

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL PARA PROCESO DE LAVANDERÍA INDUSTRIAL EN CLÍNICA
ISAMÉDICA RANCAGUA**

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

Alumno: Brandon Ignacio Gálvez Gutiérrez

Profesor Guía:

Martín José García Gutiérrez

Profesor Correferente:

Franz Yurjevic Perin



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: Diseño de sistema de control para proceso de lavandería industrial en clínica Isamédica Rancagua

Nombre del candidato(a): Brandon Ignacio Gálvez Gutiérrez

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

Campus: Sede Viña del Mar Departamento: Electrotecnia e Informática

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: 12 de AGOSTO 2026. Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 13 de AGOSTO 2026. Firma: _____

RESUMEN

El presente Trabajo de Título expone el diseño integral de un sistema de control y automatización para el proceso de calentamiento y distribución de agua caliente sanitaria (ACS) en la lavandería industrial de la Clínica Isamédica Rancagua. A partir de un levantamiento técnico en terreno, se diagnosticó que la operación manual del sistema y la falta de un lazo de recirculación eficiente generaban inestabilidad térmica, desgaste prematuro de equipos y un consumo excesivo de gas licuado en la caldera.

Para dar solución a esta problemática, se desarrolló una ingeniería de detalles que propone una arquitectura de control centralizada en un autómatas programable Siemens S7-1200. El diseño contempla la instrumentación de campo no invasiva (como transmisores ultrasónicos), el ajuste de un lazo de control PID para la modulación de la válvula de gas, y el desarrollo conceptual de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) estructurada bajo el estándar de alto desempeño ISA-101.

Finalmente, la evaluación económica demostró la viabilidad financiera del proyecto. Con una inversión inicial estimada en \$18.483.150, la optimización del proceso proyecta ahorros operativos por \$4.820.000 anuales. El proyecto obtiene un valor actual neto (VAN) positivo de \$3.011.903 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 13,53%, logrando un periodo de recuperación de la inversión (Payback simple) de 5,48 años y un Payback descontado de 8,35 años, validando su rentabilidad en el horizonte de evaluación.

KEYWORDS: Control de temperatura, Eficiencia energética, Agua sanitaria, Control PID, Automatización Industrial.

ÍNDICE

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.....	2
1. Antecedentes generales	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Importancia de resolver el problema	4
1.3. Involucrados o afectados	5
1.4. Solución	5
1.5. Estado del arte	6
1.6. Requerimientos del proyecto	11
1.6.1. Controlador.....	11
1.6.2. Sistema de recirculación	12
1.6.3. Caldera de agua caliente	13
1.6.4. Sensores de temperatura	14
1.6.5. Acumulador de agua caliente sanitaria (ACS).....	14
1.6.6. Aplicación de la norma general técnica N.º199	15
1.7. Objetivos del proyecto.....	16
1.7.1. Objetivo general	16
1.7.2. Objetivos específicos	16
1.8. Alternativas de solución y evaluación	17
Alternativa 1: Control local mediante termostatos (Lógica On/Off)	17
Alternativa 2: Control basado en plataformas de desarrollo abierto (Microcontroladores)	17
Alternativa 3: Control centralizado mediante Autómata Programable (PLC) y HMI	18
1.8.1. Evaluación y selección de alternativa	19

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	20
2.1. Descripción general de la solución propuesta	21
2.2. Análisis de la demanda y criterios de diseño	21
2.2.1. Determinación del consumo de agua	21
2.2.2. Cálculo de la carga térmica	22
2.3. Arquitectura del sistema de control	23
2.4. Instrumentación y elementos finales de control	25
2.4.1. Arquitectura de conexión eléctrico de instrumentación	28
2.4.2. Medición de caudal y consumo sanitario	31
2.5. Estrategia de control y programación	31
2.5.1. Lógica de nivel y reposición de volumen (Lazo LT-101 / LCV-101)	32
2.5.2. Lógica de calentamiento y lazo PID (Lazo TT-101 / TCV-101)	32
2.5.3. Lógica de recirculación sanitaria (Lazo TT-102 / P-102)	33
2.6. Diseño de la interfaz hombre-máquina (HMI)	34
2.7. Resultados esperados y validación del diseño	37
2.8. Algoritmos de control y lógica de seguridad	38
2.9. Topología de red y comunicación	41
CAPÍTULO 3: ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROYECTO	42
3.1. Cronograma de ejecución (Carta Gantt)	43
3.2. Presupuesto de inversión inicial	45
3.2.1. Resumen de inversión inicial	48
3.3. Costos operativos de mantenimiento	49
3.3.1 Costos por consumo eléctrico	49
3.3.2 Costos de mantenimiento preventivo	49

3.4. Cuantificación de ahorros y beneficios.....	50
3.4.1. Ahorro por eficiencia energética (consumo de gas).....	51
3.4.2. Beneficios operativos y normativos.....	52
3.4.3. Flujo de caja proyectado.....	52
3.4.4. Indicadores de rentabilidad.....	55
3.4.5. Análisis de sensibilidad bidimensional	57
Conclusiones.....	59
Bibliografía	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama actual general sistema ACS.....	4
Figura 1.2. Diagrama de proceso para el control de temperatura del agua.....	6
Figura 1.3. Arquitectura general del sistema.....	7
Figura 1.4. Respuesta de la planta de control de temperatura de un estanque	8
Figura 1.5. Ejemplo sistema de ACS de manera instantánea	9
Figura 1.6. Ejemplo de ACS por acumulador	10
Figura 2.1. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del circuito ACS	26
Figura 2.2. Diagrama de lazos de control y conexión al PLC S7-1200	30
Figura 2.3. Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura	33
Figura 2.4. Esquemático de pantalla principal HMI (norma ISA-101)	35
Figura 2.5. Esquemático de pantalla de control y lazos PID (norma ISA-101).....	36
Figura 2.6. Esquemático de pantalla de alarmas (norma ISA-101)	37
Figura 2.7. Diagrama de Flujo 1: Lógica de nivel y reposición de volumen.....	38
Figura 2.8. Diagrama de Flujo 2: Lógica principal de calentamiento de agua	39
Figura 2.9. Diagrama de Flujo 3: Lógica de recirculación sanitaria	40
Figura 2.10. Esquema de topología de red (PLC – HMI – Planta)	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Comparación resultados de consumo de gas en sistema	10
Tabla 1.2. Cuadro comparativo y evaluación multicriterio de las alternativas	19
Tabla 2.1. Listado de componentes	25
Tabla 2.2. Listado de entradas y salidas (I/O) PLC S7-1200	28
Tabla 3.1. Carta Gantt de implementación del proyecto.....	43
Tabla 3.2. Cotizaciones de mercado	45
Tabla 3.3. Costos de ingeniería e instalación (mano de obra)	47
Tabla 3.4. Gastos generales	48
Tabla 3.5. Resumen de costos operativos y de mantenimiento anual	50
Tabla 3.6. Flujo de caja proyectado a 10 años	54
Tabla 3.7. Determinación del periodo de recuperación de capital mediante flujos acumulados.....	56
Tabla 3.8. Matriz de sensibilidad del VAN (\$) ante variaciones de ahorro y costos	57

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS:

ACS: Agua caliente sanitaria.

AI: Entrada analógica (*Analog Input*).

AO: Salida analógica (*Analog Output*).

CLP: Peso chileno (\$).

CPU: Unidad central de procesamiento (*Central processing unit*).

FAT: Pruebas de aceptación en fábrica (*Factory acceptance tests*).

FS: Factor de seguridad.

HH: Horas hombre.

HMI: Interfaz Hombre-Máquina (*Human-Machine Interface*).

I/O: Entradas y Salidas (*Inputs/Outputs*).

PID: Controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

PLC: Controlador Lógico Programable (*Programmable Logic Controller*).

PT100: Sensor de temperatura de resistencia de platino (100 ohmios a 0 °C).

RTD: Detector de temperatura por resistencia (*Resistance temperature detector*).

SCADA: Control de Supervisión y Adquisición de Datos (*Supervisory control and data acquisition*).

TIR: Tasa interna de retorno.

VAN: Valor actual neto.

B. VARIABLES Y UNIDADES DE MEDIDA:

°C: Grados Celsius (Temperatura).

Cp: Calor específico.

ΔT: Diferencial o variación de temperatura.

kcal/h: Kilocalorías por hora (Potencia térmica).

kW: Kilowatt (Potencia eléctrica/térmica).

m: Masa.

mA: Miliamperios (Corriente eléctrica).

Q: Energía térmica o calor.

V_{DC}: Voltaje en Corriente Continua (*Voltage Direct Current*).

C. SIMBOLOGÍA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

CV: Válvula de control (Control Valve) / variable de control.

FIT: Transmisor indicador de caudal (Flow Indicator Transmitter).

LSH: Interruptor/alarma de nivel alto (Level Switch High).

LSL: Interruptor/alarma de nivel bajo (Level Switch Low).

LT: Transmisor de nivel (Level Transmitter).

LCV: Válvula de control de nivel (Level Control Valve).

OP: Salida o resultado del proceso (Output Process).

P&ID: Diagrama de tuberías e instrumentación (Piping and Instrumentation Diagram).

PV: Variable de proceso (Process Variable).

SP: Punto de consigna (Set Point).

TCV: Válvula de control de temperatura (Temperature Control Valve).

TE: Elemento de temperatura (Sensor primario).

TT: Transmisor de temperatura (Temperature Transmitter).

Introducción

El correcto funcionamiento del sistema de agua caliente sanitaria (ACS) es fundamental en los procesos de lavandería industrial, especialmente en entornos clínicos donde la desinfección y limpieza de prendas deben cumplir estándares sanitarios estrictos. En la Clínica Isamédica Rancagua, el área de lavandería presentó deficiencias en la temperatura del agua suministrada, afectando la activación de los detergentes y el cumplimiento de las condiciones térmicas necesarias para la higienización del material clínico y textil.

Frente a esta problemática, se plantea el diseño de un sistema de control automático orientado a optimizar la regulación térmica del circuito de ACS, permitiendo mantener la temperatura dentro del rango requerido para el proceso de lavado. El proyecto incluye la evaluación del sistema existente, la selección de instrumentos y equipos adecuados, y la implementación de un controlador que gestione de manera eficiente las variables involucradas.

El desarrollo de esta propuesta busca mejorar la eficiencia energética, garantizar la calidad del servicio de lavandería y aportar una solución tecnológica adaptable a futuras ampliaciones del sistema. De esta manera, se contribuye tanto al cumplimiento de las normas sanitarias vigentes como al fortalecimiento de la gestión operativa dentro de la clínica.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1. Antecedentes generales

Este capítulo expone la problemática identificada en el sistema de agua caliente sanitaria (ACS) del área de lavandería de la Clínica Isamédica Rancagua, junto con el método propuesto para dar solución a las deficiencias detectadas y los objetivos que orientan el desarrollo del proyecto. Dado que se trata de una iniciativa de mejora, el enfoque se centra en optimizar el control térmico del proceso mediante la implementación de un sistema automatizado que garantice estabilidad, eficiencia y cumplimiento de las condiciones operativas requeridas.

1.1. Planteamiento del problema

El servicio de lavandería de la Clínica Isamédica, presenta actualmente deficiencias en su sistema de control de agua sanitaria, lo que impide realizar una desinfección eficiente de las prendas.

El sistema existente opera con una baja eficiencia, ya que, no cuenta con una adecuada regulación ni con la instrumentación necesaria para medir parámetros fundamentales como temperatura, caudal y presión, los cuales son variables clave para garantizar un proceso de lavado óptimo.

Además, el sistema utiliza una caldera a gas que calienta el agua mediante un interacumulador; sin embargo, no dispone de planos ni diagramas técnicos que permitan comprender con precisión el funcionamiento del proceso actual. Esta deficiencia térmica se origina a partir de la incorporación de una nueva lavadora al sistema existente. Además, se detectó una insuficiencia de flujo cuando las tres lavadoras operan de manera simultánea, lo que afecta el rendimiento general del proceso.

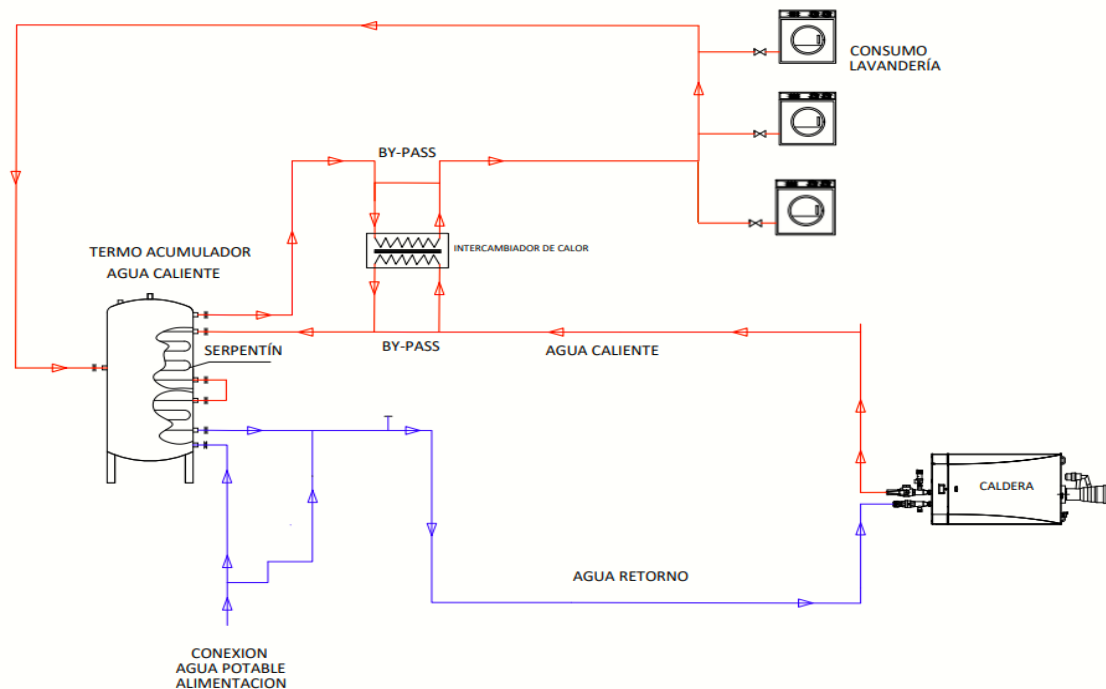


Figura 1.1. Diagrama actual general sistema ACS

Fuente: Elaboración propia

La figura 1.1. representa la arquitectura del sistema térmico, donde el ciclo de calentamiento se inicia en la caldera, la cual actúa como el generador de energía térmica elevando la temperatura del agua de entrada. Una vez alcanzada la temperatura de consigna, el fluido es transportado hacia el estanque acumulador, cuya función es almacenar el recurso térmico y actuar como un pulmón de inercia para absorber las variaciones de demanda. Finalmente, el agua caliente es distribuida desde el acumulador hacia las lavadoras industriales para los procesos de higienización, retornando parte del flujo al sistema para mantener la homogeneidad térmica del volumen almacenado.

1.2. Importancia de resolver el problema

La resolución del problema identificado en el sistema de agua caliente sanitaria (ACS) del área de lavandería de la Clínica Isamédica Rancagua es fundamental para garantizar la eficiencia y seguridad del proceso de lavado industrial. Actualmente, el agua no alcanza la temperatura

requerida de 85 °C, impidiendo la correcta activación de los detergentes desinfectantes, lo que resulta en prendas que no se limpian ni desinfectan de manera adecuada. Esta deficiencia compromete la higiene de la ropa utilizada por profesionales y pacientes, generando riesgos sanitarios y afectando la calidad del servicio.

