

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

AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO PLANTA LPG

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

Alumno:

Jonathan Daniel Navarrete Ramírez

Profesor Guía:

Franz Yurjevic Perin

Martin García Gutiérrez

2026



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: AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO PLANTA LPG

Nombre del candidato(a): Jonathan Daniel Navarrete Ramirez

Carrera / Grado: Ingeniería de ejecución control e instrumentación industrial

Campus: Sede Viña del Mar_ Departamento: ELECTROTECNIA E INFORMÁTICA (ELINF)

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **FRANZ YURJEVIC PERIN**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 26-03-2026 Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/03/2026

Firma: _____

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

RESUMEN

KEYWORDS: Gas Licuado de Petróleo (LPG), Sistema de calentamiento de LPG, lazo de control,

Este proyecto presenta el diseño e implementación de un sistema de control automático para el proceso de calentamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP) refrigerado en la planta Oxiquim Quintero. El sistema utiliza un circuito de etilenglicol y aerocalentadores, regulados mediante lazos de control de caudal y temperatura, integrados a un PLC Allen-Bradley ControlLogix. La solución busca optimizar la operación, reducir costos energéticos, aumentar la seguridad y cumplir con normativas ATEX en atmósferas explosivas. La evaluación económica demuestra la viabilidad del proyecto, mientras que los beneficios operativos y ambientales refuerzan su aporte a la eficiencia y sostenibilidad de la planta.

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	2
1. Planteamiento del problema y selección de la solución.....	3
1.1. Antecedentes generales.....	4
1.2. Terminal Marítimo Bahía Quintero.....	6
1.3. Planta LPG refrigerado.....	7
1.4. Sistema de calentamiento.....	9
1.5. Problemática.....	11
1.5.1. Descripción del problema.....	12
1.5.2. Importancia de resolverlo.....	13
1.5.3. Involucrados.....	14
1.6. Alternativas de solución.....	15
1.6.1. Alternativa N°1: Sistema con energía solar térmica.....	15
1.6.2. Alternativa N°2: Implementar control ON-OFF con histéresis.....	15
1.6.3. Alternativa N°3: Operar con sistema auxiliar de caldera.....	16
1.7. Evaluación de las alternativas de solución.....	16
1.7.1. Alternativa seleccionada.....	17
1.8. Objetivos.....	18
1.8.1. Objetivo general.....	18
1.8.2. Objetivos específicos.....	18
CAPÍTULO 2: DESARROLLO Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA.....	19
2.1. Descripción del sistema.....	20
2.2. Modo de operación automático.....	21
2.2.1. Lazo de control FIC-901: Control de caudal de etilenglicol.....	23
2.2.2. Lazo de control TIC-901: Control de temperatura del etilenglicol.....	27
2.3. Señales de proceso y alarmas adicionales.....	31

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN.....	34
3.1. Costos de los equipos elegidos en el diseño.....	35
3.2. Diagrama de Gantt de implementación.....	36
3.3. Costos de implementación.....	37
3.4. Beneficios para la empresa.....	38
3.4.1. Estimación de ahorro energético y costos asociados.....	39
3.4.2. Propuesta de flujo de caja a 5 años.....	40
3.4.3. Análisis de sensibilidad.....	41
CONCLUSIONES.....	43
ANEXOS.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Puntuación de las alternativas de solución	17
Tabla 2-1. Tabla consolidada de equipos.....	21
Tabla 3.1 Costos de los equipos elegidos en el diseño	35
Tabla 3.3 Costos de implementación	37
Tabla 3.6 Propuesta de flujo de caja a 5 años	41
Tabla 3.4 Análisis de sensibilidad del flujo de caja	42

INTRODUCCIÓN

Desde su incorporación al mercado chileno en 1956, el Gas Licuado de Petróleo (LPG) se ha levantado como uno de los pilares de la matriz energética nacional. Más del 80 % de los hogares chilenos dependen hoy de este combustible para cocinar y calefaccionar, y su uso se extiende también a industrias y comercios por su bajo costo y bajas emisiones contaminantes. Gracias a una extensa red de distribución, el LPG llega incluso a las localidades más apartadas, contribuyendo así a reducir la brecha de acceso a la energía en zonas rurales y periferia urbana.

Técnicamente, el LPG se almacena a temperaturas cercanas a $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ para mantenerlo en fase líquida. Antes de su inyección en la red de gaseoductos, debe calentarse a una temperatura que permita su distribución, ya que el gaseoducto no está diseñado para temperaturas inferior a -20°C . En la planta, este proceso de calentamiento se realiza actualmente de forma manual, obligando a un mínimo de seis horas de operación continua de los aerocalentadores. Esta práctica conlleva un aumento en los costos energéticos, puesto que los equipos tienen ciclos de arranque y paro sin un control determinado que acelera el desgaste.

En un escenario global donde la eficiencia y la sostenibilidad marcan la pauta de la innovación industrial, resulta imprescindible optimizar este proceso. La implementación de un sistema de control automático de temperatura, promete reducciones significativas en el consumo eléctrico y ahorros operativos, al mismo tiempo que prolonga la vida útil de los componentes.

Con base en lo anterior, el presente proyecto de título propone diseñar un sistema de control automático de temperatura para el proceso de calentamiento de LPG. Mediante la aplicación de estrategias ON/OFF con histéresis, se busca elevar la eficiencia global de la planta, disminuir costos operacionales y aportar al cumplimiento de las metas de sustentabilidad energética.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN

La distribución de Gas Licuado de Petróleo (LPG) hacia las regiones Metropolitana y de Valparaíso exige que el combustible salga de la planta a una temperatura no inferior a -20°C. Almacenar LPG a -43 °C lo mantiene en fase líquida, pero antes de la distribución en los gaseoductos debe calentarse; si circula por debajo de su temperatura de diseño, las tuberías se fracturan y los despachos se interrumpen.

Actualmente, el calentamiento se opera de forma manual, manteniendo los aerocalentadores en marcha un mínimo de seis horas continuas cada día. Esta práctica provoca:

- Costos energéticos elevados, al depender del criterio del operador para activar y desactivar los aerocalentadores
- Ciclos frecuentes de arranque y paro que aceleran el desgaste de los equipos.
- Riesgo de fractura o bloqueo de la red de distribución, quedando inhabilitado el gaseoducto.

En síntesis, la falta de un control automático del sistema de calentamiento impide ajustar la temperatura que aportan los aerocalentadores al LPG, comprometiendo la eficiencia operativa, la seguridad de la infraestructura y los costos de la planta. Se hace imprescindible implementar un sistema de control automático que garantice el control de la temperatura de suministro y minimice tanto el consumo energético como el desgaste de los equipos.

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

El Grupo Oxiquim inició sus operaciones en 1950 como SINTEX limitada en la ciudad de Viña del Mar, como iniciativa de dos emprendedores que deciden fabricar productos químicos para la industria textil y del cuero. A partir de entonces, y especialmente durante los años 70, diversificaron la producción incorporando la fabricación de distintos productos químicos para abastecer al mercado nacional y, principalmente, mercados de exportación, con las plantas situadas en El Salto en Viña del Mar, instalaciones que dejaron de operar en la década de los 90.

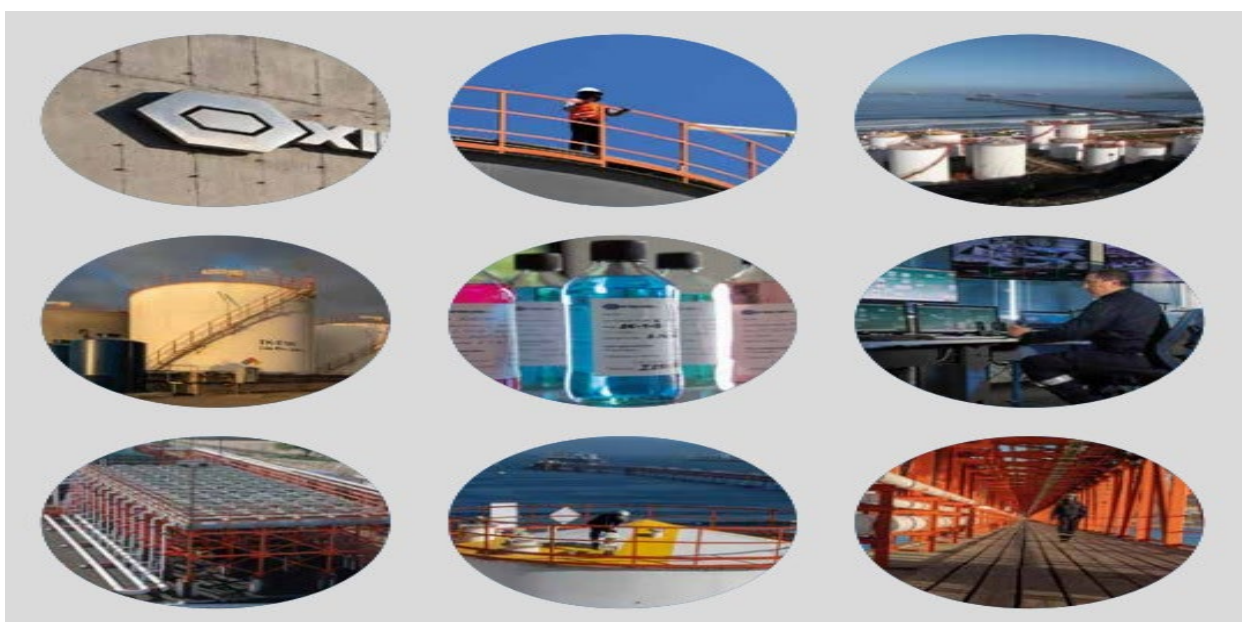
A lo largo de la historia, continuaron ampliando las actividades productivas y comerciales a través de SINTEX S.A. y de Oxiquim S.A., expandiéndose geográficamente con bodegas en Santiago y oficinas de distribución en Sao Paulo, Brasil y una oficina en Beijing, China. Entre los años 80 y 90, potenciaron el crecimiento para atender a la industria de tableros de madera con la instalación de las plantas de formalina y resinas en Escuadrón en la comuna de Coronel, Región del Biobío, Chile, la instalación de un centro de distribución y bodegas en Quilicura, Región Metropolitana. Al poco tiempo, ingresaron al negocio de los terminales marítimos especializados en líquidos a granel, primero en Quintero y luego en Escuadrón.

Como empresa chilena, nacida en la región de Valparaíso, tiene 70 años de experiencia en la distribución, producción y almacenaje de servicios y productos, cuenta con cuatro divisiones especializadas: Resinas, Minería, Terminales Marítimos y Químico y Especialidades.

Provee servicios y materias primas esenciales en la elaboración y entrega de productos básicos para el bienestar de la sociedad como son: los alimentos, remedios, agua potable, papel, adhesivos para tableros de madera, producción del cobre, gas licuado y combustibles, por nombrar sólo algunos.

En el área de terminales, tiene presencia en Quintero, Mejillones y Escuadrón, a través de los cuales se mueven más de 1.600.000 toneladas, entre combustibles como

diésel y LPG e insumos químicos requeridos por la minería, la celulosa y otras industrias productivas, atendiendo entre 160 a 200 naves anualmente. El terminal Quintero es el aliado estratégico que permite a la minería de la zona central, a los distribuidores de combustibles y a la industria mantener un abastecimiento continuo, donde es importante destacar que un 70% del LPG que se consume en Chile se importa en este terminal. En tanto, en Mejillones, las operaciones se concentran en responder la demanda de la industria minera con solventes, sulfhidrato de sodio y soda cáustica. El terminal marítimo Escuadrón recibe insumos químicos y combustibles, que permiten abastecer la industria de celulosa, fabricación de resinas para tableros y distribución de combustibles. La historia y expansión de la empresa se ilustran en la Figura 1-1, donde se muestra sus distintas divisiones.



