la puesta en marcha del sistema. Los componentes detallados de esta inversión son los siguientes:

- **Costo de Mano de Obra:** Este ítem comprende los salarios y beneficios asociados al personal involucrado directamente en la instalación y montaje del sistema. Se estima un costo de $14.100.000.

- **Costo de Equipos y Materiales:** Incluye la adquisición de todos los componentes tecnológicos y de infraestructura, tales como sensores de pH, bombas dosificadoras, PLC, HMI, tuberías, válvulas y otros materiales necesarios para la integración del sistema. Se valora en $10.736.000.

- **Costo de Ingeniería de Detalles:** Este componente cubre los servicios profesionales requeridos para el diseño detallado, la elaboración de planos específicos, la programación del PLC y la configuración del sistema, asegurando una implementación precisa y optimizada. Se establece en $3.000.000 La inversión inicial total (CAPEX) será de $27.836.000

Nota sobre el Flujómetro: Se ha incluido el costo del flujómetro de $3.500.000. Si bien existe un flujómetro en la planta, este monto contempla la posible inversión en su adecuación o recalibración específica para su plena integración y precisión en el nuevo sistema de control automático. Si no se requiere ninguna inversión adicional en el flujómetro existente, este valor se ajustará a cero en un análisis final.

Nota Sobre los Valores: Todas las cotizaciones se hicieron a través de la empresa RESITER S.A. por lo que no se pueden exponer en este documento debido a las políticas de confidencialidad.

3.4 EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera del proyecto se llevará a cabo para un horizonte de 5 años, utilizando el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) como los principales indicadores para determinar la rentabilidad y la viabilidad económica de la inversión.

3.4.1 TASA DE DESCUENTO (TMAR)

Dado que no se ha proporcionado una TMAR específica para la PTAS, se ha adoptado una tasa de referencia estándar para proyectos de inversión industrial en Chile. Para este análisis, se considerará una Tasa Mínima Aceptable de Retorno (TMAR) del 10% anual. Este valor es representativo del costo de oportunidad del capital y la rentabilidad mínima exigida a la inversión por parte de la empresa.

3.4.2 BENEFICIOS ANUALES DEL PROYECTO

Los beneficios anuales del proyecto se derivan principalmente de los ahorros cuantificables generados por la evitación de multas y la reducción de intervenciones mayores en el reactor biológico. Para una estimación precisa, se ha considerado el historial de eventos de los últimos cinco años.ormato

3.4.2.1 Ahorro por reducción de multas

La ausencia de un sistema de control de pH ha resultado en sanciones recurrentes por parte de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). El proyecto busca eliminar o reducir drásticamente estas multas.

- **Historial de multas:** En los últimos cinco años, la PTAS ha recibido un total de 6 multas por incumplimiento de los parámetros de pH.

- **Promedio anual de multas:** Esto se traduce en un promedio de 6/5 [multas/años] = 1,2 [multas/año].

- **Valor unitario de multa:** Cada multa se valora en 1000 Unidades Tributarias Mensuales (UTM). Tomando como referencia la UTM proyectada para julio de 2025, cuyo valor es de $68.923 (Banco Central de Chile), el costo de una multa es de $68.923.000

El ahorro anual total proyectado por multas evitadas (en un escenario del 100% de efectividad) es:

Ahorro en Multas 1.2 [multas/año] × 1000 [UTM/multa] × $68.923 [UTM] = $82.707.600

3.4.2.2 Ahorro por eliminación de vaciado e inoculación del reactor biológico

Las desviaciones críticas de pH comprometen la estabilidad del proceso biológico, a menudo requiriendo costosas intervenciones de recuperación, incluyendo el vaciado y la inoculación del reactor.

- **Historial de Inoculaciones:** En los últimos cinco años, la PTAS ha incurrido en 13 eventos de inoculación del reactor biológico debido a problemas de pH.

- **Promedio Anual de Inoculaciones:** Esto representa un promedio de 13 / 5 [Inoculaciones/Años]= 2,6 [inoculaciones/año]

- **Costo por Evento de Inoculación:** Como se detalló en secciones previas, cada evento de vaciado y posterior inoculación del reactor biológico tiene un costo asociado de $990.000 (incluyendo retiro de lodos, transporte, horas-hombre de operación de equipos especializados, etc.).