Adicionalmente, el quemador de la caldera opera prácticamente de manera continua debido a la insuficiente aislación térmica de los conductos, lo que provoca que el agua llegue al final del circuito con temperaturas inferiores a las requeridas. Esta situación incrementa significativamente el consumo de gas, elevando los costos operativos y reduciendo la eficiencia energética del sistema. Resolver esta deficiencia permitirá asegurar la correcta desinfección de las prendas, optimizar el funcionamiento del equipo, disminuir el gasto energético y prolongar la vida útil de la caldera y sus componentes.

1.3. Involucrados o afectados

Los principales afectados por las deficiencias identificadas en el sistema de Agua Caliente Sanitaria (ACS) del área de lavandería de la Clínica Isamédica Rancagua son los usuarios y pacientes de la clínica, así como el personal que manipula y utiliza las prendas lavadas.

Esta situación compromete la seguridad e higiene de los pacientes, aumentando la posibilidad de infecciones cruzadas o contaminación de los espacios clínicos. Asimismo, afecta la confianza en el servicio de lavandería de la clínica y el cumplimiento de normas de higiene y desinfección establecidas por organismos de salud. Por lo tanto, hay que asegurar que el sistema de ACS funcione correctamente para proteger la salud de los usuarios y garantizar que los procesos de lavado cumplan con los estándares requeridos en una institución de salud.

1.4. Solución

Luego de realizar un levantamiento técnico del sistema de control y efectuar mediciones de temperatura en distintos puntos del circuito de agua caliente sanitaria (ACS), se identificaron las mejoras necesarias para alcanzar la temperatura requerida en las lavadoras industriales.

1.5. Estado del arte

A continuación, se presenta el estado del arte correspondiente al proyecto propuesto, el cual se fundamenta en la revisión de literatura, tesis y artículos científicos relacionados con los sistemas de agua caliente sanitaria.

Entre los estudios analizados, destaca el desarrollo de un sistema de monitoreo y control de temperatura de un estanque de agua implementado entre Chile y España, utilizando redes de comunicación de alta velocidad. El proceso descrito consiste en un estanque con entrada y salida continua de agua, equipado con un sensor de temperatura y conectado a un controlador lógico programable (PLC).

El sistema incorpora un calefactor encargado de elevar la temperatura del agua que ingresa a temperatura ambiente. El principal desafío del proceso radica en el diseño de un controlador, típicamente de tipo proporcional-integral (PI) o proporcional-integral-derivativo (PID), capaz de mantener la temperatura del estanque en un valor de consigna determinado por el operador.

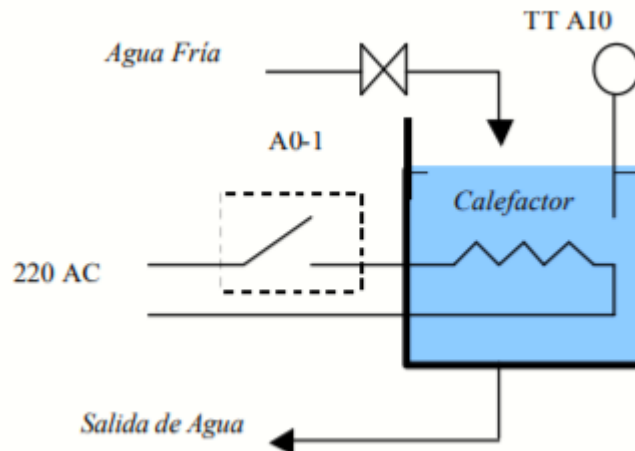


Figura 1.2. Diagrama de proceso para el control de temperatura del agua

Fuente: Cesar San Martin, «Monitoreo y control de temperatura de un estanque de agua entre Chile y España usando redes de alta velocidad,» Universidad de la Frontera, Temuco, 2003.

En la figura 1.2 se observa el funcionamiento general del proceso para el control de temperatura del agua con su respectiva instrumentación para monitorear las variables manipuladas.

Para la operación y monitoreo de las variables de proceso, se implementa un servidor en LabVIEW que cumple una doble función: por un lado, permite la interacción directa con la planta, y por otro, establece la comunicación con el cliente. La aplicación cliente, también desarrollada en LabVIEW, puede funcionar en modo monitoreo o controlador, una dualidad operativa que se alinea directamente con los requerimientos de la clínica.

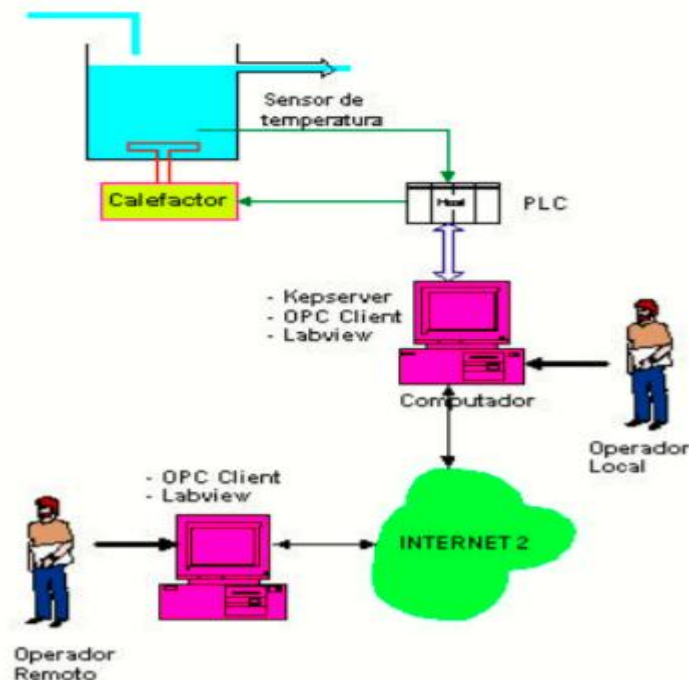


Figura 1.3. Arquitectura general del sistema

Fuente: Cesar San Martin, «Monitoreo y control de temperatura de un estanque de agua entre chile y españa usando redes de alta velocidad,» Universidad de la Frontera, Temuco, 2003.

En la figura 1.3 se demuestra la topología de funcionamiento general del sistema, demostrando la secuencia desde el operador hasta la manipulación en el control.

Con el propósito de validar el funcionamiento general del sistema de monitoreo remoto desarrollado en el año 2003, se muestra un ejemplo de implementación de un controlador proporcional-integral (PI). La respuesta dinámica de la planta obtenida durante esas pruebas se presenta en la Figura 1.4.

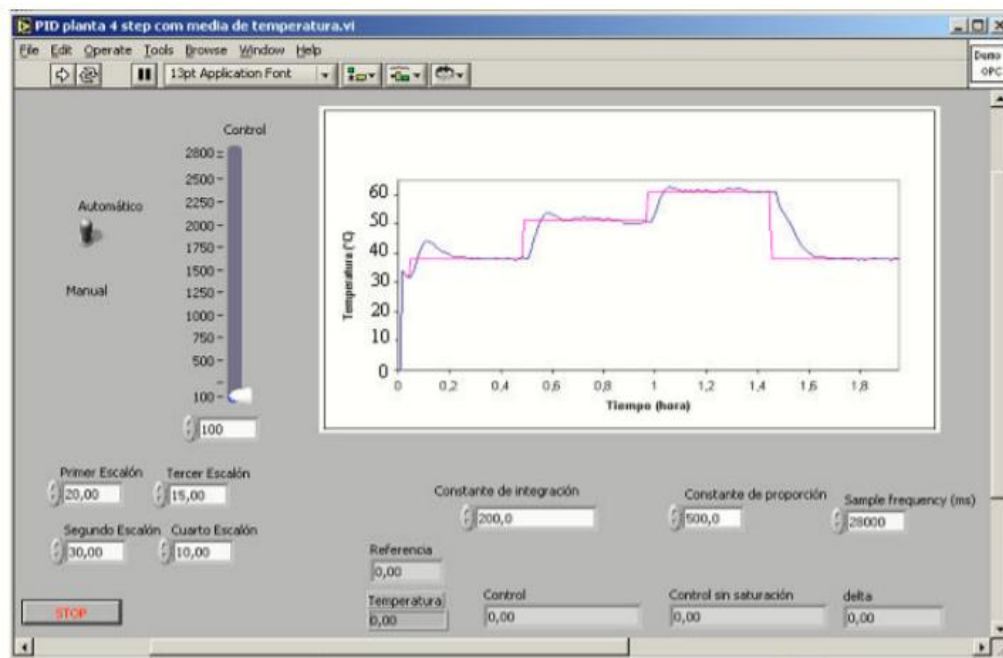


Figura 1.4. Respuesta de la planta de control de temperatura de un estanque

Fuente: Cesar San Martin, «Monitoreo y control de temperatura de un estanque de agua entre Chile y España usando redes de alta velocidad,» Universidad de la Frontera, Temuco, 2003.

A partir del sistema de control mostrado en la Figura 1.4, se puede apreciar que este tipo de implementación resulta de gran utilidad como referencia para el presente proyecto, ya que evidencia la posibilidad de operar un control de temperatura de agua tanto de forma local como remota.

La operación remota ofrece importantes ventajas, permitiendo a los operadores supervisar y ajustar la temperatura del agua sin necesidad de encontrarse físicamente en la planta, lo que incrementa la eficiencia y la seguridad operativa.

Asimismo, se observa el comportamiento dinámico de la temperatura del agua, destacando la importancia de mantener un control preciso, dado que esta variable puede

presentar fluctuaciones significativas en ausencia de una regulación adecuada. Por lo tanto, este aspecto debe considerarse cuidadosamente en el diseño del sistema de agua caliente sanitaria, con el fin de minimizar variaciones térmicas y garantizar la estabilidad del proceso.

Se presenta un estudio enfocado en la optimización de sistemas de calefacción industrial mediante el uso de acumuladores, considerando dos principios comunes para la obtención de agua caliente: uno basado en un intercambiador de calor y otro que incorpora un acumulador de agua.

Los resultados obtenidos en dicha investigación indican que una caldera con acumulador puede consumir hasta un 21 % menos de gas natural en comparación con los sistemas de preparación instantánea de agua caliente sanitaria mediante intercambiador de calor.

El objetivo principal del estudio citado consiste en comparar la eficiencia energética de las soluciones más utilizadas en la producción de agua caliente sanitaria tanto en edificios como en viviendas unifamiliares.

En este contexto, la preparación instantánea del agua caliente a partir del suministro mediante un intercambiador de calor permite mantener un flujo continuo para un número limitado de usos simultáneos, lo que representa una alternativa viable, pero con restricciones de capacidad frente a los sistemas acumulativos. Dicho sistema se representa gráficamente en la figura 1.5.

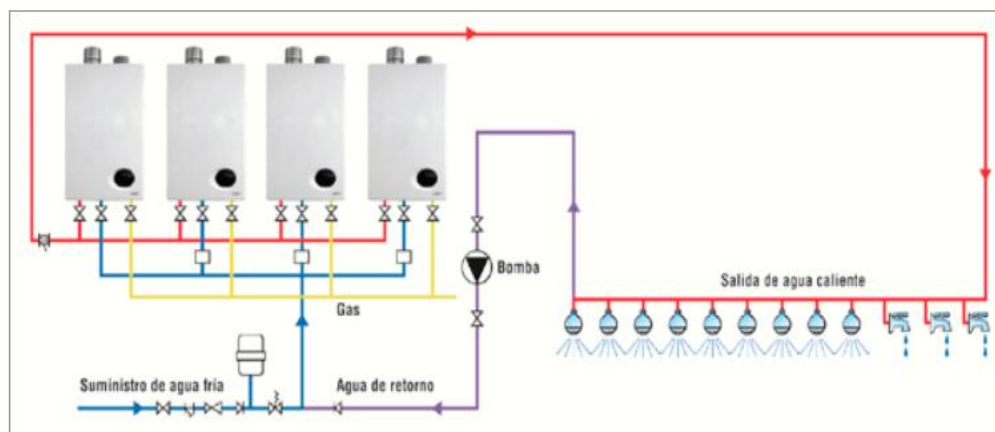


Figura 1.5. Ejemplo sistema de ACS de manera instantánea

Fuente: «Sistemas Eficientes para la producción de Agua Caliente Sanitaria» ANWO, Agosto 2014.

Por otro lado, el uso de un acumulador permite disponer de agua a la temperatura deseada incluso durante los periodos de máxima demanda, garantizando la disponibilidad continua de agua caliente y conservando su temperatura durante los intervalos de bajo uso, lo cual se demuestra en la figura 1.6.

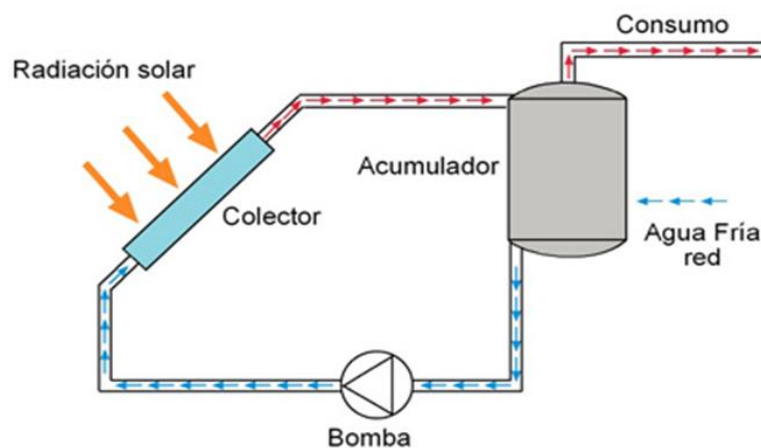


Figura 1.6. Ejemplo de ACS por acumulador

Fuente: Octavio García Valladares «Monitoreo De Sistemas Solares Térmicos» Instituto de Energías Renovables, IER-UNAM.

Luego de efectuar los ensayos correspondientes al consumo de energía, se recopilaron los datos experimentales que se detallan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Comparación resultados de consumo de gas en sistema

Experimento	Temperatura inicial(°C)	Temperatura final(°C)	Agua sanitaria preparada (Litros)	Gas consumido (m^3)	Rendimiento (%)
Acumulador	22,5 °C	38,5 °C	100L.	0,452	72%
Instantáneo	22,5 °C	38,5 °C	100L.	0,573	51%

Fuente: Ioan-Valentin Sita, «Optimización de sistemas de calefacción residencial utilizando Acumuladores,» Universidad Técnica de Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Rumania, 2015.

A partir de los datos obtenidos, se deduce que el consumo de gas es menor cuando el sistema incorpora un acumulador para la producción de agua caliente sanitaria, evidenciando un

ahorro aproximado del 21 % en combustible respecto a los sistemas de preparación instantánea para calentar la misma cantidad de agua.

De este modo, se concluye que los sistemas por acumulación presentan una mayor eficiencia energética en comparación con los sistemas instantáneos, lo que permite orientar la selección del tipo de sistema más adecuado para las necesidades de la clínica.

En consecuencia, la reducción en el consumo de combustible se traduce también en un menor costo operativo, generando un ahorro económico significativo para la institución al implementar una solución más eficiente para el suministro de agua caliente sanitaria en el servicio de lavandería.