Fuente: https://www.oxiquim.com/wp-content/uploads/2019/04/Memoria_Oxiquim_2018-1.pdf

Figura 1-1. Oxiquim S.A

1.2 TERMINAL MARÍTIMO BAHÍA QUINTERO

El terminal marítimo de la bahía de Quintero es una instalación de recepción, almacenamiento y despacho de hidrocarburos y productos químicos. Su infraestructura principal incluye: Un muelle diseñado para carga y descarga de motonaves, con líneas acondicionadas según el tipo de producto. Estanques con capacidad total de 70.000 toneladas, aptos para combustibles (gasolinas, diésel, LPG) y químicos (ácido sulfúrico, soda cáustica, entre otros). Islas de carga de camiones y básculas de pesaje para optimizar la logística terrestre. Equipos de respuesta ante emergencias en tierra y en mar, que aseguran la operación segura frente a siniestros.

Con un movimiento anual cercano al millón de toneladas y la transferencia del 70 % del LPG consumido en Chile, este terminal es un nodo clave para el abastecimiento energético e industrial del país. La infraestructura del terminal marítimo se observa en la Figura 1-2, en la recepción, almacenamiento y despacho.



Fuente: <https://docplayer.es/15869498-Conducta-responsable-y-buenas-practicas-implementadas-en-terminal-maritimo.html>

Figura 1-2. Vista terminal marítimo quintero Oxiquim S.A

1.3 PLANTA LPG REFRIGERADO

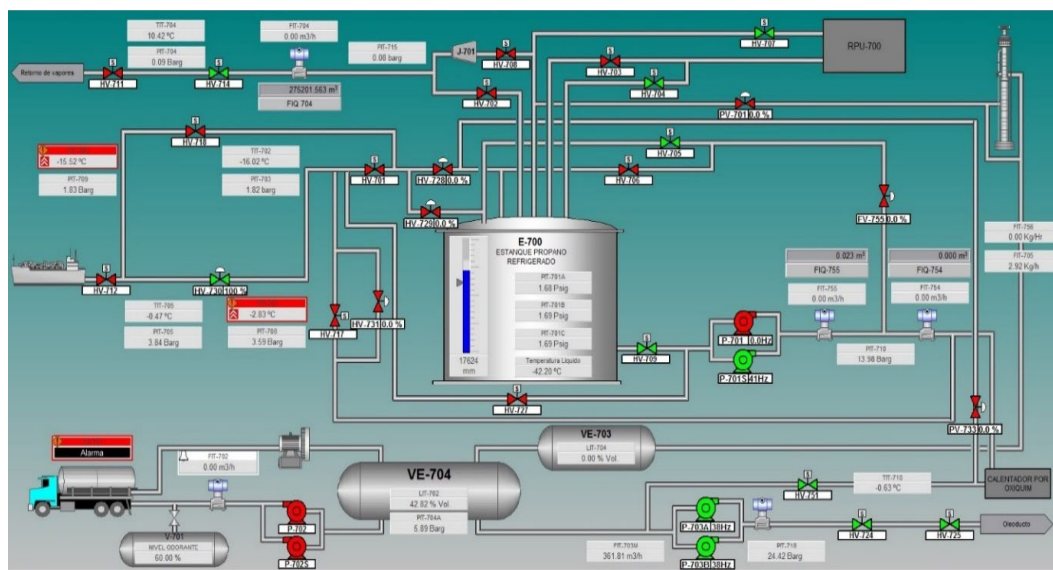
A partir de marzo del año 2015, entra en operación el terminal de almacenamiento de gas licuado de petróleo (LPG) refrigerado, está emplazado dentro del terminal marítimo de Oxiquim Quintero, consiste en un estanque de LPG refrigerado a -45 C el cual se muestra en la Figura 1-3 con el tag E-700, y cuenta con una capacidad de almacenamiento 50.000 m^3 y una presión de diseño de $2,5\text{ psi}$. Este estanque está dedicado a la recepción y envío de LPG refrigerado, desde y hacia barcos a través de una línea de $14''$, que nace en el muelle de Oxiquim y finaliza al llegar al estanque. La recepción desde el buque se hace a una tasa de $1200\text{ m}^3/\text{h}$ y el flujo de envío hacia buques varía según la altura de producto en el estanque. El terminal considera despacho de LPG a -5°C hacia el oleoducto Sonacol, por una línea de $10''$, de alrededor de 1000 m de largo, que va desde la planta hacia un punto de empalme con oleoducto. El envío de LPG a -5°C hacia el oleoducto de Sonacol se realiza a una tasa de $380\text{ m}^3/\text{h}$.

Alternativamente, se puede realizar despacho por camiones de LPG presurizado, para esto se dispone de una estación de almacenamiento presurizado intermedia que se visualiza en la Figura 1-3 con el tag VE-704, un estanque de 200 m^3 y dos bombas de $66\text{ m}^3/\text{h}$, para despachar LPG a camiones por una isla de carga. Adicionalmente, se cuenta con un compresor que permite retornar LPG en estado gaseoso para evitar sobrepresión en tanques de camiones y también permite devolver producto hacia el estanque de almacenamiento en caso de sobrellenado del tanque de camión. Para enviar el gas oleoducto y camiones es necesario acondicionar el producto hasta -5°C , para esto Oxiquim cuenta con un sistema de calentamiento de LPG refrigerado.

El terminal también está equipado con un sistema de antorcha y un tanque colector de venteos de válvulas de alivio Figura 1-4 con el tag VE-703, que permite disponer en forma segura posibles descargas de LPG originadas durante la operación normal.

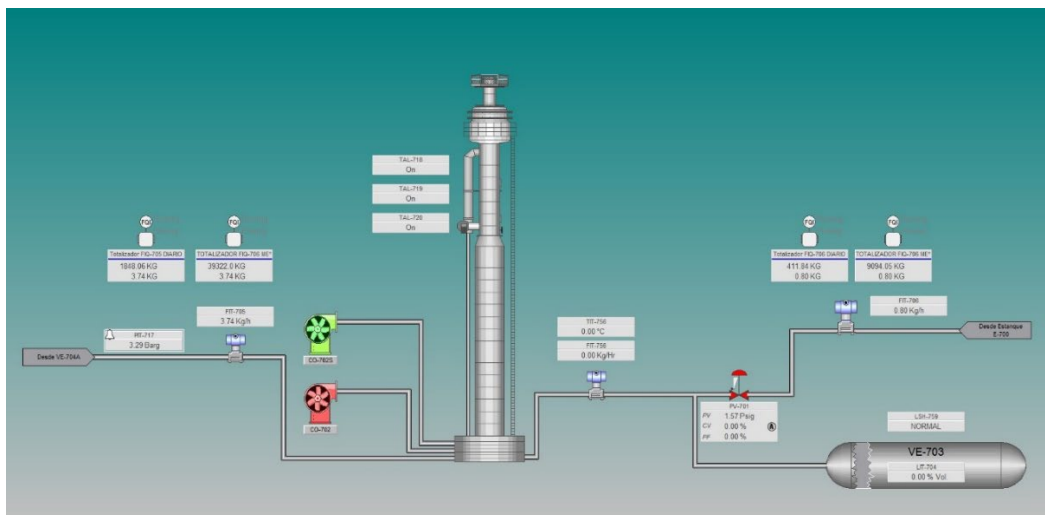
Finalmente, se dispone de una red contra incendio diseñada para refrigerar toda la superficie externa del estanque, en el evento que se produzca un derrame dentro del pretil

y este se incendie. Esta red también considera la refrigeración de los distintos equipos de la planta como son estanques presurizados, bombas y sistema de refrigeración.



Fuente: Manual operación planta LPG

Figura 1-3. Vista proceso planta LPG

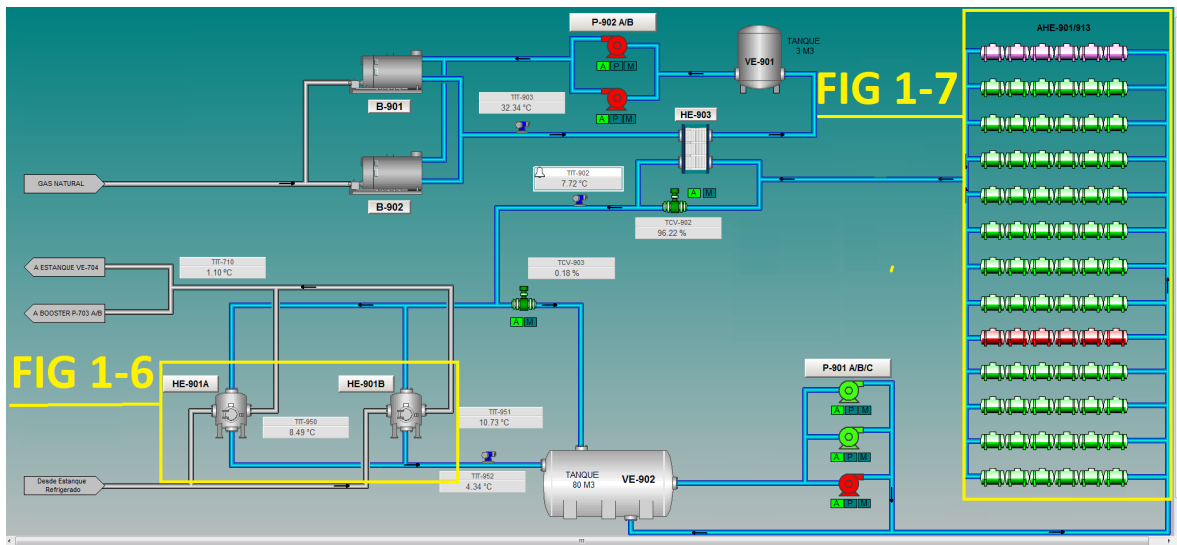


Fuente: Manual operación planta LPG

Figura 1-4. Vista antorcha y colector de venteo LPG

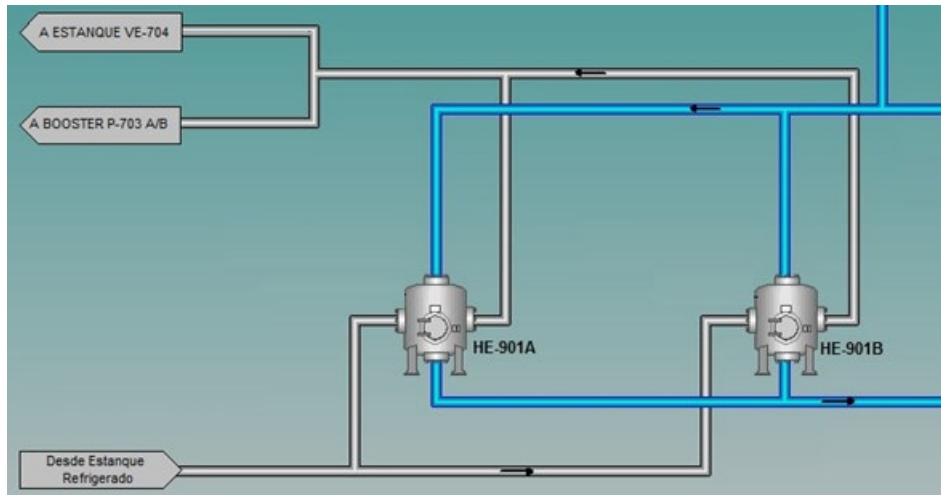
1.4 SISTEMA DE CALENTAMIENTO

El diseño del sistema de calentamiento de propano, se basa en el uso de aire ambiente como fuente de calor para calentar el propano líquido. El calentamiento del propano es de forma indirecta, es decir que el calor que proporciona el aire del ambiente se transfiere a un circuito circulante de etilenglicol que se utiliza en un intercambiador para calentar un flujo de propano líquido. El etilenglicol circulante calienta el propano líquido de -44°C a -5°C , por medio de dos intercambiadores de calor del tipo placas soldadas denominado alfa disc (HE-901A/B) ver figura 1-6, por un periodo diario de 6 a 8 horas. El etilenglicol que sale a baja temperatura del intercambiador de calor alfa disc (aprox -1°C - HE-901A/B) se vuelve a recalentar usando una combinación de aerocalentadores (intercambiador de calor aire-liquido - AHE 901/913) ver Figura 1-7 y un sistema de calentamiento auxiliar, el cual solo se usa para aquellos días donde la temperatura ambiente del aire es baja ($<10^{\circ}\text{C}$) para poder calentar el etilenglicol a un nivel mínimo de $5,3^{\circ}\text{C}$.