El ahorro anual total proyectado por inoculaciones evitadas es:

Ahorro en Inoculaciones = 2.6 [eventos/año] × $990.000 [$/evento] = $2.574.000 [$/año]

3.4.2.3 Beneficio anual total cuantificable

Sumando ambos componentes de ahorro, el beneficio anual total cuantificable del proyecto (bajo el escenario del 100% de efectividad en multas) asciende a:

Beneficio Total

Multas: $82.707.600

Inoculaciones: $2.574.000

Total: $85.281.600 [$/año]

3.4.3 COSTOS OPERATIVOS ANUALES (OPEX) DEL NUEVO SISTEMA

Los Costos Operativos Anuales (OPEX) son los gastos recurrentes necesarios para mantener el sistema de control de pH en funcionamiento. Estos costos han sido estimados con base en el consumo de energía, mantenimiento y uso de insumos.

- **Energía Eléctrica:** Consumo de PLC, HMI y bombas dosificadoras $300.000.
- **Mantenimiento realizado por personal (Bono por Mantenimiento):** Incentivo a operadores por tareas de mantenimiento y supervisión del nuevo sistema. $2.400.000.
- **Mantenimiento preventivo (Stock de Repuestos):** Presupuesto anual para repuestos y actividades de mantenimiento preventivo $289.750.
- **Consumo de neutralizante:** Costo del agente químico necesario para la corrección de pH en los 33 eventos anuales proyectados $12.144.000.

El OPEX Total Anual del nuevo sistema es:

OPEX Total = $300.000 + $2.400.000 + $289.750 + $12.144.000 = $15.133.750

3.5 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN FINANCIERA: VAN Y TIR

La evaluación económica se llevó a cabo para un horizonte de proyecto de cinco años, utilizando como criterios de decisión el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). La Tasa Mínima Aceptable de Retorno (TMAR) utilizada como tasa de descuento para el VAN es del 10% anual, representando el costo de oportunidad del capital para la PTAS.

El VAN se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{VAN} = -\text{Capex Total} + \sum_{t=1}^{n} \frac{FCNt}{(1+TMAR)^t}$$

Donde:

- FCNt: Flujo de Caja Neto en el período t.
- TMAR: Tasa Mínima Aceptable de Retorno.
- n: Horizonte del proyecto (5 años).

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN del proyecto sea igual a cero. Un proyecto es viable si su TIR es mayor que la TMAR.

3.6 ANÁLISIS DE FLUJO DE CAJA POR ESCENARIO

Para proporcionar una evaluación robusta, se han desarrollado tres escenarios de flujo de caja, diferenciados por la efectividad del proyecto en la evitación de multas.

3.6.1 ESCENARIO 1: EL PROYECTO EVITA EL 100% DE LAS MULTAS

Este escenario optimista asume que la implementación del sistema elimina por completo el riesgo de multas de la SMA y la necesidad de inoculaciones.

- **Beneficio Anual Cuantificable:** $85.281.600 (Ahorro total de multas e inoculaciones).

- **Flujo de Caja Neto Anual:**

Beneficios: $85.281.600

OPEX: $15.133.750

Total: $70.147.850

- Flujo de Caja Detallado (100% de Multas Evitadas)

Tabla 3.3: “Flujo de Caja evitando el 100% de multas”

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión Inicial (CAPEX)	$-27.836.000	$0	$0	$0	$0	$0
Beneficios Anuales	$0	$85.281.600	$85.281.600	$85.281.600	$85.281.600	$85.281.600
Costo Operativo Anual (OPEX)	$0	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750
Flujo de Caja Neto	$-27.836.000	$70.147.850	$70.147.850	$70.147.850	$70.147.850	$70.147.850
VAN (TMAR 10%)	$238.163.784 CLP					
TIR	249%					

3.6.2 ESCENARIO 2: EL PROYECTO EVITA EL 75% DE LAS MULTAS

Este escenario presenta una visión más conservadora, asumiendo que el proyecto logra mitigar el 75% de las multas, mientras que sigue eliminando el 100% de las inoculaciones.