1.6. Requerimientos del proyecto

Antes de realizar el desarrollo del proyecto, es necesario conocer algunos conceptos relacionados al control e instrumentación a utilizar para llevar a cabo el proyecto.

1.6.1. Controlador

El controlador constituye uno de los componentes más importantes del sistema, ya que es el encargado de supervisar, comparar y ajustar las variables de proceso para mantenerlas dentro de los valores establecidos. Su función principal es recibir la señal de los sensores, interpretarla y enviar las órdenes de control necesarias a los actuadores o elementos finales, asegurando el funcionamiento estable y eficiente del sistema térmico.

En el contexto de un sistema de agua caliente sanitaria (ACS), el controlador tiene la tarea de regular la temperatura del agua en función de un valor de consigna definido por el operador. Para ello, compara continuamente la temperatura medida por el sensor con el valor deseado y, en base a la diferencia (error), actúa sobre la caldera o las válvulas de control para mantener la temperatura dentro del rango óptimo.

Este proceso de regulación puede realizarse mediante distintos tipos de algoritmos, siendo uno de los más utilizados el control proporcional–integral-diferencial (PID), que permite

corregir desviaciones de manera estable y precisa. El empleo de este tipo de control garantiza un equilibrio entre la rapidez de respuesta y la estabilidad del sistema, evitando fluctuaciones térmicas que puedan afectar el rendimiento energético o la seguridad del proceso.

El controlador también puede integrarse a sistemas de monitoreo remoto o automatización industrial, lo que facilita la supervisión en tiempo real, el registro de datos históricos y la detección temprana de posibles fallas. En el presente proyecto, el controlador representa el núcleo del sistema de regulación térmica, siendo esencial para lograr una operación eficiente, confiable y acorde a los estándares exigidos en instalaciones hospitalarias.

1.6.2. Sistema de recirculación

El sistema de recirculación de agua caliente sanitaria (ACS) tiene como objetivo mantener la temperatura del agua constante dentro de la red de distribución, garantizando que el agua caliente esté disponible de manera inmediata en los puntos de consumo. Para ello, se incorpora una bomba de recirculación que impulsa el agua caliente desde el acumulador hacia las tuberías de suministro y la retorna nuevamente al depósito, conformando un circuito cerrado.

Este tipo de sistema evita que el agua se enfríe en las tuberías durante los periodos sin consumo, optimizando el confort térmico y reduciendo el desperdicio de agua. Además, permite un control más eficiente de la temperatura, ya que el agua circula de forma continua y se mantiene a un nivel térmico uniforme en toda la red.

Entre los componentes principales se encuentran la bomba de recirculación, las válvulas de retención, los sensores o termostatos de control de temperatura y la tubería de retorno. Estos elementos trabajan en conjunto para regular el flujo de agua y activar el sistema únicamente cuando la temperatura desciende por debajo del valor establecido.

El empleo de bombas de recirculación proporciona diversas ventajas, como la disponibilidad inmediata de agua caliente, la reducción del consumo energético y la disminución del tiempo de espera en los puntos de uso. Sin embargo, su diseño requiere una correcta selección de la bomba, un aislamiento térmico adecuado de las tuberías y un control

automatizado eficiente, con el fin de evitar pérdidas de calor innecesarias y garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.

1.6.3. Caldera de agua caliente

Las calderas son equipos térmicos diseñados para transferir energía calorífica al agua mediante la combustión de un combustible —generalmente gas natural, gas licuado o diésel— o mediante resistencias eléctricas, según el tipo de instalación. Dependiendo del propósito del proceso, las calderas pueden clasificarse principalmente en calderas de vapor y calderas de agua caliente.

Las calderas de vapor se emplean en procesos industriales donde es necesario generar vapor a alta presión para tareas de esterilización, calefacción o accionamiento de equipos. Sin embargo, en el caso del presente proyecto, el enfoque se centra en la caldera de agua caliente, por ser el tipo más adecuado para el suministro térmico del sistema de agua caliente sanitaria (ACS) en el servicio de lavandería.

Las calderas de agua caliente operan elevando la temperatura del agua sin llegar a convertirla en vapor. El fluido calentado circula hacia un intercambiador de calor o acumulador, donde transfiere su energía térmica al sistema de distribución. Este tipo de caldera se caracteriza por su seguridad operativa, eficiencia energética y facilidad de control, lo que la convierte en una opción ideal para aplicaciones donde se requiere una temperatura constante y moderada, como en instalaciones hospitalarias o residenciales.

El principio de funcionamiento se basa en una combustión controlada, la cual genera gases calientes que atraviesan un intercambiador interno, transfiriendo calor al agua que circula por el sistema. Posteriormente, el agua caliente es impulsada hacia la red mediante bombas de recirculación, asegurando una distribución uniforme de la temperatura.

En este proyecto, la implementación de una caldera de agua caliente a gas permitirá mantener un control preciso de la temperatura del agua sanitaria, garantizando la eficiencia del proceso de lavado y contribuyendo al cumplimiento de los estándares de higiene requeridos en un entorno clínico.

1.6.4. Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura son dispositivos encargados de medir la variación térmica de un medio y transformarla en una señal eléctrica proporcional, que puede ser interpretada por un sistema de control o monitoreo. Estos instrumentos son fundamentales en los sistemas de agua caliente sanitaria (ACS), ya que permiten supervisar y regular la temperatura del fluido, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente.

En el contexto del presente proyecto, el sensor de temperatura cumple un papel esencial dentro del circuito de control térmico, ya que proporciona la información necesaria para ajustar el proceso de calentamiento del agua. Su señal es utilizada por el controlador para comparar la temperatura real con el valor de consigna establecido, generando así las acciones de corrección requeridas para mantener una temperatura estable en el sistema.

Entre los distintos tipos de sensores existentes como los termistores, termopares y detectores de resistencia, los sensores de resistencia destacan por su alta precisión, estabilidad y tiempo de respuesta adecuado para aplicaciones industriales. Este tipo de sensor es ampliamente utilizado en sistemas donde se requiere un control de temperatura confiable y continuo, como es el caso de las instalaciones hospitalarias.

El uso de un sensor de temperatura adecuado permite optimizar el desempeño de la caldera y del sistema de recirculación, evitando fluctuaciones térmicas excesivas y mejorando la eficiencia energética general del proceso.

1.6.5. Acumulador de agua caliente sanitaria (ACS)

El acumulador de agua caliente sanitaria (ACS) es un componente fundamental dentro de los sistemas térmicos, cuya función principal es almacenar el agua previamente calentada para disponer de ella de forma inmediata cuando sea requerida en los distintos puntos de consumo.

Este dispositivo permite mantener una reserva de agua a una temperatura constante, reduciendo la necesidad de un calentamiento continuo por parte de la caldera y optimizando así la eficiencia energética del sistema. El acumulador actúa como un intermediario térmico entre la

fuentes de calor (la caldera) y la red de distribución, asegurando la estabilidad del suministro incluso en periodos de alta demanda.

El funcionamiento se basa en la estratificación térmica del agua dentro del estanque: el agua más caliente se mantiene en la parte superior, mientras que el agua más fría se ubica en la parte inferior, facilitando un intercambio eficiente de calor. Este diseño permite que la caldera opere de forma más controlada, evitando ciclos de encendido y apagado frecuentes que podrían afectar su vida útil.

Además, el acumulador se encuentra generalmente aislado térmicamente para minimizar las pérdidas de calor, y puede incorporar sensores de temperatura que monitorean el nivel térmico del agua, enviando señales al sistema de control para activar la caldera o la bomba de recirculación cuando sea necesario.

El uso de un acumulador en este tipo de sistemas resulta especialmente beneficioso en instalaciones hospitalarias o de servicios continuos, donde la disponibilidad de agua caliente debe mantenerse sin interrupciones. En el contexto del presente proyecto, el acumulador cumple un papel esencial al garantizar la eficiencia, estabilidad y confiabilidad del sistema de agua caliente sanitaria del servicio de lavandería.

1.6.6. Aplicación de la norma general técnica N.º199

La Norma General Técnica N.º 199, emitida por el Ministerio de Salud de Chile (Resolución Exenta N.º 340, 2018), establece los procedimientos y requisitos para los procesos de esterilización y desinfección de alto nivel en establecimientos de atención de salud.

Si bien la norma se orienta principalmente al manejo de artículos médicos estériles, sus principios son aplicables al proceso de higienización de prendas en una lavandería clínica, donde también es fundamental evitar la proliferación de agentes patógenos.

Entre los aspectos más relevantes para este proyecto se destacan:

- La necesidad de control térmico y trazabilidad en los procesos de lavado y desinfección.
- La validación de las condiciones de operación, como temperatura y tiempo de exposición.
- La responsabilidad del establecimiento en garantizar que los procesos de higienización cumplan los estándares sanitarios establecidos.
- El sistema propuesto de agua caliente sanitaria basado en una caldera, acumulador, recirculación y control automático de temperatura contribuye directamente al cumplimiento de los criterios definidos en esta norma, asegurando una desinfección eficaz y una operación segura y documentada en la lavandería clínica.

1.7. Objetivos del proyecto

Para el correcto desarrollo del proyecto, se definirán objetivos generales y específicos.

1.7.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de control de agua caliente sanitaria para lavandería de clínica ISAMEDICA.

1.7.2. Objetivos específicos

- Determinar situación actual del sistema
- Diseñar un sistema de control para el agua caliente sanitaria para servicio de lavandería hospitalario
- Realizar estudio económico del proyecto

1.8. Alternativas de solución y evaluación

Para dar respuesta a las deficiencias del sistema de Agua Caliente Sanitaria (ACS) y cumplir con los estándares requeridos por la Clínica Isamédica, se plantearon tres alternativas de diseño en control e instrumentación. A continuación, se describen y evalúan para determinar la arquitectura óptima a desarrollar.

Alternativa 1: Control local mediante termostatos (Lógica On/Off)

Consiste en instalar termostatos mecánicos o digitales básicos en el estanque acumulador que accionen el quemador de la caldera de forma directa (On/Off).

- Ventajas: Bajo costo de inversión inicial y facilidad de instalación sin requerir programación compleja.
- Desventajas: Alta inercia térmica que genera sobreimpulsos y caídas drásticas de temperatura. No soluciona el problema de ineficiencia en el consumo de gas, no permite supervisión centralizada ni integración de alarmas críticas de nivel o caudal.

Alternativa 2: Control basado en plataformas de desarrollo abierto (Microcontroladores)

Consiste en diseñar un sistema de control utilizando placas de prototipado electrónico (como Arduino) integradas a relés y módulos de acondicionamiento de señal para procesar el lazo PID.

- Ventajas: Costo de hardware sumamente bajo y alta flexibilidad en la programación del código.
- Desventajas: Los componentes no cuentan con certificaciones para entornos industriales ni protección contra interferencias electromagnéticas (EMI), lo que representa un riesgo inaceptable para la seguridad operativa de una clínica. Además, carece de protocolos estándar para la implementación de una interfaz hombre-máquina (HMI) robusta.

Alternativa 3: Control centralizado mediante Autómata Programable (PLC) y HMI

Arquitectura basada en un Controlador Lógico Programable (PLC) industrial que gestione un lazo de control PID para modular una válvula de gas, integrando instrumentación de campo (sensores Pt100, transmisores ultrasónicos) y supervisión a través de una pantalla HMI estándar.

- Ventajas: Alta fiabilidad, robustez industrial, procesamiento nativo de algoritmos PID avanzados y capacidad de registrar datos históricos (trazabilidad) para cumplir estrictamente con la Norma Técnica N.º 199.
- Desventajas: Mayor costo de inversión inicial en hardware y requiere horas de ingeniería especializada para su programación y sintonización.

1.8.1. Evaluación y selección de alternativa

Para determinar la solución definitiva, se aplicó una matriz de evaluación técnica considerando un peso del 1 al 5 para los criterios más relevantes del proceso hospitalario:

Tabla 1.2. Cuadro comparativo y evaluación multicriterio de las alternativas

Criterio de Evaluación	Alt 1: On/Off local	Alt 2: Microcontrolador	Alt 3: PLC + HMI
Estabilidad térmica (Precisión)	2	3	5
Seguridad y Robustez Industrial	3	1	5
Cumplimiento Normativo (Trazabilidad)	1	2	5
Costo de Implementación	5	4	2
Escalabilidad y Supervisión	1	3	5
PUNTUACIÓN TOTAL	12	13	22

Fuente: Elaboración propia

Conclusión de la evaluación:

Al analizar los resultados, la Alternativa 3 (Control centralizado mediante PLC y HMI) se perfila como la única solución capaz de garantizar la estabilidad térmica, la eficiencia energética y la robustez requerida para un entorno clínico. Aunque su costo de inversión es mayor, los beneficios a largo plazo en la reducción del consumo de gas y el cumplimiento normativo justifican plenamente su elección. Por consiguiente, esta será la arquitectura tecnológica que se desarrollará a lo largo del Capítulo 2.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

2.1. Descripción general de la solución propuesta

Para dar solución a la problemática de inestabilidad térmica e insuficiencia de flujo en el sistema de Agua Caliente Sanitaria (ACS) de la Clínica Isamédica Rancagua, se ha propuesto un sistema de control automatizado basado en una arquitectura centralizada.

La solución propuesta consiste en la optimización del lazo de generación térmica mediante la implementación de un control PID (proporcional-integral-derivativo) sobre la caldera y el sistema de acumulación, gestionado por un controlador lógico programable (PLC). Adicionalmente, se incorpora una lógica de recirculación activa monitoreada por temperatura de retorno.

El objetivo central del diseño es garantizar una temperatura de suministro constante de $85\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las lavadoras industriales, cumpliendo con los estándares de desinfección exigidos por la normativa sanitaria y asegurando la disponibilidad de caudal ante demandas simultáneas.

2.2. Análisis de la demanda y criterios de diseño

Para el diseño del sistema de control, es imperativo cuantificar la carga térmica que el proceso de lavandería demanda. El sistema debe ser capaz de suministrar agua caliente a tres lavadoras industriales con una capacidad nominal de 40 kg de ropa seca cada una.

2.2.1. Determinación del consumo de agua

Basado en estándares de operación para lavandería clínica y desinfección termoquímica, se establecen los siguientes parámetros de consumo:

- Consumo específico: 15 litros de agua total por cada kilogramo de ropa.
- Consumo por ciclo (40kg): 600 litros totales
- Requerimiento de agua caliente ($85\text{ }^{\circ}\text{C}$): Se estima que el 40% del volumen del ciclo requiere agua a temperatura de consigna para asegurar termodesinfección. Esto equivale a 240 litros de agua caliente por lavadora.

2.2.2. Cálculo de la carga térmica

Considerando el escenario más crítico, donde las tres lavadoras inician el proceso de llenado de forma simultánea, el sistema debe gestionar un volumen de 720 litros. Para elevar la temperatura de este volumen desde la temperatura de red (15 °C) hasta el Setpoint de operación (85 °C), se aplica la ecuación de transferencia de calor sensible:

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Donde:

- $m = 1000 \text{ kg}$ (masa de agua)
- $C_p = 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$
- $\Delta T = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($85 \text{ } ^\circ\text{C} - 15 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Resultando en una demanda energética de 70.000 kcal. Este valor define la perturbación máxima que el lazo de control PID deberá compensar para mantener la estabilidad térmica del acumulador y garantizar el cumplimiento de la Norma Técnica N.º 199.