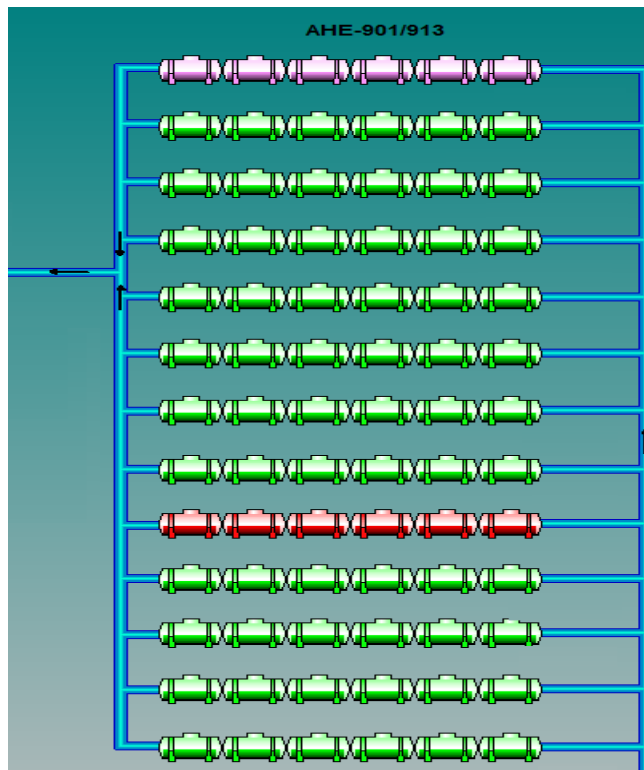
Fuente: Manual operación planta LPG

Figura 1-5. Vista proceso sistema de calentamiento planta LPG (intercambiador de calor tipo placas a) y aire líquido b).



Fuente: Manual operación planta LPG

Figura 1-6. Vista ALFADISC HE-901 A/B



Fuente: Manual operación planta LPG

Figura 1-7. Vista aerocalentadores AHE 901-913

1.5 PROBLEMÁTICA

Oxiqum S.A. es una empresa comprometida con la mejora continua de sus operaciones, elevando la seguridad y minimizando su impacto ambiental mediante inversiones tanto en infraestructura como en capital humano. En ese marco, se ha identificado una oportunidad de optimización en el sistema de calentamiento, que hoy se opera de forma manual.

El operador selecciona cuántos arocalentadores activar para garantizar que el LPG no circule por debajo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y evitar el enclavamiento por baja temperatura que cierra la válvula de transferencia.

Esta modalidad carece de automatización, depende del criterio individual y dificulta el monitoreo, el mismo operador es quien debe realizar el control de embarques, comunicaciones radiales con las naves, telefónicas y comunicaciones internas por el área de operaciones y área de mantención.

Se efectúan al menos tres transferencias diarias, de 6 a 8 horas cada uno, lo que aumenta la carga de trabajo, los riesgos de error humano y el consumo energético.

En consecuencia, resulta imprescindible diseñar e implementar un sistema de control automático de temperatura que:

- Ajuste la potencia de los arocalentadores.
- Simplifique el monitoreo y reduzca la intervención manual.
- Aumente la eficiencia operativa, la seguridad y el ahorro energético.

1.5.1 Descripción del problema

Durante cada transferencia de LPG por gaseoducto, el operador debe poner en marcha y regular manualmente una serie de equipos que consumen electricidad y gas natural licuado:

- 2 bombas CAN y 2 bombas Booster (impulsión de LPG).
- 3 bombas de agua para el sistema de calentamiento principal.
- 2 bombas de agua para el sistema auxiliar.
- 13 trenes de aerocalentadores, cada uno con 6 motores eléctricos y 2 calderas a gas natural licuado.

Al operar de forma manual, el personal de sala decide arbitrariamente cuántos aerocalentadores y calderas activar para elevar la temperatura de salida del LPG por encima de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y así evitar el interlock de baja temperatura que cierra la válvula de transferencia.

Esta falta de control ocasiona:

- Uso innecesario de equipos: por ej., para transferir 300t LPG, el operador puede encender 10 trenes de aerocalentadores cuando bastarían 7 si se trabajara con un setpoint de trabajo fijo y un lazo de control de temperatura.
- Desgaste prematuro: arranques y paros excesivos de motores.
- Riesgos de detención imprevista: si el operador descuida la temperatura por atender comunicaciones o control de embarques, el enclavamiento detiene abruptamente el flujo, provocando alzas de presión en el piping.
- Emisiones involuntarias a la antorcha: ante sobrepresiones, las válvulas de alivio (PV) descargan LPG a la antorcha para quemar el gas, liberando CO_2 y aumentando el impacto ambiental.

Peligro de fractura de tuberías: si el LPG circula por debajo de -20°C , la red de gaseoductos corre riesgo de agrietarse.

1.5.2 Importancia de resolverlo

Implementar un control automático de temperatura conlleva beneficios operativos, económicos y ambientales:

- Reducción de equipos en marcha: optimiza el número de aerocalentadores y calderas necesarias, disminuyendo el desgaste y extendiendo la vida útil de los activos.
- Menor consumo de energías eléctrica y gas: al ajustar la potencia, se reducen costos de operación y mantenimiento.
- Evitar detenciones imprevistas: al vigilar continuamente la temperatura y actuar antes de que se active el interlock, se eliminan paros bruscos y sobrepresiones en el gaseoducto.
- Minimizar emisiones: menos descargas de gas a la antorcha reducen la huella de carbono y mejoran la relación con la comunidad en una zona de alta sensibilidad ambiental como la Bahía de Quintero.
- Mayor competitividad: operar con mayor eficiencia y menores costos abre margen para reinvertir en nuevas mejoras y fortalecer el liderazgo de Oxiquim S.A.

En definitiva, un sistema de control automático no solo elevará la seguridad y la confiabilidad de las transferencias de LPG, sino que también generará ahorros significativos y fortalecerá el compromiso medioambiental de la empresa.

1.5.3 Involucrados

La problemática mencionada es transversal a toda la compañía, pero hay áreas que se ven directamente afectadas e interesadas en dar solución, es por eso que se debe fomentar la participación e involucrarlos para lograr la solución más idónea a la problemática.

Los principales involucrados en la solución de la problemática son:

- Área de Operaciones: son los encargados de las operaciones de la planta, por lo que serán los encargados de definir el modo de operaciones del sistema de calentamiento, las horas de servicio de los equipos, siendo los responsables de su correcto uso. La mejor solución se debe considerar por la experiencia de los involucrados en el uso del sistema de calentamiento.
- Área de Proyectos de Ingeniería: encargado de planificar y distribuir recursos para la solución de la problemática, supervisando el desarrollo y que se haga en base a los estándares y políticas de la compañía.
- Área de mantenimiento: Tienen el registro de falla de los equipos, informes de trabajos frecuentes, equipos con mayor cantidad de fallas y la duración más prolongada de las mismas.

1.6 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Se tienen tres alternativas para la solución a la problemática, las cuales se deben evaluar según criterios y escoger cuál es la más idónea, tanto técnicamente como económicamente.

1.6.1 Alternativa N°1: “Sistema con energía solar térmica”

La alternativa N°1 consiste en integrar un sistema de colectores solares térmicos que permitan precalentar el etilenglicol antes de su ingreso al sistema de calentamiento. El sistema incluye captadores solares ubicados estratégicamente para maximizar la captación de la radiación, un intercambiador de calor para transferir la energía solar al etilenglicol, acumuladores térmicos para mantener el calor disponible incluso en horas sin sol y por último un sistema de control automático que regule el proceso de precalentamiento según demanda térmica.

1.6.2 Alternativa N°2: “Implementar control ON-OFF con histéresis”

La alternativa N°2 es implementar un control ON-OFF con histéresis al sistema de calentamiento, lo que representa hacer una mejora, hacer transferencias más eficientes, con un menor costo energético, una empresa más competitiva, el uso de los equipos necesarios para la transferencia. Una operación transversal entre los distintos operadores. Una puesta en servicio más controlada, es decir, que para encender la cantidad de trenes de arocalentadores se respetaría un tiempo establecido para su puesta en servicio. Cuidado de los equipos y piping de la planta, además de evitar quemar producto por seguridad operacional.

1.6.3 Alternativa N°3: “Operar con sistema auxiliar de caldera”

La alternativa N°3 es trabajar con el sistema auxiliar de caldera, es decir en otras palabras, encender sistema auxiliar de caldera de GNL para calentar el propano frío que entra al gaseoducto, de esta manera se asegura que la temperatura de salida sea siempre positiva, y no dependiendo de un control, pero en contra generando un consumo de GNL para épocas cálidas, en la cual su uso no se justifica, ya que se recomienda usar cuando la temperatura ambiente sea inferior a 10 C°.

1.7 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

A las alternativas de solución antes mencionadas se realiza una evaluación que permita determinar cuál es la más idónea, cada criterio tiene una escala de calificación de 1 a 3 donde 1 corresponde a “bajo” y 3 cuando la calificación es “Muy bueno”, en la tabla 1-1 se puede apreciar lo antes mencionado. La suma da un total para cada alternativa, y la de mayor puntaje será la seleccionada para su implementación.

Los criterios a evaluar son 5:

- Innovación: Definir el aporte de nuevas ideas y mejoras.
- Beneficio: Ahorro energético.
- Factibilidad: La posibilidad de mejorar el problema.
- Inversión: El costo económico para la compañía.
- Tiempo de implementación: La demora en ejecutar la mejora.

En la tabla 1-2 se encuentra la evaluación de las alternativas y el puntaje final de cada una, por ende, la de mayor puntaje es la alternativa que será seleccionada.

Tabla 1-1. Tabla de puntuación de alternativas

Bajo	Regular	Muy bueno
1	2	3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1-2. Evaluación de alternativas

Criterio	Peso	Solar térmico	Control ON-OFF + Δh	Caldera GNL
Innovación	15%	3	3	1
Beneficio energético	10%	3	3	1
Factibilidad técnica	40%	2	2	3
Inversión económica	30%	1	2	1
Tiempo de implementación	5%	3	3	3
Total ponderado		2	2,3	1,9

Fuente: Elaboración propia.

1.7.1 Alternativa seleccionada

Alternativa 2 – Control ON-OFF es la solución más equilibrada entre eficiencia energética, factibilidad técnica, tiempo de implementación y costo. Además, al mantener una operación estandarizada y escalable, permite mayor seguridad operativa y control sobre los trenes de aerocalentadores.

1.8 OBJETIVOS

Esta sección del trabajo se definen los objetivos generales y los objetivos específicos que se buscan con el desarrollo del trabajo.

1.8.1 Objetivo general.

Diseñar el control del sistema de calentamiento planta LPG Oxiquim Quintero.

1.8.2 Objetivos específicos.

Para cumplir la meta impuesta en el objetivo general, se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Describir la operación del sistema de calentamiento de la planta LPG Quintero.
- Elaborar el proyecto de automatización del sistema de calentamiento
- Realizar estudio económico.