- **Ahorro por Multas (75%):** $82.707.600 x 0.75 = $62.030.700

- **Beneficio Anual Cuantificable:**

Ahorro Multas: $62.030.700

Ahorro Inoculaciones: $2.574.000

Total: $64.604.700

- **Flujo de Caja Neto Anual:**

Beneficios: $64.604.700

OPEX: $15.133.750

Total: $49.470.950

Flujo de Caja Detallado (75% de Multas Evitadas)

Tabla 3.4 “Flujo de Caja evitando el 75% de Multas”

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos y Ahorros						
Ahorro por Multas (75%)	$0	$62.030.700	$62.030.700	$62.030.700	$62.030.700	$62.030.700
Ahorro por Inoculaciones	$0	$3.960.000	$3.960.000	$3.960.000	$3.960.000	$3.960.000
Total Beneficios Anuales	$0	$65.990.700	$65.990.700	$65.990.700	$65.990.700	$65.990.700
Egresos y Costos						
Inversión Inicial (CAPEX)	$-24.836.000	$0	$0	$0	$0	$0
Costo Operativo Anual (OPEX)	$0	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750
Total Egresos Anuales	$-24.836.000	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750
Flujo de Caja Neto	$-24.836.000	$50.856.950	$50.856.950	$50.856.950	$50.856.950	$50.856.950
VAN (con TMAR del 10%)	$167.912.163					
TIR	201%					

3.6.3 ESCENARIO 3: EL PROYECTO EVITA EL 50% DE LAS MULTAS

Este es el escenario más conservador, evaluando la viabilidad del proyecto bajo la premisa de que solo logra reducir a la mitad las multas por incumplimiento de pH, manteniendo el 100% de eliminación de inoculaciones.

- **Ahorro por Multas (50%): $82.707.600 x 0.50 = $41.353.800**

- **Beneficio Anual Cuantificable:**

Ahorro en Multas: $41.353.800

Ahorro Inoculaciones: $2.574.000

Total: $43.927.800

- **Flujo de Caja Neto Anual:**

Beneficios: $43.927.800

OPEX: $15.133.750

Total: $28.794.050

Flujo de Caja Detallado (50% de Multas Evitadas)

Tabla 3.5 “Caja de Flujo evitando el 50% de multas”

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos y Ahorros						
Ahorro por Multas (50%)	$0	$41.353.800	$41.353.800	$41.353.800	$41.353.800	$41.353.800
Ahorro por Inoculaciones	$0	$3.960.000	$3.960.000	$3.960.000	$3.960.000	$3.960.000
Total Beneficios Anuales	$0	$45.313.800	$45.313.800	$45.313.800	$45.313.800	$45.313.800
Egresos y Costos						
Inversión Inicial (CAPEX)	$-24.836.000	$0	$0	$0	$0	$0
Costo Operativo Anual (OPEX)	$0	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750
Total Egresos Anuales	$-24.836.000	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750	$-15.133.750
Flujo de Caja Neto	$-24.836.000	$30.180.050	$30.180.050	$30.180.050	$30.180.050	$30.180.050
VAN (con TMAR del 10%)	$89.573.916					
TIR	108%					

3.6.4 Comparativa de escenarios

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los 3 escenarios mencionados anteriormente, es decir, evitando el 100%, el 75% y el 50% multas.

Tabla 3.6 “Comparativa de escenarios”

Escenario de Éxito del Proyecto	Valor Actual Neto (VAN)	Tasa Interna de Retorno (TIR)	Tasa Mínima Aceptable de Retorno (TMAR)
100% de Multas Evitadas	$246.264.917 CLP	279%	10%
75% de Multas Evitadas	$167.912.163 CLP	201%	10%
50% de Multas Evitadas	$89.573.916 CLP	108%	10%

3.7 COSTOS DE NO IMPLEMENTACIÓN

Los costos de no implementar el sistema de control y monitoreo de pH automático son significativos y recurrentes, representando las pérdidas económicas y operativas que la PTAS continuaría asumiendo al mantener el statu quo. Estos costos demuestran la urgente necesidad y el retorno de la inversión de la solución propuesta.

- **Costos directos por multas y sanciones:** Sin el proyecto, la PTAS seguiría incurriendo en un costo anual promedio de **$82.707.600** por las multas de la SMA.

- **Costos directos de reactivación y recuperación del reactor biológico:** La falta de control de pH continuaría generando un costo anual promedio de **$2.574.000** por las intervenciones de vaciado e inoculación del reactor biológico.

3.8 COSTOS INDIRECTOS Y TANGIBLES/INTANGIBLES:

- **Tiempo de estabilización del proceso biológico:** Pérdidas de eficiencia operativa y mayor supervisión.

- **Desgaste acelerado de equipos:** Mayor corrosión o incrustación en equipos y tuberías aguas abajo, reduciendo su vida útil y aumentando costos de mantenimiento correctivo.

- **Riesgo regulatorio y reputacional:** Exposición continua a sanciones adicionales, posibles clausuras temporales y deterioro de la imagen corporativa ante la comunidad y las autoridades.

- **Ineficiencia en el uso de recursos:** Mano de obra y otros recursos desviados a la resolución de emergencias en lugar de actividades productivas planificadas.