Una vez determinada la energía total requerida ($Q = 70.000 \text{ kcal}$) para elevar la temperatura de los 1.000 litros de agua, es necesario calcular la potencia térmica del equipo generador. Para garantizar la continuidad del proceso de lavandería, se establece un tiempo de recuperación objetivo de 30 minutos o 0,5 horas tras una descarga completa del acumulador.

Adicionalmente, para compensar las pérdidas de calor a través de las paredes del estanque y la red de tuberías de recirculación, se incorpora un factor de seguridad del 15% ($FS = 1,15$). Aplicando la relación de potencia:

$$P_{total} = \left(\frac{Q}{T} \right) * FS$$

$$P_{total} = \left(\frac{70.000}{0,5} \right) * 1,15 = 161.000 \text{ kcal/h}$$

Considerando un volumen de acumulación de 1.000 litros, se determina que el equipo generador debe suministrar una potencia neta de calor de 161.000 kcal/h, equivalente a

187,2 kW. Este dimensionamiento asegura el suministro simultáneo a las lavadoras de la clínica sin comprometer la temperatura exigida por la Norma Técnica N.º 199.

2.3. Arquitectura del sistema de control

La arquitectura del sistema se define bajo un esquema de control centralizado, utilizando un controlador lógico programable (PLC) como núcleo del proceso. Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de agua caliente sanitaria (ACS), y de manera previa a la selección del hardware, se establecieron los siguientes requisitos técnicos y operativos que el controlador debe cumplir:

- **Procesamiento de señales analógicas:** Capacidad para leer señales estándar (como 4-20 mA) provenientes de la instrumentación de campo (sensores de temperatura y nivel) y emitir señales de control analógicas para modular la apertura de la válvula proporcional de la caldera.
- **Capacidad de control avanzado:** Soporte nativo para la ejecución de algoritmos de control proporcional-integral-derivativo (PID) que permitan mantener la temperatura de suministro estrictamente en $85\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Gestión de señales digitales:** Entradas y salidas discretas rápidas y fiables para comandar el encendido/apagado de la bomba de recirculación, habilitar el quemador y recibir alarmas de terreno.
- **Seguridad eléctrica:** Operación en baja tensión (24 VDC), lo cual es un estándar exigido para tableros de control ubicados en entornos con alta presencia de humedad, como es el caso de una lavandería industrial.
- **Conectividad y escalabilidad:** Soporte de protocolos de comunicación industrial estándar (Ethernet industrial/PROFINET) para permitir la integración fluida con la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) y facilitar futuras integraciones hospitalarias.

En función de las condiciones y requerimientos descritos, se seleccionó el PLC Siemens SIMATIC S7-1200, específicamente el modelo CPU 1214C DC/DC/DC. Esta elección se justifica desde el punto de vista técnico y económico por las siguientes razones:

- **Adecuación al tamaño del proceso (I/O integradas):** La CPU 1214C posee una alta densidad de entradas y salidas integradas en su placa base (14 entradas digitales, 10 salidas digitales y 2 entradas analógicas). Esto permite absorber gran parte de la instrumentación del proyecto sin la necesidad inicial de adquirir costosos módulos de expansión, optimizando el espacio físico en el tablero eléctrico y reduciendo el presupuesto general.
- **Alimentación y Seguridad (Configuración DC/DC/DC):** Esta nomenclatura técnica indica que el equipo se alimenta con 24 VDC, recibe entradas a 24 VDC y entrega salidas a transistor de 24 VDC. Esta estandarización de voltaje permite alimentar tanto el PLC como los instrumentos de campo (transmisores de 2 hilos) con la misma fuente de poder. Además, las salidas a transistor garantizan una mayor vida útil frente a conmutaciones rápidas y elevan la seguridad eléctrica del operador de la lavandería al no trabajar con 220 VAC dentro de la lógica de control.
- **Algoritmo PID nativo:** La plataforma TIA Portal y esta CPU cuentan con el bloque tecnológico integrado PID_Compact, el cual incluye herramientas de auto-sintonía (*auto-tuning*). Esto facilita que el PLC procese la señal del sensor de temperatura y actúe sobre la válvula de gas con una respuesta dinámica óptima, absorbiendo eficientemente las perturbaciones generadas cuando las tres lavadoras se llenan de forma simultánea.
- **Conectividad PROFINET:** Dispone de un puerto de red integrado que permite la comunicación directa con la pantalla HMI diseñada bajo la norma ISA-101, garantizando una transferencia de datos en tiempo real y libre de interferencias.

En síntesis, si bien existen familias de controladores con prestaciones superiores (como la serie S7-1500), el modelo S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC) representa la solución técnica idónea. Cumple a cabalidad con los requisitos del lazo térmico cerrado y ofrece la mejor relación costo-beneficio para la escala operativa de la Clínica Isamédica.

2.4. Instrumentación y elementos finales de control

A continuación, en la tabla se detallan los dispositivos seleccionados para el diseño del sistema en cuanto a hardware:

Tabla 2.1. Listado de componentes

Componente	Descripción Técnica	Función
PLC (Controlador)	Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C	Procesa el algoritmo PID y gestiona las seguridades del sistema.
Módulo Analógico	SM 1231 AI (o Signal Board SB 1231)	Permite la lectura de señales 4-20 mA con alta resolución para la Pt100.
Caldera de Condensación Modulante	Equipo de generación térmica de alta eficiencia que recupera el calor latente de los gases de escape.	Ajusta su potencia de forma continua para mantener el agua a 85 °C, optimizando el consumo de agua
Transmisor de Flujo (Caudalímetro)	Caudalímetro ultrasónico de tecnología no invasiva (tipo <i>Clamp-on</i>), que se instala sobre la tubería sin contacto directo con el fluido.	Medir el caudal de agua consumida en tiempo real mediante señal 4-20 mA
Transmisor de Nivel (Ultrasónico)	Transmisor de nivel de medición continua (tipo ultrasónico), apto para estanques de agua caliente sanitaria (ACS).	Medir el nivel de agua del estanque acumulador en tiempo real mediante señal 4-20 mA
Torre de Señalización (Baliza)	Torre de señalización industrial LED equipada con alarma acústica.	Proporcionar indicación visual y sonora del estado operativo del proceso.
Sensores de Temperatura	RTD Pt100 con Transmisor 4-20 mA	Garantiza precisión de $\pm 0,5$ °C en ida y retorno del agua.

Actuador (Válvula)	Válvula de control con posicionador 4-20 mA	Modula el flujo de gas de forma proporcional a la demanda térmica.
HMI	Siemens KTP700 Basic	Interfaz para monitoreo de temperatura y ajuste de setpoint por el operador.

Fuente: Elaboración propia

Justificación técnica del controlador: Se opta por el S7-1200 debido a que su capacidad de procesamiento es plenamente compatible con la inercia térmica del acumulador. El uso de un S7-1500 representaría un sobredimensionamiento técnico para los requisitos de este diseño.

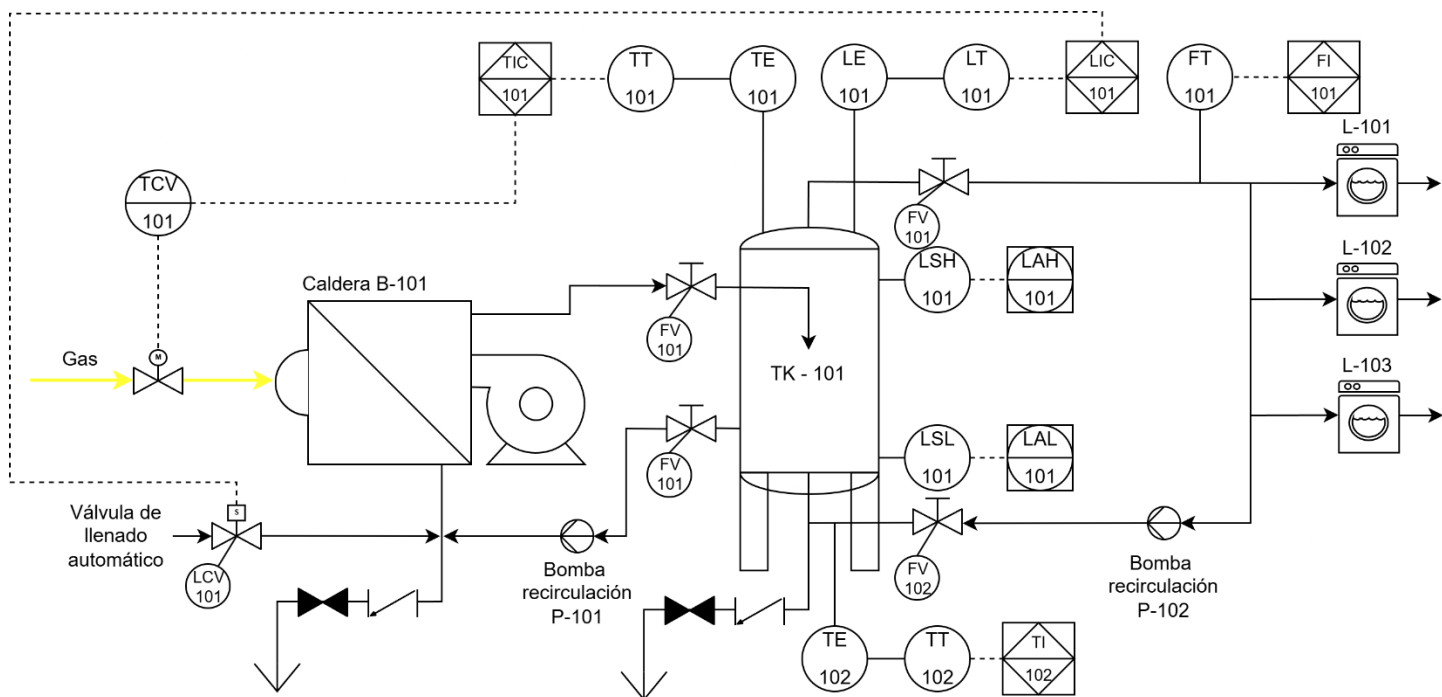


Figura 2.1. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del circuito ACS

Fuente: Elaboración propia (drawio.com)

Para representar gráficamente la arquitectura de control y la interacción física de los equipos, se elaboró el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) bajo la norma ISA 5.1, el cual se presenta en la Figura 2.1. En este esquema se detalla el lazo de control 101, encargado de la regulación térmica del sistema de agua caliente sanitaria (ACS).

El proceso se inicia con la medición continua de la temperatura en el acumulador mediante el elemento sensor TE-01 (RTD Pt100), el cual transmite una señal analógica de 4-20 mA hacia el controlador indicador de temperatura TIC-01. Este controlador, alojado lógicamente en el PLC S7-1200, evalúa el error respecto al *Setpoint* de 85 °C y emite una señal eléctrica de control hacia el actuador motorizado de la válvula proporcional de gas TCV-101, modulando así el aporte térmico en el intercambiador de calor.

Adicionalmente, el diagrama ilustra el circuito de recirculación impulsado por una bomba centrífuga *In-Line*, la cual cuenta con válvulas manuales de aislamiento para facilitar labores de mantenimiento sin interrumpir la operación general del sistema. En el ámbito de la seguridad e integridad operacional, se han incorporado dos elementos clave de monitoreo en el estanque: un interruptor de nivel bajo LSL-01, que actúa como enclavamiento de seguridad (*Interlock*) para inhibir el funcionamiento del quemador ante una pérdida crítica de agua (previniendo el calentamiento en seco); y un interruptor de nivel alto LSH-01, el cual activa una alarma de alto nivel LAH-01 en el sistema de control, diseñada para alertar de forma inmediata al operador frente a un riesgo de rebalse del acumulador.

Para complementar la arquitectura gráfica del diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID), a continuación, se presenta la matriz de asignación de variables de campo. Esta tabla detalla las señales físicas que son procesadas y emitidas por el autómata programable (PLC), definiendo su naturaleza eléctrica y su rango operativo dentro del proceso térmico.

Tabla 2.2. Listado de entradas y salidas (I/O) PLC S7-1200

Variable del proceso	Rango operativo	Tipo de señal	TAG ISA	Tipo de I/O
Temperatura estanque acumulador	0 - 100 °C	4-20 mA	TT-101	Entrada Analógica
Temperatura retorno sanitario	0 - 100 °C	4-20 mA	TT-102	Entrada Analógica
Nivel del estanque acumulador	0 - 100 °C	4-20 mA	LT-101	Entrada Analógica
Caudal red sanitaria principal	0 - 100 °C	4-20 mA	FIT-101	Entrada Analógica
Interruptor de nivel bajo (vacío)	0 - 1 (On/Off)	24 VDC	LSL-101	Entrada Digital (%I0.0)
Interruptor de nivel alto (rebalse)	0 - 1 (On/Off)	24 VDC	LSH-101	Entrada Digital (%I0.1)
Válvula proporcional de gas	0 - 100 °C	4-20 mA	TCV-101	Salida Analógica
Comando bomba recirculación primario	0 - 1 (On/Off)	24 VDC	P-101	Salida Digital (%Q0.0)
Comando electroválvula llenado	0 - 1 (On/Off)	24 VDC	LCV-101	Salida Digital (%Q0.1)
Comando bomba recirculación secundario	0 - 1 (On/Off)	24 VDC	P-102	Salida Digital (%Q0.2)

Fuente: Elaboración propia

2.4.1. Arquitectura de conexionado eléctrico de instrumentación

Para garantizar el correcto funcionamiento, la seguridad operacional y el monitoreo en tiempo real de los instrumentos descritos anteriormente, se diseñó una arquitectura de conexionado eléctrico dividida en los siguientes subsistemas hacia el PLC S7-1200:

A. Adquisición de señales continuas (entradas analógicas 4-20 mA)

Para evitar caídas de tensión por longitud de cableado y garantizar inmunidad ante interferencias electromagnéticas (EMI) propias del entorno industrial, las variables continuas operan mediante lazos de corriente a 2 hilos. Los instrumentos de campo —transmisores de temperatura (TT-101, TT-102), transmisor de nivel (LT-101) y el transmisor de caudal (FIT-101)— se energizan desde la fuente principal de 24 V_{DC} y cierran su lazo de lectura en los canales de entrada del módulo analógico SM 1234.

B. Modulación de lazo cerrado (salida analógica 4-20 mA)

El control térmico del sistema exige una regulación fina de la potencia del quemador. Para ello, el controlador comanda la válvula proporcional de gas (TCV-101) mediante una salida activa de 4-20 mA desde el módulo SM 1234. Cabe destacar que el actuador motorizado de esta válvula cuenta con alimentación de fuerza independiente a 24 V_{DC}, separando el lazo de señal del consumo de potencia mecánica.

C. Lógica de enclavamientos y seguridad (entradas digitales)

Las protecciones del sistema (Interlocks) operan de forma discreta a 24 V_{DC}, ingresando directamente a la CPU 1214C:

- Interruptor de nivel bajo (LSL-101): Conectado a la entrada %I0.0. Inhibe el funcionamiento de la caldera en caso de pérdida severa de volumen, evitando daños estructurales por calentamiento en seco.
- Interruptor de nivel alto (LSH-101): Conectado a la entrada %I0.1. Actúa como protección contra rebalse, bloqueando el suministro de agua en caso de falla de la válvula de llenado.