**CAPÍTULO 2: DESARROLLO Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN PARA EL CONTROL DE
TEMPERATURA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.**

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de calentamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP) refrigerado en la planta Oxiquim Quintero se basa en un proceso indirecto de transferencia de calor. El GLP llega a la planta a $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y debe elevarse hasta $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su despacho seguro hacia oleoductos y camiones. Para lograrlo, se utiliza un circuito secundario de etilenglicol que recibe calor del aire ambiente mediante aerocalentadores. Este etilenglicol circula hacia intercambiadores de placas Alfa Disc (HE-901 A/B), donde transfiere la energía al GLP, elevando su temperatura hasta el rango requerido.

El etilenglicol que retorna frío desde los intercambiadores es recalentado nuevamente por los aerocalentadores AHE-901/913, que combinan ventiladores y resistencias eléctricas. En condiciones de baja temperatura ambiente ($<10\text{ }^{\circ}\text{C}$), se activa un sistema auxiliar de caldera para asegurar que el etilenglicol alcance al menos $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Todo el proceso es regulado por lazos de control: FIC-901 ajusta el caudal de etilenglicol mediante válvula proporcional bajo control PID, mientras que TIC-901 mantiene la temperatura de salida con lógica ON-OFF e histéresis. La coordinación general se realiza mediante un PLC Allen-Bradley ControlLogix, que gestiona señales, alarmas y comunicación en red EtherNet/IP.

Este diseño permite un calentamiento eficiente y seguro del GLP, optimizando el consumo energético, reduciendo ciclos de arranque y paro de equipos, y cumpliendo con normativas ATEX para operación en atmósferas explosivas.

En la Tabla 2-1 se presenta la consolidación de los equipos considerados en el diseño del sistema de calentamiento de LPG. Esta información permite visualizar de manera ordenada los componentes principales, sus características y la función que cumplen dentro del proceso.

Tabla 2-1. Tabla consolidada de equipos

ID	Cantidad	Denominación	Capacidad	Parámetros principales
VE-902	1	Estanque acumulador etilenglicol	80 m ³	Mezcla agua desmineralizada con glicol, razón 50/50
HE-901 A/B	2	Intercambiador de disco	5 873 kW	Agua: -5,3°C; LPG: -44 °C; Discos: 180
P-901 AL 913	13	Aerocalentadores	610 L	T°: 1 → 5,3 C; Motor: 7.5 kW, 50 Hz, 380 V; Presión: 6/9 bar
P-901 A/B/C	3	Bomba centrífuga horizontal	700 m ³ /h	Potencia: 160 kW; P° descarga: 5 barg

Fuente: Elaboración propia.

2.1 MODO OPERACIÓN AUTOMÁTICO

El circuito de etilenglicol es alimentado por bombas de agua (P-901 A/B/C) que cuentan con un caudal unitario de 700 m³/h a 5 bar de presión, su funcionamiento es 2 + 1, siendo el caudal de diseño del sistema 1400 m³/h. Estas cuentan con un manifold de alimentación a piping de 16", conduciendo el etilenglicol al sistema de 13 aerocalentadores (12+1), el etilenglicol entra a cada aerocalentador en piping de 4" y sale en la misma medida, llegando a un piping común de 16". La temperatura del etilenglicol de salida en esta sección se controla por un lazo de control de temperatura (TIC-901), que cuenta con dos alarmas: una de alta y otra de baja temperatura (TAL-901 & TAH-901); la señal de este transmisor es enviada a la lógica de control del sistema (PLC) para controlar el número de aerocalentadores en operación. Cuanto mayor sea la temperatura del aire ambiente, menor será el número de aerocalentadores activos necesarios para calentar el etilenglicol circulante, para asegurar que la temperatura del etilenglicol a la salida de los aerocalentadores sea de 5,3 °C.

El lazo de control de flujo FIC-901 mantiene un caudal constante de etilenglicol, regulado por la válvula FCV-901.

En el caso que la temperatura del ambiente sea inferior a 10°C se debe dar la partida al sistema auxiliar (HE903). Debido a que la temperatura ambiente está por debajo de 10°C

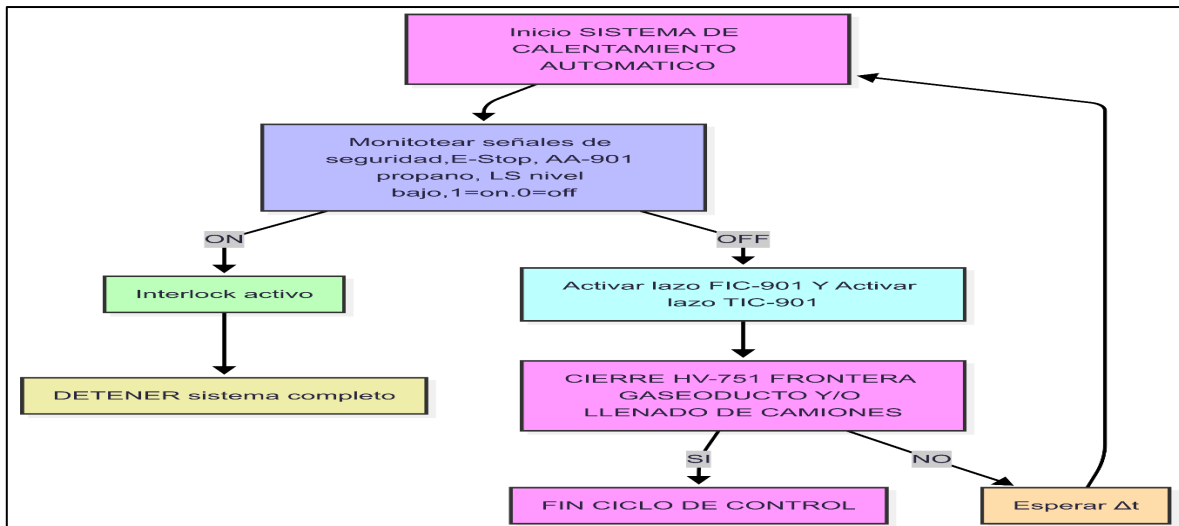
aproximadamente, el aire ambiental no tiene suficiente calor para mantener la temperatura del etilenglicol circulante en el nivel mínimo de 5,3°C.

2.2 DESCRIPCIÓN LAZOS DE CONTROL

Para mantener una temperatura constante entre el lado caliente y frío del intercambiador de etilenglicol-propano, el sistema de calentamiento usará 2 lazos de control esto para mantener el flujo de etilenglicol a una temperatura promedio de 5,3°C en la entrada de los Alfa Disc (HE-901A Y HE-901B).

- TIC-901: El control de temperatura de etilenglicol circulante regula el flujo de aire que fluye por los aerocalentadores por medio del control de la cantidad de motores en operación (on-off).
- FIC-901: Un control de caudal que regula la válvula electroactuada (FCV-901) desviando parte del flujo de etilenglicol de las bombas (P-901 A/B/C) al estanque (VE-902).

La secuencia de operación del sistema de calentamiento automático se representa en la Figura 2.1, donde se observa la lógica de activación de los lazos FIC-901 y TIC-901, junto con las condiciones de seguridad y enclavamientos que regulan el proceso.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-1. Diagrama de bloques del sistema de calentamiento automático.

2.2.1 Lazo de control FIC-901: Control de caudal de etilenglicol

Para realizar un control de caudal circulante y mejorar la precisión de control de la temperatura del etilenglicol, se utiliza un transmisor de flujo (FIT-901) que controla un bypass por una válvula electro-actuada (FCV-901), por medio de esta válvula, se controla la cantidad de etilenglicol que se desvía de regreso al estanque acumulador (VE-902), la interacción de estos elementos se representa en la Figura 2-2, de esta forma controla el flujo neto que fluye a los aerocalentadores. Esto permitirá un mejor control de la temperatura del etilenglicol y de esta manera mantener las diferencias de temperatura requerida en el sistema. La arquitectura modular del lazo de control FIC-901 se muestra en la Figura 2-3, donde se distinguen los bloques funcionales que componen el lazo de control.

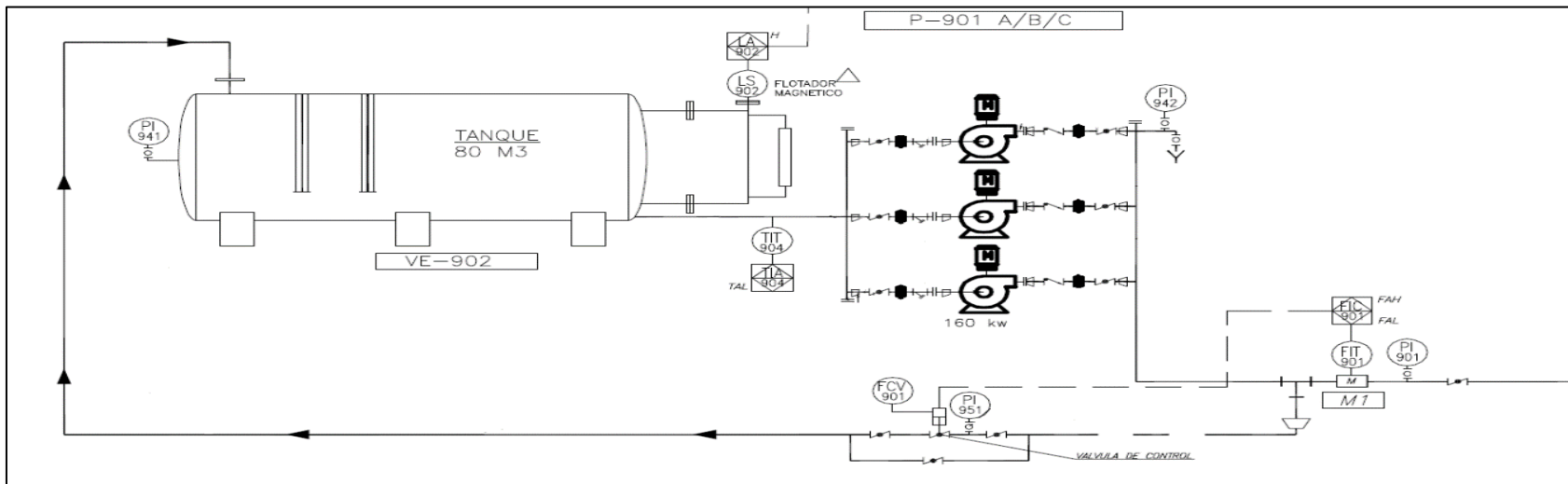
- Sensor + escalamiento → PID → válvula → supervisión de alarmas
- Todo está encapsulado en bloques funcionales independientes, lo que facilita pruebas y mantenimiento.
-

Componentes:

- FIT-901: transmisor de flujo que mide el caudal real de etilenglicol.
- FIC-901: módulo de control en el PLC que compara el flujo real con el setpoint definido.
- FCV-901: válvula de bypass accionada por señal 4–20 mA para desviar parte del etilenglicol al estanque acumulador.

