



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

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSE MIGUEL CARRERA

“Proyecto de automatización planta de bombeo Aguas Andinas”

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero de Ejecución en
control e instrumentación industrial

Alumnos: Julio Andrés Ayala Godoy
Profesor Guía: Franz Yurjevic Perin

2025



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 automatización planta de bombeo aguas andinas

Nombre del candidato(a): Julio Andrés Ayala Godoy

Carrera / Grado: Ing. De Ej. En control e instrumentación industrial

Campus: Sede Viña del Mar **Departamento:** Electrotecnia e Informática (ELINF)

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Franz Yurjevic Perin, 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

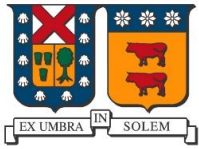
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 27 octubre 2025 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27-10-202 **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.



RESUMEN

KEYWORDS: Planta de bombeo, Automatización industrial, Control de presión

El presente proyecto tiene como objetivo la automatización de la planta de bombeo que abastece los sectores de Huinganal y Parque del Sol, en la comuna de Lo Barnechea, operada por la empresa sanitaria Aguas Andinas. Actualmente, el sistema presenta deficiencias asociadas a su control manual a distancia, lo que provoca tiempos de respuesta lentos ante variaciones de presión, aumentando el riesgo de sanciones por parte de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y generando un elevado consumo energético.

La solución propuesta considera la implementación de sensores de presión y transmisores de nivel, todos controlados mediante un PLC Siemens S7-1200, y el uso de variadores de frecuencia (VDF) que permiten un control escalonado y eficiente de tres bombas centrífugas. A través del diseño de una lógica de control automatizada, respaldada por un sistema SCADA, se logra una operación más precisa, con ahorro energético estimado en un 20% y una reducción significativa de costos operacionales (OPEX). La evaluación económica demuestra un Valor Actual Neto (VAN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) favorable, consolidando la viabilidad técnica y financiera del proyecto.

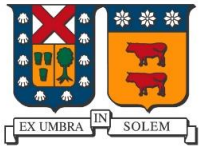


ÍNDICE

RESUMEN	2
ÍNDICE 3	
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	7
SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS	8
SIMBOLOGÍAS	9
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO 1: CONCEPTOS GENERALES PROBLEMÁTICA Y SOLUCIÓN	3
CONCEPTOS GENERALES Y PROBLEMÁTICA.....	4
1.1 CONCEPTOS GENERALES	4
1.1.1 Electricidad	4
1.2 Empresas sanitarias	4
1.3 Plantas o estaciones de bombeo	6
1.3.1 ¿Qué son las plantas de bombeo?.....	6
1.3.2 ¿En qué consisten?	6
1.3.3 ¿Cómo están conformadas?.....	6
1.4 SISTEMA ACTUAL	14
1.5 Problemática	16
1.6 Alternativas de solución.....	17
1.6.1 Alternativa 1 “mantener sistema actualizando equipamiento”	17



1.6.2	Alternativa 2 “Actualizar sistema agregando sensores”	18
1.6.3	Alternativa 3 “automatizar sala de control con VDF y lógica 2 +1”	18
1.6.4	Evaluación de las alternativas de solución	18
1.6.5	Alternativa seleccionada	20
1.6.6	Valor agregado de la alternativa seleccionada	20
CAPÍTULO 2: SOLUCIÓN DE INGENIERÍA DEL PROYECTO		22
2	Descripción y desarrollo del proyecto	23
2.1	Supuestos generales del proyecto	23
2.2	Arquitectura general del sistema	25
2.2.1	Diagrama de tuberías e instrumentación(P&ID)	25
2.2.2	Explicación del diagrama	29
2.3	Componentes del sistema	31
2.3.1	Consideración de diseño y seguridad	31
2.3.2	Instrumentación de campo	32
2.3.3	Elementos de actuación	33
2.3.4	Sistema de control y comunicación	34
2.4	Lógica de control del sistema (Diagrama de flujo)	36
2.4.1	Rango de operación de la planta	36
2.4.2	Modos de operación	36
2.5	Filosofía de control	36
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO		40
3	Evaluación económica del proyecto	41
3.1	Costo de materiales	41
3.2	Carta Gantt del proyecto considerando costos de mano de obra	42
3.2.1	Detalle de tareas, horas-hombre y costos	44
3.3	Costos de implementación (CAPEX)	45



3.4	Ahorros operacionales anuales (OPEX)	46
3.4.1	Reducción de personal operativo	46
3.4.2	Ahorro energético por uso de VDF.....	47
3.4.3	Ahorro por reducción de mantenimiento	49
3.4.4	Ahorro por multas de la SISS	49
3.4.5	Beneficio total anual cuantificable	50
3.5	Costos operativos anuales (OPEX) del nuevo sistema	50
3.6	Evaluación financiera VAN y TIR	51
3.7	Análisis de flujo de caja por escenario	52
3.7.1	Escenario 1: el proyecto evita el 100% de la multa	52
3.7.2	ESCENARIO 2: EL PROYECTO EVITA EL 75% DE LAS MULTAS	53
3.7.3	ESCENARIO 3: EL PROYECTO EVITA EL 50% DE LAS MULTAS	54
3.7.4	Comparativa de escenarios	55
3.8	Costos de no implementarse la solución.....	56
	CONCLUSIONES.....	57
	Anexos58	
	BIBLIOGRAFÍA.....	61



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Estanque de entrada	10
Figura 1-2. Tuberías de succión e impulsión	11
Figura 1-3. Válvulas	11
Figura 1-4. Bomba centrífuga	12
Figura 1-5. Motor eléctrico	12
Figura 1-6. Conexión estrella triángulo	13
Figura 1-7. Variador de frecuencia.....	13
Figura 1-8. Tablero de fuerza y control bombas.....	14
Figura 1-9. Controlador lógico programable.....	14
Figura 1-10. Pantalla HMI	15
Figura 1-11. Caudalímetro electromagnético.....	15
Figura 1-12. Sensor hidrostático.....	16
Figura 1-13. Ubicación actual planta de bombeo lo Barnechea.....	18
Figura 1-14. Estado actual planta de bombeo lo Barnechea.....	18
Figura 2-1. Simbología P&ID.....	29
Figura 2-2. Sistema actual P&ID.....	30
Figura 2-3. P&ID sistema propuesto.....	31
Figura 2-4. Selección sistema manual o automático	37
Figura 2-5. Sistema manual	38
Figura 2-6. Sistema automático.....	39



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Elementos utilizados en plantas de bombeo.....	16
Tabla 1-2. Reclamos y sanciones por la SISS.....	20
Tabla 1-3. Escala de calificación de alternativas.....	22
Tabla 1-4. Evaluación de alternativas.....	23
Tabla 2-1. Datos para cálculo de caudal.....	26
Tabla 3-1. Costos de materiales.....	43
Tabla 3-2. Costos hora hombre por cargo	44
Tabla 3-3. Carta Gantt con HH	45
Tabla 3-4. Resumen CAPEX	47
Tabla 3-5. Flujo caja evitando multa al 100%	54
Tabla 3-6. Flujo caja evitando multa al 75%	55
Tabla 3-7. Flujo caja evitando multa al 50%	56
Tabla 3-8. Tabla comparativa	56
Tabla 3-9. Tabla comparativa de no implementar el proyecto	57

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1. análisis de sensibilidad del proyecto - VAN Y TIR según multa evitada.....	56
---	----



SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

SIGLAS

SEC : Superintendencia de Electricidad y Combustible

ERNC : Energía renovable no convencionales

CO₂ : Dióxido de carbono

USD : Dólar estadounidense

EVR : Resistencia variable electrónico

V_{mpp}: Voltaje máximo pico a pico

V_{mp} : Voltaje en máxima potencia

SISS : Superintendencia de servicios sanitarios

PLC : Controlador lógico programable

HMI : Interfaz hombre maquina

Scada: Supervisión, control y adquisición de datos

VDF : Variador de frecuencia

HD : Hierro dúctil

WP : Agua potable

Q : Caudal

BOC: Bomba centrífuga



SIMBOLOGÍAS

CA : Corriente alterna.
CC : Corriente continua.
V : Voltio.
A : Amperio.
W : Watts.
kW : Kilowatts.
MW : Megawatts.
GW : Gigawatts
MVA : Mega voltamperio
kWh : Kilowatt hora
MWh : Megawatts hora
GWh : Gigawatts hora.
 Ω/m : Ohm metro
 Ω : Ohm
 $^{\circ}C$: Grados Celsius.
 $^{\circ}K$: Grados Kelvin.
S : Sur
O : Oeste
Hz : Hertz.
J : Joule.
kV : Kilovoltios.
 m^2 : Metros cuadrados
h : hora
 mm^2 : Milímetros cuadrados
m : Metro
l/s : Litros por segundo



GPM : Galón por minuto

m³/h : metros cúbicos por hora

Pa : Pascal

Bar : unidad de presión 1 bar = 100kPa

m.c.a: metros columna de agua

Psi : Libras por pulgada cuadrada

Ft : pies

HP : Caballos de fuerza

RPM : Revoluciones por minuto

Nm : Newton metro

Lb*ft : libras por pie

INTRODUCCIÓN

El abastecimiento continuo de agua potable es fundamental para la calidad de vida y la salud pública. En Chile, este servicio es gestionado por empresas sanitarias concesionadas y reguladas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), las cuales deben garantizar presión adecuada, calidad y continuidad en el suministro.

En este contexto, las plantas de bombeo son clave para transportar agua a zonas con demanda elevada o ubicadas en altura, donde la presión natural no es suficiente. Este proyecto propone el diseño ideal de una planta de bombeo automatizada, tomando como referencia el sistema de Lo Barnechea operado por Aguas Andinas.

La propuesta considera la incorporación de variadores de frecuencia (VFD), controladores PLC, y sensores de presión para lograr una operación eficiente, reducir fallas operativas y optimizar el consumo energético. Esta solución busca mejorar el servicio, cumplir con los estándares de la SISS y responder a los desafíos técnicos y urbanos actuales.

OBJETIVO GENERAL

Proponer proyecto de automatización en sala de control para planta de bombeo Aguas Andinas ubicada en Lo Barnechea.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar problemática del sistema actual.
- Proyectar automatización a Planta de bombeo.
- Realizar evaluación económica del proyecto.

CAPÍTULO 1: CONCEPTOS GENERALES PROBLEMÁTICA Y SOLUCIÓN

CONCEPTOS GENERALES Y PROBLEMÁTICA

En este capítulo se darán a conocer conceptos relevantes para la comprensión y contextualización del proyecto, la problemática que existe en la planta, como también los objetivos tanto específicos como generales.

1.1 CONCEPTOS GENERALES

Para poder comprender el contenido del presente trabajo de título, se necesita saber ciertos conceptos asociados a la automatización, ingeniería mecánica, eléctrica e hidráulica.

1.1.1 Electricidad

Conjunto de fenómenos físicos relacionados con la presencia y flujo de cargas eléctricas. Se manifiesta en una gran variedad de fenómenos como los rayos, la electricidad estática, la inducción electromagnética o el flujo de corriente eléctrica. Es una forma de energía tan versátil que tiene un sinnúmero de aplicaciones, por ejemplo: transporte, climatización, iluminación y computación.

1.2 Empresas sanitarias

Las empresas sanitarias cumplen un rol fundamental en el manejo del recurso hídrico, estructurando su operación en cinco ciclos esenciales que garantizan tanto el abastecimiento de agua potable como la correcta disposición de las aguas servidas. El primero de estos ciclos es la captación, que consiste en extraer agua desde fuentes naturales como ríos, lagos, embalses o

pozos subterráneos. Esta agua es conducida mediante estructuras y equipos de bombeo hacia las plantas de tratamiento para su procesamiento.

A continuación, se da paso al ciclo de producción o potabilización, donde el agua bruta es sometida a procesos fisicoquímicos para eliminar impurezas y agentes patógenos. Entre estos procesos se incluyen la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, con el objetivo de cumplir con los estándares de calidad para el consumo humano. El agua potabilizada se almacena temporalmente en estanques reguladores antes de ser distribuida.

El tercer ciclo corresponde a la distribución, etapa en la cual el agua potable es impulsada a través de redes de tuberías hacia los distintos puntos de consumo: hogares, industrias, comercios y servicios públicos. Para mantener la presión y continuidad del suministro, se utilizan estaciones de bombeo intermedias y válvulas de control, todo monitoreado desde centros de operación y control.