D. Control de fuerza y aislamiento galvánico (salidas digitales)

El accionamiento de los equipos de mayor consumo se realiza mediante las salidas transistorizadas de la CPU, utilizando relés electromecánicos (K1, K2 y K3) como interfaz de aislamiento:

- Circuito primario (%Q0.0): Comanda el relé K1 para la bomba de carga de caldera (P-101).
- Reposición de volumen (%Q0.1): Comanda el relé K2 para la electroválvula de llenado (LCV-101).
- Circuito secundario o de anillo (%Q0.2): Comanda el relé K3 para la bomba de recirculación sanitaria (P-102), la cual se activa en base a la temperatura de retorno.

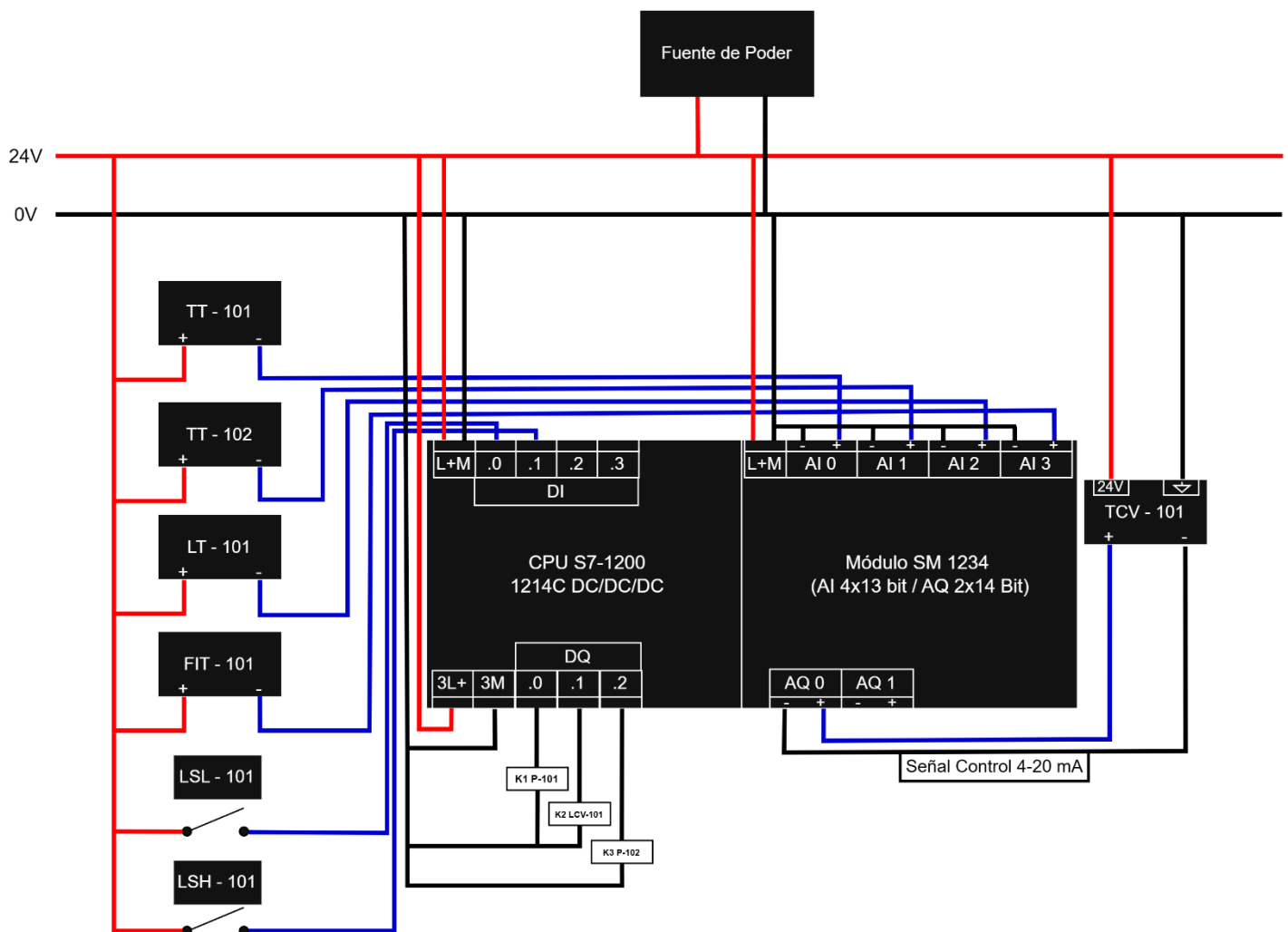


Figura 2.2. Diagrama de lazos de control y conexionado al PLC S7-1200

Fuente: Elaboración propia (drawio.com)

Tal como se ilustra en la Figura 2.2, la integración física de los instrumentos de campo y elementos finales de control hacia el autómatas S7-1200 proporciona una plataforma de hardware robusta y eléctricamente segura. Esta topología no solo protege las tarjetas electrónicas del controlador mediante el aislamiento galvánico de las cargas de fuerza, sino que centraliza todas las variables del proceso, sentando las bases físicas necesarias para ejecutar la lógica de automatización que se detalla a continuación.

2.4.2. Medición de caudal y consumo sanitario

Para el monitoreo del consumo de agua caliente en el proceso de lavandería, se consideró la instalación de un transmisor de caudal de tipo ultrasónico no invasivo (FIT-101) en la matriz principal de suministro.

Desde el punto de vista hidráulico, la red se diseñó considerando una tubería de impulsión principal de 2 pulgadas hacia los equipos de consumo (lavadoras industriales), garantizando el caudal instantáneo requerido durante los ciclos de llenado sin generar caídas de presión severas. Por su parte, el anillo de retorno para la recirculación sanitaria se dimensionó en 1 pulgada, optimizando el tamaño de la bomba de recirculación (P-102) y manteniendo la temperatura del fluido dentro del rango esperado.

El instrumento FIT-101 seleccionado opera mediante tecnología ultrasónica, ideal para fluidos a alta temperatura (85 °C) ya que no posee partes móviles que sufran desgaste mecánico. Este equipo envía una señal analógica de 4-20 mA al autómatas S7-1200, permitiendo al sistema de control registrar los litros consumidos por hora en la interfaz hombre-máquina (HMI). Esta variable es fundamental para detectar fugas o consumos anómalos en el proceso de lavado.

2.5. Estrategia de control y programación

La estrategia de control se desarrolló mediante narrativas de proceso y algoritmos agnósticos al hardware. Esta metodología permite que la lógica de automatización quede

estructurada y lista para ser codificada en lenguaje estandarizado (Norma IEC 61131-3) una vez el mandante adquiera las licencias de software respectivas.

El programa se dividió en tres subrutinas principales, correspondientes a los lazos térmicos e hidráulicos del sistema:

2.5.1. Lógica de nivel y reposición de volumen (Lazo LT-101 / LCV-101)

El objetivo de esta subrutina es mantener el estanque acumulador presurizado y con un volumen estable, incorporando además los enclavamientos de seguridad (Interlocks):

- Control continuo: El PLC lee constantemente el nivel desde el transmisor LT-101 (0-100%). Se establece una banda muerta de operación: si el nivel desciende del 90%, el PLC energiza la salida %Q0.1, abriendo la electroválvula de llenado (LCV-101). Cuando el nivel alcanza el 95%, la válvula se cierra.
- Seguridad por nivel bajo (Interlock): Si el sensor discreto LSL-101 (%I0.0) no detecta agua, el sistema entra en falla crítica. Se bloquea inmediatamente el funcionamiento de la caldera y la bomba P-101 para evitar trabajo en seco, generando una alarma en la HMI.
- Seguridad por rebalse (Interlock): Si el sensor discreto LSH-101 (%I0.1) se activa, el sistema asume una falla mecánica en el cierre de la LCV-101. El PLC desenergiza forzosamente la salida %Q0.1 y activa una alarma de rebalse.

2.5.2. Lógica de calentamiento y lazo PID (Lazo TT-101 / TCV-101)

Corresponde a la rutina principal para garantizar la entrega de agua a 85 °C.

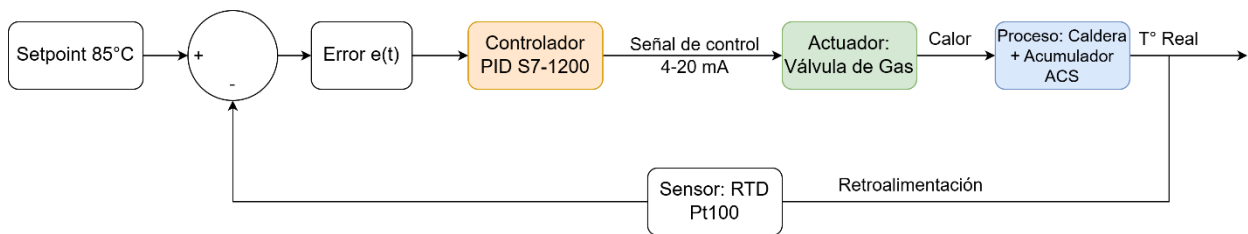
- Condiciones de arranque: Para iniciar el calentamiento, el nivel del estanque debe ser seguro (LSL-101 normal) y la bomba de carga del circuito primario (P-101) debe estar encendida vía %Q0.0, garantizando flujo por el intercambiador de la caldera.
- Modulación PID: El bloque controlador (TIC-101) compara la variable de proceso leída por el transmisor de temperatura principal (TT-101) versus el Setpoint de 85 °C. En base al error calculado, el PLC emite una señal analógica modulada de 4-20 mA hacia la válvula

proporcional de gas (TCV-101). A mayor diferencia térmica, mayor apertura de la válvula de gas, regulando la potencia del quemador de forma continua y eficiente.

2.5.3. Lógica de recirculación sanitaria (Lazo TT-102 / P-102)

Esta subrutina gestiona la eficiencia energética de las tuberías de distribución cuando las lavadoras no demandan agua.

- **Control On/Off con Histéresis:** El PLC monitorea la temperatura de retorno desde el sensor TT-102. Si esta temperatura desciende por debajo de los 75 °C (indicando enfriamiento del anillo), el controlador enciende la bomba de recirculación sanitaria P-102 (%Q0.2). Una vez que la temperatura de retorno alcanza los 80 °C, la bomba se detiene, evitando un consumo eléctrico innecesario.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.3. Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura

El esquema de control en lazo cerrado se detalla en la Figura 2.3. El sistema compara continuamente el *Setpoint* de operación (85 °C) con la temperatura real del acumulador (variable de proceso o PV) obtenida por el sensor TE-01. La diferencia entre ambos valores genera una señal de error ($e(t)$) que es procesada por el algoritmo PID alojado en el PLC. Como resultado, el controlador ajusta el output process (OP), correspondiente a la apertura de la válvula de gas, modulando la potencia térmica aportada al proceso para eliminar el error y estabilizar la temperatura frente a perturbaciones de demanda.

2.6. Diseño de la interfaz hombre-máquina (HMI)

El diseño de la interfaz gráfica para el operador se estructuró bajo la filosofía de "HMI de alto desempeño" (High-Performance HMI) basada en el estándar internacional ISA-101. Esta metodología prioriza el conocimiento situacional del operador, utilizando fondos en escala de grises, minimizando animaciones distractivas y reservando los colores vivos (rojo y amarillo) exclusivamente para denotar estados de alarma o condiciones anormales.

El diseño se presenta mediante "Wireframes" conceptuales que definen la arquitectura de navegación y los elementos de control. El sistema se divide en tres pantallas principales:

A. Pantalla principal (esquemático del proceso)

En la figura 2.4. se muestra la ventana de inicio y monitoreo continuo. Presenta un diagrama de flujo simplificado (P&ID en baja resolución) de la caldera, el estanque acumulador y las tuberías principales.

- Muestra en tiempo real las variables analógicas clave: Temperatura primaria (TT-101), temperatura de retorno (TT-102), nivel del estanque (LT-101) y caudal de consumo (FIT-101).
- Muestra el estado operativo de las bombas (P-101, P-102) y válvulas en tonos neutros cuando están funcionando con normalidad.

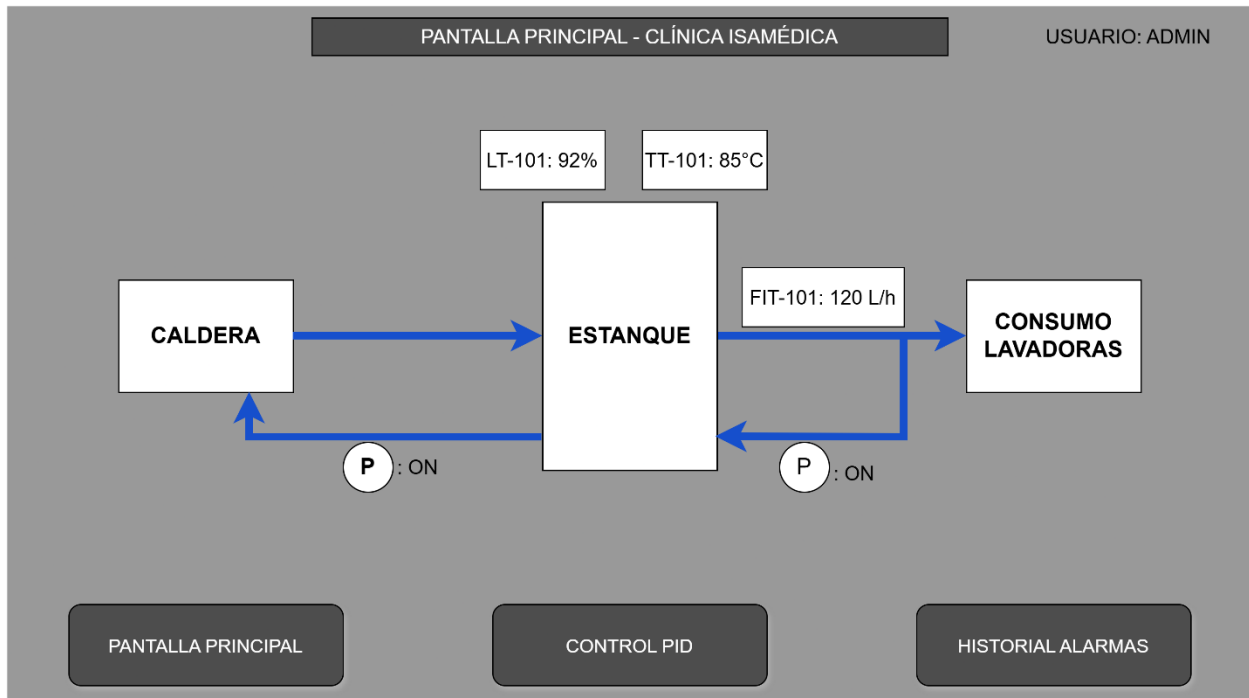


Figura 2.4. Esquemático de pantalla principal HMI (norma ISA-101)

Fuente: Elaboración propia (drawio.com)

B. Pantalla de control y lazos PID

Esta ventana ilustrada en la figura 2.5, está restringida por contraseña para el personal de mantenimiento o el jefe de lavandería.

- Permite modificar el Setpoint de temperatura (fijado nominalmente en 85 °C).
- Incluye selectores virtuales (Manual/Automático) para las bombas P-101, P-102 y la válvula de llenado LCV-101, permitiendo forzar el arranque de los equipos en caso de mantenimientos o fallas del sistema automático.
- Despliega la barra de modulación de la válvula proporcional de gas (TCV-101) indicando su porcentaje de apertura (0-100%).