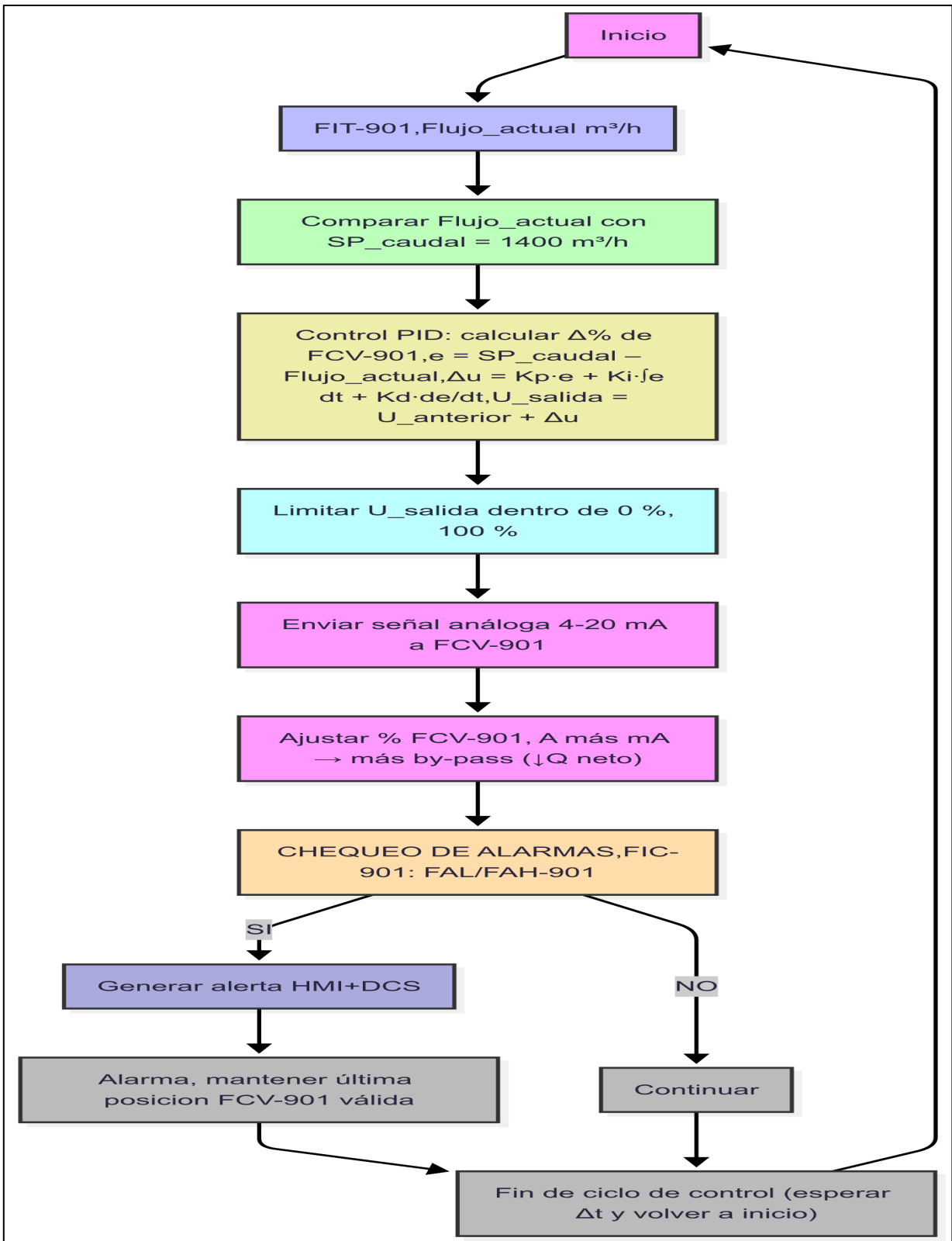
Funcionamiento:

1. Medición: FIT-901 envía al PLC la lectura del caudal en tiempo real.
2. Comparación: FIC-901 contrasta ese valor con el setpoint programado.
3. Ajuste de válvula:
 - Si el flujo cae por debajo del setpoint, se cierra FCV-901, desviando menos etilenglicol al tanque y aumentando el caudal al circuito de calentamiento.
 - Si el flujo supera el setpoint más la banda de histéresis, se abre FCV-901 para devolver más etilenglicol al estanque y reducir el caudal activo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-2. Lazo de control FIC-901: regulación de caudal de etilenglicol.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-3. Diagrama de bloques lazo FIC-901

2.2.1.1 Estructura del programa FIC901 para el organizador del controlador

El organizador del controlador refleja una arquitectura de control modular, ideal para mantenimiento, diagnóstico y escalabilidad. A continuación, una descripción operativa de cómo interpretar esa jerarquía.

Programa_FIC901

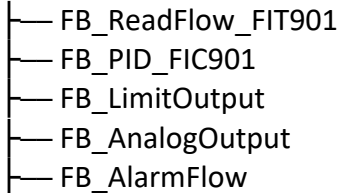


Tabla 2-2. Llamado programa FIC-901

Paso	Función / Bloque	Descripción	Observaciones
1	FB_ReadFlow_FIT901	Lectura y escalamiento del caudal desde FIT-901	Entrada analógica escalada a valor físico
2	FB_PID_FIC901	Regulación PID con setpoint de 1400.0	Ajustar Kp, Ki, Kd en comisionamiento
3	FB_LimitOutput	Limitación de la salida PID al rango permitido (0–100%)	Evita saturación de señal
4	FB_AnalogOutput	Conversión del % de apertura a señal 4–20 mA	salida física al FCV-901
5	FB_AlarmFlow	Activación de alarma por caudal fuera de rango	Límites: mínimo 1000.0 – máximo 1800.0

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Definir parámetros de PID (Kp, Ki, Kd) durante comisionamiento.

Ventajas de la lógica modular:

- Modularidad: cada bloque realiza una función única, lo que simplifica la localización de fallas.
- Mantenimiento: si hay un problema en la lectura de caudal, por ejemplo, se revisa FB_ReadFlow_FIT901 directamente.

- Escalabilidad: se puede agregar nuevos bloques funcionales sin afectar la lógica principal.

¿Qué puede hacer el operador?

- Monitorear caudal actual: en pantalla HMI se ve en tiempo real.
- Cambiar Setpoint si está autorizado: por ejemplo, de 1400 a 1500 m³/h si lo requiere el proceso.
- Revisar alarmas activas: y confirmar si son reales o por falla de sensor.
- Pasar de automático a manual: solo si hay falla de válvula o necesidad operativa especial.

2.2.2 Lazo de control TIC-901: Control de temperatura a la salida de los aerocalentadores

Este lazo regula el flujo de aire a través de los aerocalentadores (AHE-901 a AHE-913), permitiendo mantener la temperatura del etilenglicol a la salida de estos equipos en 5,3 °C. La disposición física de los aerocalentadores y su conexión con el sistema de control se observa en la Figura 2-4. Esto permite mantener la temperatura del etilenglicol bajo control aun cuando ocurran cambios de la temperatura y humedad relativa del aire que entra a los aerocalentadores. La lógica de operación se representa en la Figura 2-5, donde se observa el diagrama de bloques de control implementado en el PLC.

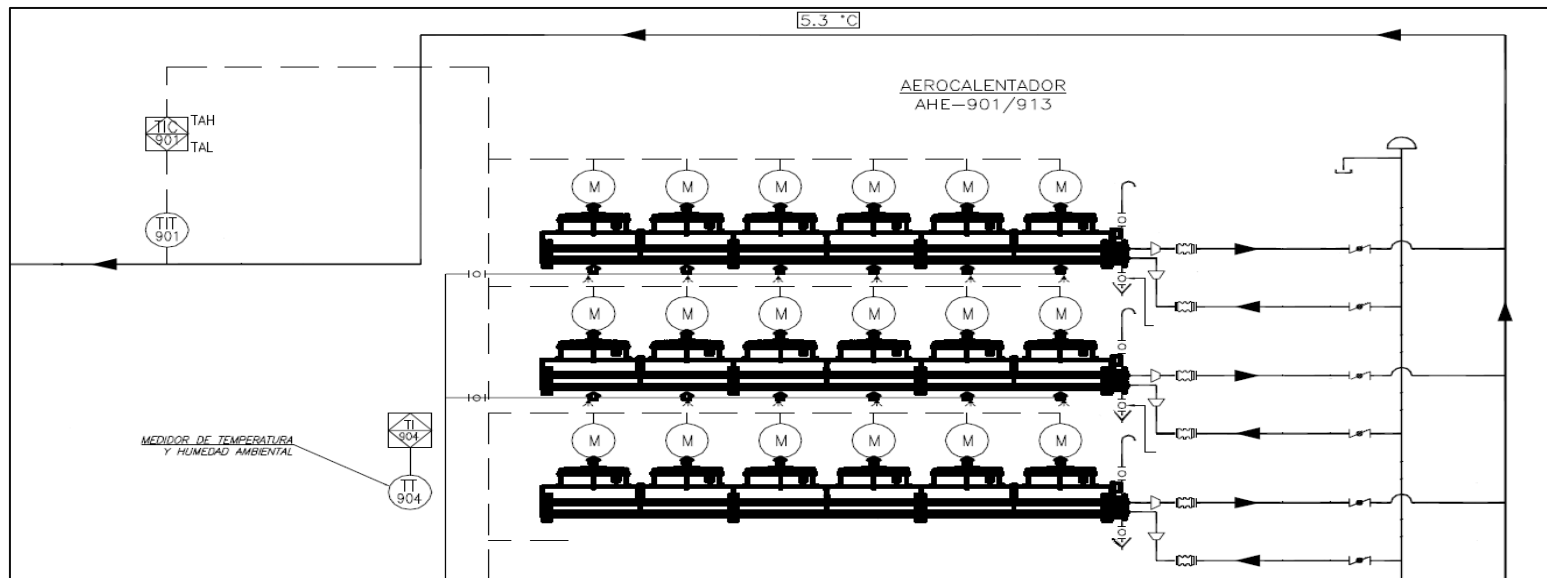
- Sensor + escalamiento → control on/off → encendido/apagado aerocalentadores → supervisión de alarmas

Componentes:

- Sensor PT100 (TIT-901): Mide la temperatura del etilenglicol circulante tras los aerocalentadores.
- Controlador TIC-901 (PLC): Compara la temperatura medida con el setpoint definido.
- Actuadores (salidas digitales/relés): Encienden o apagan los ventiladores y resistencias de los aerocalentadores.