Luego, el ciclo de recolección de aguas servidas se encarga de captar el agua que ha sido utilizada por los usuarios. Estas aguas residuales viajan por redes de alcantarillado, colectores y estaciones elevadoras, dirigidas hacia plantas de tratamiento específicas. En esta fase es crucial evitar filtraciones o fugas para proteger tanto el medio ambiente como la infraestructura urbana.

Finalmente, el ciclo de tratamiento de aguas servidas busca descontaminar el agua utilizada antes de su retorno al medioambiente. Para ello, se aplican procesos biológicos, físicos y químicos que eliminan materia orgánica, sólidos suspendidos y microorganismos. El agua tratada puede ser devuelta a cauces naturales o reutilizada para riego, limpieza urbana o procesos industriales, cerrando así el ciclo del agua con responsabilidad ambiental y sanitaria.

1.3 Plantas o estaciones de bombeo

Para comprender lo que se describirá a continuación se responderán las siguientes preguntas:

1.3.1 ¿Qué son las plantas de bombeo?

Las plantas de bombeo son instalaciones hidráulicas diseñadas para impulsar agua o fluidos desde un nivel inferior a uno superior o para vencer la pérdida de carga a lo largo de una red de conducción. Se utilizan ampliamente en sistemas de agua potable, aguas servidas, riego, drenaje y procesos industriales, especialmente en zonas con topografía variable o donde la gravedad no permite el flujo natural.

1.3.2 ¿En qué consisten?

Una planta de bombeo consiste en un conjunto de equipos electromecánicos, estructuras hidráulicas y sistemas de control que trabajan en conjunto para mover el agua desde una fuente (como un estanque, pozo o cámara húmeda) hacia un destino (otro estanque, red de distribución o planta de tratamiento).

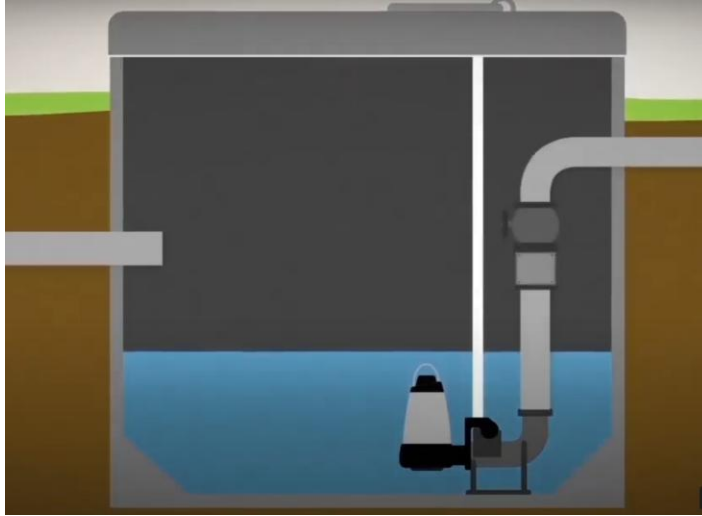
Su función principal es **asegurar el caudal y la presión** requeridos para mantener el servicio de agua de forma continua y eficiente, cumpliendo con estándares técnicos y normativos.

1.3.3 ¿Cómo están conformadas?

Las plantas de bombeo pueden variar en complejidad según su uso, pero generalmente están compuestas por los siguientes sistemas:

1.3.3.1 Sistema hidráulico

- Cámara de succión o estanque de entrada: Recibe el agua desde una fuente previa (pozo, red o río). Como se muestra en figura 1-1.



FUENTE: [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=UNBGRWDPJQ4&T=51S](https://www.youtube.com/watch?v=UNBGRWDPJQ4&t=51s)

FIGURA 1-1. ESTANQUE DE ENTRADA

- Tuberías de succión e impulsión: Conducen el agua desde la bomba hasta su destino final. Ejemplo en figura 1-2.



FUENTE: [HTTPS://WWW.IAGUA.ES/BLOGS/](https://www.iagua.es/blogs/)

FIGURA 1-2. TUBERÍAS DE SUCCIÓN E IMPULSIÓN

- Válvulas: Permiten controlar, aislar o proteger el flujo (de retención, compuerta, mariposa, alivio de presión). Como se muestra en figura 1-3



FUENTE: [HTTPS://WWW.IAGUA.ES/BLOGS/MIGUEL-ANGEL-MONGE-REDONDO/BOMBEOS-VALVULAS-Y-PRESIONES-PROBLEMAS-Y-SOLUCIONES](https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/bombeos-valvulas-y-presiones-problemas-y-soluciones)

FIGURA 1-3. VÁLVULAS

1.3.3.2 Equipos de bombeo

- Bombas centrífugas: Son las más comunes por su simplicidad y capacidad de mover grandes volúmenes. En figura 1-4 se muestra una bomba centrífuga.



FUENTE: [HTTPS://WWW.SEGUAS.COM/BOMBAS-CENTRIFUGAS-INSTALACIONES-HIDRAULICAS/](https://www.seguas.com/bombas-centrifugas-instalaciones-hidraulicas/)

FIGURA 1-4. BOMBAS CENTRIFUGAS.

- Motores eléctricos: Acoplan a las bombas para proporcionar la energía mecánica requerida. En figura 1-5 se muestra motor con bomba acoplada.



FUENTE: [HTTPS://WWW.SEGUAS.COM/BOMBAS-CENTRIFUGAS-INSTALACIONES-HIDRAULICAS/](https://www.seguas.com/bombas-centrifugas-instalaciones-hidraulicas/)

FIGURA 1-5. MOTOR ELÉCTRICO.

- Arranque y protección: Puede ser por sistema estrella-triángulo (figura 1-6), variador de frecuencia (VFD), (figura 1-7) o arrancadores suaves.



FUENTE: IMAGEN PROPIA

FIGURA 1-6. CONEXIÓN ESTRELLA TRIANGULO



FUENTE: [HTTPS://WWW.SIEMENS.COM/](https://www.siemens.com/)

FIGURA 1-7. VARIADOR DE FRECUENCIA

1.3.3.3 Sistema eléctrico y de control

- Tableros de fuerza y control: Alimentan eléctricamente las bombas y protegen el sistema. En figura 1-8 ejemplo de tablero de fuerza y control.



FUENTE: IMAGEN PROPIA

FIGURA 1-8. TABLERO DE FUERZA Y CONTROL BOMBAS.

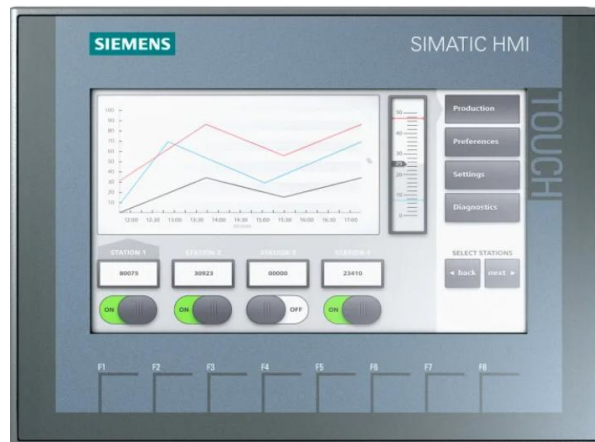
- PLC (Controlador Lógico Programable): Gestiona automáticamente las órdenes de funcionamiento según presión, caudal o nivel. Ejemplo de controlador en figura 1-9.



FUENTE: [HTTPS://WWW.INCIBE.ES/INCIBE-CERT/BLOG/TECNICAS-DE-PROGRAMACION-SEGURA-EN-LOS-PLC](https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/tecnicas-de-programacion-segura-en-los-plc)

FIGURA 1-9. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.

- HMI/SCADA: Interfaces para que los operadores visualicen y controlen el proceso en tiempo real. Como se muestra en figura 1-10.



FUENTE: [HTTPS://CL.RSDDELIVERS.COM/PRODUCT/SIEMENS/6AV2123-2GA03-0AX0/PANEL-HMI-SIEMENS-SIMATIC-KTP700-BASIC-DE-7-TFT-X/8726325](https://CL.RSDDELIVERS.COM/PRODUCT/SIEMENS/6AV2123-2GA03-0AX0/PANEL-HMI-SIEMENS-SIMATIC-KTP700-BASIC-DE-7-TFT-X/8726325)

FIGURA 1-10. PANTALLA HMI

1.3.3.4 Instrumentación

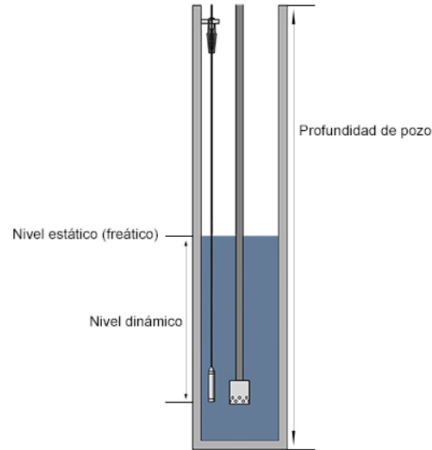
- Sensores de presión y caudal: Monitorean el desempeño hidráulico del sistema. Ejemplo de caudalímetro en figura 1-11



FUENTE: [HTTPS://WWW.CL.ENDRESS.COM/](https://WWW.CL.ENDRESS.COM/)

FIGURA 1-11. CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO.

- Medidores de nivel: Indican el estado del estanque o pozo de succión (figura 1-12).



FUENTE: [HTTPS://WWW.VETO.CL/TRANSMISOR-DE-NIVEL-HIDROSTATICO-SUMERGIBLE](https://www.veto.cl/transmisor-de-nivel-hidrostatico-sumergible)

FIGURA 1-12. SENSOR HIDROSTÁTICO

- Alarmas: Alertan ante fallas o condiciones fuera de parámetros.

Los elementos mas utilizados en las plantas de bombeo se describirán en la tabla 1-1.

TABLA 1-1. ELEMENTOS UTILIZADOS EN PLANTAS DE BOMBEO

Elemento	Función principal
Bomba centrífuga	Impulsar el agua desde la fuente hacia la red
Motor eléctrico	Proporcionar la energía mecánica necesaria
Variador de frecuencia (VFD)	Regular la velocidad de la bomba según demanda
PLC	Controlar lógicamente la operación automática del sistema
HMI/SCADA	Visualizar, supervisar y operar la planta de forma remota
Válvula de retención	Evitar el retorno del agua al detenerse la bomba
Válvula de compuerta/mariposa	Abrir o cerrar el paso del flujo
Sensor de presión	Medir la presión en línea y activar respuestas del sistema
Sensor de caudal	Verificar el volumen de agua impulsado
Tuberías (HD o PEAD)	Conducir el agua entre puntos del sistema

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE PLANTAS DE BOMBEO.

1.4 SISTEMA ACTUAL

El sistema de bombeo actualmente en operación se divide en dos sectores principales: Huinganal y Parque del Sol, ambos ubicados en la comuna de Lo Barnechea. Cada sector cuenta con tres bombas centrífugas, las cuales están accionadas mediante un sistema de arranque estrella-triángulo, comandado por un controlador lógico programable (PLC). Si bien este controlador permite gestionar el encendido y apagado de las bombas, el sistema carece de un nivel de automatización real, ya que su operación depende directamente de la intervención manual del personal de Aguas Andinas, quienes deben accionar las bombas a través de un servidor.

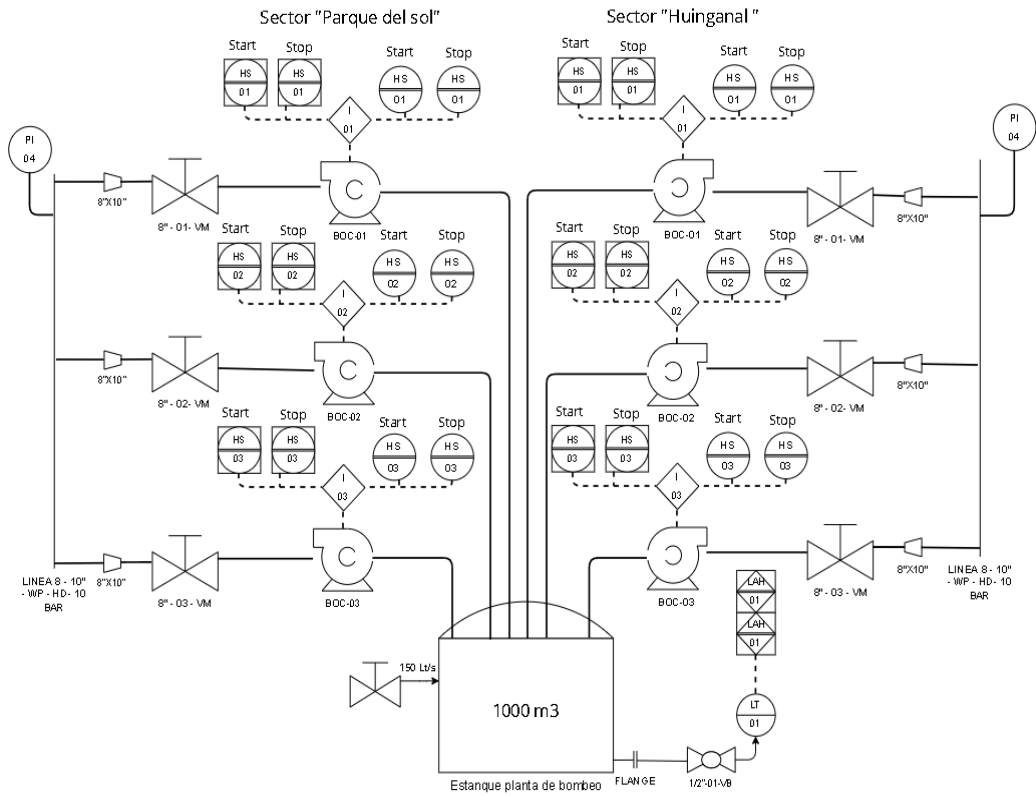
Esta modalidad operativa presenta limitaciones significativas, especialmente en cuanto a los tiempos de respuesta ante variaciones de presión o cambios en la demanda, lo cual repercute directamente en la capacidad del sistema para mantener las presiones exigidas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). La ausencia de sensores en línea y de lógica automática de control impide un ajuste dinámico y preciso, generando un funcionamiento deficiente y más expuesto a errores humanos.

A continuación, se presentará figura 1-13 que hará referencia de la ubicación de la planta y figura 1-14 del diagrama P&ID del sistema actual, donde se ilustran los componentes principales de cada sector, el esquema de control existente y las conexiones hidráulicas asociadas.



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

FIGURA 1-13. UBICACIÓN ACTUAL PLANTA BOMBEO



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

FIGURA 1-14. P&ID ESTADO ACTUAL PLANTA BOMBEO

1.5 **Problemática**

Actualmente, la planta de bombeo que abastece los sectores de Huinganal y Parque del Sol, en la comuna de Lo Barnechea, no cuenta con un sistema de monitoreo de presión durante la operación, limitándose únicamente a la supervisión del nivel del estanque. Esta deficiencia representa un riesgo operativo importante, ya que la presión en la red de distribución es un parámetro crítico que garantiza el suministro continuo y eficiente a los usuarios finales. La falta de información en línea y en tiempo real sobre la presión impide que el sistema pueda reaccionar rápidamente ante bajas de presión, que son una de las principales causas de reclamos por parte de los clientes según datos históricos reportados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).

Además, el sistema actual depende de la intervención manual de operadores, quienes encienden o apagan las bombas a distancia, pero sin referencia directa al comportamiento hidráulico en la red. Esto genera tiempos de respuesta lentos, falta de precisión en el control, y riesgos de incumplimiento de la presión mínima reglamentaria de 15 m.c.a. (~1,5 bar) que exige la superintendencia de servicios sanitarios para zonas urbanas.

A continuación, se muestra tabla 1-2 de los reclamos y sanciones asociadas a las caídas de presión en el sistema actual.

TABLA 1-2. RECLAMOS Y SANCIONES POR LA SUPER INTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS EN 13 AÑOS

Empresas	Nºclientes 2021	Nº Cortes agua potable. 2008-2021	Nºde reclamos por baja Presión 2008-2021	Sanciones en UTA 2008-2021
Aguas andinas	2.063.739	69.577	157.622	7.593
Essbio	873.738	86.295	78.402	18.936
Esva	684.475	46.426	22.279	12.597

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE LA SISS

Por lo que se propondrá como solución el proyecto de una sala de bombeo.

1.6 Alternativas de solución

Para resolver la gran problemática nombrada anteriormente y que traen grandes consecuencias negativas para la comunidad se plantearon tres distintas soluciones, las cuales deberán ser evaluados según distintos tipos de criterios en la cual se deberá identificar que solución es más viable aplicar en la planta ya sea a nivel económico y técnico.

1.6.1 Alternativa 1 “mantener sistema actualizando equipamiento”

La primera alternativa consiste en mantener parte sistema actual, instalando sensor de presión en la salida de la planta, además, automatizar el encendido y apagado de las bombas estableciendo ciertas condiciones de presión. Esta alternativa es de bajo costo, pero no controla la presión de salida solo monitorea presión, enciende y apaga las bombas.

1.6.2 Alternativa 2 “Actualizar sistema agregando sensores”

Esta solución mantiene el control desde el PLC, pero incorpora una lógica de operación escalonada: dos bombas en funcionamiento y una de respaldo (2+1). Además, se programa una rotación automática de turnos para que las bombas se alternen y se desgasten equitativamente.

1.6.3 Alternativa 3 “automatizar sala de control con VDF y lógica 2 +1”

La tercera alternativa propone un sistema completamente automatizado, mediante la integración de variadores de frecuencia (VDF), un PLC de control, sensores de presión y caudal. Esta solución ofrece control automático en tiempo real, lo que permite responder de forma inmediata a variaciones de presión o caudal, optimizar el uso energético y reducir el desgaste de los equipos. Si bien implica una inversión inicial mayor y requiere capacitación técnica, esta alternativa entrega la mayor confiabilidad, continuidad del servicio y cumplimiento con los estándares exigidos por la SISS, siendo la opción más robusta y sostenible a largo plazo.

1.6.4 Evaluación de las alternativas de solución

A partir de las alternativas de solución presentadas anteriormente, se procederá a realizar un análisis comparativo utilizando criterios específicos tales como innovación, beneficio esperado, factibilidad técnica y costo de implementación. Estos criterios permitirán identificar con mayor objetividad cuál de las propuestas resulta más viable para abordar las deficiencias actuales de la planta de bombeo de Lo Barnechea, especialmente en lo relacionado con la respuesta tardía ante bajas de presión.

Cada alternativa será evaluada bajo una escala de competencias, que asigna puntajes relativos en función del desempeño esperado en cada uno de los criterios mencionados. Esta evaluación permitirá priorizar técnicamente la opción más conveniente en términos de impacto, eficiencia operativa y sostenibilidad del sistema. Las formulaciones de propuestas y su valoración se resumen en la Tabla 1-3.

TABLA 0-3. ESCALA DE CALIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS.

Muy deficiente	Deficiente	Aceptable	Bueno	Óptimo
1	2	3	4	5

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A REQUERIMIENTO PARA PROYECTO.

En la tabla 1-4 se observan los resultados de la evaluación de los criterios de cada alternativa en conjunto con la puntuación final que llevará a tomar la decisión y el camino a seguir.

TABLA 1-4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.

Tabla de Puntuación de Alternativas de Solución				
Muy deficiente	Deficiente	Aceptable	Bueno	Óptimo
1	2	3	4	5
Característica / Alternativa	Alternativa 1 Actualizar programa, agregando sensores de presión	Alternativa 2 Actualizar programación con lógica 2+1	Alternativa 3 automatizar sala de control con VDF y lógica 2+1	
Innovación	3	3	5	
Beneficio	2	3	5	
Factibilidad	5	5	4	
Puntuación Total	10	11	14	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A REQUERIMIENTO PARA EL PROYECTO.

1.6.5 Alternativa seleccionada

A partir de la puntuación obtenida a la evaluación de alternativas, la mejor calificada es la alternativa 3 ya que cumple con todos los requerimientos para una solución más efectiva al problema antes explicado. Además, resulta ser la solución más viable según innovación, ya que se integrará los VDF al sistema que controlará la presión de salida, beneficio en cuanto a costos y eficiencia energética y factibilidad porque se aprovechará la infraestructura y equipos existentes.

1.6.6 Valor agregado de la alternativa seleccionada

La implementación de un sistema de automatización total en la planta de bombeo representa no solo una solución técnica a la problemática de operación manual y respuesta tardía, sino también un salto cualitativo en la gestión sanitaria moderna, alineado con los principios de eficiencia, sostenibilidad y digitalización de infraestructura crítica.

Entre los principales valores agregados de esta alternativa destacan:

- Optimización energética mediante el uso de variadores de frecuencia (VFD), que permiten adaptar la velocidad de las bombas a la demanda real, reduciendo el consumo eléctrico y los costos operacionales.
- Mejora de la confiabilidad y continuidad del servicio, gracias a la respuesta inmediata ante variaciones de presión, evitando interrupciones no programadas y cumpliendo con los estándares de la SISS en términos de presión mínima dinámica.
- Reducción del error humano y del desgaste mecánico, al eliminar arranques bruscos y automatizar decisiones que antes requerían la presencia constante de un operador.

- Integración con sistemas SCADA, lo que permite monitoreo remoto, análisis histórico de datos y planificación de mantenimiento predictivo, facilitando la toma de decisiones técnicas y administrativas.
- Adaptabilidad futura: La infraestructura automatizada permite escalar fácilmente hacia esquemas de operación inteligente (smart water), donde los datos en tiempo real se utilizan para optimizar aún más los recursos hídricos y energéticos.

En conjunto, esta alternativa no solo resuelve la problemática actual, sino que agrega valor estratégico a la operación de la planta, posicionando el sistema como un modelo replicable para otras instalaciones del país que enfrentan desafíos similares.

CAPÍTULO 2: SOLUCIÓN DE INGENIERÍA DEL PROYECTO

2 Descripción y desarrollo del proyecto

En este capítulo se desarrolla la solución propuesta para mejorar el funcionamiento de la planta de bombeo ubicada en los sectores de Huinganal y Parque del Sol, perteneciente a la empresa sanitaria Aguas Andinas. Para ello, se establece una filosofía de control basada en criterios técnicos y operacionales derivados de los siguientes supuestos generales del proyecto:

2.1 Supuestos generales del proyecto

Se estipulará valores reales de acuerdo con información de la comuna de Lo Barnechea para determinar cuántos litros en segundos debe suministrar. Para ello tenemos los siguientes datos:

TABLA 2-1. DATOS PARA CÁLCULOS DE CAUDAL.

Supuesto	Valor / Justificación
Población abastecida	131.000 habitantes (zona de Lo Barnechea)
Consumo promedio por persona	170 litros/día
Factor de simultaneidad	80 % (para horario punta)
Factor de demanda	1,5 (condiciones críticas)

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A REQUERIMIENTO PARA EL PROYECTO.

Caudal base diario

$Q_{\text{diario}} = \text{población} \times \text{Consumo promedio por persona}$

$$131.000 \text{ hab} \times 170 \frac{l}{\text{día}} = 22.270.000 \frac{l}{\text{día}}$$

Convertir a l/s

$$\frac{Q_{\text{diario}}}{86.400} = \frac{22.270.000}{86.400} = 257,7 \frac{l}{s}$$

Aplicar factor de simultaneidad 80%

$$Q_{sim} = Q \frac{1}{s} \times \text{Factor de simultaneidad} \Rightarrow Q_{sim} = 257,7 \frac{1}{s} \times 0,80 = 206,2 \frac{1}{s}$$

Aplicar factor de demanda 1,5

$$Q_{max} = Q_{sim} \times \text{Factor de demanda} \Rightarrow Q_{max} = 206,2 \frac{1}{s} \times 1,5 = 309,3 \frac{1}{s}$$

Por lo tanto, la planta debe suministrar $309,3 \frac{1}{s}$. Anteriormente se explicó que en la planta hay 6 bombas por lo que cada bomba deberá suministrar $51,55 \frac{1}{s}$ bajo este valor se corroborara si la potencia de las bombas que actualmente están instaladas puede ser utilizadas.

Para calcular la potencia hidráulica requerida para la bomba en kW es:

$$P = \frac{Q * H * \rho * g}{\eta}$$

Donde:

- Q: Caudal (m^3/s)
- H: Altura manométrica (m)
- ρ : Densidad del agua (kg/m^3) $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$
- g: Gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- η : Eficiencia (%)
- P: Potencia hidráulica (kW)

Reemplazando con los valores anteriormente calculados:

$$P = \frac{0,052 * 50 * 1000 * 9,81}{0,70} = 36,2 \text{ kW}$$

Las bombas instaladas en la planta son de 55kW por lo que están correctamente dimensionadas según el requerimiento de la comuna.

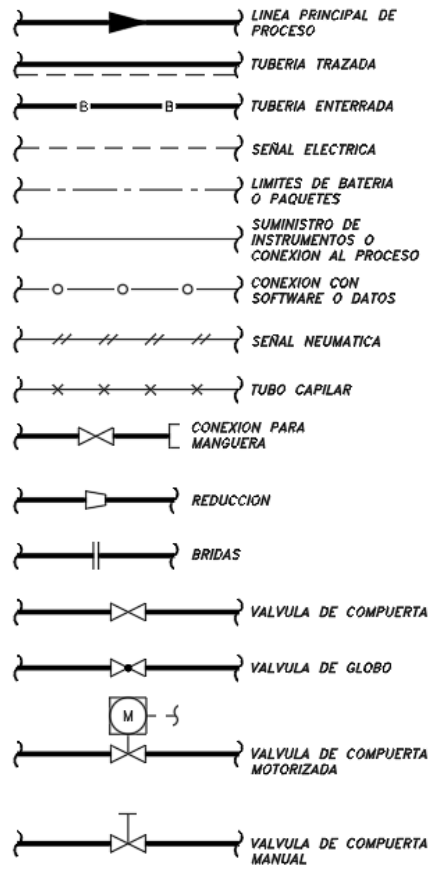
2.2 Arquitectura general del sistema

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.

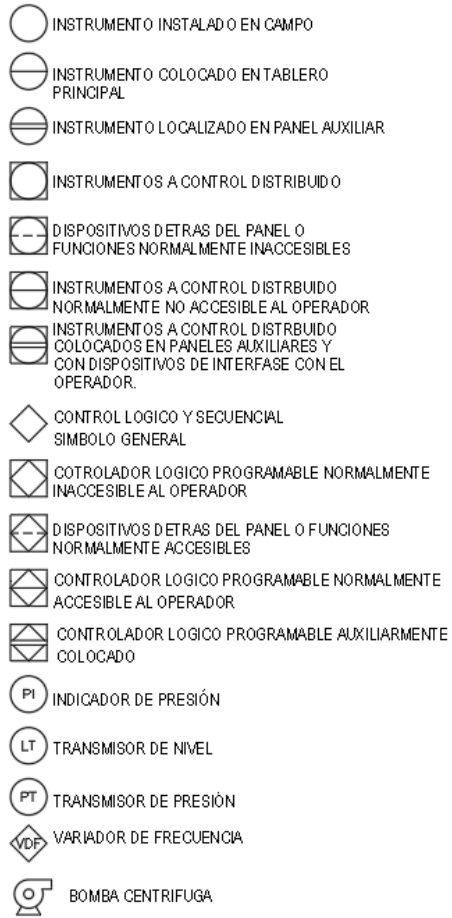
2.2.1 Diagrama de tuberías e instrumentación(P&ID)

Para una comprensión detallada de la integración del sistema de control y monitoreo de presión propuesto en la planta de bombeo de Aguas Andinas, esta sección presenta los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID). En primer lugar, se muestra el P&ID que representa la condición actual del sistema de bombeo (Imagen 2.2), Mostrando la base de conexión para el nuevo sistema. A continuación, se mostrará el P&ID modificado (Imagen 2.3), el cual incorpora la instrumentación y los equipos necesarios para la implementación del sistema de control y monitoreo de la presión en la planta de bombeo operada por Aguas Andinas. Para facilitar la interpretación de estos P&ID, se incluye simbología utilizada en los P&ID (imagen 2.1).

SIMB. DE TUB. Y LINEAS DE INSTRUMENTOS

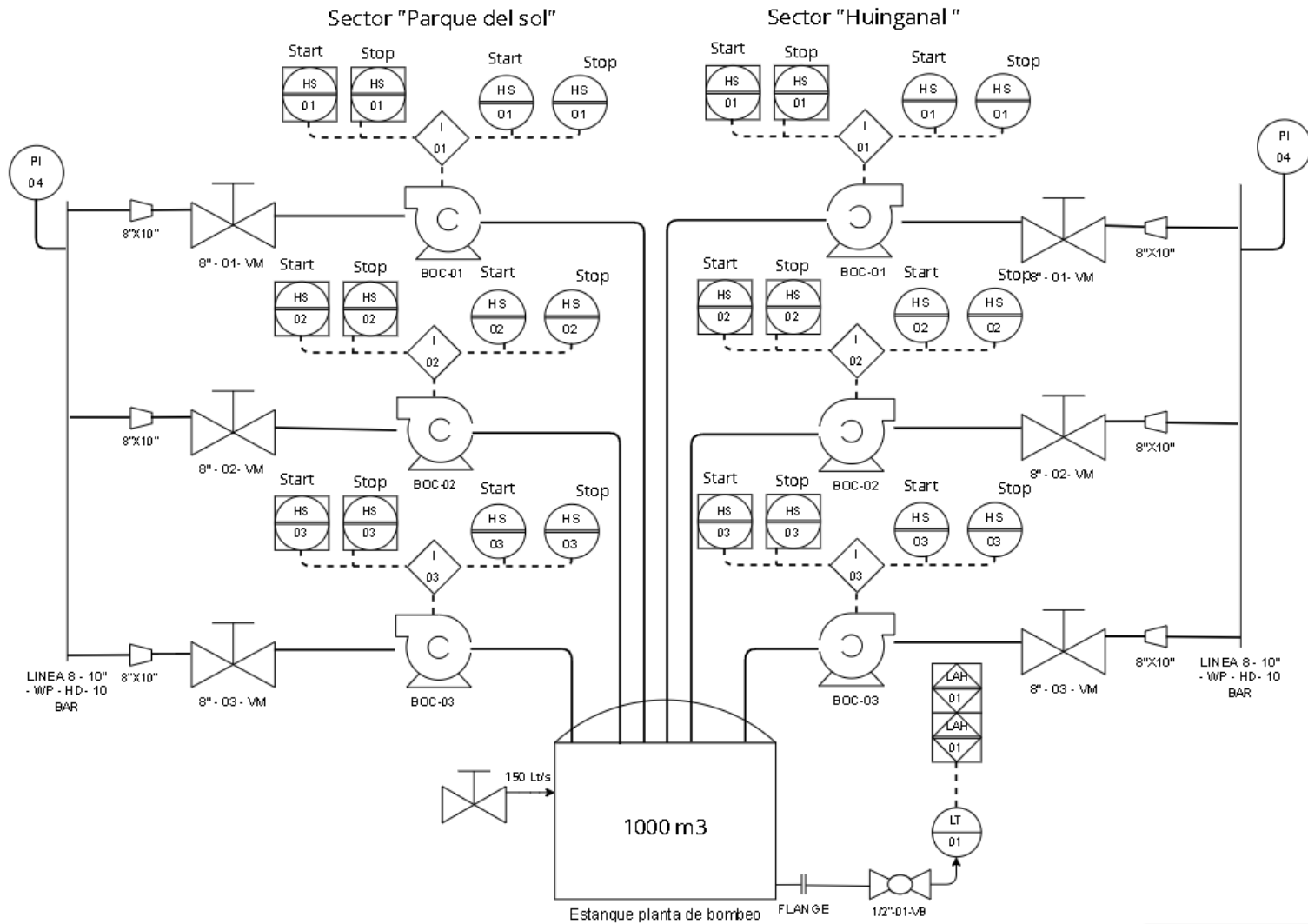


SIMBOLOGIA PARA INSTRUMENTOS



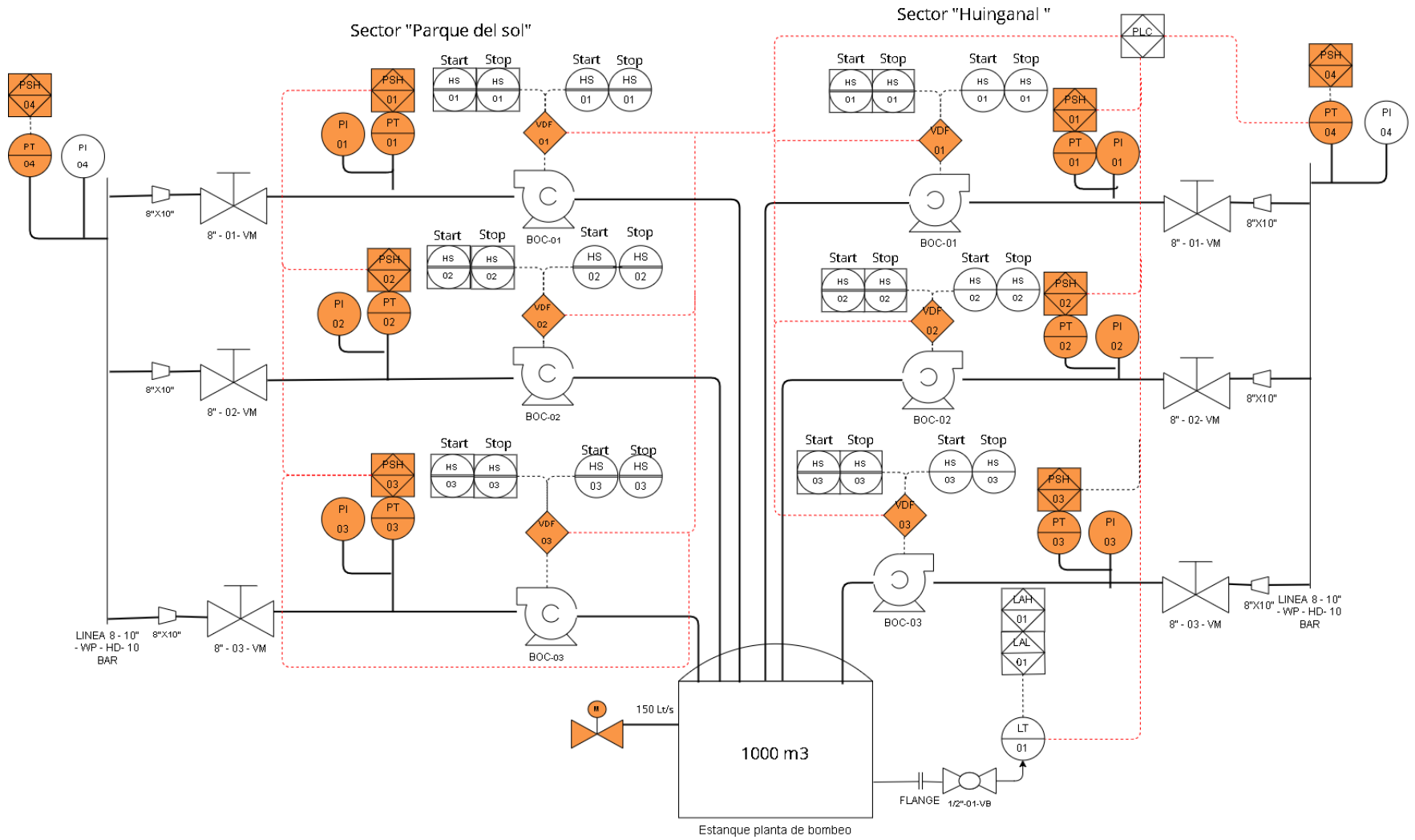
FUENTE: DATOS DE NORMA ANSI/ISA

FIGURA 2-1. SIMBOLOGÍA P&ID



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA PLANO P&ID SISTEMA ACTUAL

IMAGEN 2-2. SISTEMA ACTUAL P&ID



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA PLANO P&ID
 IMAGEN 2-3. "P&ID SISTEMA PROPUESTO"

2.2.2 Explicación del diagrama

El diagrama expuesto muestra la arquitectura operativa del sistema de control y monitoreo de presión propuesto, diseñado para ser implementado en la planta de bombeo.

El sistema de bombeo proyectado muestra un estanque de almacenamiento de 1.000 m³, el cual recibe un caudal de ingreso de 150 $\frac{1}{s}$. El nivel del estanque es monitoreado en tiempo real mediante un transmisor de nivel hidrostático, cuya señal es procesada por el PLC y abre o cierra la electroválvula de ingreso de agua hacia el estanque. Este instrumento permite visualizar el nivel en porcentaje y activar alarmas por nivel alto y nivel bajo, asegurando la protección operativa del sistema.

El control de la presión de salida se basa en un lazo de control PID, donde el operador ingresa la referencia de presión (Set-Point) mediante el HMI local. Una vez que se activa la operación, el sistema enciende la bomba de impulsión BOC-01, comandada por el variador de frecuencia VDF-01, el cual regula la velocidad del motor para alcanzar gradualmente el valor de presión deseado.

Si la BOC-01 operando a velocidad máxima no logra alcanzar el setpoint de presión, el controlador activa la BOC-02 mediante el VDF-02. A partir de ese momento, la lógica de control mantiene la BOC-01 operando al 100% y ajusta dinámicamente el régimen de operación de la BOC-02 para complementar el caudal necesario hasta alcanzar el setpoint de presión definido.

Finalmente, se contempla una lógica de respaldo automático. En caso de falla de cualquiera de las dos bombas principales (BOC-01 o BOC-02), el

sistema activará la bomba de respaldo BOC-03, la cual asume automáticamente el lugar de la bomba defectuosa, manteniendo la continuidad del servicio y asegurando la estabilidad de presión en la red de distribución.

A continuación, se desarrollará una descripción técnica del proyecto, abordando los aspectos fundamentales para su comprensión, así como los elementos físicos, dispositivos de instrumentación y sistemas de control que lo componen. Se detallarán los principales componentes hidráulicos y eléctricos de la planta de bombeo, incluyendo estanque, bombas, sensores de presión y caudal, junto con su integración mediante un sistema automatizado controlado por un PLC. Además, se expondrá la arquitectura funcional del sistema y los criterios de diseño utilizados, estableciendo las bases para la implementación de una solución eficiente, confiable y alineada con los estándares normativos vigentes.

2.3 Componentes del sistema

La selección de los componentes se realizó considerando la robustez, precisión, confiabilidad y compatibilidad para ambientes de planta de bombeo.

2.3.1 Consideración de diseño y seguridad

- **Robustez del sistema:** Todos los componentes del sistema (PLC, VDF, sensores, HMI y actuadores) se seleccionan para operar de forma confiable bajo condiciones adversas presentes en salas de bombeo, como humedad elevada, vibraciones mecánicas y presencia de polvo.
- **Calibración y mantenimiento:** El diseño incorpora acceso sencillo para la calibración periódica de los transmisores de presión y nivel, así como el mantenimiento preventivo de las bombas y válvulas, asegurando precisión en la operación y reduciendo fallas por desajustes o suciedad.
- **Redundancia operativa:** Se contempla una tercera bomba de respaldo (BOC-03) que entra en operación automáticamente ante la falla de cualquiera de las dos bombas principales, garantizando la continuidad del suministro de agua sin comprometer la presión de red.
- **Alarmas visuales:** El sistema contará con alarmas locales y remotas mediante pestañas emergentes que advertirán al personal en caso de nivel crítico en el estanque, pérdida de presión, fallas de bomba o fallas en sensores.
- **Bloqueos de seguridad (Interlocks):** Se implementará lógica en el PLC para evitar el encendido de bombas si el nivel del estanque es insuficiente o si los sensores detectan condiciones anormales, evitando el funcionamiento en seco o presiones inadecuadas que puedan dañar el sistema.
- **Modo de fallo seguro:** En caso de fallas críticas como pérdida de comunicación con sensores, corte de energía o sobre temperatura en los

motores, el sistema pasará automáticamente a un estado seguro, deteniendo el bombeo y notificando vía HMI o SCADA para evitar daños mayores.

- **Protección de infraestructura:** El control preciso de presión contribuye a proteger las redes de distribución aguas abajo, reduciendo la probabilidad de roturas, fugas o reclamos por baja presión, y extendiendo la vida útil de tuberías, válvulas y accesorios.

2.3.2 Instrumentación de campo

Los instrumentos de campo son aquellos dispositivos que van instalados directamente en el proceso, cuya función es medir variables del sistema para que el controlador según lógica tome decisiones, para esta planta de bombeo son los siguientes:

2.3.2.1 Sensor de nivel para estanque

- **Función:** Monitorea el nivel del estanque.
- **Rango de medición:** 0 a 20 mts
- **Características Técnicas:** Tipo hidrostático mide nivel de un líquido en función de la presión ejercida (Salida de señal 4-20mA).
- **Ubicación:** sumergido en estanque de nivel

2.3.2.2 Sensor de presión

- **Función:** Monitorea las presiones del sistema.
- **Rango de presión:** 0 a 10 bar

- **Características Técnicas:** Diseñado para aplicaciones industriales exigentes y entornos adversos, ofreciendo medición confiable incluso en presencia de vibraciones, golpes de ariete o cavitación (Salida de señal 4-20mA).
- **Ubicación:** Insertado en tubería de salida de planta de bombeo además en cada línea de las bombas.

2.3.3 Elementos de actuación

Los elementos de actuación son los encargados de ejecutar acciones físicas dentro del proceso, actuando según comando del controlador. Los presentes en esta planta serán:

2.3.3.1 Bombas centrifugas(existentes)

- **Función:** Impulsan el agua hacia la línea de salida
- **Características técnicas:** Centrifuga de succión simple de 55kW
- **Ubicación:** Conectadas a la línea de succión del estanque y a la línea de salida. Conectada eléctricamente a motor eléctrico.

2.3.3.2 Válvula motorizada

- **Función:** Abrir y cerrar caudal de ingreso a estanque.
- **Características técnicas:** Se inserta cabezal a válvula existente su giro va desde los 0° a 270°, funciona con 220V o 24VDC.
- **Ubicación:** Conectadas a la línea de succión del estanque y a la línea de salida. Conectada eléctricamente a motor eléctrico.

2.3.3.3 Variador de frecuencia (VDF)

- **Función:** Variar frecuencia de bomba (o variar velocidad o porcentaje de operación).
- **Características técnicas:** Siemens SINAMICS G120X – Especializado en aplicaciones de agua y HVAC (380-480 V, 50/60 Hz).
- **Ubicación:** En cada tablero de bomba en sala de control.

2.3.4 Sistema de control y comunicación

Es aquel encargado de la toma de decisiones del proceso, obtiene las señales de sus instrumentos de campo y comando las acciones mediante sus actuadores, en la planta se instalarán los siguientes:

2.3.4.1 Controlador lógico programable (PLC)

- **Función:** Es el "cerebro" del sistema. Recibe todas las señales de los sensores, ejecuta la lógica de control programada y acciona las bombas.
- **Características Técnicas:** PLC industrial robusto (Siemens S7-1215C DC/DC/DC (14 DI, 10 DO, 2 AI integrados + 1 puerto PROFINET). Con los siguientes Módulos de expansión:
 - 2 × SM 1221 DI 16x24VDC
 - 2 × SM 1222 DO 8x24VDC
 - 2 × SM 1231 AI 4x13bit
 - 1 SWITCH
- **Ubicación:** En tablero existente adentro de sala de control.

2.3.4.2 Interfaz hombre-maquina (HMI)

- **Función:** Permite al operador visualizar el estado del sistema, los valores de presión y nivel en tiempo real, tendencias, alarmas y modos de operación. También permite la interacción (ej. cambiar entre modo automático/Manual).
- **Características Técnicas:** Pantalla táctil industrial (ej. Siemens KTP, Rockwell PanelView Plus). Conexión Ethernet al PLC.
- **Ubicación:** Sala de control centralizada.

2.3.4.3 Comunicación

- **Entre Instrumentos y PLC:** Señal estándar industrial 4-20mA para la mayoría de los sensores y actuadores.
- **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.
- **Entre PLC y VDF:** Comunicación Ethernet (ej., Modbus TCP/IP, Profinet) además de análogas de 4 a 20 mA para la referencia de velocidad y estatus de bombas.
- **Alarmas:** Comandadas por PLC, mostradas en HMI y sala de monitoreo hacia los operadores (nivel alto y bajo, presión alta y baja, falla de bombas, etc.).

2.4 Lógica de control del sistema (Diagrama de flujo)

La lógica de control es el cerebro del sistema automático, ya que toma decisiones según corresponda a las variaciones de presión que puedan existir además de monitorear el nivel del estanque principal. Dicho esto, el sistema operará en 2 modos: automático y manual.

2.4.1 Rango de operación de la planta

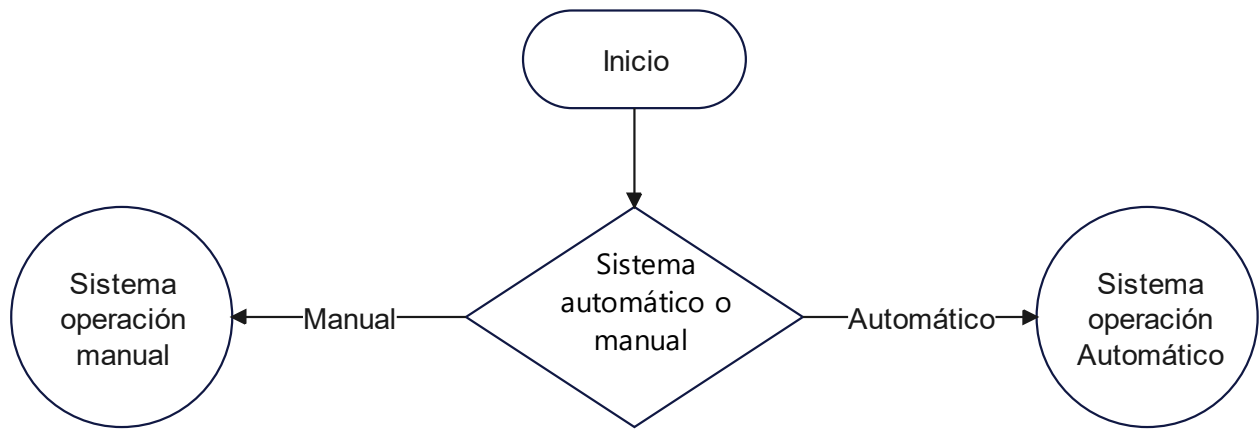
- Rango de presión óptima de trabajo: 1,5 a 6 bar
- Límite superior de alarma (presión alta): presión > 8 bar
- Límite inferior de alarma (presión baja): presión < 1,5 bar
- Límite superior de alarma (nivel alto): nivel > 98%
- Límite inferior de alarma (nivel bajo): nivel < 10 %

2.4.2 Modos de operación

- **Modo automático:** El sistema controla la presión de salida de forma autónoma.
- **Modo manual:** El sistema monitorea estatus y alerta ante fallas, pero la operatividad del sistema la maneja manualmente el operador.

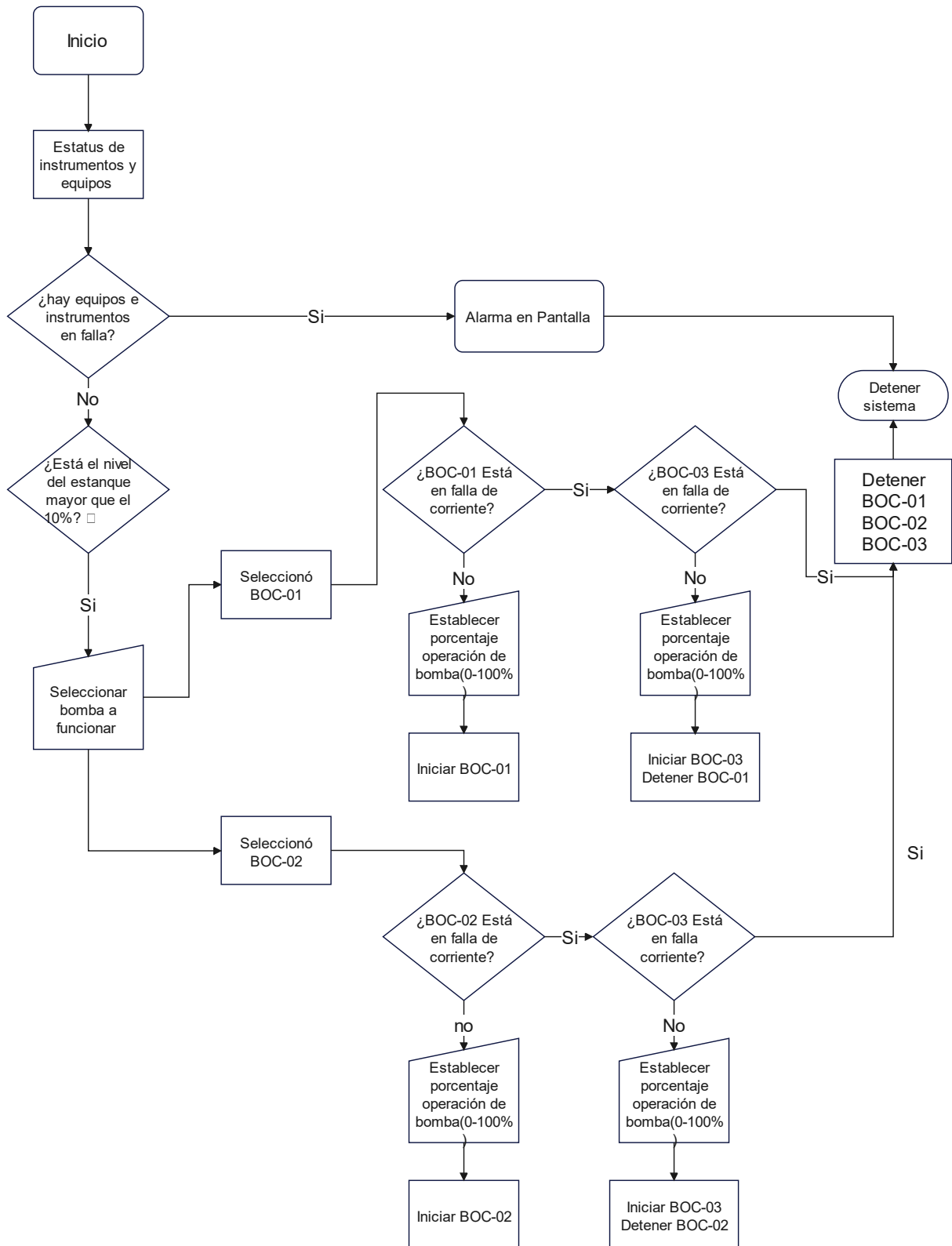
2.5 Filosofía de control

A continuación, se mostrará la lógica de control del proyecto, diseñada en diagrama de flujo se distribuye mediante 3 esquemas según su operación:



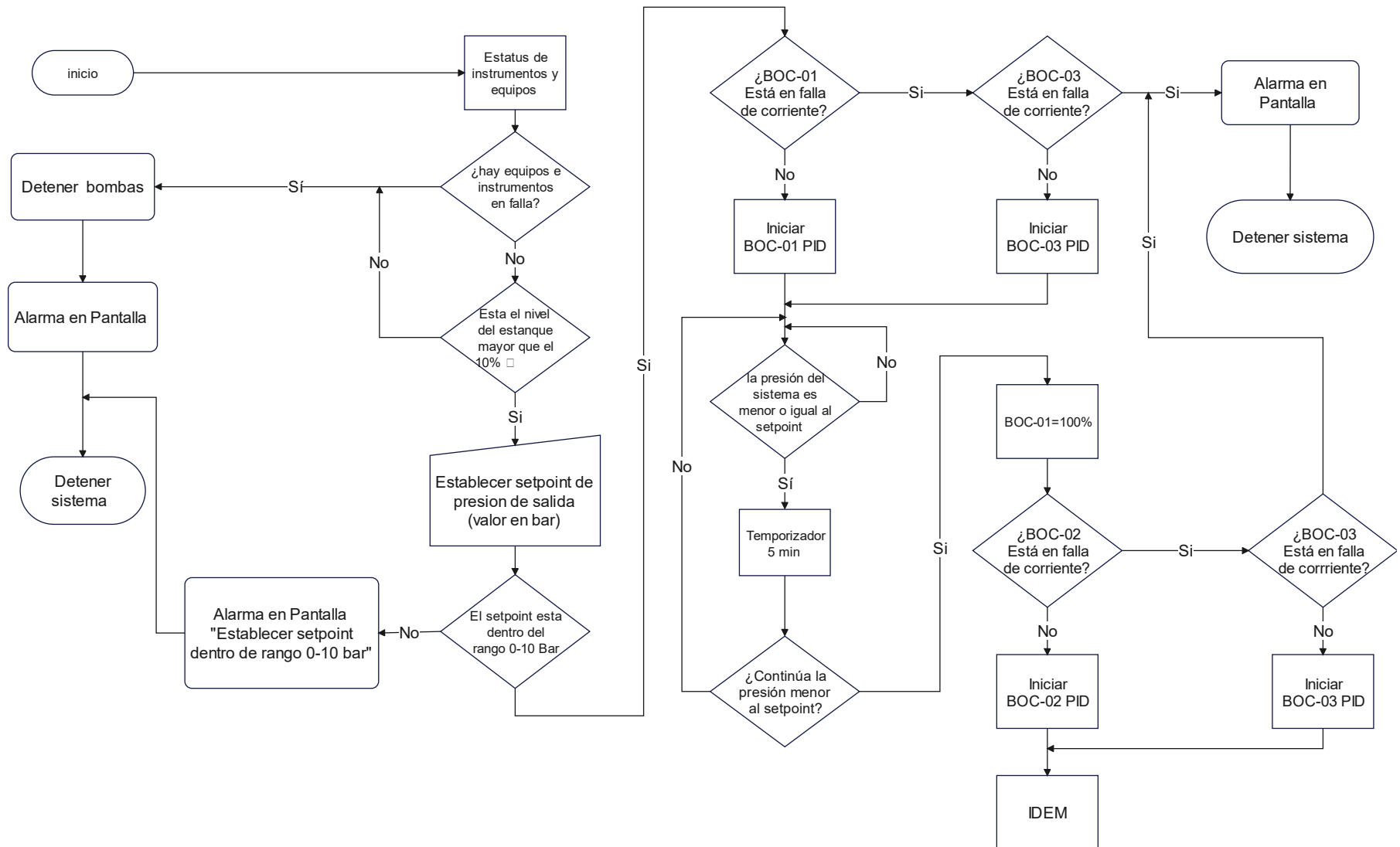
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN PROGRAMA WONDERSHARE EDRAWMAX

IMAGEN 2-4. SELECCIÓN SISTEMA MANUAL O AUTOMÁTICO



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN PROGRAMA WONDERSHARE EDRAWMAX

IMAGEN 2-5. SISTEMA MANUAL



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN PROGRAMA WONDERSHARE EDRAWMAX

IMAGEN 2-6. SISTEMA AUTOMÁTICO

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

3 Evaluación económica del proyecto

Esta sección tiene como objetivo analizar la viabilidad financiera del proyecto mediante la cuantificación de la inversión necesaria y los beneficios que generará, utilizando indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Para ello se necesitan los siguientes datos:

- Capex está asociado a costo materiales, mano de obra, todo lo relacionado a inversión inicial.
- Opex costos operacionales que se ahorrarán por implementar el proyecto
- Vida útil del proyecto. En este caso se estimará para el cálculo a 5 años
- Tasa de descuento (TMAR) se considerará para el cálculo el 10%
- Análisis de multas

Dicho lo anterior se comenzará con el cálculo del CAPEX o costo de inversión (costo de materiales, costo mano de obra)

3.1 Costo de materiales

A continuación, se mostrará en tabla 3.1, el detalle de lo que se utilizará en el proyecto, considerando equipos y materiales asociados al montaje.

TABLA 3.1 COSTOS DE MATERIALES

Cantidad	Descripción	Valor unitario	Total
Instrumentos en terreno			
7	Transmisor de presión MBS 3000 DANFOSS(4-20 mA)	\$150.000	\$1.050.000
1	Transmisor de nivel hidroestático sumergible	\$120.000	\$120.000
1	Actuador eléctrico (ODL) Cabezal de válvula	\$250.000	\$250.000
Sistema de control			
6	Siemens SINAMICS G120X VDF	\$3.120.000	\$18.720.000
1	PLC S7-1200 (CPU 1214C)	\$850.000	\$850.000
1	HMI Siemens KTP700 Basic	\$400.000	\$400.000
1	Módulos de Entradas/Salidas (E/S) PLC	\$300.000	\$300.000
Material de instalación			
1	Fuente de poder externa 24 V	\$90.000	\$90.000
200 m	Cable de instrumentación (3x1 mas shield)	\$1.200	\$240.000
50 m	Cable de alimentación válvula (3x1,5)	\$950	\$47.500
100	Terminales	\$250	\$25.000
5	Cintas aislantes	\$500	\$2.500
10	Prensa estopa	\$800	\$8.000
200	Amarrares plásticos	\$56	\$11.200
1000	Autoperforantes 1/2x8mm	\$10	\$10.000
TOTAL			\$22.074.200

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON COTIZACIONES DE PROVEEDORES

3.2 Carta Gantt del proyecto considerando costos de mano de obra

Para asegurar una ejecución ordenada y eficiente del proyecto, se ha desarrollado una Carta Gantt en tabla 3.3 con una duración total de **5 semanas**. Este cronograma organiza las actividades en fases secuenciales, garantizando que cada etapa se complete antes de avanzar a la siguiente.

La planificación considera las siguientes fases clave:

- **Semana 1: Reconocimiento y Planificación.** Esta fase inicial se enfoca en un diagnóstico detallado del estado actual de la planta. Se realiza un reconocimiento en el lugar para levantar hallazgos y considerar cualquier detalle que no haya sido incluido en la fase de ingeniería. Paralelamente, se lleva a cabo una planificación exhaustiva de los trabajos in-situ.

- **Semanas 2-4: Implementación.** Durante estas tres semanas, se ejecutan los trabajos principales del proyecto, que incluyen la instalación de equipos, la configuración de sistemas y las demás tareas necesarias para poner en marcha la solución propuesta.
- **Semana 5: Puesta en marcha y capacitación.** La última semana está dedicada a las pruebas de funcionamiento para asegurar que el sistema opere correctamente. Una vez verificado, se procede con la puesta en marcha. Adicionalmente, se imparten las capacitaciones necesarias al personal operativo para garantizar el uso adecuado y sostenible del nuevo sistema.

La jornada laboral se estipuló de 8 horas efectivas de trabajo por día. En el equipo se consideró un ingeniero, especialista eléctrico/instrumentista, ayudante y un prevencionista de riesgos. Los valores de la hora hombre son valores considerados según a valores de mercado en Chile agosto de 2025. A continuación, se muestra la tabla 3.2 Costo horas hombre por cargo.

TABLA 3.2 COSTO HORA-HOMBRE POR ESPECIALIDAD

Rol Profesional	Horas-Hombre (HH)	Costo Promedio (CLP/HH)	Costo Total
Especialista Eléctrico/Instrumentista	192	14.000	\$2.688.000
Ayudante	184	6.500	\$1.196.000
Prevencionista de Riesgos	160	18.000	\$2.880.000
Ingeniero (Supervisor)	96	25.000	\$2.400.000
Ingeniería de Detalle(ing. en control)	104	25.000	\$2.600.000
Total Costo Mano de Obra	736	88.500	\$11.764.000

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE HABITISMO.CL

3.2.1 Detalle de tareas, horas-hombre y costos

Como la duración de la implementación del proyecto está programada para ejecutarse en 5 semanas se mostrará el detalle de cada actividad demostradas en la tabla 3.3 carta Gantt con H-H.

TABLA 3.3 CARTA GANTT CON HH

item	Tarea del Proyecto	Ingeniero	Tec Eléctrico/instrumentista	Ayudante	Prevencionista	Totales
Semana 1						
		H-H	H-H	H-H	H-H	H-H
1.1	Visita a terreno y levantamiento	8	8	8	8	
1.2	Revisar Ingeniería de Detalles(P&ID, control y fuerza)	24	8	0	0	
1.3	Compra de materiales	0	24	24	0	
	Subtotal HH Semana 1	32	40	32	8	
	Total	\$800.000	\$560.000	\$208.000	\$144.000	\$1.712.000
Semana 2						
2.1	Preparación del Área de Trabajo	0	8	8	8	
2.2	Montaje instrumentos de presión(7)	0	12	12	12	
2.3	Montaje sensor de nivel	0	4	4	4	
2.4	Montaje cabezal válvula motorizada	0	8	8	8	
	Subtotal Semana 2	0	32	32	32	
	Total	0	448.000	208.000	576.000	\$1.232.000
Semana 3						
3.1	Montaje eléctrico en terreno (canalizado)	0	16	16	16	
3.2	Montaje eléctrico en terreno (cableado)	0	16	16	16	
3.3	conexión de instrumentación	0	8	8	8	
	Subtotal Semana 3	0	40	40	40	
	Total	0	\$560.000	\$260.000	\$720.000	\$1.540.000
Semana 4						
4.1	Conexión Eléctrica e Instrumentación	0	16	16	16	
4.2	Programación PLC y pruebas en gabinete	24	24	24	24	
	Subtotal Semana 4	24	40	40	40	
	Total	\$600.000	\$560.000	\$260.000	\$720.000	\$2.140.000
Semana 5						
5.1	Calibración de Instrumentos	0	16	16	16	
5.2	Pruebas de Lógica de Control	16	8	8	8	
5.3	Puesta en Marcha y Ajustes Finales (PEM)	16	16	16	16	
5.4	Capacitaciones operadores	8	0	0	0	
	Subtotal Semana 5	40	40	40	40	
	Total	\$1.000.000	\$560.000	\$260.000	\$720.000	\$2.540.000
TOTAL DEL PROYECTO		96	192	184	160	\$9.164.000

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

3.3 Costos de implementación (CAPEX)

La inversión inicial o como dicen sus siglas Capital Expenditures, representa el gasto de capital que se debe realizar incluyendo equipos, materiales, la contratación de mano de obra y servicios necesarios para dejar operativo el sistema. En este caso se detalla los costos incluidos:

- **Costo de materiales:** En esta sección esta todos los componentes de tecnología asociados al proyecto, tales como sensores de nivel, sensores de presión, variadores de frecuencia, controlador lógico programable, HMI cabezal de válvula motorizada e insumos asociados al montaje del sistema. Teniendo un valor de \$22.074.200 según tabla 3.1
- **Costo de mano de obra:** Se proyecta el valor de cada hora hombre asociada a cada profesional que integrará la solución a la sala de control de la planta de bombeo. Estimándose un valor de \$9.164.000 según tabla 3.2
- **Costo de ingeniería de detalles:** Corresponde al desarrollo técnico del proyecto, incluyendo la elaboración de planos constructivos, la selección de dispositivos, la programación del PLC y la configuración de los sistemas de control. Se Valorizará en \$2.600.000 revisar tabla 3.2

Se detallará un resumen de lo escrito anteriormente en la tabla 3.4 Resumen Capex.

TABLA 3.4 RESUMEN CAPEX

Costo de implementación (CAPEX)	
Costo mano de obra	\$9.164.000
Costos materiales	\$22.074.200
Costo ingeniería de detalles	\$2.600.000
Imprevistos (3%)	\$1.015.146
subtotal	\$34.853.346
Iva 19%	\$6.622.136
TOTAL (CAPEX)	\$41.475.482

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Una vez teniendo el valor total del costo de inversión inicial, se determinarán los costos operacionales que se ahorrarán con la implementación del proyecto.

3.4 Ahorros operacionales anuales (OPEX)

El OPEX hace referencia a los costos operativos que tiene la planta de bombeo tales como los sueldos de los operadores las mantenciones y cambio de suministros, al implementar el sistema se disminuirá los siguientes gastos:

3.4.1 Reducción de personal operativo

Actualmente, en la planta hay 4 operadores por turnos día y noche (2 operadores por turno). Con la automatización, se estima que solo se requerirá 1 operador por turno.

- Costo mensual por operador: \$800.000
- Cantidad de operadores actuales: 4
- Cantidad de operadores futuros: 2
- **Ahorro mensual:** $(4-2) \text{ operadores} \times \$800.000 = \$1.600.000$
- **Ahorro anual:** $\$1.600.000 \times 12 = \mathbf{\$19.200.000}$

3.4.2 Ahorro energético por uso de VDF

El uso de VDF permite ahorrar en costos energéticos al regular la velocidad de las bombas según la demanda del sistema. En este caso se estimará que 2 de las 6 bombas tendrán un funcionamiento continuo de 12 horas y las demás serán por breves tiempo, pero para efecto de cálculo solo se considerarán estas 2 bombas.

Para ello el ahorro energético se estima a partir de la **Ley de Afinidad de las Bombas**, un principio fundamental que relaciona la velocidad de rotación de una bomba con sus variables de operación: caudal, presión y potencia. Esta ley es la base técnica que justifica el uso de un Variador de Frecuencia (VDF) para optimizar el consumo.

Las leyes de afinidad se expresan mediante las siguientes relaciones:

- **Caudal:** Proporcional a la velocidad.
- **Presión:** Proporcional al cuadrado de la velocidad.
- **Potencia (Consumo energético):** Proporcional al cubo de la velocidad.

La fórmula que relaciona la potencia con la velocidad es la siguiente:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3$$

Donde:

- P1 = Potencia inicial (consumo sin VDF).
- P2 = Potencia final (consumo con VDF).
- N1 = Velocidad inicial (100% de la velocidad nominal).
- N2 = Velocidad final (la velocidad a la que opera el VDF, dependiendo de la demanda).

En este caso, al asumir que las bombas operan, en promedio, a un 90% de su velocidad nominal el consumo de energía se calcula de la siguiente manera:

- **Consumo de energía a velocidad reducida:**

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{90}{100} \right)^3 = \frac{P_2}{P_1} = (0,90)^3 = \frac{P_2}{P_1} = 0,729$$

Esto demuestra que al reducir la velocidad un 10%, la potencia consumida se reduce a un **73%** de la potencia original.

- **Porcentaje de ahorro energético:**

$$\text{Ahorro \%} = (1 - 0,729) \times 100\% = 27,1\%$$

Este porcentaje de ahorro, aplicado al consumo total, permite estimar una proyección de ahorro anual significativo.

- **Aplicación al cálculo (2 bombas, 12 horas/día)**
- **Potencia Total:** 2 bombas x 55 kW = 110 kW
- **Consumo teórico anual (sin VDF):** 110 kW x 12h x 365 días = 481.800 kWh
- **Ahorro energético anual:** 481.800 kWh x 27,1% = 130.568 kWh/año

Llevando este ahorro a pesos según la tarifa del kWh en zona industrial está a \$220 quedaría:

$$\text{Ahorro anual: } 130.567 \text{ kWh/año} \times \$220/\text{kWh} = \mathbf{\$28.724.916 \text{ al año}}$$

3.4.3 Ahorro por reducción de mantenimiento

Al implementar el sistema de monitoreo en la planta y los VDF en cada bomba estos eliminan los arranques y paradas bruscas que aceleran el desgaste de los componentes de la bomba y las tuberías. Al operar el motor a la velocidad óptima, se reduce el estrés mecánico, lo que prolonga la vida útil del equipo y disminuye la necesidad de reparaciones.

Además, con el sistema de monitoreo en tiempo real permite detectar anomalías en el funcionamiento de las bombas antes de que se conviertan en fallas graves. Esto transforma el mantenimiento de un modelo correctivo (reparar cuando se rompe) a uno predictivo (reparar antes de que falle), evitando paradas de emergencia y los altos costos asociados.

Para cuantificar este beneficio, se estima un ahorro de mantenimiento del 15% anual, basado en un costo referencial de \$1.500.000 por bomba.

- Costo de Mantenimiento Anual (4 bombas): \$6.000.000
- Ahorro de Mantenimiento Anual (15%): $\$6.000.000 \times 0,15 = \mathbf{\$900.000}$

3.4.4 Ahorro por multas de la SISS

La modernización de la planta no solo genera beneficios de eficiencia operativa, sino que también mitiga un importante riesgo financiero asociado a posibles sanciones de la **Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)**. La SISS es el organismo regulador que fiscaliza a empresas como Aguas Andinas y aplica multas por incumplimientos en la calidad y continuidad del servicio, como la baja de presión.

En caso de una falla grave que resulte en una baja de presión para los usuarios de lo Barnechea, la SISS podría aplicar una sanción que, según la Ley 18.902, se mide en Unidades Tributarias Anuales (UTA). La normativa establece que las multas por infracciones que afectan a la generalidad de los usuarios pueden ir desde 51 hasta 1.000 UTA.

Para el análisis, se utilizará el valor mínimo de sanción de 51 UTA como estimación conservadora del riesgo.

- **Valor UTA 2024 (referencial):** \$837.204
- **Cálculo de la multa mínima:** 51 UTA × \$837.204/UTA = **\$42.707.004**

3.4.5 Beneficio total anual cuantificable

En este caso se suman los 3 casos antes descritos ahorrando el 100% de las multas daría como resultado:

Beneficio total = \$42.707.004 [Multas] + \$900.000 [Mantenimiento] + \$28.724.916 [Ahorro energético] + \$19.200.000 [Ahorro personal] = **91.531.920 [CLP/AÑO]**

Beneficio total = 91.531.920 [CLP/AÑO]

3.5 Costos operativos anuales (OPEX) del nuevo sistema

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

- **Energía Eléctrica:** No se considerará ya que con el nuevo sistema se reduce los costos de energía por ende tenemos un valor agregado, no un gasto asociado
- **Mantenimiento realizado por personal (Bono por Mantenimiento):** Incentivo a operadores por tareas de mantenimiento y supervisión del nuevo sistema. 2.400.000 [CLP/año].
- **Mantenimiento preventivo (Stock de Repuestos):** Presupuesto anual para repuestos y actividades de mantenimiento preventivo. 800.000 [CLP/año].
- **Licencias/actualizaciones SCADA/PLC:** Costo por soporte técnico, licencias de software, firmware, respaldo remoto u otras actualizaciones de control. 600.000 [CLP/año].
- **Personal operativo:** Aunque el sistema está automatizado, se requiere supervisión básica y mantenimiento. Se estima 1 operador por turno (día y noche). 19.200.000 [CLP/año].

OPEX Total: \$19.200.000 + \$600.000 + \$800.000 + 2.400.000 = **23.000.000[CLP/año]**.

3.6 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 planta de bombeo.

El VAN se calcula mediante la siguiente fórmula:

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

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.

3.7 Análisis de flujo de caja por escenario

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

3.7.1 Escenario 1: el proyecto evita el 100% de la multa

Este escenario optimista asume que la implementación del sistema elimina por completo el riesgo de multas de la SISS.

- **Beneficio Anual Cuantificable:** 91.531.920 [CLP/año]
- **Flujo de Caja Neto Anual:** \$91.531.920 (Beneficios) - \$23.000.000 (OPEX) = 68.531.920 [CLP/año].

A continuación, se detalla el Flujo de caja con el cálculo del Van y TIR

TABLA 3.5 FLUJO DE CAJA EVITANDO MULTA AL 100%

MULTA AL 100%						
Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos y Ahorros						
Ahorro por Multas (100%)	\$0	\$42.707.004	\$42.707.004	\$42.707.004	\$42.707.004	\$42.707.004
Ahorro por mantención	\$0	\$900.000	\$900.000	\$900.000	\$900.000	\$900.000
Ahorro de personal	\$0	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000
Ahorro energético (10% en 2 boc)	\$0	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916
Total Beneficios Anuales	\$0	\$91.531.920	\$91.531.920	\$91.531.920	\$91.531.920	\$91.531.920
Egresos y Costos						
Inversión Inicial (CAPEX)	\$-41.475.782	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Costo Operativo Anual (OPEX)	\$0	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000
Total, Egresos Anuales	\$0	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000
Flujo de Caja Neto	\$-41.475.782	\$68.531.920	\$68.531.920	\$68.531.920	\$68.531.920	\$68.531.920
VAN (TMAR al 10%)	\$218.314.113,62					
TIR	164%					

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

3.7.2 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 la multa, mientras sigue ahorrando energía, costos de mantenimiento y costo de personal.

- **Ahorro por Multas (75%):** $\$42.707.004 \times 0.75 = 32.030.253$ [CLP/año].
- **Beneficio Anual Cuantificable:** $\$32.030.253$ (Ahorro Multas) + $\$48.824.916$ (Ahorro de mantención, personal y energía) = $80.855.168$ [CLP/año].
- **Flujo de Caja Neto Anual:** $\$80.855.168$ (Beneficios) – $23.000.000$ (OPEX) = $57.855.169$ [CLP/año].

TABLA 3.6 FLUJO DE CAJA EVITANDO MULTA AL 75%

MULTA AL 75%						
Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos y Ahorros						
Ahorro por Multas (75%)	\$0	\$32.030.253	\$32.030.253	\$32.030.253	\$32.030.253	\$32.030.253
Ahorro por mantención	\$0	\$900.000	\$900.000	\$900.000	\$900.000	\$900.000
Ahorro de personal	\$0	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000
Ahorro energetico(10% en 2 boc)	\$0	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916
Total Beneficios Anuales	\$-41.475.782	\$80.855.169	\$80.855.169	\$80.855.169	\$80.855.169	\$80.855.169
Egresos y Costos						
Inversión Inicial (CAPEX)	\$-41.475.782	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Costo Operativo Anual (OPEX)	\$0	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000
Total Egresos Anuales	\$0	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000	\$-23.000.000
Flujo de Caja Neto	\$-41.475.782	\$57.855.169	\$57.855.169	\$57.855.169	\$57.855.169	\$57.855.169
VAN(TMAR al 10%)	\$177.840.827,19					
TIR	138%					

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

3.7.3 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 la multa por incumplimiento de presión, manteniendo el ahorro de energía, costos de mantenimiento y costo de personal.

- **Ahorro por Multas (50%):** $\$42.707.004 \times 0.50 = 21.353.502$ [CLP/año].
- **Beneficio Anual Cuantificable:** $\$21.353.502$ (Ahorro Multa) + $\$48.824.916$ (Ahorro de mantención, personal y energía) = $70.178.418$ [CLP/año].
- **Flujo de Caja Neto Anual:** $\$70.178.418$ (Beneficios) - $\$23.000.000$ (OPEX) = $47.178.418$ [CLP/año].

TABLA 3.7 FLUJO DE CAJA EVITANDO MULTA AL 50%

MULTAS AL 50%						
Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos y Ahorros						
Ahorro por Multas (50%)	\$0	\$21.353.502	\$21.353.502	\$21.353.502	\$21.353.502	\$21.353.502
Ahorro por mantención	\$0	\$900.000	\$900.000	\$900.000	\$900.000	\$900.000
Ahorro de personal	\$0	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000	\$19.200.000
Ahorro energético (10% en 2 BOC)	\$0	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916	\$28.724.916
Total, Beneficios Anuales	-\$41.475.782	\$70.178.418	\$70.178.418	\$70.178.418	\$70.178.418	\$70.178.418
Egresos y Costos						
Inversión Inicial (CAPEX)	-\$41.475.782	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Costo Operativo Anual (OPEX)	\$0	-\$23.000.000	-\$23.000.000	-\$23.000.000	-\$23.000.000	-\$23.000.000
Total, Egresos Anuales	\$0	-\$23.000.000	-\$23.000.000	-\$23.000.000	-\$23.000.000	-\$23.000.000
Flujo de Caja Neto	-\$41.475.782	\$47.178.418	\$47.178.418	\$47.178.418	\$47.178.418	\$47.178.418
VAN (TMAR al 10%)	\$137.367.540,76					
TIR	111%					

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

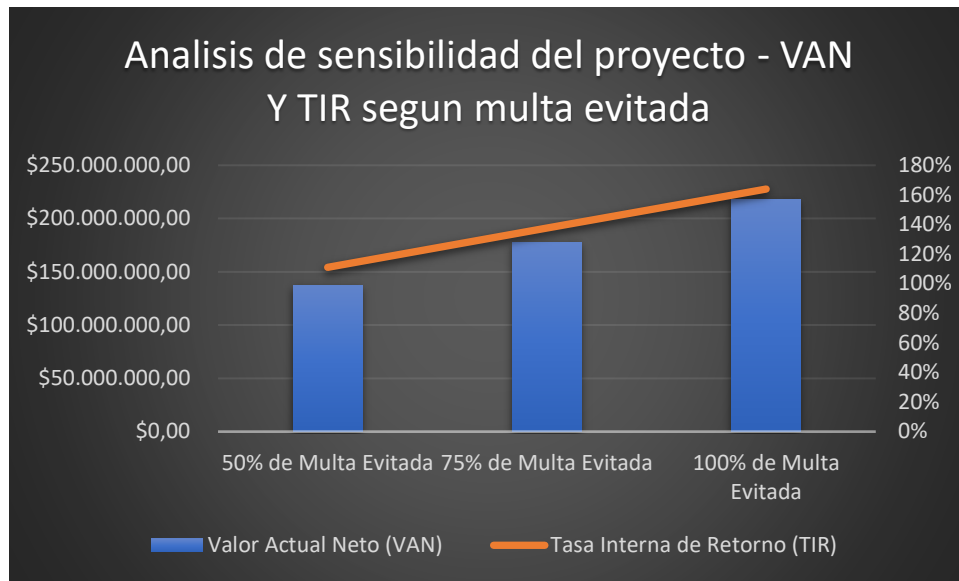
3.7.4 Comparativa de escenarios

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

TABLA 3.8 TABLA COMPARATIVA

Escenario de Éxito del Proyecto	Valor Actual Neto (VAN)	Tasa Interna de Retorno (TIR)	Tasa Mínima Aceptable de Retorno (TMAR)
100% de Multa Evitada	\$218.314.113,62	164%	10%
75% de Multa Evitada	\$177.840.827,19	138%	10%
50% de Multa Evitada	\$137.367.540,76	111%	10%

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL FLUJO DE CAJA.

GRÁFICO 3-1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROYECTO - VAN Y TIR SEGÚN MULTA EVITADA.

3.8 Costos de no implementarse la solución

Los costos de no implementar el proyecto implican mantener costos operacionales innecesariamente altos, exponer la operación a sanciones, y comprometer la eficiencia energética y la vida útil de los equipos. Se mostrará en la tabla 3.9 comparativa del sistema con y sin monitoreo constante:

TABLA 3.9 TABLA COMPARATIVA DE NO IMPLEMENTAR EL PROYECTOR

Ítem	Escenario Actual (Sin Automatizar)	Escenario Propuesto (Automatizado)	Diferencia (Pérdida Anual)
Consumo Energético	\$105.996.000	\$77.271.084	\$28.724.916
Costo de Personal Operativo	\$38.400.000 (4 operarios)	\$19.200.000 (2 operarios)	\$19.200.000
Mantenimiento Correctivo	\$3.000.000	\$2.100.000	\$900.000
Multas por Baja Presión (Riesgo SISS)	\$42.707.004	\$0 (mitigado con automatización)	\$42.707.004
Gestión de Datos/SCADA inexistente	No disponible	Incluido	—
Vida útil de bombas (desgaste acelerado)	Reposición más frecuente	Optimizada con VDF	—
		TOTAL	\$91.531.920

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

CONCLUSIONES

La evaluación integral de la automatización de la planta de bombeo, que abastece los sectores de Huinganal y Parque del Sol, demuestra que el proyecto no solo es una modernización técnica necesaria, sino una solución estratégica y económicamente sólida.

Las metas operacionales del proyecto, como la mejora de la eficiencia y la garantía de cumplimiento normativo, se lograron a través de la implementación de sensores de presión, variadores de frecuencia y un control automatizado con PLC. Esta solución tecnológica resuelve las deficiencias del sistema manual, asegurando un suministro de agua confiable y estable.

Desde el punto de vista financiero, la inversión inicial de \$41.475.482 se valida de manera contundente por un Valor Actual Neto (VAN) de \$218.314.113. Este VAN positivo confirma que el proyecto genera una creación de valor significativa, superando con creces el costo de capital. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 164% demuestra una rentabilidad excepcionalmente alta, muy por encima del 10% mínimo aceptable.

El análisis de sensibilidad reforzó esta conclusión al demostrar que la viabilidad del proyecto se mantiene incluso en escenarios conservadores, como una reducción en los ahorros por multas. Por lo tanto, se concluye que la automatización de la planta de bombeo es una inversión justificada que optimiza la eficiencia operativa, mitiga riesgos financieros y asegura la sostenibilidad del servicio a largo plazo.

Anexos

Unidades de medida

Voltaje (V): Es la cantidad de voltios que actúan en un aparato o en un sistema eléctrico. De esta forma, el voltaje, que también es conocido como tensión o diferencia de potencial, es la presión que una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz ejerce, sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado. De esta forma, se establece el flujo de una corriente eléctrica. A mayor diferencia de potencial que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica, mayor es el voltaje existente en el circuito al que corresponde ese conductor. La diferencia de potencial se mide en voltios (V), al igual que el potencial.

Amper(A): Un ampere equivale a la intensidad que tiene la corriente cuando, al pasar por dos conductores rectilíneos distantes entre sí a un metro en el vacío, con una sección circular que resulta despreciable y dispuestos de forma paralela, genera en ambos conductores de longitud infinita una fuerza correspondiente a dos diezmillonésimas de newton por metro de conductor. El dispositivo que mide los amperes de la corriente eléctrica recibe el nombre de amperímetro. Este instrumento, al ser conectado a un circuito eléctrico, revela qué cantidad de amperes tiene la corriente en circulación, reflejando de esta manera su intensidad.

Watts (W): El watt, como tal, es una unidad de potencia eléctrica que equivale a un Julio o Joule (J) por segundo. De acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades, el símbolo que identifica a los watts es W. El watt, en este sentido, es la unidad que mide la cantidad de energía entregada o

absorbida por un elemento en un tiempo determinado. O, dicho en términos empleados en la electricidad, el watt vendría a ser la potencia eléctrica producida por una diferencia de potencial de un voltio y una corriente eléctrica de un amperio.

Frecuencia Eléctrica [Hz]: Número de ciclos por segundo en una señal alterna expresado en [HZ].

Energía consumida [KWh]: Cantidad de electricidad utilizada en un tiempo determinado, medida en [kWh].

Unidades hidráulicas

Caudal: Cantidad de fluido que pasa por un punto en un tiempo determinado. Se mide en litros/segundos (l/s), metros cúbicos/hora (m^3/h) o Galones por minuto (GPM).

Presión: Fuerza ejercida por el fluido sobre una superficie. Se expresa en Pa, Bar, m.c.a o psi.

Altura manométrica: Energía por unidad de peso del fluido, representada en metros de elevación (m o ft).

Unidades mecánicas

Potencia: Trabajo realizado por unidad de tiempo, expresado en [kW] o [HP].

Velocidad de giro: Número de vueltas que da un eje en un minuto, medida en [RPM].

Torque: Fuerza aplicada en un eje para generar giro, medida en [N*m] o [lb*ft].

Unidades fisicoquímicas del agua

Temperatura: Nivel térmico del agua, medida en [°C] o [°F].

PH: Indica la acidez o alcalinidad del agua en una escala de 0 a 14 (sin unidad).

Conductividad eléctrica: Capacidad del agua para conducir electricidad, expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

BIBLIOGRAFÍA

Siemens AG. (2020). Manual de usuario PLC S7-1200. <https://support.industry.siemens.com>

Danfoss. (2021). Guía técnica de variadores de frecuencia VLT HVAC Drive FC 102.

Instrumentation Toolbox. (2020). Introduction to Process Control and Instrumentation. <https://instrumentationtools.com>

ISA (International Society of Automation). (2018). ISA-5.1: Instrumentation Symbols and Identification.

AWWA (American Water Works Association). (2017). Manual of Water Supply Practices – Pumping Stations.

Grundfos. (2019). Guía de selección de bombas centrífugas para agua potable.

Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). (2020). Normativa de presiones mínimas en redes de distribución de agua potable. <https://www.siss.gob.cl>

Agencia de Sostenibilidad Energética de Chile. (2022). Guía para la eficiencia energética en plantas de bombeo de agua potable.

Comisión Nacional de Energía (CNE). (2024). Tarifas de energía eléctrica por tipo de cliente en Chile. <https://www.cne.cl>

Project Management Institute (PMI). (2017). Guía del PMBOK – Sexta Edición.

MIDEPLAN – Ministerio de Desarrollo Social. (2014). Manual de Preparación y Evaluación de Proyectos de Inversión Pública.

NCh 777/2 Of.2020. Sistemas de agua potable – Parte 2: Requisitos para redes de distribución.

DS 735/69 MINSAL. Reglamento de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado.

Reglamento Eléctrico Chileno – SEC. Reglamento de Instalaciones de Consumo (RIC).