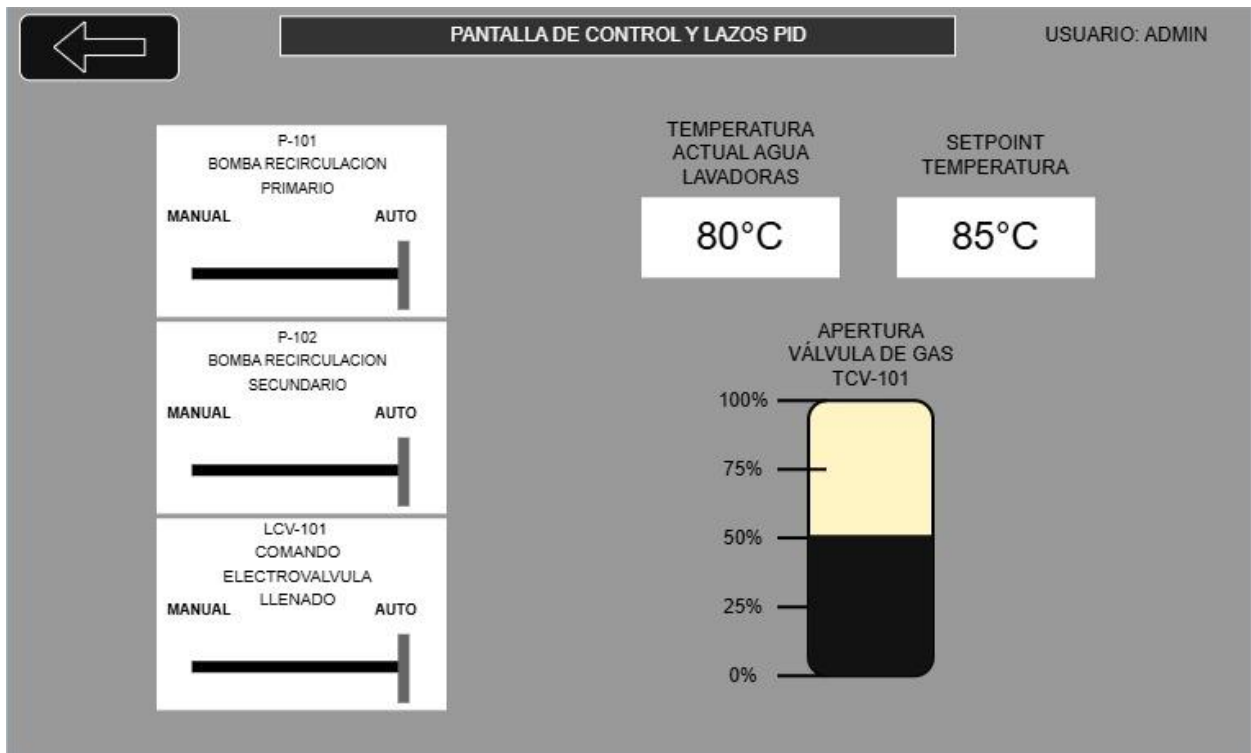


Figura 2.5. Esquemático de pantalla de control y lazos PID (norma ISA-101)

Fuente: Elaboración propia (drawio.com)

C. Pantalla de alarmas

Dedicada exclusivamente a la seguridad operacional, tal como se ilustra en la figura 2.6. Contiene una tabla de registro histórico (Datalogger) que captura la fecha y hora de cualquier anomalía.

- Las alarmas críticas de seguridad física, como el nivel bajo (LSL-101) y el nivel alto (LSH-101), parpadean en rojo y requieren el reconocimiento explícito por parte del operador antes de permitir el reinicio de la caldera.

PANTALLA DE ALARMAS				USUARIO: ADMIN
FECHA	HORA	TAG/DESCRIPCIÓN	ESTADO	
13/08/2026	16:56	LSL-101: NIVEL BAJO CRÍTICO ESTANQUE - CALDERA BLOQUEADA	ACTIVA 	RECONOCER ALARMA
25/06/2026	21:20	LSH-101: NIVEL ALTO ESTANQUE - RIESGO DE REBALSE	RECONOCIDA 	
07/06/2026	10:33	TT-101: DESVIACIÓN DE SETPOINT - TEMPERATURA BAJA (<80°C)	ACTIVA 	RECONOCER ALARMA

Figura 2.6. Esquemático de pantalla de alarmas (norma ISA-101)

Fuente: Elaboración propia (drawio.com)

2.7. Resultados esperados y validación del diseño

A partir de la implementación de este diseño, se proyectan los siguientes resultados técnicos y operativos:

1. Estabilidad térmica: Se espera mantener la temperatura del agua en 85 °C con una desviación máxima de ± 2 °C, eliminando las caídas drásticas de temperatura observadas en el sistema actual durante las horas punta.
2. Cumplimiento normativo: El sistema garantiza las condiciones termodinámicas para la correcta acción de los químicos desinfectantes, cumpliendo con la Norma Técnica N.º 199.
3. Eficiencia Energética: Gracias a la modulación de la llama (válvula proporcional) y al uso del acumulador como "buffer" de energía, se estima una reducción en el consumo de gas al evitar el encendido/apagado frecuente de la caldera.

4. Disponibilidad de flujo: El dimensionamiento correcto del acumulador y la recirculación asegura que las tres lavadoras puedan cargar agua simultáneamente sin caídas de presión que detengan el proceso.

2.8. Algoritmos de control y lógica de seguridad

En esta sección se detalla la lógica de control que debe llevar el PLC Siemens S7-1200 mediante diagramas de flujo que describen las secuencias operativas y las protecciones del sistema.

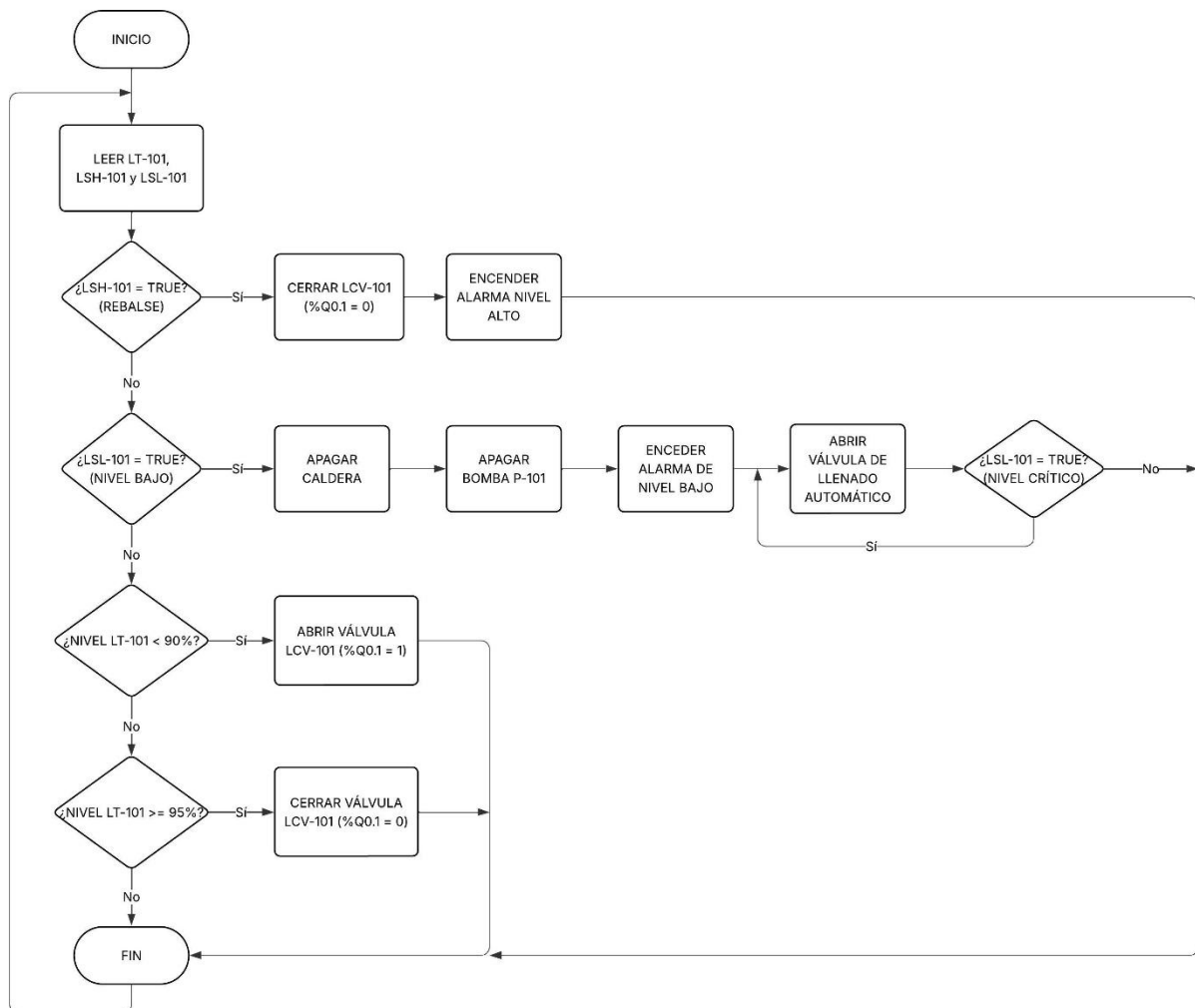


Figura 2.7. Diagrama de Flujo 1: Lógica de nivel y reposición de volumen

Fuente: Elaboración propia (drawio.com)

La figura 2.7 representa el algoritmo de control para gestionar el volumen del estanque acumulador. El PLC monitorea constantemente la señal del transmisor de nivel (LT-101) para abrir la válvula de llenado (LCV-101) si el nivel cae por debajo del 90% y cerrarla al alcanzar el 95%. Adicionalmente, evalúa de forma prioritaria los enclavamientos de seguridad: si detecta nivel bajo crítico (LSL-101), bloquea el encendido de la caldera para evitar daños; si detecta riesgo de rebalse (LSH-101), fuerza el cierre del suministro de agua.

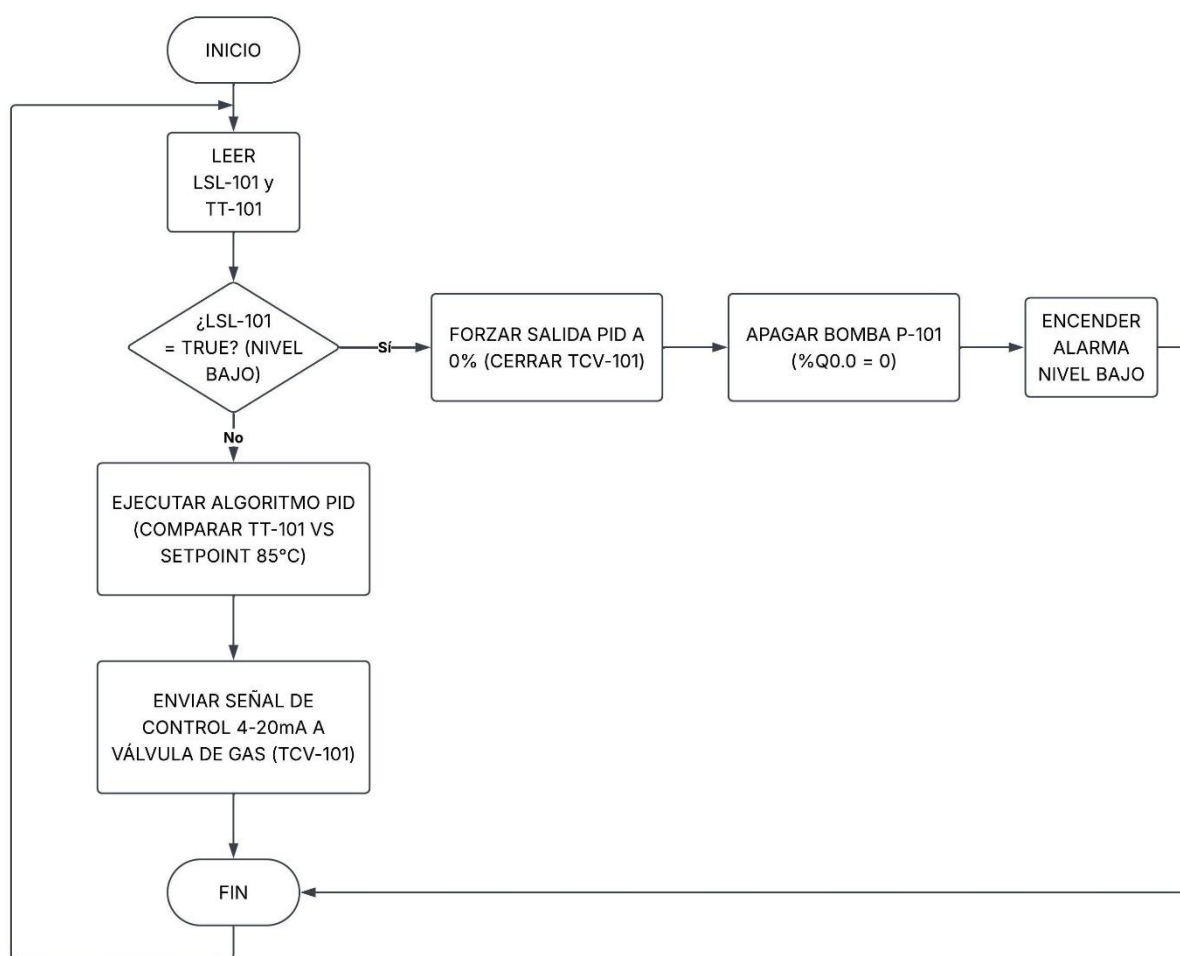


Figura 2.8. Diagrama de Flujo 2: Lógica principal de calentamiento de agua

Fuente: Elaboración propia (lucidchart.com)

El algoritmo ilustrado en la figura 2.8 gestiona el lazo cerrado de temperatura. El controlador verifica primero que exista un nivel seguro de agua (LSL-101) antes de habilitar el proceso. Una vez validada la seguridad, el bloque PID compara la temperatura actual del estanque (TT-101) con el punto de consigna (85 °C) y calcula el error para modular la señal analógica de 4-20 mA hacia la válvula de gas (TCV-101), regulando así la potencia térmica entregada.