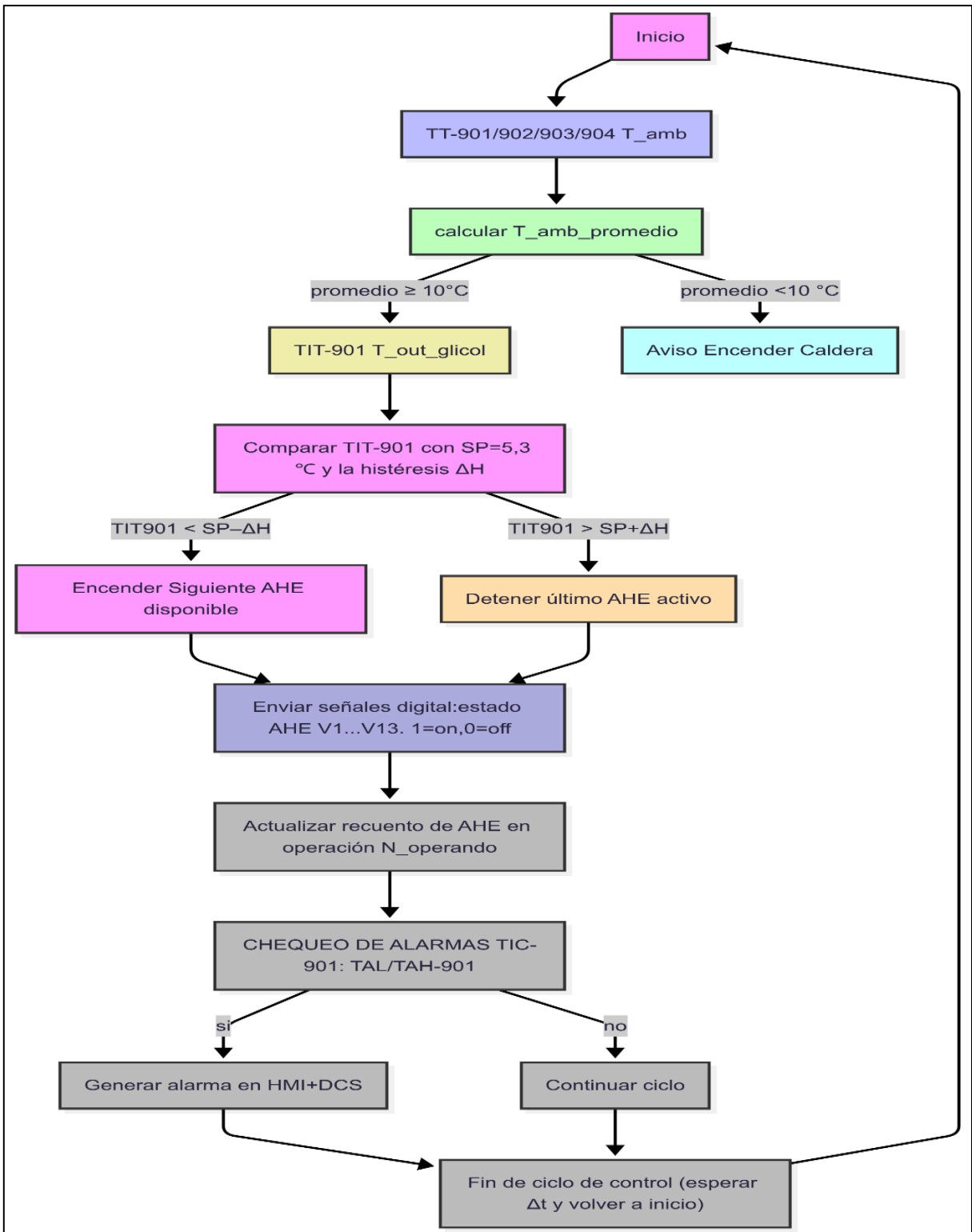
Funcionamiento

1. El sensor TIT-901 envía al PLC la lectura de temperatura del etilenglicol.
2. El controlador aplica lógica ON/OFF con histéresis:
 - Si la temperatura cae por debajo del límite inferior (p. ej. 4,3 °C), el PLC activa uno o más aerocalentadores.
 - Si supera el límite superior (p. ej. 6,3 °C), el PLC desactiva ventiladores.
3. Se incluye un retardo programable para evitar conmutaciones rápidas y proteger equipos.
4. El PLC registra eventos de encendido/apagado y genera alarmas si la temperatura se sale de rangos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-4. Lazo de control TIC-901: Control de temperatura a la salida de los aerocalentadores



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-5. Diagrama de bloques TIC-901

2.2.2.1 Estructura del programa TIC901 para el organizador del controlador

El organizador del controlador refleja una arquitectura de control modular, ideal para mantenimiento, diagnóstico y escalabilidad. A continuación, una descripción operativa de cómo interpretar esa jerarquía.

Programa_TIC901

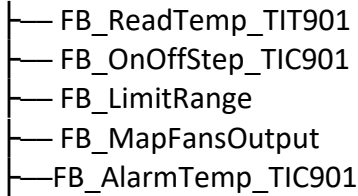


Tabla 2-3. Llamado programa TIC-901

Paso	Función / Bloque	Descripción	Observaciones
1	FB_ReadTemp_TIT901	Lectura y escalamiento de temperatura desde TIT-901	Convierte valor raw a °C (o unidad física)
2	FB_OnOffStep_TIC901	Cálculo del nuevo conteo de ventiladores ON con lógica ON/OFF	SP=5,3 °C, Hyst=0,3 °C, MaxCount=13
3	FB_LimitRange	Limitación del conteo bruto de ventiladores al rango 0–13	Evita valores fuera de límites
4	FB_MapFansOutput	Mapea el conteo de ventiladores a salidas digitales (BOOL[1..13])	Prepara array AHE_Enable para cada fan
5	FB_AlarmTemp_TIC901	Genera alarmas de temperatura según SP y histéresis	AlarmLow, AlarmHigh, AlarmActive
6		Guardar FansOnCount en PrevFansCount para siguiente ciclo	Preserva estado entre iteraciones

Fuente: Elaboración propia.

Ventajas de la lógica modular:

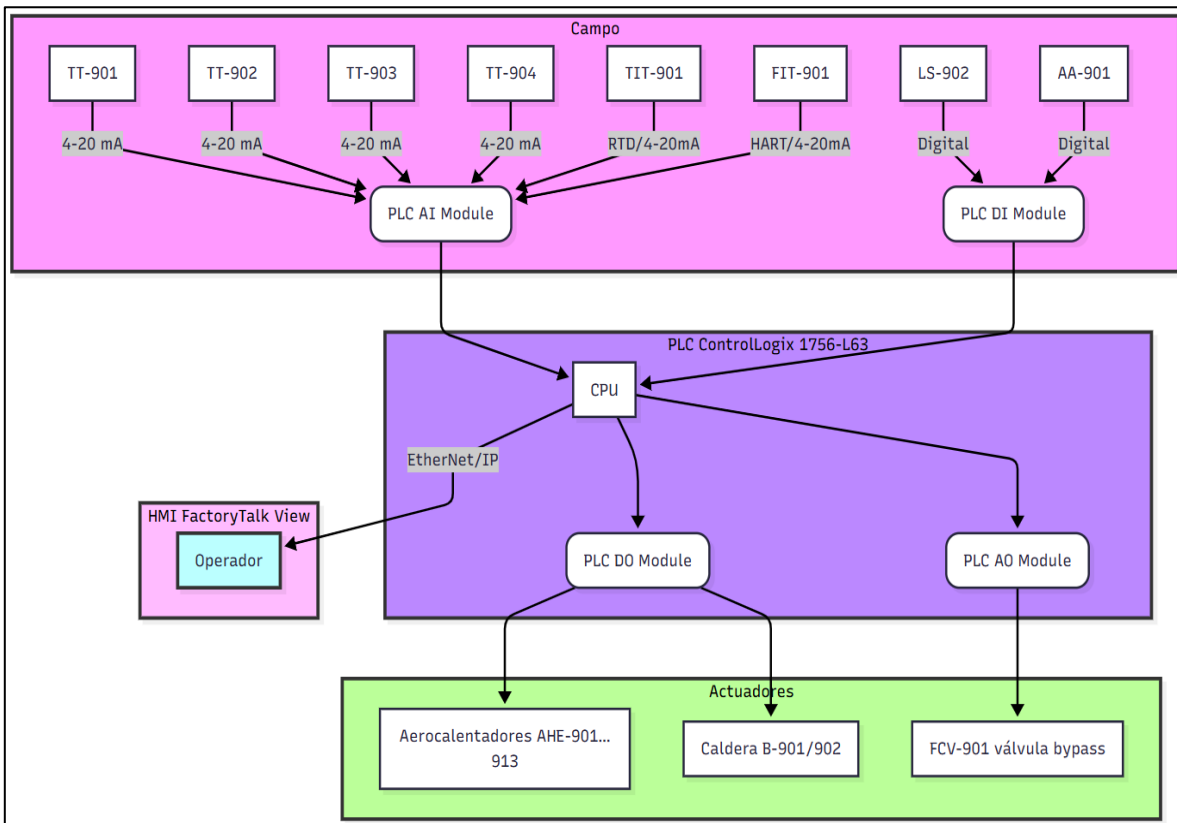
- Reutilizable: Cada bloque funcional puede aplicarse en otros proyectos con mínimas modificaciones.
- Testeo unitario: Permite validar individualmente cada FB sin alterar el resto del sistema.
- Mantenimiento ágil: Facilita ajustes y correcciones sin romper lógica global.
- Escalabilidad: Ideal para futuras versiones con más ventiladores, sensores, o algoritmos PID más refinados

2.3 SEÑALES DE PROCESO Y ALARMAS ADICIONALES.

2.2.3 Arquitectura del sistema de control

La integración de los lazos FIC-901 y TIC-901 se realiza mediante un PLC, que recibe las señales de campo y gobierna los actuadores de la planta. La disposición de sensores, módulos de entrada/salida, controlador y actuadores se observa en la Figura 2-6. Arquitectura del sistema de control con PLC ControlLogix 1756-L63, donde se representa la estructura general del sistema de automatización.

En esta figura se distinguen claramente tres niveles: Campo, conformado por los instrumentos de medición (TT-901 a TT-904, TIT-901, FIT-901, LS-902 y AA-901), que entregan señales analógicas y digitales al PLC. PLC ControlLogix 1756-L63, compuesto por la CPU y los módulos de entrada/salida analógicos y digitales, que procesan las señales y ejecutan la lógica de control. Actuadores, aerocalentadores AHE-901 a AHE-913, calderas B-901/902 y la válvula de bypass FCV-901, que reciben las órdenes del PLC para regular el proceso. HMI FactoryTalk View, interfaz de operador que permite supervisar variables en tiempo real, confirmar alarmas y modificar setpoints autorizados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-6. Arquitectura del sistema de control con PLC

2.3.1 Transmisores de la temperatura del aire (TT-901, TT-902, TT-903 y TT-904)

Cuatro (4) transmisores de temperatura se utilizan para generar un valor promedio de la temperatura del aire que entra a los aerocalentadores. El sistema de lógica utiliza estos valores para generar un valor promedio de temperatura del aire, el cual se usa para determinar cuándo se deben encender las calderas del sistema auxiliar esto es cuando la temperatura sea menor a 10° C, además, permite identificar la existencia de recirculación de aire en el sistema.

2.3.2 Interruptores de nivel etilenglicol (LS-901, LS-902)

Dos interruptores de nivel en el estanque VE-902, generan señales, las cuales indican niveles de alarma cuando el fluido está en un nivel alto o bajo según corresponda.

2.3.3 Alarma de flujo alto o bajo (FIC-901) en el sistema principal de etilenglicol

El lazo de control de flujo tiene dos alarmas (FAL-901 & FAH-901) que alertan al operador y el sistema de control cuando la circulación principal de etilenglicol, tiene bajo o alto caudal con respecto al punto de control de flujo deseado.

2.3.4 Detector de hidrocarburos (AA-901)

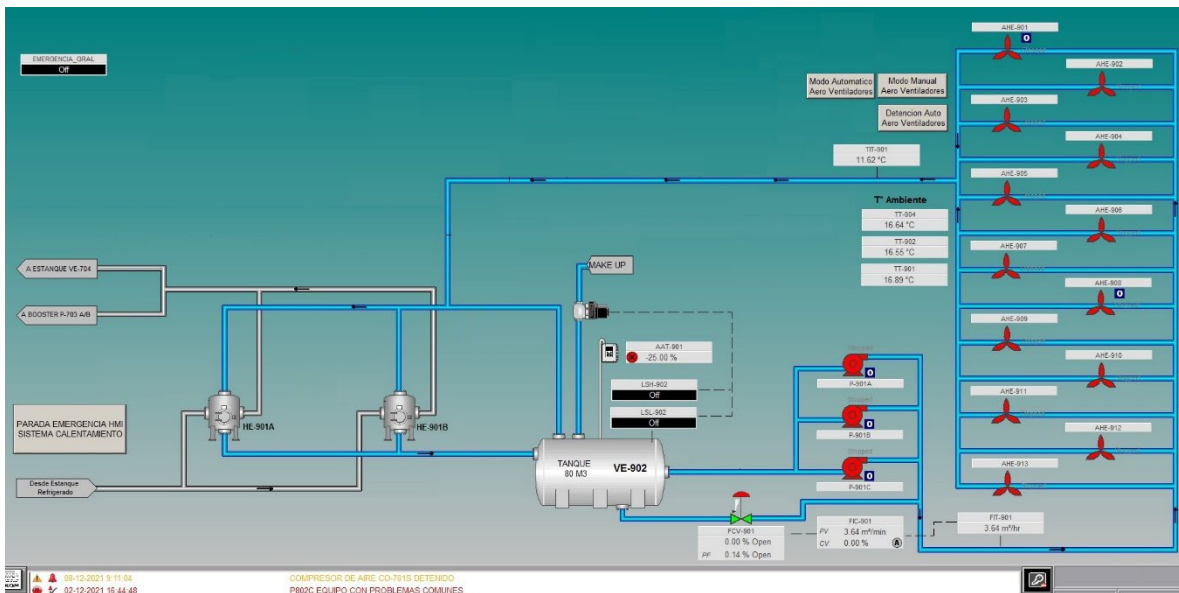
Detector de hidrocarburos – Este detector de hidrocarburo (AA-901) se usa para detectar si hay presencia de propano en el tanque (VE-902). Si se detecta propano en este tanque, esto indica que hay una fuga en el circuito frío de los intercambiadores HE-901 A y HE-0901 B. Esta alarma inmediatamente detiene el flujo del propano hacia los intercambiadores, y detiene todos los equipos que estén en funcionamiento en el sistema de calentamiento.

2.3.5 Transmisor de temperatura – Circuito de Etilenglicol

El TIT-901 indica la temperatura del etilenglicol en la salida de los aerocalentadores (AHE-901 AL 913). Esta señal se utiliza para aumentar o disminuir el número de aerocalentadores en operación.

2.3.6 HMI final

La supervisión del sistema de calentamiento se realiza mediante una interfaz HMI, representada en la Figura 2-8. En ella se visualiza el estado de los aerocalentadores AHE-901 a AHE-913, la temperatura del etilenglicol en el tanque VE-801, y las alarmas asociadas al lazo TIC-901. El operador puede seleccionar entre modo automático o manual, reiniciar el sistema, y monitorear en tiempo real el número de aerocalentadores en operación (N_operando), así como la temperatura de salida del etilenglicol (TIT-901). Esta interfaz permite una operación segura, eficiente y trazable.



Fuente: Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-7. HMI final

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN

3.1 COSTOS DE LOS EQUIPOS ELEGIDOS EN EL DISEÑO

Todos los equipos han sido elegidos con certificación ATEX/IECEX para zonas 1 y 2, garantizando protección adecuada en un entorno con LPG altamente explosivo. Las carcasas explosion-proof (Ex d/e) y materiales resistentes a la corrosión aseguran hermeticidad y durabilidad frente a vapores de hidrocarburos.

El PLC Allen-Bradley 1756-L63 junto con los módulos 1756-IF16 y 1756-IB32 ofrecen compatibilidad nativa con EtherNet/IP y Studio 5000, lo que facilita la integración, programación y escalabilidad del sistema. La red industrial basada en switches Moxa y cables apantallados cumple estrictas normativas de seguridad para áreas clasificadas, asegurando la integridad de la comunicación en todo momento.

Tabla 3-1. Tabla instrumentación

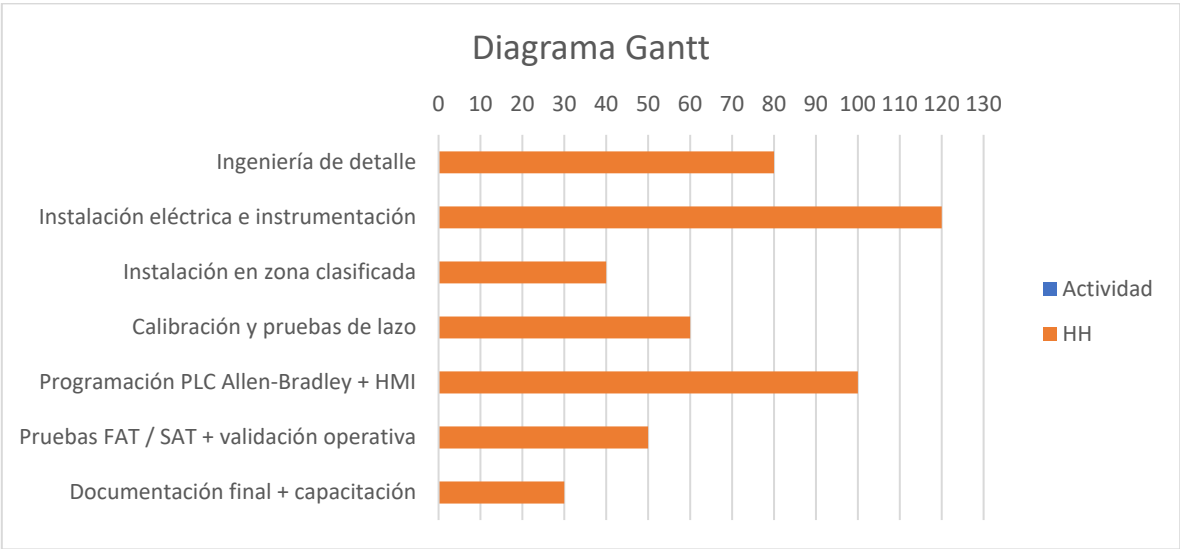
Instrumento / Equipo	Cantidad	Tipo de señal	Precio estimado (USD c/u)	Total (USD aprox.)	Observaciones técnicas
RTD PT100 (TIT-901, etc.)	6	4–20 mA / resistencia	450	2.700	Sensor tipo industrial, encapsulado
Transmisores ambiente (TT-901–904)	4	4–20 mA	550	2.200	Intemperie, ideal para lógica auxiliar
FIT-901 (flujo)	1	4–20 mA	1.200	1.200	Sensor tipo turbina, alta precisión
LS-902 (nivel)	2	Contacto seco (ON/OFF)	400	800	Flotador magnético con encapsulado
AA-901 (hidrocarburos)	1	4–20 mA + contacto alarma	1.500	1.500	Corte crítico ante fuga de propano
Válvula FCV-901	1	4–20 mA (proporcional)	4.500	4.500	Control dinámico por algoritmo de caudal
PLC Allen Bradley 1756-L63	1	CPU central	4.800	4.800	Compatible con Studio 5000 y HMI
Módulo analógico 1756-IF16	1	Señales 4–20 mA	800	800	16 canales analógicos aislados
Módulos digitales 1756-IB32	6	Entradas ON/OFF	450	2.700	32 canales por módulo, conexión directa
Red Ethernet (Moxa + cables)	1	Comunicación EtherNet/IP	480	480	Switch industrial + cables apantallados
TOTAL				21.680	

Fuente: Elaboración propia.

Costo total aproximado instrumentación: 21.680 USD (precios referenciales según mercado industrial 2024–2025).

3.2 DIAGRAMA GANTT IMPLEMENTACION SISTEMA DE CONTROL

La planificación del proyecto se representa en la Figura 3-1, mediante un diagrama Gantt que distribuye las horas hombre (HH) asignadas a cada etapa. Se incluyen actividades como ingeniería de detalle, instalación eléctrica e instrumentación, trabajos en zona clasificada, calibración de lazos, programación del PLC Allen-Bradley y HMI, pruebas FAT/SAT, y documentación final con capacitación. Este diagrama Gantt permite visualizar la carga de trabajo, identificar las etapas críticas y asegurar el cumplimiento de plazos definidos para la implementación del sistema de control automático en la planta LPG.



Fuente: Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1. Diagrama Gantt actividades del proyecto.

3.3 Costos de implementación

La tabla 3-2 presenta la distribución de horas-hombre y costos asociados según el tipo de recurso involucrado en la implementación del sistema de control. Se diferencia entre ingenieros y técnicos, para ingenieros el valor HH es de 3 UF por hora y para el técnico un valor HH de 2 UF la hora.

Tabla 3-2. Tabla por tipo de recurso

Tipo recurso	Horas-hombre	Costo (UF)
Ingenieros	360	1080
Técnicos	120	240
Total	480	1320

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3-3 detalla las principales fases del proyecto de automatización, indicando para cada actividad las horas-hombre estimadas, el valor UF/h aplicado según el tipo de recurso, el costo base en UF y el responsable de ejecución. Este desglose permite identificar las etapas del proyecto, como la programación del PLC y HMI, la instalación en zona clasificada y las pruebas FAT/SAT, que requieren mayor especialización y aseguran el cumplimiento de normativas ATEX y estándares de confiabilidad.

Tabla 3-3. Tabla implementación sistema de control

Fase / Actividad	Horas-hombre	UF/h	Costo base (UF)	Responsable
Ingeniería de detalle	80	3	240	Ingeniería de Proyectos
Instalación eléctrica e instrumentación	120	2	240	Técnicos eléctricos / instrumentistas
Instalación en zona clasificada	40	3	120	Especialistas áreas peligrosas
Calibración y pruebas de lazo	60	3	180	Ingeniero de puesta en marcha
Programación PLC Allen-Bradley + HMI	100	3	300	Automatizador / desarrollador
Pruebas FAT / SAT + validación operativa	50	3	150	Supervisor de operaciones
Documentación final + capacitación	30	3	90	Ingeniería / soporte técnico
Total base	480		1.320	

Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Resumen costo total de la inversión

La tabla 3-4 resume el costo total de la inversión del sistema de control automático en la planta LPG, tanto la adquisición de equipos como los costos de ejecución. En primer lugar, se consideran los valores base provenientes de las Tablas 3-1 (equipos) y 3-2 (implementación), expresados en pesos chilenos. Posteriormente, se adiciona un 10 % de imprevistos para cubrir posibles contingencias durante la ejecución del proyecto, y finalmente se aplica el 19 % de IVA sobre el subtotal.

En conjunto, el proyecto alcanza un costo total aproximado de \$95,7 millones CLP, lo que entrega una visión realista de la inversión necesaria para garantizar eficiencia, seguridad y cumplimiento normativo en la operación de la planta LPG.

Se consolida todo a peso chileno (CLP) usando el valor de la UF vigente en marzo 2026 (\approx \$39.800 CLP/UF) y manteniendo los equipos en USD convertidos a CLP (1 USD \approx \$950 CLP, referencia de mercado).

Tabla 3-4. Tabla resumen costo total de la inversión

Concepto	Monto Base (MM)	10% imprevistos (MM)	subtotal (MM)	19% IVA (MM)	Total Final (MM)
Equipos	20.59	2.05	22.65	4.30	26.96
Implementación	52.53	5.25	57.78	10.98	68.76
Total	73.13	7.31	80.44	15.28	95.72

Fuente: Elaboración propia

3.4 BENEFICIOS PARA LA EMPRESA

Implementar el control ON-OFF con histéresis reporta beneficios directos en:

- Ahorro energético al reducir las horas de operación de los aerocalentadores.
- Disminución de actividades y horas de mantenimiento, al bajar el desgaste por arranques/paros.
- Extensión de la vida útil de motores, variadores.

3.4.1 Estimación de ahorro energético y costos asociados

Asume:

- Potencia total de aerocalentadores: 78 motores × 7,5 kW = 585 kW.
- Operación diaria base: 6 h/día × 365 días = 2.190 h/año.
- Consumo anual base: 585 kW × 2 190 h = 1.281.150 kWh.
- Tarifa industrial promedio: 150 CLP/kWh.
- Costos de mantenimiento: 30.000 CLP/h técnico.
- Horas de mantenimiento anual base: 312 h (equivale a 0,14 h de mantenimiento por hora de operación).

Tabla 3-5. Tabla de sensibilización -10,-15,-25,-30% ahorro en energía

Escenario	Ahorro operación			Ahorro mantención	
	Reducción tiempo (%)	Ahorro energético (kWh/año)	Valor ahorro energía (MM/año)	Horas mantenimiento ahorradas	Valor ahorro mantención (MM/año)
Caso base	0%	0	0,00	0	0
Escenario 10 %	10%	128.115	19.22	31.2	0.94
Escenario 15 %	15%	192.173	28.83	46.8	1.40
Escenario 20 %	20%	256.230	38.43	62.4	1.87
Escenario 25 %	25%	320.288	48.04	78	2.34
Escenario 30 %	30%	384.345	57.65	93.6	2.81

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detallan las fuentes empleadas para cada uno de los datos y supuestos utilizados en la estimación de beneficios:

- Potencia nominal de los aerocalentadores (78 motores × 7,5 kW):
Ficha técnica SRD 6B-12S de Alfa Laval, sección “Motor data” (2024), y manual de operación Planta LPG Oxiquim Quintero (2023).
- Horas de operación diarias y anuales de los aerocalentadores (6 h/día → 2 190 h/año):
Registro de operación diaria del sistema de calentamiento, Informe de Turnos – Área de Operaciones Planta LPG Quintero (2023).

- Tarifa eléctrica industrial promedio (150 CLP/kWh):
Comisión Nacional de Energía (CNE), “Informe Tarifario Sector Eléctrico Chile 2023”, tabla de tarifas medias sector industrial.
- Costos de mantenimiento (30 000 CLP/h técnico; 0,14 h de mantenimiento por h de operación):
Plan de Mantenimiento Preventivo Oxiquim Quintero 2023, “Estimación de horas de mantenimiento y tarifas de servicios”.
- Relación entre tiempo de funcionamiento y reducción de consumo (10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %):
Cálculo interno de ingeniería de procesos, basado en simulaciones de lazo ON-OFF con histéresis y datos históricos de consumo de arocalentadores (2023)

3.4.2 Propuesta de flujo de caja para el proyecto de control ON–OFF con histéresis

A continuación, se presenta un flujo de caja proyectado a 5 años, tomando como escenario intermedio una reducción del 20 % en tiempo de operación de arocalentadores. Se incluyen las principales variables e indicadores financieros:

3.4.2.1. Supuestos clave:

- Moneda: CLP (pesos chilenos).
- Inversión inicial: Total instrumentación (21.680 USD) + total implementación (1320 UF) = 95.73 MM (costo total con IVA + imprevistos).
- Tasa de cambio asumida: 1 USD = 900 CLP.
- Valor UF marzo 2026 = 39800 CLP
- Ahorro anual (20 %):
 - Energía: $256\,230 \text{ kWh} \times 150 \text{ CLP/kWh} = 38.434.500 \text{ CLP}$
 - Mantención: $62,4 \text{ h} \times 30\,000 \text{ CLP/h} = 1.872.000 \text{ CLP}$
 - Total, ahorro anual = 40.306.500 CLP
- Horizonte de análisis: 5 años.
- No se contempla valor residual ni impuestos adicionales

Tabla 3-6. Flujo de caja

Año	0	1	2	3	4	5
Inversión / Costos	-95,73M					
Ahorros Energía	–	38,43M	38,43M	38,43M	38,43M	38,43M
Ahorros Mantención	–	1,87M	1,87M	1,87M	1,87M	1,87M
Kit repuestos electronicos				-8,98M		
Flujo Neto	-95,73M	40,31M	40,31M	31,33M	40,31M	40,31M
FNE ACTUAL	-95,73M	37,32M	34,56M	24,87M	29,63M	27,43M
Flujo Acumulado	-95,73M	-58,41M	-23,85M	1,02M	30,64M	58,08M
VAN	58,08M					
TIR	20%					

Fuente: Elaboración propia.

Indicadores financieros. Valor Actual Neto (VAN) (*suponiendo tasa de descuento 8 %*): VAN \approx 58.08M CLP. Tasa Interna de Retorno (TIR): TIR \approx 20 %.

Se agrega ítem de reemplazo kit de repuestos electrónicos: FCV-901(4.500), FIT-901(1.200), TIT-901 (450), TT-901...904 (550), AA-901 (1 500), Módulo analógico (800), Módulo digital (450); total:9.450 USD. Cada 36 meses

3.4.3 Sensibilización tabla y gráfico

La sensibilización evalúa cómo varía el valor actual neto (VAN) del proyecto ante cambios en la tasa de descuento. Esto permite analizar la robustez financiera de la inversión considerando distintas percepciones de riesgo o costo de capital.

La tabla de sensibilización muestra el VAN calculado a diversas tasas de descuento desde 0 % hasta 50 %. A medida que la tasa aumenta, el valor presente de los flujos futuros disminuye, reduciendo el VAN.

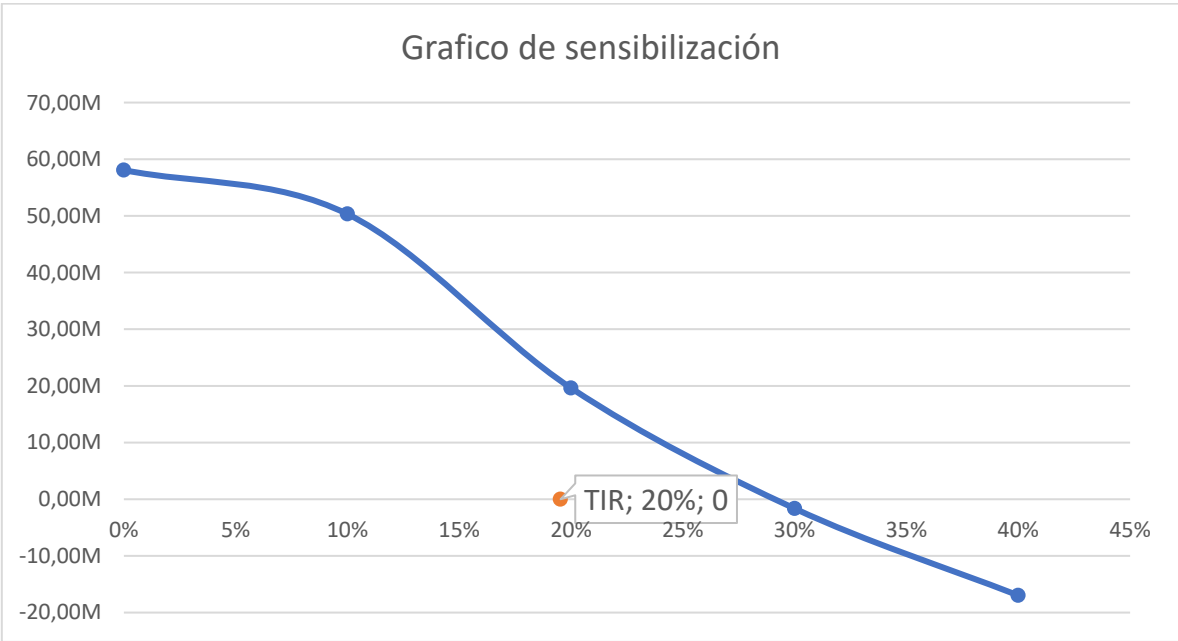
La Figura 3-2 muestra la curva de sensibilización del Valor Actual Neto (VAN) frente a variaciones en la tasa de descuento. Se observa que el VAN parte en valores positivos elevados a tasa 0 % y disminuye progresivamente hasta volverse negativo cuando la tasa supera el 20 %, punto que corresponde a la Tasa Interna de Retorno (TIR). Este comportamiento confirma que, con un costo de capital estimado en 8 %, el proyecto es altamente rentable; sin embargo, si la tasa de descuento se incrementa más allá de la TIR,

el VAN se torna negativo, indicando que la inversión deja de ser atractiva. El gráfico permite visualizar la robustez financiera del proyecto y la sensibilidad de su rentabilidad ante distintas percepciones de riesgo.

Tabla 3-7. Sensibilización

TASA DE DESCUENTO	0%	10%	20%	30%	40%	50%
VAN	58.08	50.32	19.62	-1.65	-16.97	-28.39

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-2. Gráfico de sensibilización

Las especificaciones se encuentran en la carpeta Técnica, incluida en el Anexo A, la cual respalda el diseño y la implementación del sistema de control.”

3.5 Conclusiones

El proyecto desarrollado demuestra que permite automatizar de manera confiable el proceso de calentamiento del LPG, manteniendo la temperatura de salida dentro del rango requerido sin necesidad de intervención manual y reduciendo significativamente la carga operativa. La lógica de histéresis aplicada al lazo de control evita conmutaciones rápidas en los aerocalentadores, lo que prolonga la vida útil de motores y válvulas y minimiza el desgaste asociado a los ciclos de arranque y paro.

La solución propuesta cumple con las normativas para operación en zonas clasificadas, mejora la seguridad al reducir las emisiones fugitivas de LPG y mitiga riesgos de sobrepresión en el gaseoducto, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y responsabilidad social corporativa de Oxiquim S.A. Además, la arquitectura basada en PLC ControlLogix asegura escalabilidad para futuras ampliaciones o integraciones con sistemas SCADA, consolidando una plataforma robusta y adaptable para la operación de la planta.

Desde el punto de vista económico, el análisis realizado arroja un Valor Actual Neto positivo y una Tasa Interna de Retorno superior al 20 %, con un período de recuperación de la inversión estimado en menos de tres años. El ahorro energético proyectado supera el 20 % anual, lo que se traduce en reducciones sustanciales de la factura eléctrica y de los costos de mantenimiento.

En síntesis, el proyecto logra automatizar de manera eficiente el sistema de calentamiento de LPG, generando beneficios técnicos, económicos, ambientales y de seguridad, y posicionando a la planta en un estándar superior de eficiencia y sostenibilidad.

6. Anexos

Anexo A. Carpeta técnica del proyecto

1. Sensores de temperatura (RTD, PT100, ATEX)

- Fichas técnicas de sondas PT100 con certificación ATEX
- Curvas de calibración según IEC 60751
- Tipos de conexión: 2, 3 y 4 hilos
- Materiales de vaina y cabezales (acero inoxidable, aluminio fundido)
- Ejemplos: [Sensor RTD PT100 – TC S.A.](#), [Catálogo ATEX – TC](#), [TR65 Endress+Hauser](#)

2. Transmisores de temperatura ATEX

- Modelos con salida 4–20 mA y protocolo HART
- Certificaciones ATEX/IECEX
- Ejemplos: [TTF300 ABB](#), [OTMT84 PROFIBUS PA – Comind](#)

3. Transmisores de flujo ATEX

- Tipos: ultrasónicos, radar, presión diferencial
- Protocolos: HART, Modbus, PROFIBUS
- Ejemplos: [XNX Honeywell](#), [Rosemount 3051 – Emerson](#)

4. Válvulas de control ATEX

- Tipos: bola, mariposa, asiento simple/doble
- Cabezal de control C-TOP con certificación ATEX
- Ejemplos: [INOXPA válvulas y accesorios](#), [Cabezal C-TOP B – INOXPA](#)

5. Detectores de hidrocarburos ATEX

- Tipos: catalíticos, infrarrojos, electroquímicos
- Aplicaciones: LPG, metano, gasolina, H₂
- Ejemplos: [Detector N-DSA – ASEC](#), [FGD10A – PST](#)

6. Interruptores de nivel ATEX

- Tipos: boya, flotador, visualizador externo
- Certificados para zona 1 y 2
- Ejemplos: [NIVOSTOP PR2 – Global Agua](#), [NS 25/15 AM – Bühler](#)

7. Interruptores de flujo ATEX

- Tipos: paleta, vórtice, presión diferencial
- Aplicaciones: agua, LPG, aire comprimido
- Ejemplos: [Tecfluid LT radar guiado](#), [Honeywell XNX con sensores de flujo](#)

8. PLC y módulos Allen Bradley

- CPU 1756-L63: memoria, velocidad, protocolos
- Módulos analógicos/digitales: especificaciones por canal
- Ejemplos: Ficha técnica 1756-L63 – Rockwell

9. Red Ethernet industrial ATEX

- Switches certificados para zona 1/2
- Protocolos: EtherNet/IP, Modbus TCP
- Ejemplos: Redes ATEX – Moxa, Hirschmann