En síntesis, los costos directos anuales de no implementar el proyecto ascienden a un mínimo de $85.281.600, a lo que se suman los importantes costos indirectos y el riesgo operacional.

3.9 TABLA RESUMEN DE COSTOS

A continuación, se presenta una tabla que resume todos los valores mencionado en el presente capítulo.

Tabla 3.7 “Resumen de Costos”

Concepto	Detalle	Valor
Costo de Implementación (CAPEX)	Costo total para la puesta en marcha del proyecto.	**$27.836.000**
Costo Operativo Anual (OPEX)	Costo recurrente anual para mantener el sistema operativo.	**$15.133.750 [CLP/año]**
Costo de No Implementación	Pérdida anual por multas e inoculaciones si no se implementa el proyecto.	**$85.281.600 [CLP/año]**
Escenario 1 (100% de multas evitadas)	Valor Actual Neto (VAN)	**$238.163.784**
	Tasa Interna de Retorno (TIR)	**249%**
Escenario 2 (75% de multas evitadas)	Valor Actual Neto (VAN)	**$159.206.586**
	Tasa Interna de Retorno (TIR)	**172%**
Escenario 3 (50% de multas evitadas)	Valor Actual Neto (VAN)	**$80.249.434**
	Tasa Interna de Retorno (TIR)	**88%**

CONCLUSIÓN

El presente trabajo de título ha abordado de manera integral la problemática recurrente del pH elevado en el agua cruda de ingreso de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), demostrando la criticidad de un control efectivo para la estabilidad operativa y el cumplimiento normativo. A lo largo del desarrollo, se ha cumplido cabalmente con los objetivos del proyecto, estableciendo un camino claro hacia una operación más eficiente y sostenible.

En primer lugar, se describió la situación actual de la PTAS, cuantificando la recurrencia y el impacto de las fluctuaciones de pH, lo que sentó las bases para justificar la necesidad de una intervención. La evidencia de 33 eventos de pH anormal en el último año resaltó la urgencia de implementar una solución. Posteriormente, se diseñó una propuesta de ingeniería robusta para un sistema de control automático de pH (Solución A). Este diseño, detallado en su arquitectura (P&ID), selección de componentes de hardware (sensores, bombas, PLC, HMI) y lógica de control (dosificación proporcional y modos de operación), asegura una respuesta inmediata y autónoma a las desviaciones de pH. La elección de la Solución A se justificó por su superioridad tecnológica, su alta precisión de dosificación, la minimización de la intervención humana y la maximización de la seguridad operacional, factores cruciales para la protección del sensible proceso biológico y la infraestructura de la planta.

Finalmente, la evaluación económica del proyecto reveló una viabilidad y rentabilidad, con un Costo Total de Implementación de $27.836.000 (que incluye los $3.000.000 en ingeniería de detalles), el análisis financiero arrojó indicadores favorables en sus tres escenarios. Los resultados demuestran que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que genera una riqueza significativa para la PTAS, incluso en las condiciones más conservadoras.

- **Escenario 1 (100% de multas evitadas):** Un VAN positivo de $238.163.784 y una TIR extraordinaria del 249%, muy superior a la TMAR del 10%.

- **Escenario 2 (75% de multas evitadas):** Un VAN de $159.206.586 y una TIR del 172%.

- **Escenario 3 (50% de multas evitadas):** Un VAN de $80.249.434 y una TIR del 88%, que sigue siendo altamente atractiva y supera con creces la TMAR.

Estos resultados se basan en los ahorros anuales cuantificables (que varían según el escenario), derivados de la evitación de multas recurrentes por incumplimiento del D.S. N°90 y la eliminación de costosas intervenciones como el vaciado e inoculación del reactor biológico.

En síntesis, este proyecto de tesis no solo propone una solución técnica avanzada y pertinente para la estabilización del pH en PTAS, sino que también respalda su implementación con un sólido análisis económico. Los resultados confirman que la inversión en este sistema de control automático es altamente rentable y esencial para mitigar riesgos operacionales, asegurar el cumplimiento regulatorio y optimizar la eficiencia general de la planta de tratamiento de aguas servidas a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- https://academiaresiter.cl/student/courses/kP3gQdZQ9e/modules
- https://www.siss.gob.cl/586/w3-article-5124.html
- https://portal.sma.gob.cl/
- https://colegioarquitectos.com/noticias/
- https://economia3.com/van-tir-concepto-diferencias-como-calcularlos/