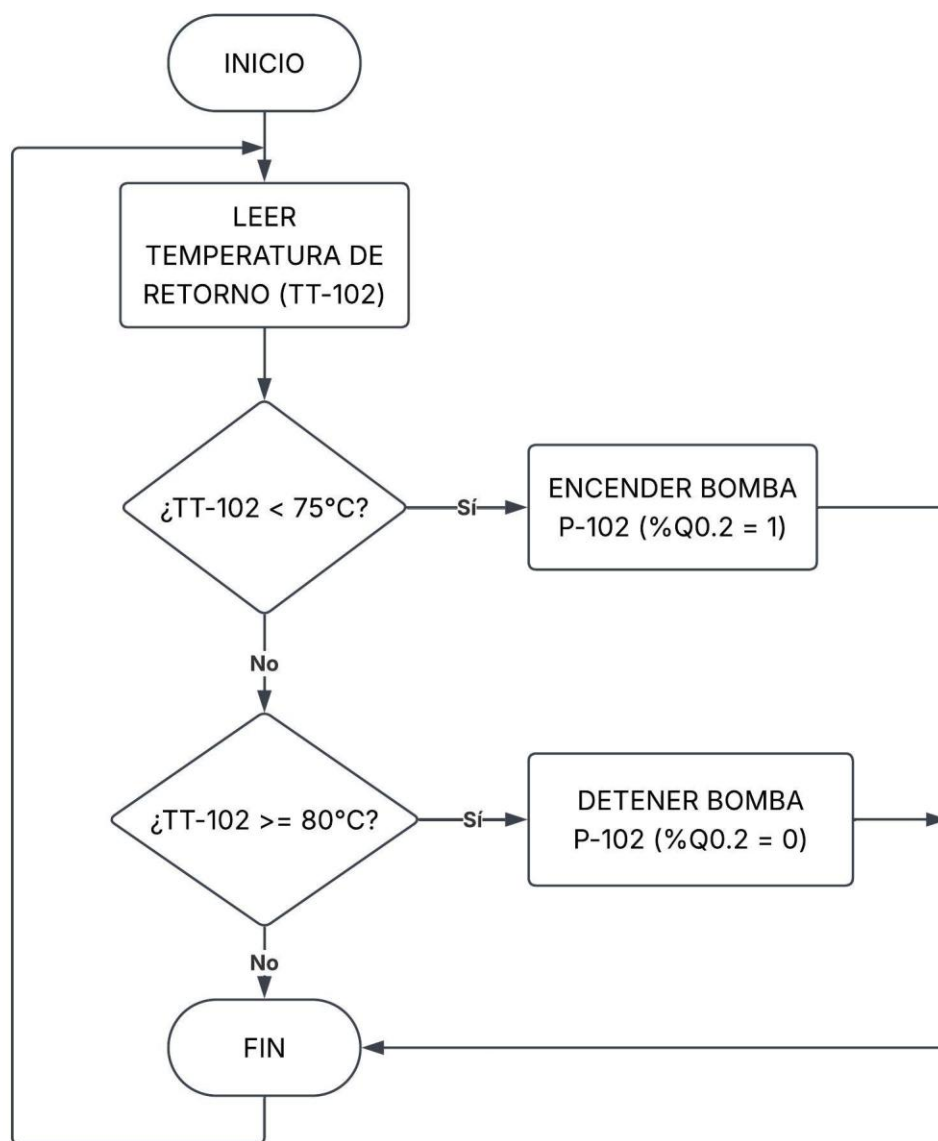


Figura 2.9. Diagrama de Flujo 3: Lógica de recirculación sanitaria

Fuente: Elaboración propia (lucidchart.com)

El diagrama expuesto en la figura 2.9 representa la lógica de control para el anillo de recirculación sanitaria. Con el objetivo de mantener la eficiencia energética y la disponibilidad inmediata de agua caliente en la matriz, el PLC monitorea continuamente la temperatura de retorno mediante el sensor TT-102. Si la temperatura del fluido desciende por debajo de los 75 °C, el controlador ordena el encendido de la bomba de recirculación (P-102). Una vez que la red recupera su nivel térmico y alcanza los 80 °C, la bomba se detiene automáticamente, evitando un trabajo mecánico y consumo eléctrico innecesario.

2.9. Topología de red y comunicación

Para consolidar la arquitectura integral del sistema, resulta fundamental definir la topología de comunicación que enlaza el nivel de supervisión con el nivel de control y la planta física.

Como se ilustra en la Figura 2.10, la comunicación bidireccional entre la Interfaz Hombre-Máquina (HMI KTP700) y el controlador principal (PLC S7-1200) se realiza mediante el protocolo industrial PROFINET, utilizando una red Ethernet estándar que garantiza una transferencia de datos rápida y confiable para el monitoreo en tiempo real. Por su parte, la interacción entre el PLC y los equipos de campo (sensores, bombas y válvula proporcional) se ejecuta a través de cableado físico directo de señales analógicas (4-20 mA) y discretas (24 VDC), aislando la red de datos de la potencia de la planta.

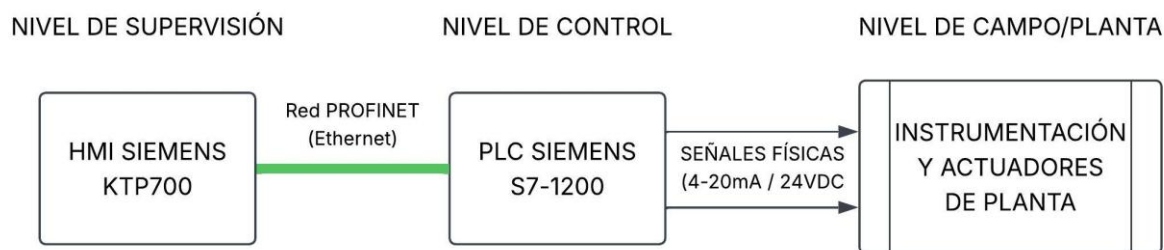


Figura 2.10. Esquema de topología de red (PLC – HMI – Planta)

Fuente: Elaboración propia (lucidchart.com)

CAPÍTULO 3: ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROYECTO

3.1. Cronograma de ejecución (Carta Gantt)

Para llevar a cabo la implementación del sistema de control diseñado, se estructuró un plan de trabajo dividido en cuatro fases principales: Ingeniería, Desarrollo de Software, Montaje y Puesta en Marcha. El tiempo estimado para la ejecución total del proyecto en modalidad "llave en mano" es de 12 semanas (3 meses), considerando los tiempos de importación de los equipos Siemens y la instrumentación.

A continuación, se presenta la Carta Gantt con la distribución de las tareas:

Tabla 3.1. Carta Gantt de implementación del proyecto

Fase/Actividad	Responsable	HH	Mes 1 (semanas)				Mes 2 (semanas)				Mes 3 (semanas)			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Fase 1: Ingeniería y Compras		60												
Revisión de ingeniería y P&ID final	Ingeniero en Control e Instrumentación	40												
Compra de equipos	Ingeniero en Control e Instrumentación	20												
Fase 2: Desarrollo de Software		80												
Programación lógica	Ingeniero en Control e Instrumentación	40												
Diseño de pantallas HMI	Ingeniero en Control e Instrumentación	25												
Pruebas de simulación	Ingeniero en Control e Instrumentación	15												
Fase 3: Montaje e Instalación		80												
Armado de Tablero de Control y canalización	Técnicos Electromecánicos (2)	30												

Montaje de instrumentación	Técnicos Electromecánicos (2)	25												
Conexiónado eléctrico y pruebas de lazo	Técnicos Electromecánicos (2)	25												
Fase 4: Puesta en Marcha		16												
Pruebas en vacío y energización	Ingeniero en Control e Instrumentación	6												
Sintonización de lazos PID con carga térmica	Ingeniero en Control e Instrumentación	6												
Capacitación y entrega formal	Ingeniero en Control e Instrumentación	4												

Fuente: Elaboración propia

3.2. Presupuesto de inversión inicial

El presupuesto de inversión inicial detalla los costos asociados a la adquisición de equipos, materiales y la mano de obra necesaria para la implementación del sistema de control térmico en la lavandería de la Clínica Isamédica. Para el cálculo de este presupuesto, se ha dividido la inversión en dos categorías principales: adquisición de hardware (equipos e instrumentación) y costos de ingeniería e instalación (horas hombre).

Tabla 3.2. Cotizaciones de mercado

Ítem	Descripción del Equipo	Cantidad	Precio Unitario Estimado	Precio Total
1.	Equipos de Control			
1.1	PLC Siemens CPU S7-1214 DC/DC/DC	1	\$550.000	\$550.000
1.2	Módulo de Entradas/Salidas Analógicas (SM 1234 AI/AO)	1	\$550.000	\$550.000
1.3	Panel HMI Siemens SIMATIC Basic 7" (Touch)	1	\$500.000	\$500.000
1.4	Fuente de Poder Siemens SITOP 24VDC	1	\$200.000	\$200.000
2.	Instrumentación y Elementos Finales de Control			
2.1	Transmisor de Caudal Ultrasónico Clamp-On SITRANS FS230	1	\$1.450.000	\$1.450.000
2.2	Válvula Moduladora de Gas Motorizada 4-20 mA	1	\$950.000	\$950.000
2.3	Transmisor de Nivel Ultrasónico Endress+Hauser	1	\$350.000	\$350.000

2.4	Transmisor de Temperatura PT100 con cabezal WIKA	2	\$120.000	\$240.000
2.5	Interruptor de Nivel tipo Horquilla/Flotador	2	\$85.000	\$85.000
2.6	Electroválvula de Llenado de Agua Sanitaria	1	\$150.000	\$150.000
3.	Materiales Eléctricos y de Montaje			
3.1	Gabinete de Control (Armario autosoportado IP65)	1	\$350.000	\$350.000
3.2	Aparellaje Eléctrico (Relés de aislación, contactores, borneras)	1	\$250.000	\$250.000
3.3	Materiales de canalización (Bandejas, tuberías EMT, cables de instrumentación)	1	\$450.000	\$450.000
Total	Subtotal Equipamiento y Materiales			\$6.075.000

**Valores referenciales obtenidos a partir de catálogos en portales web de distribuidores industriales y plataformas de comercio electrónico. Precios estimados vigentes a marzo de 2026.*

Fuente: Elaboración Propia en base a datos de mercado

Para la ejecución del proyecto, se estiman los costos de mano de obra basados en horas hombre (HH) detallados en el punto 3.1. Cronograma de ejecución (Carta Gantt), divididos en cuatro etapas clave de ingeniería e instalación.

Tabla 3.3. Costos de ingeniería e instalación (mano de obra)

Etapa del Proyecto	Perfil Requerido	HH Estimadas	Tarifa Hora	Costo Total
Ingeniería de detalles (planos, selección de equipos y programación)	Ingeniero en control e instrumentación	60	\$60.000	\$3.600.000
Programación PLC S7-1200, HMI y ajuste PID	Ingeniero en control e instrumentación	80	\$45.000	\$3.600.000
Montaje eléctrico/mecánico	Técnico electromecánico (cuadrilla de 2 técnicos por 10 días)	80	\$35.000	\$2.800.000
Puesta en marcha (comisionamiento y capacitación)	Ingeniero en control e instrumentación	16	\$30.000	\$480.000
Total	Subtotal mano de obra	236		\$10.480.000

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.4. Gastos generales

Ítem	Costo total
Equipamiento y materiales	\$6.075.000
Mano de obra	\$10.480.000
Gastos generales de proyecto y traslados (10% sobre servicios)	\$1.048.000
Imprevistos del proyecto (5% total)	\$880.150
Inversión total estimada (Subtotal NETO)	\$18.483.150
IVA (19%)	\$3.511.799
Total presupuesto (BRUTO a facturar)	\$21.994.949
Total presupuesto en UF	552,69 UF

*Valor de UF: \$37.796,31. Válido al 1 de marzo del 2026.

Fuente: Elaboración Propia

3.2.1. Resumen de inversión inicial

Al consolidar los costos de adquisición de equipos y los servicios de ingeniería e instalación, se determina que la inversión inicial neta requerida para la modernización del sistema de agua caliente sanitaria asciende a **\$18.483.150**. Considerando el 19% de impuesto al valor agregado (IVA) correspondiente a la facturación comercial de los servicios y equipos, el costo total bruto del proyecto a presentar al mandante es de **\$21.994.949**. Cabe destacar que, para efectos de la evaluación económica y el flujo de caja del proyecto, se utilizarán exclusivamente los valores netos.

3.3. Costos operativos de mantenimiento

Los costos operativos y de mantenimiento corresponden a los gastos periódicos necesarios para asegurar el correcto funcionamiento, la vida útil y la fiabilidad del sistema de control térmico implementado en la lavandería de la clínica Isamédica. Para el análisis de este proyecto, se han considerado dos factores principales: el consumo de energía eléctrica de los nuevos equipos instalados y el plan de mantenimiento preventivo anual.

3.3.1 Costos por consumo eléctrico

El nuevo sistema de control incorpora equipos eléctricos que operarán de manera continua durante los turnos de la lavandería. Se estima un funcionamiento promedio de 12 horas diarias, 26 días al mes (312 horas/mes). Los principales consumidores son:

- Bomba de recirculación: Potencia mecánica de 0,75 kW (1 HP), lo que considerando el rendimiento del motor (η), equivale a una potencia eléctrica consumida aproximada de 1 kW.
- Tablero de control (PLC S7-1200, HMI KTP700, fuentes de poder 24VDC): Potencia estimada de 0,1 kW (100 W).
- Potencia total instalada = 1,1 kW.
- Consumo mensual estimado = 1,1 kW * 312 horas = 343,2 kWh/mes.

Considerando una tarifa eléctrica industrial promedio de \$130 por kWh, el costo mensual aproximado es de **\$44.616**, lo que se traduce en un costo anual de **\$535.392**.

3.3.2 Costos de mantenimiento preventivo

Para garantizar que el sistema mantenga la precisión en el control de temperatura (85 °C) y cumpla con la Norma Técnica N.º 199, se requiere un plan de mantenimiento preventivo semestral (2 visitas al año). Estas visitas incluyen:

- Verificación y contrastación del sensor RTD Pt100.
- Revisión y limpieza de la válvula proporcional de gas.
- Inspección de tablero eléctrico, reapriete de borneras y respaldo (backup) del programa del PLC y HMI.

Se estima que cada visita preventiva por parte de personal técnico especializado tiene un valor de mercado de **\$150.000**, resultando en un costo anual de **\$300.000**.

Tabla 3.5. Resumen de costos operativos y de mantenimiento anual

Ítem de Operación/Mantenimiento	Frecuencia	Costo Unitario Estimado	Costo Anual Total
Consumo de energía eléctrica (bomba + control)	Mensual	\$44.616	\$535.392
Mantenimiento preventivo y calibración	Semestral (2/año)	\$150.000	\$300.000
Repuestos menores (fusibles, relés, etc.)	Anual	\$50.000	\$50.000
Total costos			\$885.392

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la Tabla 3.5, el costo operativo anual del nuevo sistema de control y recirculación asciende a **\$885.392**. Este valor será utilizado posteriormente en los flujos de caja para determinar la rentabilidad real del proyecto frente a los ahorros de combustible generados.

3.4. Cuantificación de ahorros y beneficios

La implementación del nuevo sistema de control y acumulación no solo resuelve el problema de las caídas de temperatura durante la demanda máxima de las lavadoras, sino que también genera un impacto económico positivo y asegura el cumplimiento de las normativas sanitarias vigentes. Los beneficios de este proyecto se dividen en dos categorías: ahorros tangibles (reducción del consumo de gas) y beneficios operativos (intangibles).

3.4.1. Ahorro por eficiencia energética (consumo de gas)

En el sistema original, la caldera operaba bajo una lógica de encendido y apagado brusco (On/Off) para suplir la demanda instantánea, lo que generaba un alto consumo de combustible debido a la inercia térmica y las constantes purgas del quemador.

Al incorporar el acumulador de 1.000 litros como "buffer" de energía y controlar la temperatura a 85 °C mediante un lazo PID que modula la válvula proporcional, el quemador trabaja de manera continua, pero a baja potencia, optimizando la mezcla combustible-aire. Según datos de eficiencia térmica industrial, migrar de un sistema instantáneo a uno de acumulación modulada genera un ahorro conservador del 25% en el consumo de gas.

El ahorro proyectado del 20% en consumo de gas (300 kg/mes) se fundamenta en la literatura estándar de eficiencia energética para calderas. Según la *Guía técnica de eficiencia energética en sistemas de calderas y generación de vapor* (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2019), la transición de un sistema On/Off a un control PID modulante permite reducir el consumo entre un 15% y 25%. Esto se justifica por la eliminación de los ineficientes ciclos de encendido/apagado y la optimización de la temperatura de retorno, lo que asegura que el equipo opere continuamente en su zona de alta eficiencia por condensación.

Estimación económica:

- Consumo actual estimado: Se estima que la lavandería consume aproximadamente 1.500 kg de gas licuado (GLP) al mes para el calentamiento de agua.
- Precio promedio del gas (GLP): \$1.200 por kilogramo.
- Gasto actual mensual: $1.500 \text{ kg} \times \$1.200 = \$1.800.000$.
- Ahorro proyectado (20%): 300 kg mensuales.
- Ahorro económico anual (Consumo de gas): \$4.320.000.
- Ahorro por mantenimiento correctivo evitado (Fallas y repuestos): Al eliminar la lógica de encendido brusco (On/Off), se reduce drásticamente la fatiga termomecánica en el quemador y el desgaste prematuro de los contactores eléctricos. Se estima un ahorro

conservador de \$500.000 anuales por concepto de repuestos no utilizados y horas de servicio técnico de emergencia (gastos que ocurren fuera del plan de mantención preventiva).

Sumando la eficiencia de combustible y el mantenimiento correctivo evitado, el proyecto generará un ahorro total proyectado de \$4.820.000 al año, valor que será considerado como el ingreso principal en la evaluación económica.

3.4.2. Beneficios operativos y normativos

Además del ahorro energético, el diseño del sistema de control aporta beneficios fundamentales para la operación diaria de la clínica Isamédica, los cuales, aunque difíciles de cuantificar económicamente de forma directa, poseen un alto valor estratégico:

- Cumplimiento de la Norma Técnica N.º 199: Al estabilizar la variable de proceso (PV) en el Setpoint de 85 °C (± 2 °C), se garantiza el choque térmico necesario para la correcta acción de los químicos desinfectantes. Esto anula el riesgo de infecciones intrahospitalarias por ropa mal lavada y evita multas sanitarias para la clínica.
- Disponibilidad continua de flujo: El volumen de reserva del estanque de 1.000 litros, sumado a la bomba de recirculación, asegura que las tres lavadoras industriales puedan llenarse simultáneamente sin sufrir caídas de presión ni de temperatura, eliminando los tiempos muertos (cuellos de botella) en el proceso de lavado.
- Aumento en la vida útil de los equipos: Al eliminar los ciclos constantes de partida/parada brusca, se reduce drásticamente la fatiga térmica en los tubos de la caldera y el desgaste electromecánico de los contactores y el quemador.

3.4.3. Flujo de caja proyectado

Para la elaboración del flujo de caja, se utilizó una depreciación lineal a 10 años, acorde a la vida útil técnica estimada para los equipos de control (PLC) e instalaciones industriales,

resultando en un valor de \$1.848.315 anuales. En este modelo, los "Ingresos" del proyecto corresponden a los ahorros directos por menor consumo de combustible.

- Inversión Inicial: \$18.483.150
- Ahorro anual (Ingresos): \$4.820.000
- Costos operativos y de mantenimiento (energía + mantención): \$885.392
- Depreciación lineal (10 años): \$1.848.315 anual
- Impuesto a la renta: 27%
- Tasa de descuento del proyecto: 10%

Tabla 3.6. Flujo de caja proyectado a 10 años

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
(+) Ahorro por eficiencia (gas)		\$ 4.820.000	\$ 4.820.000	\$ 4.820.000	\$ 4.820.000	\$ 4.820.000	\$ 4.820.000	\$ 4.820.000	\$ 4.820.000	\$ 4.820.000	\$ 4.820.000
(-) Costos operativos		\$ -885.392	\$ -885.392	\$ -885.392	\$ -885.392	\$ -885.392	\$ -885.392	\$ -885.392	\$ -885.392	\$ -885.392	\$ -885.392
(-) Depreciación		\$-1.848.315	\$-1.848.315	\$-1.848.315	\$-1.848.315	\$-1.848.315	\$-1.848.315	\$-1.848.315	\$-1.848.315	\$-1.848.315	\$-1.848.315
(=) Utilidad antes de impuestos		\$ 2.086.293	\$ 2.086.293	\$ 2.086.293	\$ 2.086.293	\$ 2.086.293	\$ 2.086.293	\$ 2.086.293	\$ 2.086.293	\$ 2.086.293	\$ 2.086.293
(-) Impuestos (27%)		\$ -563.299	\$ -563.299	\$ -563.299	\$ -563.299	\$ -563.299	\$ -563.299	\$ -563.299	\$ -563.299	\$ -563.299	\$ -563.299
(=) Utilidad neta		\$ 1.522.994	\$ 1.522.994	\$ 1.522.994	\$ 1.522.994	\$ 1.522.994	\$ 1.522.994	\$ 1.522.994	\$ 1.522.994	\$ 1.522.994	\$ 1.522.994
(+) Reversa de depreciación*		\$ 1.848.315	\$ 1.848.315	\$ 1.848.315	\$ 1.848.315	\$ 1.848.315	\$ 1.848.315	\$ 1.848.315	\$ 1.848.315	\$ 1.848.315	\$ 1.848.315
(+) Valor de desecho o residual											\$ 2.023.905
(-) Inversión inicial	\$ -18.483.150										
(=) Flujo de caja neto	\$ -18.483.150	\$ 3.371.309	\$ 3.371.309	\$ 3.371.309	\$ 3.371.309	\$ 3.371.309	\$ 3.371.309	\$ 3.371.309	\$ 3.371.309	\$ 3.371.309	\$ 5.395.214
(=) Flujo de caja actualizado	\$ -18.483.150	\$ 3.064.826	\$ 2.786.206	\$ 2.532.914	\$ 2.302.649	\$ 2.093.318	1.903.016	\$ 1.730.015	\$ 1.572.741	\$ 1.429.764	\$ 2.079.604

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. Indicadores de rentabilidad

Aplicando una tasa de descuento (costo de oportunidad) del 10%, determinada en base a la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) estipulada por la gerencia de administración y finanzas de la Clínica Isamédica para la evaluación de nuevos proyectos, se obtienen los siguientes resultados basados en el flujo de caja neto:

- Valor actual neto (VAN = \$3.011.903): Al obtener un VAN mayor a cero, se demuestra que el proyecto es financieramente viable. Esto significa que la inversión inicial no solo se recupera por completo, sino que el proyecto genera un incremento real de riqueza para la Clínica Isamédica equivalente a \$3.011.903 al final del horizonte de evaluación.
- Tasa interna de retorno (TIR = 13,53%): Este indicador refleja que la rentabilidad intrínseca del sistema de control propuesto es del 13,53% anual. Dado que este valor es superior a la tasa de descuento exigida (10%), se ratifica contundentemente la aprobación económica del proyecto.
- Periodo de recuperación de la inversión (Payback simple = 5,48 años): Este indicador determina el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial de \$18.483.150 mediante los ahorros generados. Considerando un flujo neto anual de \$3.371.309, el periodo de retorno es de 5,48 años.
- Periodo de recuperación descontado (Payback = 8,35 años): Al considerar el valor del dinero en el tiempo mediante los flujos actualizados al 10%, el saldo acumulado se mantiene negativo hasta el octavo año. Aplicando la interpolación matemática con el flujo positivo del noveno año, el proyecto alcanza su punto de equilibrio a los 8,35 años. Al lograr el retorno dentro del horizonte de 10 años estipulado para la vida útil de los equipos, se concluye que la inversión está financieramente garantizada.

Tabla 3.7. Determinación del periodo de recuperación de capital mediante flujos acumulados

Año	Flujo de caja neto	Flujo actualizado al 10%	Flujo actualizado acumulado
0	-\$18.483.150	-\$18.483.150	-\$18.483.150
1	\$3.371.309	\$3.064.826	-\$15.418.324
2	\$3.371.309	\$2.786.206	-\$12.632.118
3	\$3.371.309	\$2.532.914	-\$10.099.204
4	\$3.371.309	\$2.302.649	-\$7.796.555
5	\$3.371.309	\$2.093.318	-\$5.703.237
6	\$3.371.309	\$1.903.016	-\$3.800.221
7	\$3.371.309	\$1.730.015	-\$2.070.206
8	\$3.371.309	\$1.572.741	-\$497.465
9	\$3.371.309	\$1.429.764	\$932.299
10	\$5.395.214	\$2.079.604	\$3.011.903

Fuente: Elaboración propia

3.4.5. Análisis de sensibilidad bidimensional

Con el objetivo de determinar la robustez del proyecto ante variaciones simultáneas en las condiciones operativas y del mercado, se desarrolló un análisis de sensibilidad bidimensional. Este estudio permite visualizar cómo se comporta la rentabilidad del proyecto (VAN) al cruzar las dos variables de mayor incertidumbre detectadas: el Ahorro de Gas proyectado y el Costo de Operación y Mantenimiento.

Tabla 3.8. Matriz de sensibilidad del VAN (\$) ante variaciones de ahorro y costos

		Variación ahorro de gas o ingresos								
		-20%	-15%	-10%	-5%	0% (Caso base)	5%	10%	15%	20%
Variación costos operativos	-20%	-\$517.79	\$563.21	\$1.644.203	\$2.725.197	\$3.806.191	\$4.887.185	\$5.968.179	\$7.049.173	\$8.130.167
	-15%	-\$716.36	\$364.64	\$1.445.631	\$2.526.625	\$3.607.619	\$4.688.613	\$5.769.607	\$6.850.601	\$7.931.595
	-10%	-\$914.93	\$166.07	\$1.247.059	\$2.328.053	\$3.409.047	\$4.490.041	\$5.571.035	\$6.652.029	\$7.733.023
	-5%	-\$1.113.501	-\$32.51	\$1.048.487	\$2.129.481	\$3.210.475	\$4.291.469	\$5.372.463	\$6.453.457	\$7.534.451
	0% (Caso base)	-\$1.312.073	-\$231.08	\$849.92	\$1.930.909	\$3.011.903	\$4.092.897	\$5.173.891	\$6.254.885	\$7.335.879
	5%	-\$1.510.645	-\$429.65	\$651.34	\$1.732.337	\$2.813.331	\$3.894.325	\$4.975.319	\$6.056.313	\$7.137.307
	10%	-\$1.709.217	-\$628.22	\$452.77	\$1.533.765	\$2.614.759	\$3.695.753	\$4.776.747	\$5.857.741	\$6.938.735
	15%	-\$1.907.789	-\$826.80	\$254.20	\$1.335.193	\$2.416.187	\$3.497.181	\$4.578.175	\$5.659.169	\$6.740.163
	20%	-\$2.106.361	-\$1.025.367	\$55.63	\$1.136.621	\$2.217.615	\$3.298.609	\$4.379.603	\$5.460.597	\$6.541.591

**Nota: Las celdas marcadas en rojo representan escenarios de pérdida (VAN negativo), mientras que las celdas en verde indican escenarios de utilidad (VAN positivo).*

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la Tabla 3.8, el proyecto presenta una resiliencia financiera sobresaliente, manteniendo un Valor Actual Neto (VAN) positivo en casi la totalidad de los escenarios combinados. Si bien la viabilidad del proyecto es sensible a las fluctuaciones en el ahorro de gas y mantenciones, el diseño de ingeniería propuesto asegura un margen de seguridad sumamente amplio. Incluso en un escenario pesimista muy exigente, donde los ahorros totales disminuyan un 10% y los costos operativos aumenten un 20%

simultáneamente, el proyecto mantiene un VAN positivo de \$55.627, garantizando a la Clínica Isamédica que la inversión es de bajo riesgo y financieramente responsable ante condiciones adversas del mercado.

Conclusiones

El desarrollo del presente Trabajo de Título permitió diseñar una solución integral de automatización para el sistema térmico de la lavandería industrial en la Clínica Isamédica Rancagua. El diseño propuesto resolvió exitosamente las deficiencias del sistema manual existente, cumpliendo a cabalidad con los objetivos técnicos, normativos y económicos planteados.

A partir de los resultados obtenidos, se desprenden las siguientes conclusiones:

- Resolución de la problemática operativa: La integración de un autómata programable Siemens S7-1200, sumada a la implementación de un lazo de recirculación sanitario, permitió erradicar las caídas de presión y temperatura del diseño original. El nuevo control PID sobre la válvula de gas asegura un suministro estable de agua a 85 °C (± 2 °C), garantizando flujo suficiente incluso cuando las tres lavadoras operan de manera simultánea.
- Cumplimiento del estándar sanitario hospitalario: Al lograr la estabilidad térmica del sistema de Agua Caliente Sanitaria (ACS), el diseño asegura que se genere el choque térmico requerido para la activación de los químicos desinfectantes. Esto permite a la clínica cumplir estrictamente con la Norma Técnica N.º 199 del MINSAL, mitigando el riesgo de infecciones intrahospitalarias.
- Viabilidad económica y alta rentabilidad: El proyecto demostró ser una inversión financieramente sólida. Tras evaluar un horizonte de 10 años, el sistema de control genera un Valor Actual Neto (VAN) positivo de \$3.011.903 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 13,53%. Esto demuestra que el ahorro proyectado de \$4.820.000 anuales en consumo de gas y repuestos no solo paga la inversión inicial, sino que renta por sobre el costo de oportunidad exigido.
- Robustez frente a la incertidumbre: El análisis de sensibilidad bidimensional comprobó la resiliencia del diseño. El proyecto mantiene su viabilidad económica en la mayoría de los escenarios proyectados, soportando incrementos en los costos de mantenimiento y

variaciones en el ahorro de combustible, minimizando el riesgo financiero para la institución.

- Modernización y seguridad mediante HMI: La incorporación de una interfaz gráfica estructurada bajo el estándar de alto desempeño ISA-101 proporciona al personal de operaciones una herramienta jerarquizada e intuitiva. Esto facilita el monitoreo remoto, la detección temprana de anomalías y protege la vida útil de los equipos (como la caldera y las bombas) mediante alarmas lógicas.

En definitiva, la propuesta de automatización diseñada trasciende la simple modernización tecnológica; se consolida como una inversión estratégica que optimiza el recurso energético, resguarda el equipamiento electromecánico y asegura la continuidad y calidad de un servicio crítico dentro de la infraestructura hospitalaria de la clínica.

Bibliografía

- **Agencia de Sostenibilidad Energética.** (2019). *Guía técnica de eficiencia energética en sistemas de calderas y generación de vapor.* Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- **Creus Solé, A.** (2011). *Instrumentación Industrial* (8va ed.). Marcombo.
- **Endress+Hauser.** (2022). *Manual de instrucciones operativas: Transmisor ultrasónico compacto Prosonic T FMU30.* Endress+Hauser Group.
- **International Society of Automation (ISA).** (2009). *ANSI/ISA-5.1-2009: Instrumentation Symbols and Identification.* ISA.
- **Ministerio de Salud (MINSAL).** (2021). *Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo (Decreto Supremo 594).* Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- **Ogata, K.** (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (5ta ed.). Pearson Educación.
- **Siemens AG.** (2021). *Manual de sistema: SITRANS FS230 Medidor de caudal ultrasónico tipo Clamp-on.* Siemens Industry Online Support.
- **Siemens AG.** (2022). *Sistema de automatización S7-1200: Manual de sistema.* Siemens Industry Online Support.
- **Spirax Sarco.** (2020). *El control de temperatura en intercambiadores de calor y su impacto en la eficiencia energética.*
- **Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).** (2021). *Pliego Técnico Normativo RIC N° 04: Conductores y canalizaciones.* Gobierno de Chile.
- **WIKA.** (2023). *Manual de instrucciones: Termorresistencias para la industria de procesos, serie TR10.* WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG.