

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

“IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA USANDO ALGORITMOS DE CONTROL PID PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE VAPOR EN EL ESTERILIZADOR ROTATORIO EN UNA EMPRESA ENVASADORA DE ALIMENTOS DE LIMA NORTE - 2018”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Mecatrónico

Autor:

Bach. Alfonso Cruz Ccollcca

Asesor:

Mg. Jorge Luis Contreras Cossio

Lima - Perú

2018



ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS

El asesor Ing. Jorge Luis Contreras Cossio, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera profesional de INGENIERÍA MECATRÓNICA, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la tesis de los estudiantes:

- Cruz Ccolcca Alfonso

Por cuanto, **CONSIDERA** que la tesis titulada: IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA USANDO ALGORITMOS DE CONTROL PID PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE VAPOR EN EL ESTERILIZADOR ROTATORIO EN UNA EMPRESA ENVASADORA DE ALIMENTOS DE LIMA NORTE - 2018 para aspirar al título profesional de: Ingeniero Mecatrónico por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, **AUTORIZA** al o a los interesados para su presentación.

Mg. Jorge Luis Contreras Cossio
Asesor

ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS

Los miembros del jurado evaluador asignados han procedido a realizar la evaluación de la tesis de los estudiantes: *Haga clic o pulse aquí para escribir texto*, para aspirar al título profesional con la tesis denominada: Ingeniero Mecatrónico

Luego de la revisión del trabajo, en forma y contenido, los miembros del jurado concuerdan:

Aprobación por unanimidad

Aprobación por mayoría

Calificativo:

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Bueno [14 - 13]

Desaprobado

Firman en señal de conformidad:

Dr. Néstor B. Corpus Vergara
Jurado
Presidente

Ing. Euler Deza Figueroa
Jurado
Secretario

Ing. Fernando A. Hoyos Rivas
Jurado
Vocal

DEDICATORIA

En primer lugar, agradecer a Dios por guiarme por el buen camino, a mis padres Justina y Jesús quienes en todo momento me apoyaron y creyeron en mí para la realización de esta tesis.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Privada del Norte, porque me brindó los conocimientos básicos para poder lograr uno de mis objetivos de vida, a mis profesores de la carrera de ingeniería Mecatrónica, quienes me apoyaron en la realización de esta tesis, a la empresa Intelectric por brindarme los conocimientos en automatización industrial, y por último a amigo Eduardo Reyes con quién trabaje arduamente en la implementación de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS.....	ii
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
TABLA DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xii
SUMMARY	xiii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Realidad problemática	14
1.2. Antecedentes internacionales	16
1.3. Antecedentes Nacionales	18
1.4. Formulación del problema.....	20
1.5. Objetivos.....	20
1.5.1. Objetivo general.....	20
1.5.2. Objetivos específicos	20
1.6. Hipótesis	21
1.6.1. Hipótesis general.....	21
1.6.2. Hipótesis general.....	21
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	22
2.2. Materiales, instrumentos y métodos	22
2.2.1. Materiales.....	22

2.2.2. Instrumentos.....	24
2.2.3. Métodos.....	25
2.3.1. Desarrollo de los lazos de control del sistema de recuperación de energía (HRS)....	26
2.3.2. Dimensionamiento de intercambiadores de placas	44
2.3.3. Tablero de control y fuerza del sistema de recuperación de energía	48
2.3.4. Arquitectura de control del sistema de recuperación de energía.....	61
CAPÍTULO III. RESULTADOS	62
3.1. Funcionamiento del Sistema de Recuperación de Energía.....	62
3.2. Resultados del ahorro de vapor y agua.....	67
3.2.1. Dato patrón.....	67
3.2.2. Calculo de costos generales de ahorro energético.....	67
3.3. Resultados de la implementación del sistema de recuperación de energía	70
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	72
REFERENCIAS.....	74
ANEXOS.....	77
ANTIPLAGIO	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro de temperautas de operación del esterilizador rotatorio	37
Tabla 2: Tabla de datos de formulas carga de calor	45
Tabla 3: Datos padron de consumo	46
Tabla 4: Estado de equipos en HMI del HRS.....	63
Tabla 5: Datos de costos de los recursos	67
Tabla 6: Resultaod del ahrro del consumo de vapor	68
Tabla 7: Resultados del ahorro del consumo de agua	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del esterilizador rotatorio.....	23
Figura 2. Interfaz HMI del esterilizador rotatorio.	24
Figura 3. Diagrama PI&D del sistema de recuperación de energía.....	25
Figura 4. Diagrama PI&D del lazo de control de flujo.	26
Figura 5. Diagrama de bloques del lazo de control de flujo.....	26
Figura 6. Bloque de control PID.....	28
Figura 7. Configuración parámetro de sintonía del bloque PID.....	28
Figura 8. Configuración de tipo de ecuación del bloque PID.	29
Figura 9. Ventana emergente del lazo de control PID de flujo en pantalla de operación (HMI).....	30
Figura 10. Diagrama de flujo del funcionamiento del lazo de control PID de flujo.	31
Figura 11. Ganancia térmica de condensado del tubo de esterilización.....	32
Figura 12. Gráfica de tendencia del condensado en tubo de esterilización.	34
Figura 14. Diagrama de flujo del funcionamiento de válvulas desvió de condensado del tubo de esterilización.	35
Figura 15. Control de encendido de bombas On/off en tubo de precalentamiento.	36
Figura 15. Diagrama de flujo del funcionamiento bomba 01_P_03.....	39
Figura 16. Diagrama de flujo del funcionamiento bomba 02_P_04.....	40
Figura 17. Diagrama PI&D de control de nivel en tubo de enfriamiento.	41
Figura 18. Rango de nivel de operación del tubo de enfriamiento.....	42
Figura 19. Diagrama de flujo del control de nivel del tubo de enfriamiento.	43
Figura 20. Temperaturas en intercambiadores de placas.....	44
Figura 21. Intercambiador de placas M6-FM.....	46

Figura 22: Cuadro de ahorros del sistema de recuperación de energía.	47
Figura 23: Vista interior y exterior del tablero de control y fuerza del HRS.	48
Figura 24: Esquema unifilar del tablero de control y fuerza del sistema de recuperación de energía.	50
Figura 25: Controlador lógico CompactLogix L33ER.....	52
Figura 26: Interfaz de programación Studio 5000.....	53
Figura 27: Tareas principales del programa HRS en el Software Studio 5000.....	54
Figura 28: Bloque de escalamiento de la señal de temperatura TT03.....	55
Figura 29: Circuito de conexionado de salidas analógicas en CompactLogix.....	56
Figura 30: Escalamiento de la salida analógica.....	57
Figura 31: Pantalla de operación (HMI) panel view 1000.	57
Figura 32: Fuente de alimentación 24VDC y Switch Ethernet IP.....	58
Figura 33: Borneras de interconexión, relés de interfaz.....	59
Figura 34. Arrancadores Tesys U con esquema de conexión.....	60
Figura 35. Esquema de conexión del arrancador Tesys U	60
Figura 36: Arquitectura de control del sistema de recuperación de energía.	61
Figura 37. Sistema de recuperación de energía en funcionamiento.	62
Figura 38. Indicador de temperatura de agua del HRS.....	63
Figura 39. Indicador de temperaturas en zonas de tubo de precalentamiento.....	64
Figura 40. Consumo de vapor con el sistema de recuperación de energía apagado.....	65
Figura 41. Consumo de vapor con el sistema de recuperación de energía encendido.	65
Figura 42. Funcionamiento del esterilizador rotatorio con el sistema HRS.....	66
Figura 43. Intercambiadores de placas del HRS instalados.....	70
Figura 44. Válvula de control Salida de agua en Tubo de Enfriamiento.....	70

Figura 45. Válvula On/off en tubo de precalentamiento. 71

Figura 46. Bomba centrífuga de recirculación de agua en tubo de precalentamiento..... 71

RESUMEN

Este proyecto de investigación tiene como objetivo reducir el consumo de vapor en el esterilizador rotatorio en una empresa envasadora de alimentos, ya que presenta un consumo excesivo de este recurso, y a su vez toda la energía térmica que genera se pierde en el ambiente o se desecha al drenaje. Para ello se ha implementado un sistema de recuperación de energía térmica, aplicando algoritmos de control PID para reducir el consumo de vapor y recuperar la energía térmica que se pierde. Así mismo, este sistema posee un controlador de procesos CompactLogix y una pantalla operador Panel View para su operación y monitoreo, en el cual se supervisa y controla todos los equipos de instrumentación y control. Asimismo, se monitorea el consumo de vapor en un registro de tendencias para ver su comportamiento. Esta mejora, lleva a un ahorro significativo de recursos, y un ahorro monetario de la empresa envasadora de alimentos de Lima Norte.

Palabras clave: Vapor, Control, Energía, Reducción.

SUMMARY

This research project aims to reduce the consumption of steam in the rotary sterilizer in a food packaging company, since it presents an excessive consumption of this resource, and in turn all the thermal energy that is generated is lost in the environment or is discarded to the drain. To this end, a thermal energy recovery system has been implemented, applying PID control algorithms to reduce steam consumption and recover the thermal energy that is lost. Likewise, this system has a CompactLogix process controller and a Panel View operator screen for its operation and monitoring, in which all the instrumentation and control equipment is supervised and controlled. Also, steam consumption is monitored in a trend log to see its behavior. This improvement leads to a significant saving of resources and a monetary saving of the North Lima food packaging company.

Keywords: Steam, Control, Energy, Reduct

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Hoy en día el ahorro de energía se ha convertido en una de las opciones más eficaces para la optimización de los recursos en la industria, ya que el uso del agua, electricidad y combustible son las principales fuentes para la fabricación de materiales y productos. Dentro de las fuentes de energía que se usa en la industria, se encuentra el vapor, que es generado por la evaporación de agua en las salas de calderas. Para generar vapor, se necesita consumir grandes cantidades de agua y combustible como diésel o gas. El ahorro de estos recursos significa una competitividad en el mercado industrial que conlleva a una mejora en los mecanismos, motores y sistemas con la implementación de tecnologías con eficiencia energética, esto significa producir más consumiendo menos energía. Dentro de ello se encuentran los esterilizadores, estas máquinas cumplen un papel importante en la esterilización de productos alimenticios derivados de carne, leche y productos fármacos, los modelos varían desde los esterilizadores de presión rotatorio, esterilizadores atmosféricos rotatorio, y los esterilizadores hidrostáticos. El estudio de esta tesis está enfocado en el esterilizador de presión rotatorio, ya que empresas envasadoras de Lima Norte poseen en sus instalaciones para la esterilización de productos alimenticios. Estos esterilizadores rotatorios están conformados por tres cuerpos cilíndricos, las cuales son: El tubo de precalentamiento, el tubo de esterilización y por último el tubo de enfriamiento. Sin embargo, el funcionamiento de estas máquinas requiere de un control PID que se enfoca en el control de las variables de su proceso. Ciertamente varias empresas a nivel mundial han optado por implementar un sistema el cual pueda reutilizar la energía que

produce estos esterilizadores rotatorios, para generar un ciclo cerrado en el cual toda la energía que se pierde en el ambiente sea aprovechada y devuelta al propio sistema. Dentro del proceso mencionado anteriormente existen varios problemas con respecto al consumo y pérdida de vapor. El primer problema, se encuentra en el tubo de precalentamiento, donde se necesita controlar la temperatura constante en 4 zonas con diferentes valores de referencia (Set Point), siendo en esta etapa, donde el consumo de vapor es de gran proporción, ya que el 45% de su capacidad está lleno de agua y un 55% es vapor, además, el calor que se genera en este cuerpo se desperdicia en el ambiente y no se vuelve a reutilizar. El segundo problema, se encuentra en el tubo de esterilización, donde depende de un valor de referencia de temperatura para el control de esterilizado, y el 100% de su capacidad es netamente vapor, entonces, el vapor se condensa en una trampa mecánica de condensado, y es arrojado hacia el drenaje donde ya no se vuelve a reaprovechar. El tercer y último problema, se encuentra en la pérdida de agua en la torre de enfriamiento, esta se encarga de reducir la temperatura de agua de la salida del tubo de enfriamiento, ya que es bombeada a una temperatura aproximada de 65°C a 70 °C. Para reducir esta temperatura del agua, se deja caer por medio de una cascada donde una turbina de viento de gran potencia logra reducir su temperatura alrededor de 28°C, es allí, donde el agua se evapora en el ambiente en gran cantidad, y es una pérdida para el sistema de recirculación de agua potable. Observando estos 3 problemas que posee el esterilizador rotatorio, se implementará el sistema de recuperación de energía, para recuperar la energía que se pierde y reducir el consumo de vapor.

1.2. Antecedentes internacionales

Recalde (2017) en su tesis de pregrado ha denominado “Diseño y simulación de un sistema de automatización para el proceso de producción de agua estructurada” en su conclusión número 2 indica:

Para realizar un diseño de procesos industriales es importante definir los requerimientos funcionales del sistema, a través de diagramas de instrumentación y tuberías, y descripción general del proceso.

Gracias al uso de software especializado para simulación de procesos industriales automatizados, se ha logrado demostrar que el sistema funciona de acuerdo con las condiciones planteadas durante el diseño. (p. 101)

Cabe mencionar que esta referencia está enfocada en el análisis y diseño de un proceso, en la presente tesis se realizarán las simulación y cálculos correspondientes para la implementación del sistema, ya que, sin ello la implementación del proyecto tendría errores. Este procedimiento de simulación se realiza con el fin de verificar y analizar las diferentes variables que involucran el funcionamiento del proceso automatizado, tomando estas consideraciones y criterio del funcionamiento de cada equipo y analizando las variables de proceso.

Roja (2016) en su tesis de pregrado a denominado “Recuperación mejorada mediante el uso de energía geotérmica” en su conclusión numero 3 indica: “De igual forma se concluye que al circular agua por un pozo, lo suficientemente profundo para alcanzar temperaturas de yacimiento del orden de 500 [K], será calentada por el efecto de transferencia de calor dentro del pozo y el incremento de su temperatura dependerá del gasto de inyección” (p. 74).

Cabe recalcar en esta conclusión menciona el efecto de transferencia de calor, ya que este fenómeno físico se calcula en los intercambiadores de calor para la transferencia térmica de los fluidos caliente y frío. Entre el agua que sale del tubo de enfriamiento y el agua que recircula en el tubo de precalentamiento del esterilizador rotatorio. Asimismo, nos sirve para comprender las leyes de la termodinámica en intercambiadores de placas.

Mendoza (2009) en su tesis de pregrado a denominado “Propuesta de actualización del sistema de control de atemperación del sobrecalentador de un generador de vapor” en su conclusión número 5 indica:

Tomando los análisis termodinámicos realizados y tomando los modelos matemáticos de las partes del sistema de sobrecalentado de vapor y del sistema de atemperación de vapor sobrecalentado, se propuso una arquitectura de control del sistema de atemperación del sobrecalentador de vapor la cual, con ayuda de la herramienta computacional obtenida en este trabajo, se pudo simular su acción a diferentes perturbaciones planteadas en diferentes magnitudes y comportamientos, con lo cual comprobando su funcionamiento y buen desempeño. (p. 165)

En el desarrollo de esta tesis aplicaremos un software especializado para el dimensionamiento de los intercambiadores de placas, analizando las temperaturas de entra y salida de los fluidos, considerando las variables de flujo de agua y presión ejercida por las bombas.

1.3. Antecedentes Nacionales

Nicolás G. (2014) en su tesis de magister a denominado “Desarrollo de un sistema de control predictivo multivariable de un generador de vapor de tubos de agua” en una de sus conclusiones menciona:

Se estudió el comportamiento de los generadores de vapor identificando sus principales variables y describiendo apropiadamente el modelo matemático que emula su comportamiento dinámico. Se determinó que las variables más importantes a controlar son la presión de vapor en el domo superior, el porcentaje de exceso de oxígeno y el nivel de agua. (p 100)

En esta tesis es de suma importancia comprender el comportamiento del vapor en el sistema planteado, ya que gracias a ello analizaremos el comportamiento de la temperatura y la condensación que se genera en el esterilizador rotatorio, este análisis del condensado de vapor se reaprovechara para introducir al propio sistema disminuyendo el consumo de vapor en una de las zonas del tubo de precalentamiento. Se realizará una lógica de control para el funcionamiento de las válvulas que desvían este condesando.

Rojas (2016) en su tesis de magister a denominado “Diseño de controladores PID avanzado para el control robusto de una unidad de ósmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar”, en su conclusión número 1 indica: Se desarrolló una propuesta de implementación práctica del sistema de control de la planta objeto de estudio diseñado basada en la aplicación de un PLC SIMATIC S7-300, una PC y un cliente/servidor OPC (p 93).

Rojas menciona una propuesta de desarrollo de un control con PLC de la marca Siemens, para la implementación de esta tesis toda la lógica de control se desarrolla con un controlador lógico CompactLogix de la marca Allen Bradley, el cual se programará la lógica, alarmas y bloques de control avanzado para funcionamiento del sistema de recuperación de energía, ya que este controlador lógico es el cerebro de del sistema, los variables de éste , se registrarán en un servidor Scada, el cual almacenará las variables de consumo de vapor instantáneo y el consumo de agua cuando el esterilizador entre en funcionamiento .

Ugarte D. (2016) en su tesis de magister a denominado “Desarrollo de un controlador inteligente para un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar”, en su conclusión número uno indica: La propuesta de implementación del sistema de control está basada en una aplicación en PLC Allen Bradley de la familia 5000, desarrollándose una interfaz hombre máquina (HMI) para la supervisión del proceso en el software de automatización FactoryTalkView de Allen Bradley (p 88).

Ugarte implemento una aplicación basado en PLC y HMI de la marca Allen Dradley, en esta tesis se usará equipos similares, pero de una gama superior, el desarrollo de la programación y el desarrollo de la pantalla operador HMI, se realizarán en el mismo entorno o software de programación, pero con versión actualizada, esto mejorará algunos aspectos en el funcionamiento, lectura de equipos de instrumentación, actuadores como válvulas y motores del sistema de recuperación de energía.

1.4. Formulación del problema

¿De qué manera se disminuirá el consumo de vapor en el esterilizador rotatorio de una empresa envasadora de alimentos de Lima Norte – 2018?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Implementar el sistema de recuperación de energía usando algoritmos de control PID para disminuir el consumo de vapor en el esterilizador rotatorio en una empresa envasadora de alimentos de Lima Norte - 2018.

1.5.2. Objetivos específicos

- Desarrollar los lazos de control del plano PI&D aplicando diagrama de flujos con la finalidad de realizar la programación en el controlador lógico CompactLogix.
- Dimensionar los intercambiadores de placas usando el software CAS de Spirax Sarco con fluidos en contracorriente.
- Desarrollar la arquitectura de control del sistema de recuperación de energía.
- Desarrollar del circuito eléctrico del tablero de control y fuerza describiendo cada equipo de automatización.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

HI - La implementación del sistema de recuperación de energía usando algoritmos de control PID disminuye el consumo significativamente de vapor en el esterilizador rotatorio en una empresa envasadora de alimentos de Lima Norte – 2018.

HO - La implementación del sistema de recuperación de energía usando algoritmos de control PID no disminuye significativamente el consumo significativo de vapor en el esterilizador rotatorio en una empresa envasadora de alimentos de Lima Norte – 2018.

1.6.2. Hipótesis general

- Al desarrollar los lazos de control del plano PI&D aplicando diagrama de flujos se realizará la programación en el controlador lógico PLC.
- Usando el software CAS de Spirax Sarco se dimensionará los intercambiadores de placas con fluidos en contracorriente.
- Al desarrollar la arquitectura de control del sistema de recuperación de energía se conocerá el tipo de topología de red al cual pertenece.
- Al desarrollar el circuito eléctrico del tablero de control y fuerza se conocerá los equipos de automatización asociados.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

Se utilizó el diseño no experimental porque, no se manipula la variable de estudio, solo se analiza mediante gráficas el consumo de vapor antes y después de la implementación del sistema de recuperación de energía.

Podría definirse como la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, se trata de estudios en los que no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables. Lo que hacemos en la investigación no experimental es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para analizarlos (*The SAGE Glossary of the Social and Behavioral Sciences, 2009b*).

En un experimento, el investigador prepara deliberadamente una situación a la que son expuestos varios casos o individuos. Esta situación consiste en recibir un tratamiento, una condición o un estímulo en determinadas circunstancias, para después evaluar los efectos de la exposición o aplicación de dicho tratamiento o tal condición. (Sampieri, Collado, & Lucio, 2006, p129)

2.2. Materiales, instrumentos y métodos

2.2.1. Materiales

Para la elaboración de esta tesis, se hizo un análisis del funcionamiento del esterilizador rotatorio, tomando en consideración todos los equipos de instrumentación y control, para encontrar los problemas que presentaba y en consecuencia se recopiló los datos del consumo de vapor y las pérdidas de energía de este. Todos estos datos se analizaron desde dos puntos, el primero desde el análisis mecánico de la propia

máquina, y segundo desde el análisis de operación. En la figura 1 y 2 se observa el funcionamiento del esterilizador, y la pantalla de operación desde donde se registran todos los datos de la máquina.

El esterilizador rotatorio está compuesto por 3 cuerpos cilíndricos con un eje rotario al centro en cada cuerpo, estos ejes rotativos están conectados a un motor mediante piñones el cual hace girar a la misma velocidad y sentido. Además de ello está compuesta por un conjunto de válvulas On/Off y válvulas proporcionales que permiten el ingreso de vapor y agua a los diferentes cuerpos. El primer cuerpo es el tubo de precalentamiento, el segundo cuerpo es el tubo de esterilización y por último el tercer cuerpo es el tubo de enfriamiento.

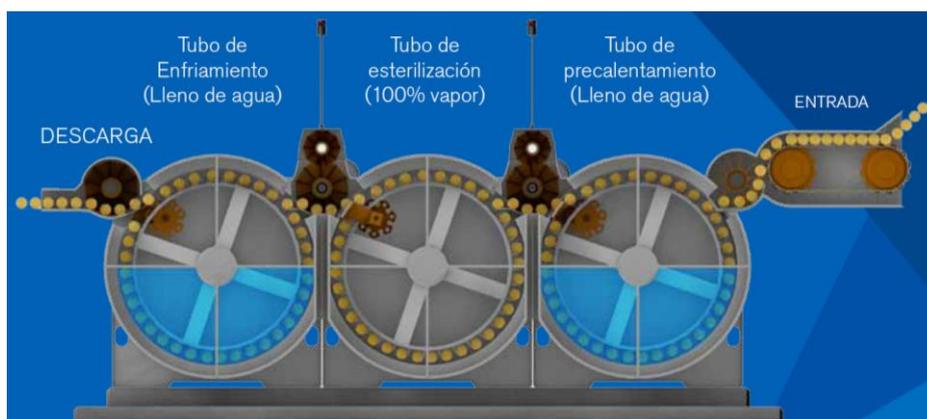


Figura 1. Etapas del esterilizador rotatorio.

Se muestra funcionamiento de los tres tubos del esterilizador rotatorio, del cual el tubo de precalentamiento y el tubo de enfriamiento son los que funcionan con un porcentaje de agua y vapor, mientras que el tubo de esterilización funciona únicamente vapor. Fuente: JBT Food (2017), Esterilizador Rotatorio Continuo a Presión. (p. 5)

La pantalla de operación muestra el estado de todos los sensores y actuadores que posee el esterilizador rotatorio, desde aquí se manipula todo el sistema, también se registra cada evento que ocurra, ya sea alarmas de máquina o atascos de latas. El consumo de vapor no se observa en esta pantalla, pero si la velocidad de producción a la cual funciona. Gracias a esta pantalla de operación se pudo observar en que etapas

medidores de caudal VL20, y 5 sensores de temperatura PT100. En la Figura 3 se muestra el diagrama PI&D del HRS.

Los cálculos matemáticos aplicados para la selección de equipos son: Carga de calor y LMTD, desarrollo del Control PID de flujo, desarrollo de los controles on/off y por último selección de equipos.

2.2.3. Métodos

Una vez realizado los cálculos, y el dimensionamiento de los equipos adecuados para el funcionamiento del sistema de recuperación de energía (HRS), se realizó el plano PI&D, para la distribución y ubicación de los equipos de instrumentación y control. Posterior a ello se procede a la implementación y puesta en marcha del HRS.

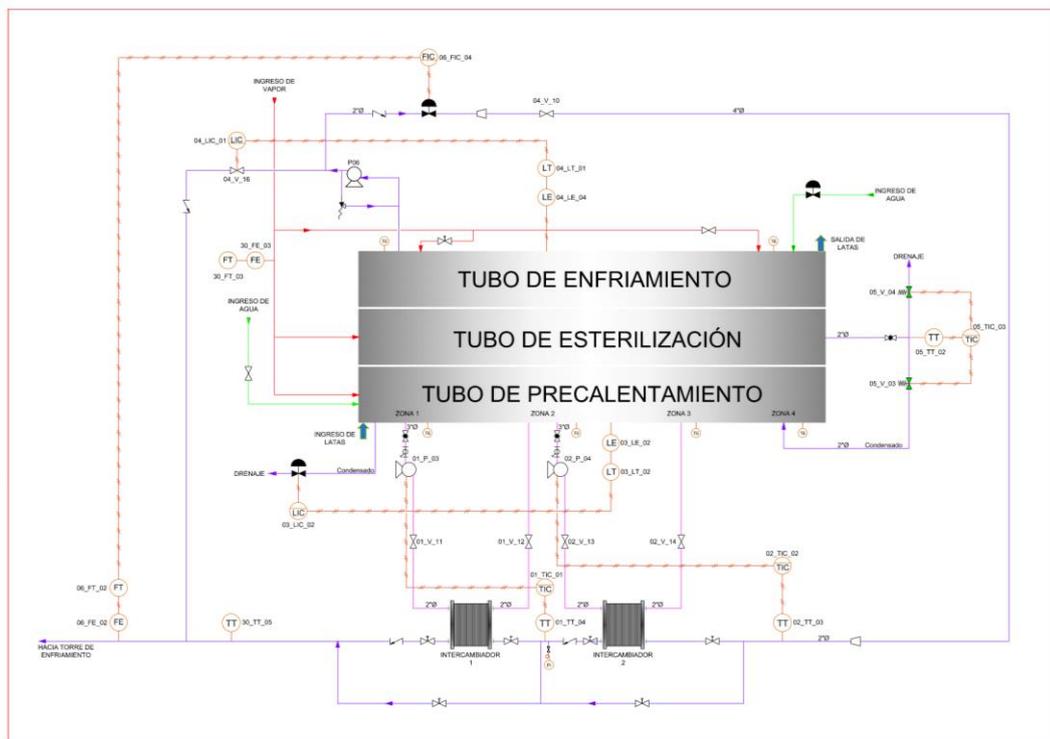


Figura 3. Diagrama PI&D general del sistema de recuperación de energía.

PI&D de las siglas en inglés (Piping and instrumentation diagram). Contiene la distribución de equipos y las conexiones de lazo de control respectivo para el funcionamiento general del sistema, cada equipo contiene una descripción o tag, y las tuberías etiquetadas con los diámetros respectivos. Para mayor detalle del plano ver el Anexo 4. Fuente: Elaboración Propia

2.3. Procedimiento

2.3.1. Desarrollo de los lazos de control del sistema de recuperación de energía (HRS)

- **Lazo de control PID de flujo salida de agua del HRS**

Para desarrollar el control PID de flujo del HRS primero analizamos el lazo de control en el diagrama PI&D y posterior a ello realizamos los diagramas de bloques.

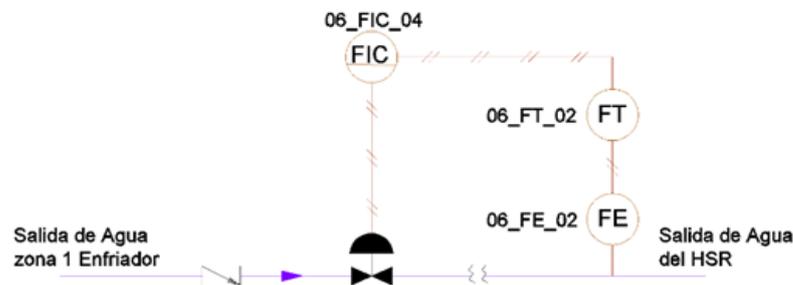


Figura 4. Diagrama PI&D del lazo de control de flujo.

Este diagrama muestra el lazo de control de flujo donde el instrumento de medición de flujo se describe con el tag FE y FT, el controlador se describe como FIC. Asu vez la descripción de los equipos agrupan el lazo de control 06. Fuente: Elaboración Propia

El diagrama representa el control PID que se programa en el controlador lógico CompactLogix, se obtiene analizando el lazo de control del plano P&ID, así mismo de la pantalla operador HMI del sistema de recuperación de energía, se realiza los objetos de control correspondientes con sus tags o denominación.

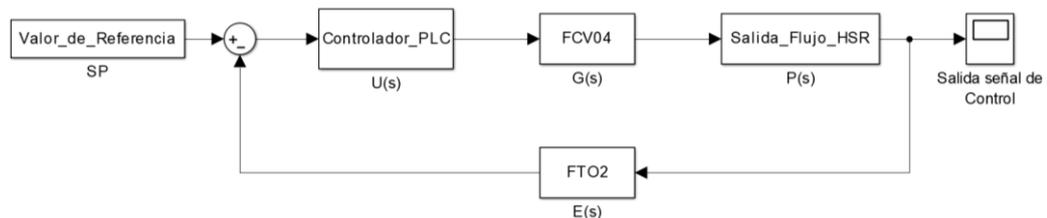


Figura 5. Diagrama de bloques del lazo de control de flujo.

El valor de referencia se encuentra en la entrada, el controlador está en serie con la válvula y la salida de flujo, el sensor es el que realimenta la señal de control y por último se muestra la señal de salida de control. Fuente: Elaboración propia

Donde la función de transferencia es:

$$Y(s) = \frac{U(s) * G(s) * P(s)}{1 + E(s)}$$

Para hablar el control de flujo nos basamos en el conocimiento de los reguladores PID partiendo del modelo general donde:

$$U(t) = K_p \left[e(t) - \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right]$$

Donde los tres parámetros de sintonía son K_p , T_i y T_d .

Donde K_p es la ganancia proporcional, T_i la ganancia integrativa y T_d la ganancia derivativa.

Donde el error se define como ecuación de:

$$E = SP - PV$$

Para el desarrollo del control PID de flujo del sistema de recuperación de energía se usará el bloque integrado de control PID del controlador lógico CompactLogix que se programa en el software Studio 5000, que es configurable de acuerdo con el tipo de control, y además de ello se creará un bloque Add-on dentro del programa (Bloque de función) para la optimización de esta herramienta.

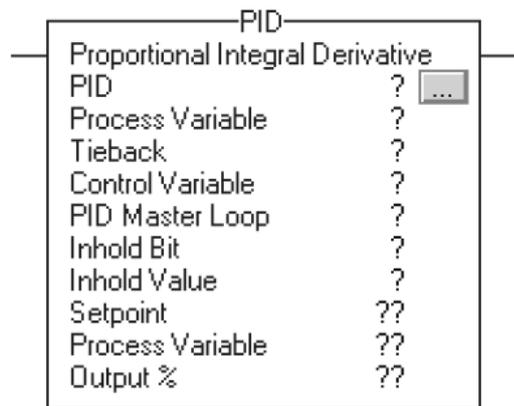


Figura 6. Bloque de control PID.

Contiene el algoritmo de control PID, que es configurable desde el software de programación, pero en este proyecto se creó una ventana emergente desde el panel operador para su configuración sin necesidad de ingresar al programa fuente en el lenguaje ladder. Fuente: Rockwell Automation (2008), Instrucciones generales de los controladores Logix5000™ (p.497)

El primero grupo posee los siguientes parámetros de configuración que se realiza en el entorno del software RSLogix 5000.

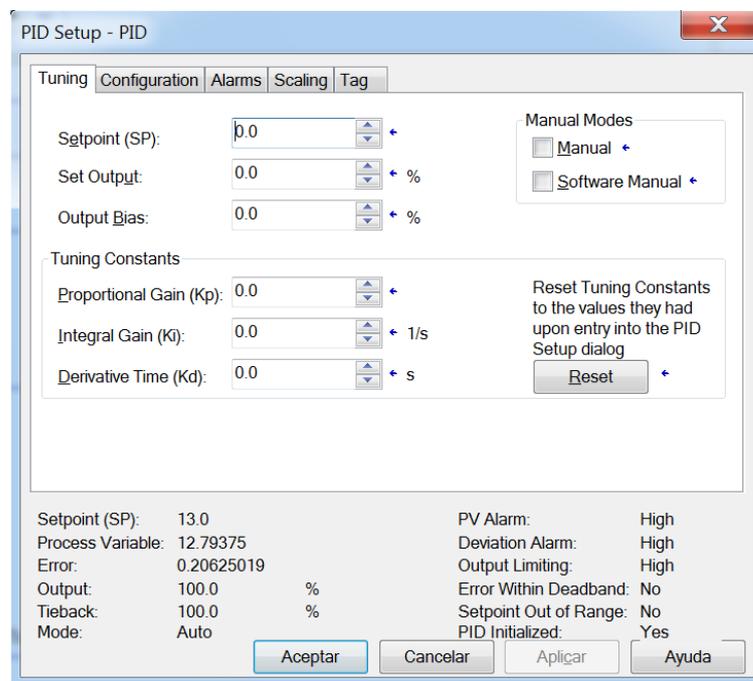


Figura 7. Configuración parámetro de sintonía del bloque PID.

Se configura la variable de referencia (SP) y las constantes de sintonía Kp, Ki, Kd. En la parte inferior del recuadro se observa los valores configurados que están siendo ejecutados en tiempo real desde el programa del PLC. Fuente: Elaboración Propia.

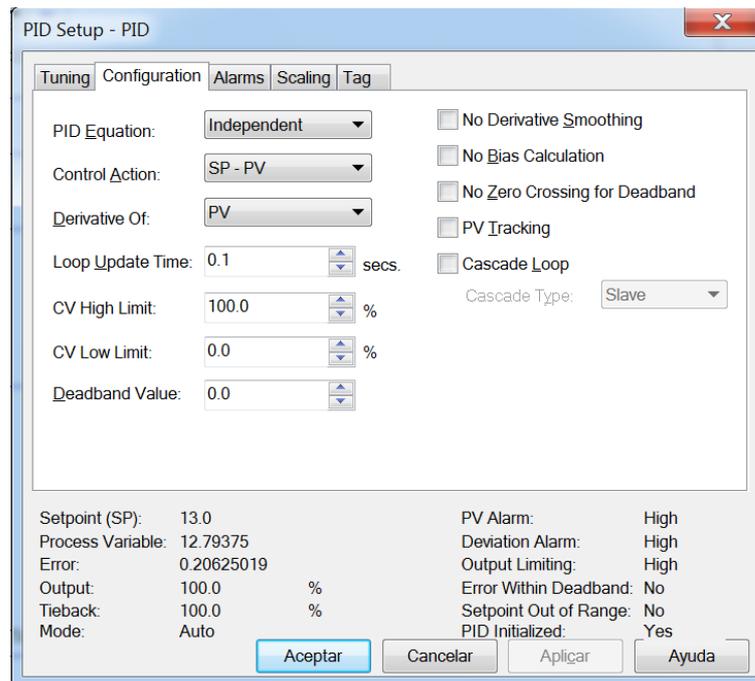


Figura 8. Configuración de tipo de ecuación del bloque PID.

Acción de control y la actualización de tiempo de repeticiones, el límite máximo y mínimo escalado para la salida de la válvula. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del bloque PID independiente se utiliza cuando las tres ganancias P, I y D funcionan independientes. Se utiliza las dependientes cuando sea deseado que la ganancia general del controlador afecta a los tres términos de ganancia P, I y D. De acuerdo con esto, se configura con el tipo de control que en el sistema se determine. Una vez configurados estos parámetros del bloque PID, se desarrolló la ventana emergente para su configuración y sintonía del lazo de control de flujo desde el panel operador HMI, con el fin de facilitar a los ingenieros y técnicos de la empresa envasadora de alimentos en la configuración del lazo de control, sin necesidad de conectarse a una computadora.

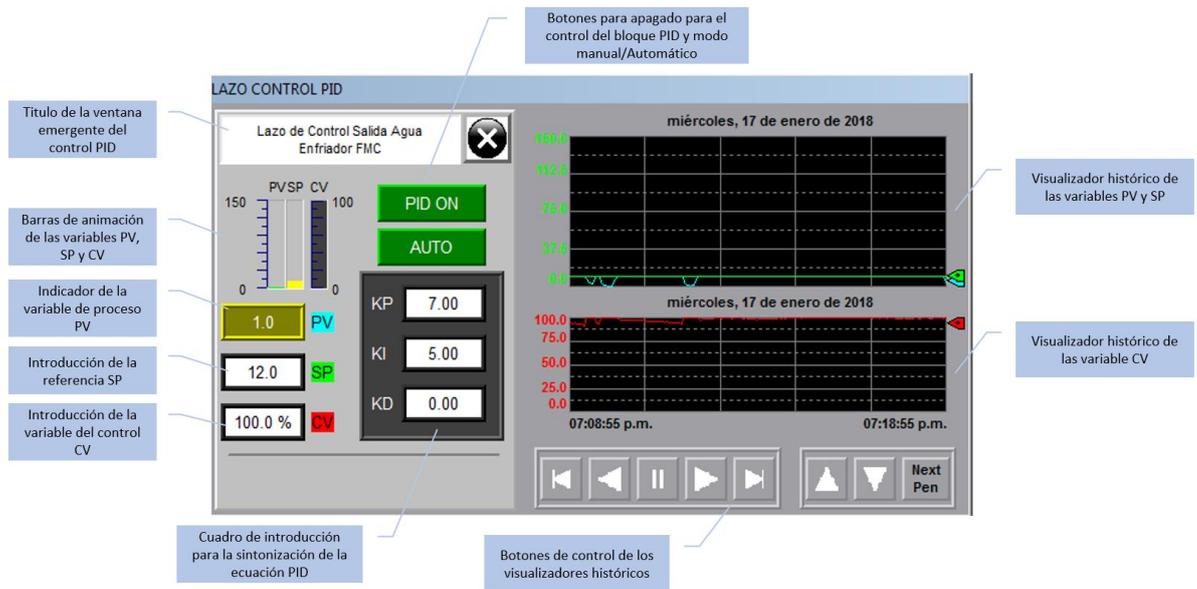


Figura 9. Ventana emergente del lazo de control PID de flujo en pantalla de operación (HMI).

La ventana emergente del lazo de control PID, posee los parámetros necesarios para la sintonización del control PID de flujo. Al lado izquierdo aparecen los variables de control, y los botones de encendido y apagado del bloque PID, además de las constantes de sintonía que son configurables. Al lado derecho de la ventana, aparece los gráficos de tendencia para visualizar la respuesta de la variable de referencia versus la variable de proceso, asimismo la variable de apertura de la válvula aparece en un gráfico independiente. Fuente: Elaboración propia.

Una vez desarrollado y configurado el bloque PID, se realiza el diagrama de flujo para la programación en el controlador lógico PLC. En la figura 10 se muestra que, una vez encendido el sistema de recuperación de energía, el control PID inicia su funcionamiento, pero mientras este no esté encendido se mantendrá pagado y con la apertura de la válvula en 0%.

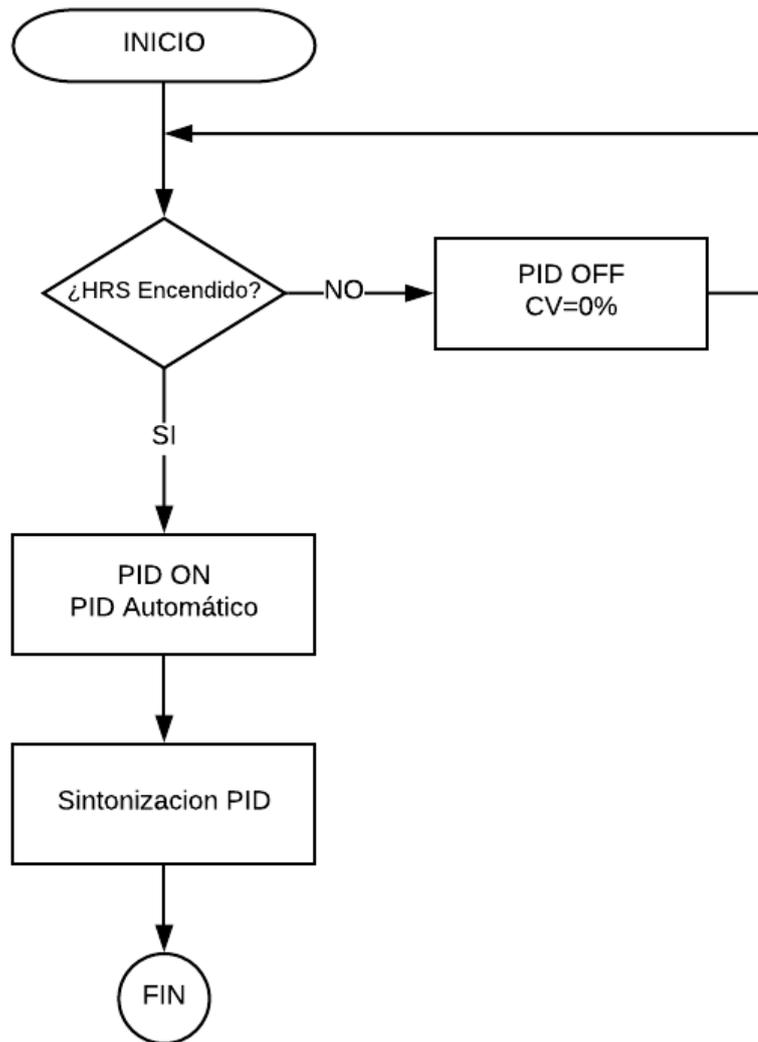


Figura 10. Diagrama de flujo del funcionamiento del lazo de control PID de flujo.

El diagrama de flujo describe el funcionamiento de la lógica del control PID que se implementa en el controlador lógico CompactLogix. La lógica inicia si únicamente el sistema de recuperación de energía (HRS) este encendido, mientras este pagado se mantendrá inactivo sin realizar ninguna acción de control sobre la válvula. Fuente: Elaboración Propia.

- **Lazo de control On/Off de ganancia térmica de condensado en tubo de esterilización**



Figura 11. Ganancia térmica de condensado del tubo de esterilización.

Corresponde al lazo de control de condensado, donde cada equipo posee una descripción de grupo lazo al cual corresponde. Las válvulas funcionan de manera alternada, cuando una se encuentra activa, la otra válvula se encuentra apagada. Fuente: Elaboración propia.

Para reducir el consumo de vapor en la zona 4 del tubo de precalentamiento, se instaló dos válvulas on/off (05_V_03 y 05_V_034) ubicadas en la salida de condensado del tubo de esterilización, con el fin de desviar el condensado hacia zona 4 del tubo de precalentamiento, siempre en cuando supere la temperatura de referencia. Para ello, existe un transmisor de temperatura (05_TT_02) que indica la temperatura de condensado en la tubería.

Para realizar el control de las válvulas, la temperatura de condensado debe superar el valor de referencia de 110°C, si este caso no ocurre, el condensado se arroja al drenaje.

Para realizar la acción de control on/off de las válvulas se determina el error donde:

$$Error = Valor\ de\ Referencia(SP) - Valor\ del\ Transmisor\ de\ Temperatura$$

Entonces si el $Error < -0.1 \rightarrow u(c) = 1$

El valor máximo se presenta como 1 digital $u(c) = 1$, donde la salida de control puede ser:

$$u(c) \begin{cases} 0 & | \text{ Cuando la temperatura de condensado esta por debajo del SP.} \\ 1 & | \text{ Cuando la temperatura de condensado esta por encima del SP.} \end{cases}$$

De esta manera hacemos que la válvula se accione cada vez que la temperatura se encuentre por encima del valor de referencia. Este resultado el controlador lógico CompactLogix lo convierte en una señal de salida de tipo voltaje.

$$Salida\ en\ el\ controlador\ lógico \begin{cases} 0 = 0VDC \\ 1 = 24VDC \end{cases}$$

La temperatura es una de las variables que se comporta de manera exponencial, incrementando o disminuyendo de forma oscilatoria, por ello para realizar el control de las válvulas se colocó un tiempo de estabilización con respecto a la señal del transmisor de temperatura. La comparación se realiza cada vez que la señal del transmisor de temperatura (PV) supera el valor de referencia (SP) o cuando el error es -0.1 . Entonces la salida de control en el controlador lógico CompactLogix está representada de la siguiente manera.

$$U(c) = u(c) * Te$$

Donde:

$$U(c) = Salida\ Digital\ del\ Controlador\ Logico\ PLC$$

$$Te = Tiempo\ de\ estabilización, 5s$$

desvió de condensado en el tubo de esterilización, considerando las descripciones de los equipos del plano PI&D.

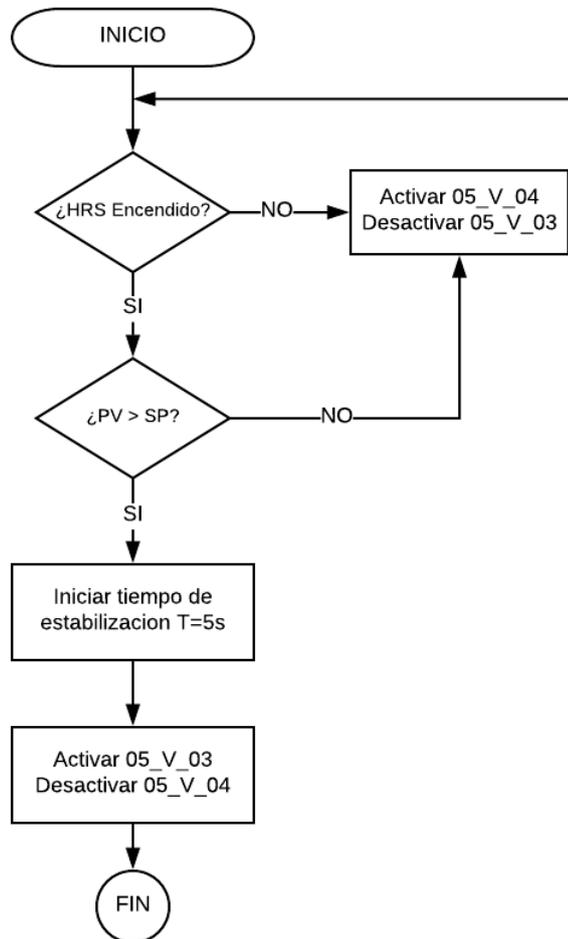


Figura 13. Diagrama de flujo del funcionamiento de válvulas desvió de condensado del tubo de esterilización.

PV es la temperatura de condensado. SP es el valor de referencia (Set Point) 110°C. 05_V_04 es la válvula de desvió condensado a zona 4 tubo de precalentamiento. 05_V_03 es la válvula de desvió condensado a drenaje. El funcionamiento de las válvulas de condensado se consideró un tiempo de estabilización para su apertura y cierre de acuerdo con la estabilización de la temperatura. Fuente: Elaboración propia.

- **Desarrollo del control de encendido de bombas on/off en tubo de precalentamiento**

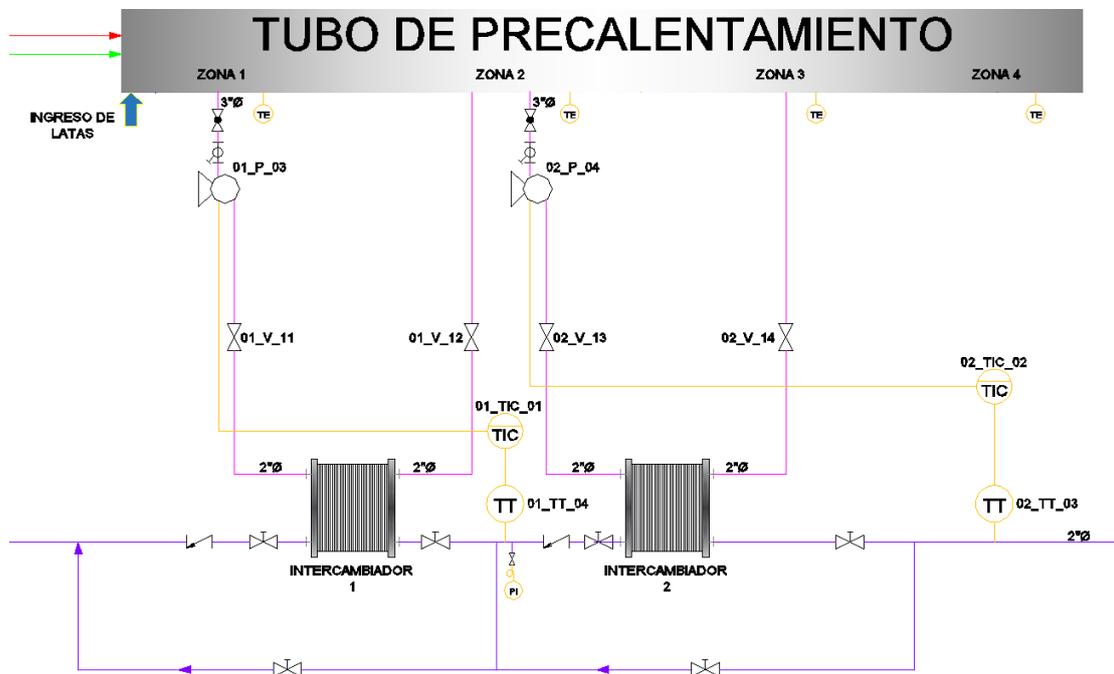


Figura 14. Control de encendido de bombas On/off en tubo de precalentamiento.

La figura es un corte del plano PI&D que se realizó para un análisis del control On/Off de las bombas. Cada equipo está con una descripción que corresponde al grupo de lazo en el cual se encuentran. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de recuperación de energía obtiene mejores resultados en la reducción de consumo de vapor gracias al funcionamiento de las bombas (01_P_03 y 02_P_04), que recirculan el agua del tubo de precalentamiento por los intercambiadores 1 y 2, generando la transferencia térmica con el agua caliente que sale del tubo de enfriamiento. Para ello, se analiza las temperaturas del tubo de precalentamiento y el tubo de enfriamiento en cada zona de operación.

Considerando este análisis, se calcula las temperaturas en el intercambiador de placas y posterior a ello se procede al dimensionamiento y selección.

Para obtener mejor ganancia térmica, los flujos circulan en contracorriente por los intercambiadores de placas. A continuación, se detallan las temperaturas de

operación de las 4 zonas del tubo de precalentamiento y la zona 1 del tubo de enfriamiento.

Tabla 1

Cuadro de temperaturas de operación del esterilizador rotatorio

Zonas del Esterilizador Rotatorio	Temperatura de operación
Zona 1 Tubo de Precalentamiento	40 °C
Zona 2 Tubo de Precalentamiento	60 °C
Zona 3 Tubo de Precalentamiento	80 °C
Zona 4 Tubo de Precalentamiento	98 °C
Zona 1 Tubo de Enfriamiento	80 °C

Las temperaturas de la tabla 1 fueron sacadas del registro de control de proceso que manejan los operarios en la empresa envasadora de alimentos ya que con estos datos cumplen en el control de calidad del esterilizado de sus productos. Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento de la bomba 01_P_03, es sacar agua de la zona 1 del tubo de precalentamiento a una temperatura de 40°C, y enviarlo al intercambiador 1 donde allí se genera la transferencia térmica con el agua que sale intercambiador 2, a una temperatura de 68°C, esta agua ingresa a la zona 2 del Tubo de Precalentamiento a una temperatura de 52°C.

La bomba 01_P_03 funcionará cada vez que la temperatura de la zona 1 del tubo de precalentamiento se encuentre por debajo del valor de la temperatura de agua que circula entre los intercambiadores 1 y 2, y esto se sabe por la medición de transmisor de temperatura 01_TT_04 y el transmisor de temperatura ubicado en la zona 1 del tubo de precalentamiento.

La bomba 02_P_04 realiza la misma función, sacando agua de la zona 2 a una temperatura de 68°C, y envía al intercambiador 2 para realizar la transferencia térmica

con el agua que sale del tubo de enfriamiento a 80°C, y termina en la zona 3 del tubo de precalentamiento.

La Bomba 02_P_04 funcionará cada vez que la temperatura de la zona 2 del tubo de precalentamiento este entre 2°C por debajo del valor de la temperatura de agua que ingresa al intercambiador 2 esto se sabe al transmisor de temperatura 02_TT_03 y el transmisor de temperatura ubicado en la zona 2 del tubo de precalentamiento.

Las bombas 01_P_3 y 02_P_04 funcionarán únicamente cuando se detecte flujo por los intercambiadores y esto se sabe por el transmisor de flujo instalado a la salida del sistema de recuperación de energía (HRS).

La operación es igual para las dos bombas, por lo tanto, matemáticamente:

$$\text{El } Error = TZP - THSR$$

Donde:

TZP = Temperatura en zona de tubo de precalentamiento.

$THSR$ = Temperatura en tubería de sistema de recuperación de energía.

Entonces si el $Error < -0.1 \rightarrow p(c) = 1$

Aplicamos el tiempo de estabilización de la señal de salida en el controlador lógico CompactLogix convirtiendo la salida de control en:

$$P(c) = p(c) * T$$

Donde T es el tiempo de estabilización en 5 segundos.

Una vez desarrollado el funcionamiento de las bombas se procede a realizar el diagrama de flujo para la programación en el controlador lógico CompactLogix del control de las bombas 01_P_03 y 02_P_04.

Diagrama de flujo del funcionamiento bomba 01_P_03.

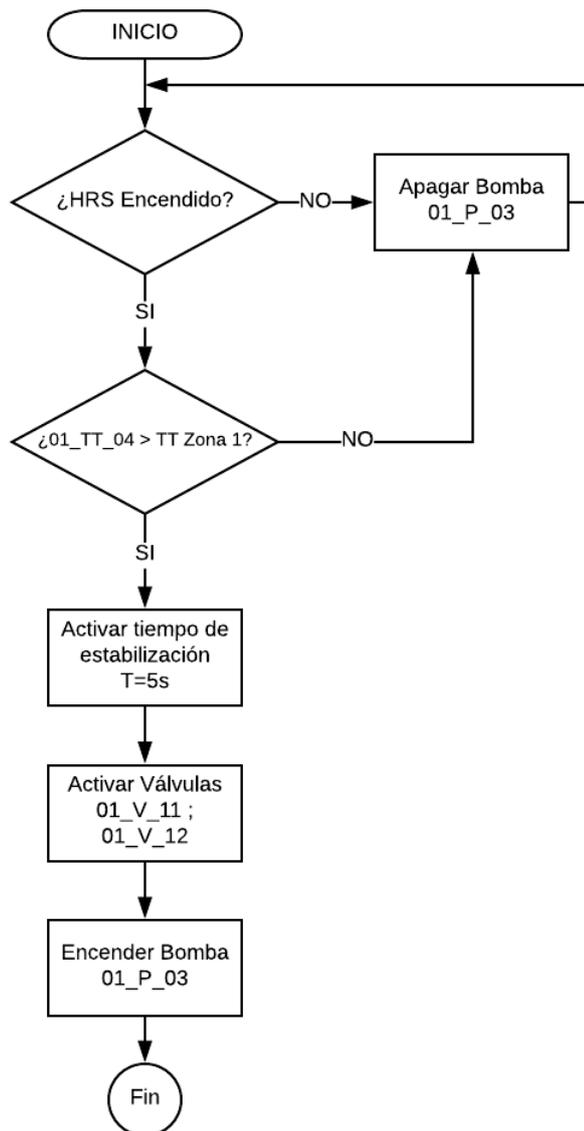


Figura 15. Diagrama de flujo del funcionamiento bomba 01_P_03.

01_TT_04 es el transmisor de temperatura entre los intercambiadores 1 y 2. TT zona 1 es el transmisor de temperatura en tubo de precalentamiento zona 1. 01_P_03 es la bomba de recirculación de agua en zona 1 del tubo de precalentamiento. 01_V_11 y 01_V_12 son las válvulas de seguridad para la recirculación de agua por el intercambiador 1. Fuente: Elaboración propia.

Diagrama de flujo del funcionamiento bomba 02_P_04.

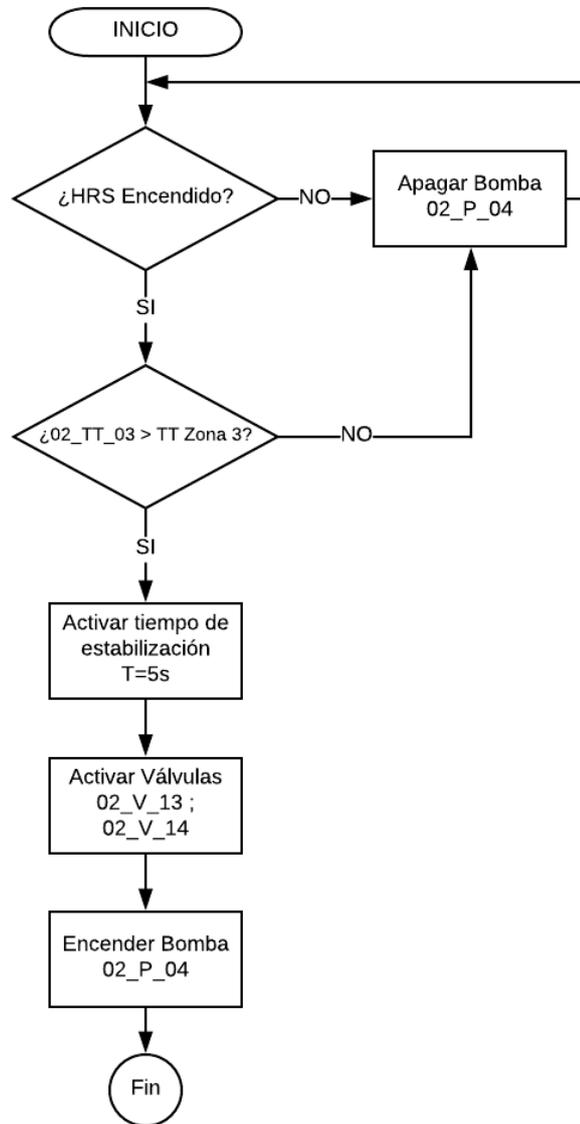


Figura 16. Diagrama de flujo del funcionamiento bomba 02_P_04.

02_TT_03 es el transmisor de temperatura en la entrada del intercambiador 2. TT zona 2 es el transmisor de temperatura en tubo de precalentamiento zona 2. 02_P_04 es la bomba de recirculación de agua en zona 2 del tubo de precalentamiento. 02_V_13 y 02_V_14 son las válvulas de seguridad para la recirculación de agua por el intercambiador 2. Fuente: Elaboración propia.

- **Desarrollo del control de nivel On/Off del tubo de enfriamiento**

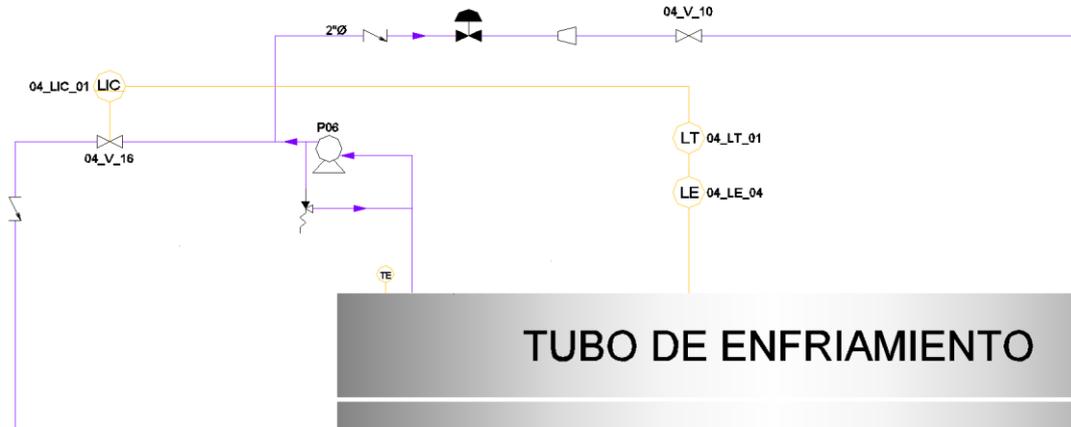


Figura 17. Diagrama PI&D de control de nivel en tubo de enfriamiento.

Los equipos asociados al lazo de control de nivel son, la válvula Nota: Elaboración Propia.

El tubo de enfriamiento posee un control de nivel on/off propio del esterilizador rotatorio, pero cuando entra en funcionamiento con el sistema de recuperación de energía cambia a una lógica que depende de dos condiciones para realizar el control de nivel.

La primera condición, es que la bomba que saca el agua del tubo de enfriamiento hacia los intercambiadores tiene que mantener constante el flujo ya que, si esta bomba no funciona, la transferencia térmica en los intercambiadores no funciona.

El segundo caso, es el control de nivel que se realiza considerando el porcentaje de agua permitida en el tubo de enfriamiento, y esto se delimita con los rangos mínimo y máximo de operación, que es proporcionado por los operadores del esterilizador rotatorio. Para ello determinamos los niveles de operación en el tubo de enfriamiento.

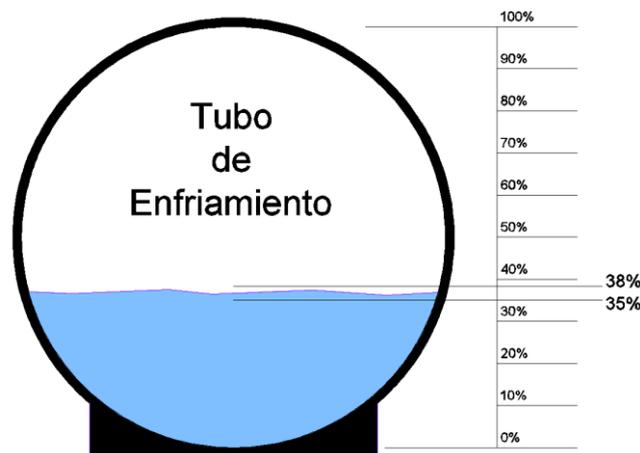


Figura 18. Rango de nivel de operación del tubo de enfriamiento.

El tubo de enfriamiento posee en su interior agua potable, para enfriar los tarros de leche que salen del tubo de esterilización. Fuente: Elaboración propia.

El rango de nivel de operación establecido es 35% a 38% de la capacidad del tubo de enfriamiento. Este dato se puede visualizar en el indicador de nivel del esterilizador rotatorio el cual esta escalado en porcentaje.

El del control de nivel, se realiza mediante la activación de la válvula 04_V_15 que está en lazo de control con el transmisor de nivel del tubo de enfriamiento, el funcionamiento es el siguiente:

Si el nivel de agua se encuentra en 38%, la válvula 04_V_15 se abre y deja pasar el agua por la tubería que conecta directo a la torre de enfriamiento, hasta que baje el nivel del agua a 35%, y luego se vuelve a cerrar. El nivel baja rápidamente, ya que la tubería que conecta directo a la torre de enfriamiento es de 6", y la tubería que conecta el sistema de recuperación de energía (HRS) es de 2". Si comparamos los flujos, se podría decir que el flujo de agua que pasa por el HRS es de 13 m³/h y por la tubería de 6" es de 20 m³/h aproximadamente, por lo tanto, el nivel disminuirá en un tiempo aproximado de 30 segundos y esto no afecta en el funcionamiento de los

intercambiadores. Asimismo, teniendo este análisis se desarrolla la lógica de programación en el controlador lógico CompactLogix mediante diagrama de flujo.

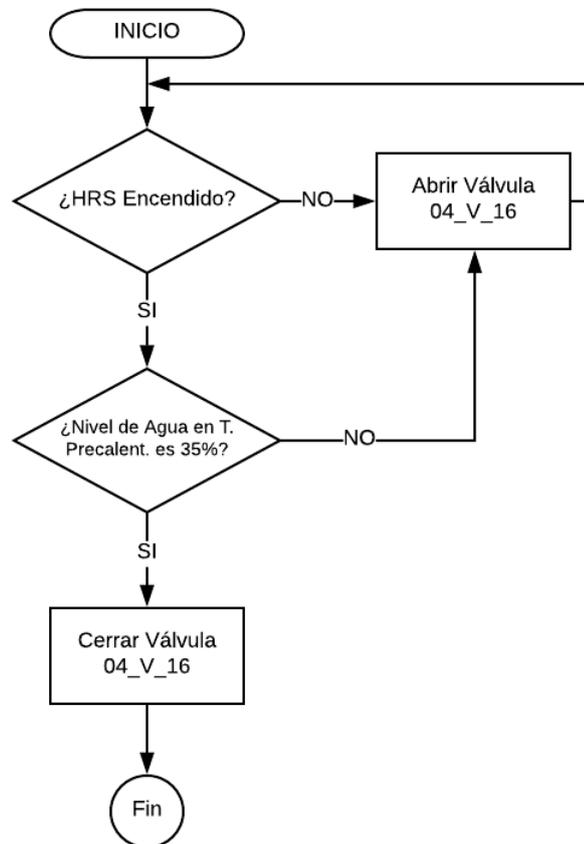


Figura 19. Diagrama de flujo del control de nivel del tubo de enfriamiento.

04_V_16 es la válvula de control de nivel enfriador. Elaboración propia.

2.3.2. Dimensionamiento de intercambiadores de placas

Para realizar el dimensionamiento de los intercambiadores de placas, aplicamos las fórmulas de transferencia de calor, y con ello se obtiene las temperaturas en la entrada y salida de cada intercambiador, considerando que el sentido de los fluidos es en contracorriente, como se observa en la figura 20.

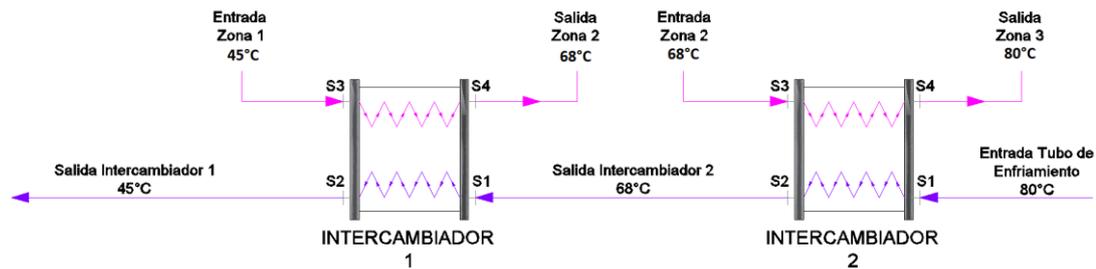


Figura 20. Temperaturas en intercambiadores de placas.

La línea de color morado es el fluido caliente, mientras la de color rosado es el fluido frío. El sentido de los fluidos es en contracorriente. Elaboración propia

Calculamos la carga de calor y la transferencia media logarítmica con la siguientes formulas:

Formula de carga de calor

$$P = k * A * LMTD$$

La fórmula de la transferencia media logarítmica para fluidos en contracorriente

$$LMTD = \frac{\Delta T_c - \Delta T_f}{\ln\left(\frac{\Delta T_c}{\Delta T_f}\right)}$$

Los datos se obtienen de la tabla 2, del cual se obtiene tomado medidas en el esterilizador rotatorio.

Tabla 2

Tabla de datos de fórmula carga de calor

Variable	Descripción	Unidad
P	Carga de calor	btu/h
k	Coefficiente de transferencia de calor	$6.4 \frac{btu}{m^2} * ^\circ C$
A	Área de transferencia de calor	$32m^2$
$T1$	Temperatura de entrada a zona caliente	$80^\circ C$
$T2$	Temperatura de salida a zona caliente	$68.6^\circ C$
$T3$	Temperatura de entrada a zona fría	$60^\circ C$
$T4$	Temperatura de salida a zona fría	$71.9^\circ C$

Tabla de datos para el cálculo de las fórmulas de carga de calor y transferencia media logarítmica.
Fuente: Elaboración propia.

$$\Delta T_c = T1 - T4 = 8.1^\circ C$$

$$\Delta T_f = T2 - T3 = 8.6^\circ C$$

$$LMTD = 8.3^\circ C$$

$$P = 17099.6 \text{ btu/h}$$

Una vez hallado el LMTD donde es la diferencia de temperatura media logarítmica, esta nos indica la transferencia térmica que tendrá el intercambiador de placas entre los fluidos caliente y frío. Analizando estos datos se procede a seleccionar el intercambiador de placas utilizando el software CAS de Alfa Laval. Se dimensiona por el tipo de fluido, las temperaturas de operación por cada fluido caliente y frío, la presión en la tubería y el flujo a la cual pasaran los fluidos, para ello se seleccionó un intercambiador M6 - FM de 35 placas de la marca Alfa Laval.



Figura 21. Intercambiador de placas M6-FM.

Posee dos entradas para el intercambio térmico de los fluidos caliente y frio. Fuente: Spirax Sarco (2015), *Alfa Laval M6*. (p.1)

- **Desarrollo del cuadro de ahorro energético del Sistema de Recuperación de Energía**

Para realizar los cálculos de ahorro energético, se tomaron datos del histórico de consumo de vapor y agua del esterilizador rotatorio antes de la puesta en marcha del HRS. En la tabla 3 se muestran los datos patrones, que son el promedio aproximado del consumo de estos recursos, del cual se hará referencia para realizar la fórmula de ahorro energético por semana, mes y año.

Tabla 3

Datos Padrón de consumo

Descripción	Medición promedio
Dato padrón vapor (kg/h)	3000
Dato padrón agua (L/h)	2580

Las medidas son el promedio aproximado del consumo de vapor y agua en una producción continua del esterilizador rotatorio antes de la puesta en marcha del HRS. Fuente: Elaboración propia

La fórmula de ahorro de vapor esta dado por el dato patrón menos el consumo instantáneo de vapor. La fórmula de consumo de agua es similar al de vapor.

Adicional a ello, se calculó el ahorro de la energía total que el sistema y reducción de CO₂, que es producido en la sala de calderas para la generación de vapor.

$$\text{Ahorro de vapor} = \text{Dato patrón vapor} - \text{Consumo vapor con HRS}$$

$$\text{Ahorro de agua} = \text{Dato patrón agua} - \text{Consumo Agua con HRS}$$

$$\text{Ahorro Energetico} = \text{Ahorro de Vapor} * \left(\frac{2047.7}{1000000} \right) \text{ GigaJouls}$$

$$\text{Reduccion de CO2} = \text{AhorroEnergetico} * \left(\frac{56.1}{1000} \right) \text{ Toneladas}$$

En base a estas fórmulas descritas anteriormente se diseñó el cuadro de ahorro en la pantalla operador HMI para su monitoreo por semana, mes y año.



AHORRO Y CONSUMO DE ENERGIA	SEMANA #####	MES Diciembre	AÑO #####
Ahorro Consumo de Vapor (Kg Vapor)	NNNNNNNN.NN	NNNNNNNN.NN	NNNNNNNN.NN
Ahorro Consumo de Agua (Litros)	NNNNNNNN.NN	NNNNNNNN.NN	NNNNNNNN.NN
Ahorro de Energía (GJ)	NNNNNNNN.NN	NNNNNNNN.NN	NNNNNNNN.NN
Reducción Consumo de CO2 (Ton)	NNNNNNNN.NN	NNNNNNNN.NN	NNNNNNNN.NN

At the bottom of the screen, there is a navigation bar with buttons: MENU, ESTERILIZADOR JBT, ESTERILIZADOR FMC, TENDENCIAS, HOROMETROS, Alarma Presente (red), and HISTORICO DE ALARMAS.

Figura 22: Cuadro de ahorros del sistema de recuperación de energía.

Las fórmulas se programan en el controlador lógico CompactLogix. Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Tablero de control y fuerza del sistema de recuperación de energía

El tablero de control y fuerza (TCF) es la parte principal del sistema de recuperación de energía, ya que sin este no funcionaría ningún instrumento y actuadores ubicados en campo. Este se encarga de recibir las señales de las variables medidas en campo, y luego procesarlas para realizar el accionamiento de los motores y válvulas. Está conformado por un conjunto de equipos electrónicos y eléctricos, las cuales se dimensionan de acuerdo con sus características y capacidades de funcionamiento. A continuación, en la figura 23 se muestra el tablero eléctrico del sistema de recuperación de energía.



Figura 23: Vista interior y exterior del tablero de control y fuerza del HRS.

La dimensión del tablero es de 1200x800x300mm, el modelo es el NSYMM128 de la marca Schneider Electric. Fuente: Elaboración propia.

El tablero es un gabinete de acero metálico con protección IP66, para la protección del ingreso de polvo, agua y grasa. Su diseño ergonómico permite que los equipos en su interior no se dañen o maltraten. El tablero se diseñó con un sistema de ventilación para la refrigeración de los equipos en su interior. El ingreso de cables al tablero es por la parte inferior del mismo, ordenado de manera que estos no se enreden y sean fáciles de realizar cualquier desconexión y mantenimiento. Todos los equipos de control y fuerza del tablero están rotulados según el plano eléctrico, asimismo, como los cables unifilares y multifilares.

El circuito eléctrico está conformado por dos circuitos las cuales son, el circuito de control y el circuito de fuerza. Los equipos asociados al circuito de control están alimentados con 24 voltios en corriente continua VDC, y 220 voltios en corriente alterna VAC ya que, los equipos electrónicos son diseñados para soportar este tipo de voltajes.

El circuito de fuerza está diseñado en 440VAC, ya que es suministrado por red eléctrica de la empresa. Por lo tanto, es el voltaje que se encarga de alimentar a los arrancadores directos, que viene a ser la etapa de potencia del tablero, y también alimenta al transformador de voltaje que se encarga de reducir la tensión para alimentar al circuito de control.

El siguiente diagrama unifilar corresponde a la distribución eléctrica del tablero de control y fuerza del sistema de recuperación de energía (HRS).

Como se observa en el circuito unifilar de la figura 20, la alimentación viene hacia el tablero desde la sala eléctrica de la empresa, luego llega a un interruptor general NSX-160F, el cual se encarga de alimentar a los circuitos de control y fuerza. Después del interruptor general, se encuentra el circuito de fuerza, que está conformado por los arrancadores Tesys U, ya que son los que se encargan de energizar las bombas 01_P_03 y 02_P_04, también está el transformador encargado de reducir el voltaje de 440VAC a 220VAC para alimentar el circuito de control.

En la salida del transformador, se encuentran los interruptores que alimentan los equipos de control como son el controlador lógico CompactLogix, La bornera de alimentación para señales de 220VAC, y la fuente de alimentación 24VDC.

La fuente de alimentación 24VDC, se encarga de alimentar al HMI (Human Machine Interface), las señales de confirmación de arranque, las fallas de los arrancadores Tesys U y, por último, algunas señales digitales de campo como sensores y válvulas configurados en corriente continua.

Cada interruptor monofásico del tablero esta dimensionado de acuerdo con la capacidad de carga del equipo y del circuito al que alimenta, este dimensionamiento de carga se realiza revisando las especificaciones de cada equipo electrónico, para así ante un corto circuito, este puede responder adecuadamente y proteger los circuitos adyacentes en el tablero. Por lo tanto, considerando todas las cargas y el consumo eléctrico total del tablero, la potencia máxima del tablero del sistema de recuperación de energía es de 2.5 KWatts. A continuación, se describen los equipos de fuerza y control del tablero del sistema de recuperación de energía.

- **Controlador lógico CompactLogix L33ER**



Figura 25: Controlador lógico CompactLogix L33ER.

Controlador instalado en tablero eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

El controlador lógico CompactLogix L33ER, posee un CPU el cual almacena toda la lógica de programación, contiene la configuración de los módulos de entradas y salidas tanto digitales y analógicas, posee puertos de comunicación para conexión entre dispositivos, además contiene una fuente independiente de 24VDC para la alimentación del bus interno. Este controlador está dedicado para aplicaciones industriales de pequeña y mediana envergadura, ya que cuenta con puerto de comunicación Ethernet IP, un puerto USB tipo B, una memoria RAM de 2MB, y con una expansión de hasta 16 módulos I/O.

Para el proyecto de recuperación de energía, se usó los siguientes módulos que corresponden al controlador lógico CompactLogix: Un procesador CompactLogix (1769-L33ER), una fuente de voltaje 24VDC de 4 Amperios (1794-PA4), 1 módulo de 32 entradas digitales (1769-IQ32), 2 módulos de 16 salidas digitales (1769-OB16), 1 módulo de 6 entradas RTD (1769-IR6), 1 módulo de entrada analógica de 8 canales (1769-IF8) y por último 1 módulo de salidas análogas de 8 canales (1769-OF8).

El software de programación del controlador lógico CompactLogix es el Studio 5000 de la marca Rockwell Automation, donde se realizó las lógicas de control desarrolladas anteriormente. A continuación, se describe el interfaz de programación del software.

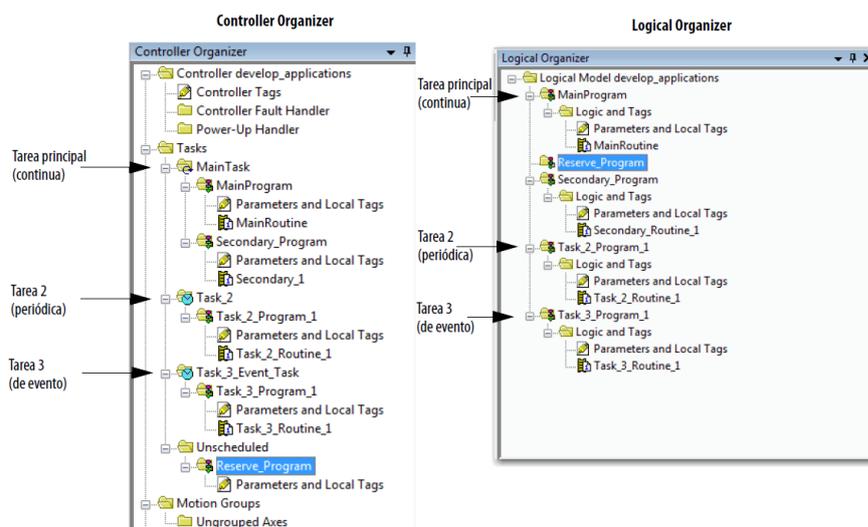


Figura 26: Interfaz de programación Studio 5000.

Fuente: Rockwell Automation (2016), Controladores CompactLogix 5370 (p. 263)

La tarea principal contiene las líneas con los algoritmos de programación que se ejecutan continuamente, allí se desarrolló toda la lógica de control del sistema de recuperación de energía. Las tareas periódicas son aquellos algoritmos que se ejecutan en un determinado tiempo cíclico, las cuales se configuran por tiempo en milisegundos.

El sistema de recuperación de energía se programó tomando en cuenta los algoritmos planteados en el desarrollo del plano PI&D, asimismo, las lógicas se ordenaron por las etapas que comprende el esterilizador rotatorio, considerando las alarmas y seguridades que tiene el sistema de recuperación de energía HRS como se muestra en la figura 27.

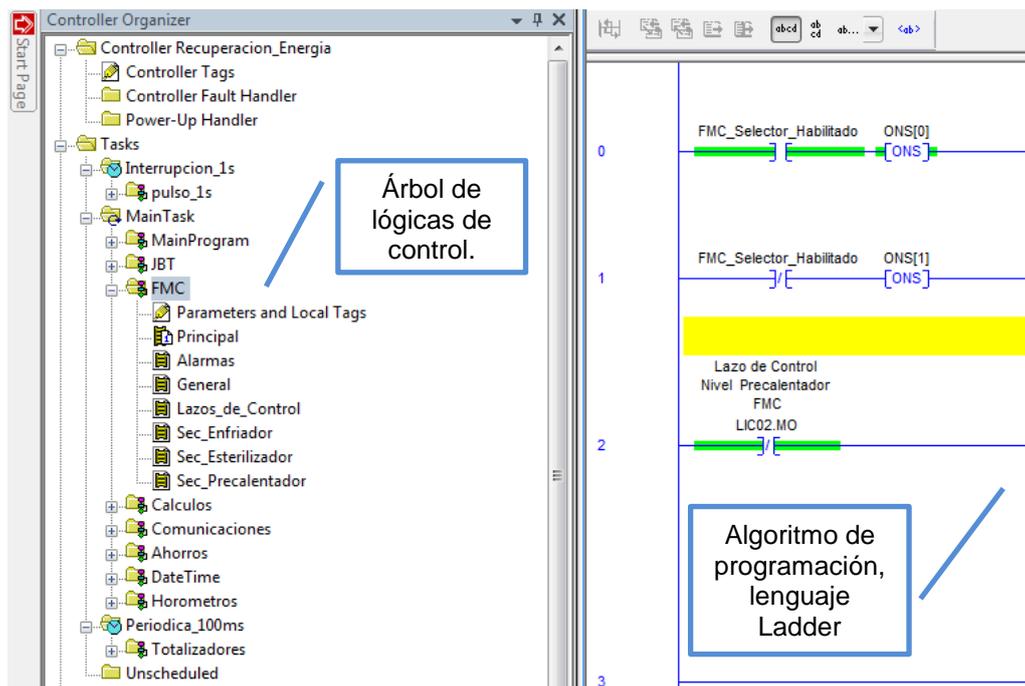


Figura 27: Tareas principales del programa HRS en el Software Studio 5000.

La lógica del controlador lógico contiene las rutinas de los cálculos de ahorro energético, las lógicas de comunicación entre controladores lógicos, y el horómetro que realiza el conteo del número de horas del funcionamiento del sistema de recuperación de energía. Elaboración Propia

EL controlador lógico CompactLogix recibe las señales digitales y analógicas en sus módulos I/Os, pero estas señales de campo vienen en voltaje y corriente, por lo tanto, se configuran en el software de programación para realizar la lógica de control, para ello las señales digitales se comportan como datos tipo bool, las cuales son 0 y 1.

Las entradas analógicas son lecturas de voltaje o corriente, donde el módulo analógico la convierte en datos de tipo entero. Para ello se realiza el método de escalamiento de la señal, para encontrar el valor real que el instrumento de campo está censando. Para realizar este proceso de escalamiento se realiza una ecuación matemática en la programación del controlador lógico CompactLogix, la siguiente ecuación describe el escalamiento de una señal analógica.

$$Out = (In - InRawMin) * \left(\frac{InEUMax - InEUMin}{InRawMax - InRawMin} \right) + InEuMin$$

Donde:

Out = Señal escalada

In = Señal de entrada analógica del Instrumento

InEUMax = Unidad de ingeniería máxima

InEUMin = Unidad de ingeniería mínima

InRawMax = Rango máximo de medición del Instrumento

InRawMin = Rango mínimo de medición del Instrumento

En el siguiente bloque de programación, se muestra el escalamiento de la señal de temperatura del transmisor TT03 ubicado a la entrada de los intercambiadores de placas del sistema de recuperación energía.

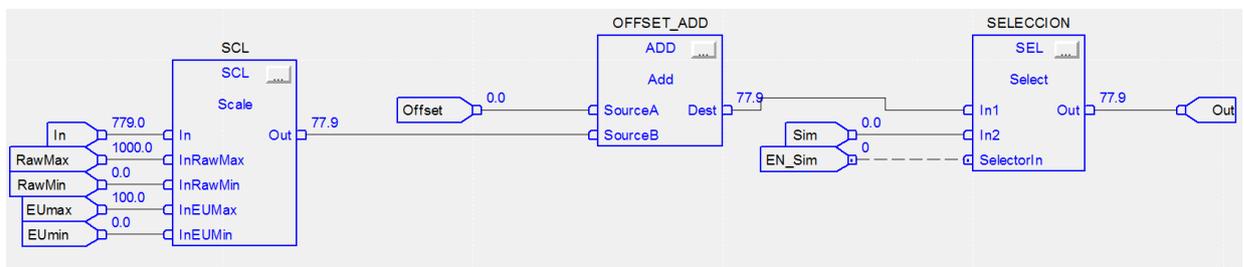


Figura 28: Bloque de escalamiento de la señal de temperatura TT03.

Esta rutina de programación se le conoce como Add-on, ya que se usa como un código fuente para el escalamiento de las señales analógicas. La rutina se puede repetir el número de señales posibles que el controlador pueda recibir, simplemente cambiando el tag de la variable analógica como tipo de dato estructurado. Fuente: Elaboración Propia

Las salidas analógicas se configuran de acuerdo con el tipo de señal que recibirá el actuador, ya sea en voltaje o corriente, las válvulas instaladas en el sistema de recuperación de energía reciben señales de corriente en el rango de 4-20mA, esta señal

sale escalada desde el controlador lógico CompactLogix, por lo tanto, la válvula proporcional también se configura en la señal que recibe en ese rango.

El circuito eléctrico muestra el modo de conexión entre las bornes del controlador lógico CompactLogix y la válvula de control.

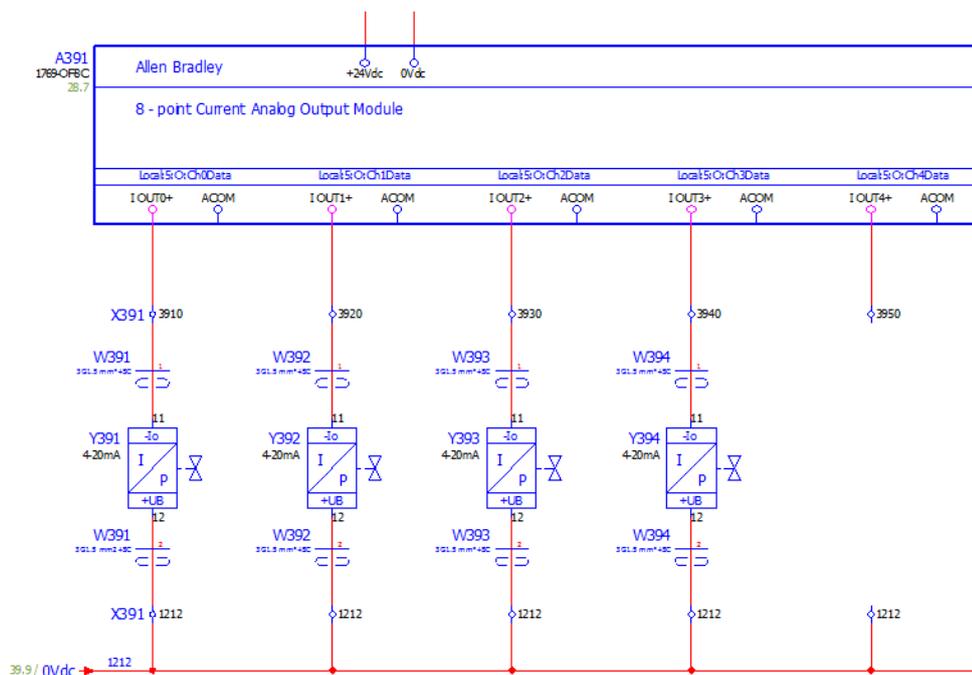


Figura 29: Circuito de conexionado de salidas analógicas en CompactLogix.

El diagrama se diseñó en el software Eplan electrical, se describe la conexión del módulo de salida analógica del controlador lógico CompactLogix, hacia los bornes de conexión de la válvula de control. La señal de corriente viaja por un cable apantallado, ya que este reduce la interferencia electromagnética y ruidos que se generan en el ambiente. Elaboración propia.

La configuración de la salida analógica se realiza con el método de escalamiento, que es muy similar al desarrollado con las entradas analógicas. Donde 4mA es igual a 0% de apertura, y 20mA es iguala 100% de apertura de la válvula proporcional, esto se muestra con más detalle en la figura 30.

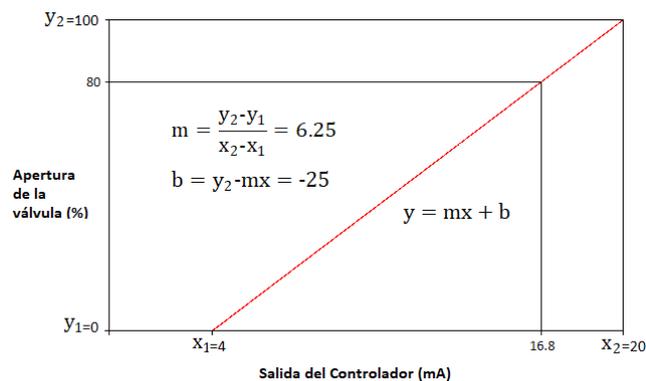


Figura 30: Escalamiento de la salida analógica.

El escalamiento de la señal se realiza en el controlador lógico, dentro de las rutinas de programación.
Fuente: Elaboración propia.

- **Panel operador HMI (Human Machine Interface)**

El Panel operador (HMI) es el dispositivo interfaz entre el hombre y la máquina, donde se visualiza el proceso industrial, como también permite el monitoreo y control de los equipos de campo. Para el proyecto de recuperación de energía (HRS) se usó una pantalla táctil de 10 pulgadas de la marca Allen Bradley, el modelo es el Panel View 1000, la comunicación con el controlador lógico CompactLogix se realiza por el protocolo de red ethernet IP.



Figura 31: Pantalla de operación (HMI) panel view 1000.

Fuente: Rockwell Automation (2018), PanelView Plus 6 Terminals (p. 171)

El circuito de control también agrupa a la fuente alimentación 24VDC, el switch ethernet, y los bornes de interconexión entre el controlador lógico y las señales de campo, asimismo, las válvulas on/off poseen bobinas de 220VAC, para ello el controlador lógico CompactLogix manda activar una salida digital, que a su activa un relé interfaz para aislar la etapa de control 24VDC con la etapa de control en 220VAC. De esta manera, se logra proteger a los módulos del controlador lógico CompactLogix para no originar un corto circuito en el tablero eléctrico.



Figura 32: Fuente de alimentación 24VDC y Switch Ethernet IP.

El modelo de la fuente de alimentación es ABL8RPS24100, de la marca Schneider Electric, su capacidad es de 10 Amperios, incorporado con el filtro de corrección del factor de energía de acuerdo con IEC 61000-3-2, con un grado de protección IP20 según la norma EN/IEC 60529. Fuente: Elaboración propia

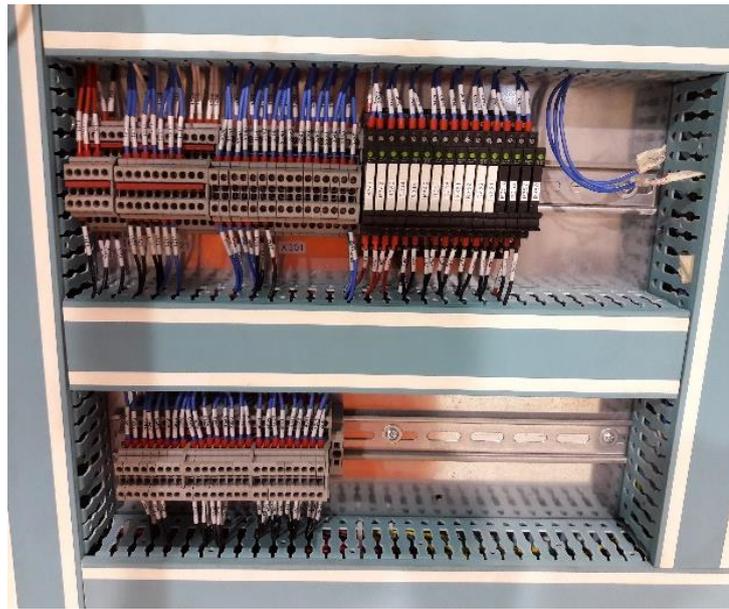


Figura 33: Borneras de interconexión, relés de interfaz.

Las borneras de interconexión facilitan el mantenimiento de cables. Están separados por grupos, tanto para la alimentación de 24VDC y 220VAC, asimismo para las señales del controlador lógico. Fuente: Elaboración propia

- **Arrancador directo Tesys U**

El arrancador Tesys U es la etapa del circuito de fuerza, ya que se encargan de energizar las bombas centrifugas 01_P_03 y 02_P_04, que recirculan el agua del tubo de precalentamiento. Este equipo está compuesto de una base de potencia y de una unidad de control. Además, posee las siguientes características; seccionamiento de potencia, protección contra las sobrecargas y los cortocircuitos, protección contra las sobrecargas térmicas y conmutación de potencia. A diferencia de los arranques clásicos que son el guardamotor y un contactor, este equipo es fácil de montar y fácil de reemplazar en sus componentes, ya que, es un equipo compacto.

Posee contactos de estado y contacto de falla, el cual permite la conexión con el controlador lógico para su programación.



Figura 34. Arrancadores Tesys U con esquema de conexión

Fuente: Elaboración propia

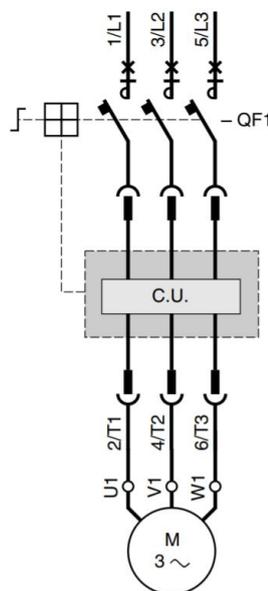


Figura 35. Esquema de conexión del arrancador Tesys U

La unidad de control es el dispositivo sensible que detecta sobre corrientes o cortocircuito, además de ello se puede graduar al rango de consumo de corriente de acuerdo con la placa del motor. Fuente: Elaboración propia

2.3.4. Arquitectura de control del sistema de recuperación de energía

La empresa envasadora de alimentos tiene una red industrial ethernet IP, el cual se conecta con todos los dispositivos configurados en esa red. Además de ello, posee un sistema Scada que se ubica en la sala de operación, para el monitoreo de las máquinas y sistemas instalados en dicha empresa.

Por ello, el sistema de recuperación de energía posee un switch ethernet para la comunicación entre el controlador lógico CompactLogix (PLC) y el panel operador HMI, en la topología ethernet punto a punto. El Scada se conecta al switch ethernet del tablero para que este pueda leer las variables del controlador lógico.

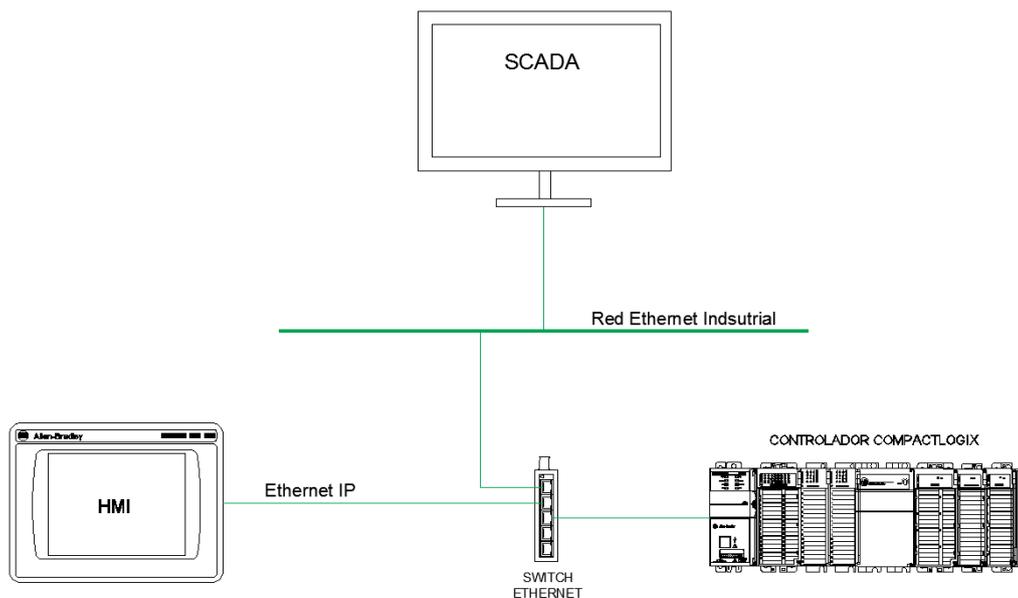


Figura 36: Arquitectura de control del sistema de recuperación de energía.

Le Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Los resultados de este proyecto de tesis se encuentran en base al funcionamiento del sistema de recuperación de energía durante un periodo de 30 días, ya que, ese tiempo se usó para la recopilación de datos para determinar el ahorro significativo de vapor y agua, con ello se pudo calcular el ahorro monetario de estos recursos.

3.1. Funcionamiento del Sistema de Recuperación de Energía

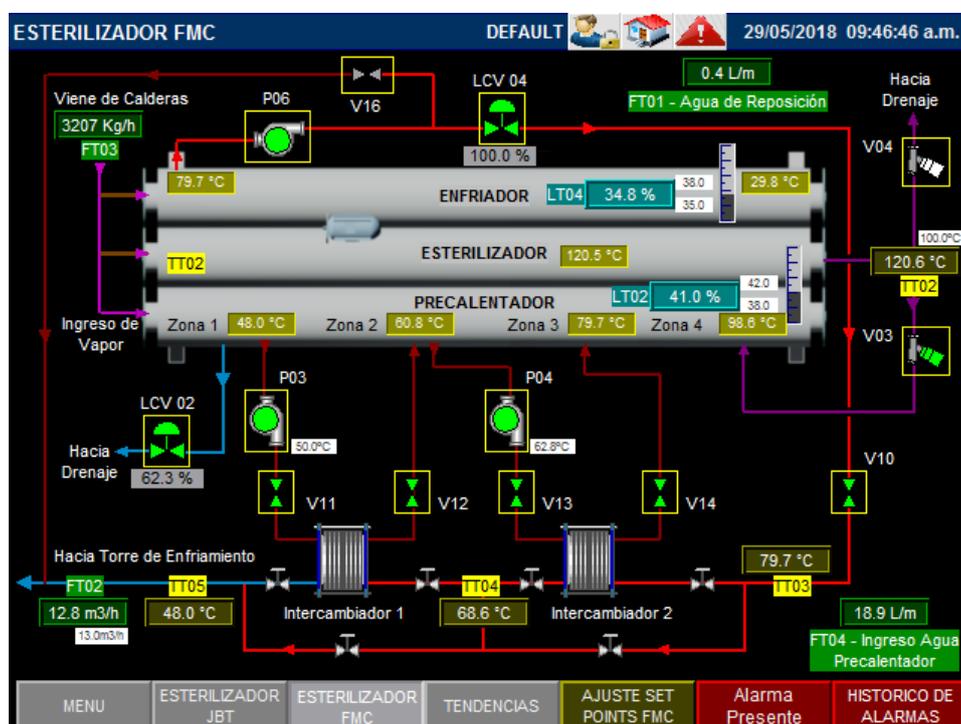


Figura 37. Sistema de recuperación de energía en funcionamiento.

Los equipos funcionan correctamente de acuerdo con la lógica planteada en los diagramas de flujos.
Fuente: Elaboración propia.

Para describir mejor el funcionamiento de los equipos del sistema de recuperación de energía (HRS) y el monitoreo de este, se asignaron estado de colores para diferenciar si el equipo se encuentra apagado, energizado o en falla, ver tabla 4.

Tabla 4

Estado de equipos en HMI del HRS

Equipo	Estado apagado	Estado encendido	Estado en falla
Bombas			
Válvulas On/Off			
Válvulas proporcionales			

Color blanco significa que el equipo se encuentra pagado. Color verde significa el equipo esta activado o encendido y el color rojo el equipo presenta una falla o se encuentra apagado: Elaboración propia

La figura 37 muestra el sistema de recuperación de energía (HRS) en funcionamiento, como se observa las válvulas V03, V11, V12, V13 y V14 se mantienen activadas, la válvula proporcional LCV04 realiza la acción de control de flujo mientras las bombas P03, P04 y P06 están encendidas. De acuerdo con esto se describen los siguientes resultados:

Resultado 1

La salida de agua en el tubo de enfriamiento (Enfriador) se encuentra en 79.7°C, y la salida de agua en el sistema de recuperación de energía es de 48°C. Esto sucede porque los intercambiadores de placas 1 y 2 realizan la transferencia de calor con los fluidos del tubo de precalentamiento (Precalentador), logrando reducir la temperatura de salida de agua del tubo de enfriamiento.

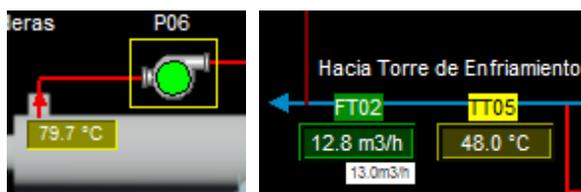


Figura 38. Indicador de temperatura de agua del HRS.

Fuente: Elaboración propia.

Resultado 2

El agua recirculada del tubo de precalentamiento que pasa por los intercambiadores 1 y 2, reducen el consumo de energía utilizada en el mismo, manteniendo la temperatura de cada zona por encima o igual a los valores de referencia establecida, por lo tanto, al ya no ingresar vapor a estas zonas se genera el ahorro de vapor.

Resultado 3

El calor del condensado se reaprovecha desde el tubo de esterilización (Esterilizador) hacia la zona 4 del tubo de precalentamiento (Precalentador).



Figura 39. Indicador de temperaturas en zonas de tubo de precalentamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Se logro reducir el consumo de vapor en el tubo de precalentamiento, este resultado se observa con el histórico de tendencias que se implementó en la pantalla de operación (HMI), el cual registró el consumo de vapor antes y después de la puesta en marcha del sistema de recuperación de energía (HRS). La comparación del consumo de vapor antes de la implementación tenía picos de hasta 4500Kg/h, mientras que con el sistema HRS encendido el consumo de vapor tiene picos de hasta 3200Kg/h,

donde en varios momentos el consumo de vapor bordeaba hasta los 800 Kg/h como se muestra en las siguientes imágenes.

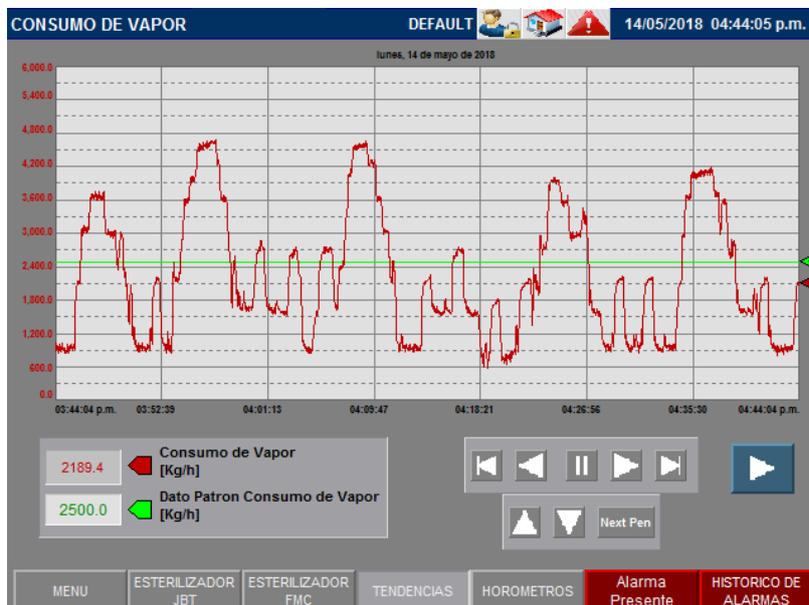


Figura 40. Consumo de vapor con el sistema de recuperación de energía apagado.

La curva del consumo de vapor oscila entre 4800Kg/h. Fuente: Elaboración propia.

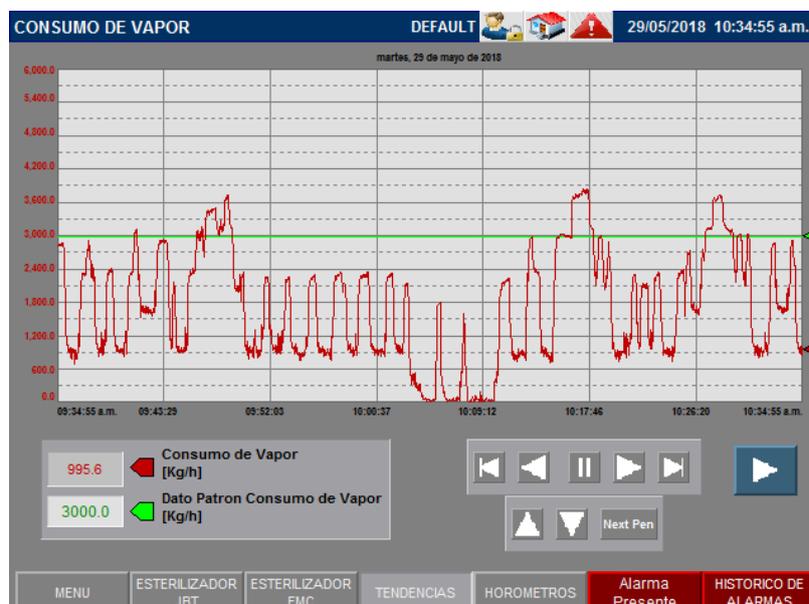


Figura 41. Consumo de vapor con el sistema de recuperación de energía encendido.

La curva oscila entre 3600Kg/h, y en ocasiones el consumo llega a 0Kg/h. Fuente: Elaboración propia.

- **Funcionamiento del esterilizador rotario con el sistema de recuperación de energía**

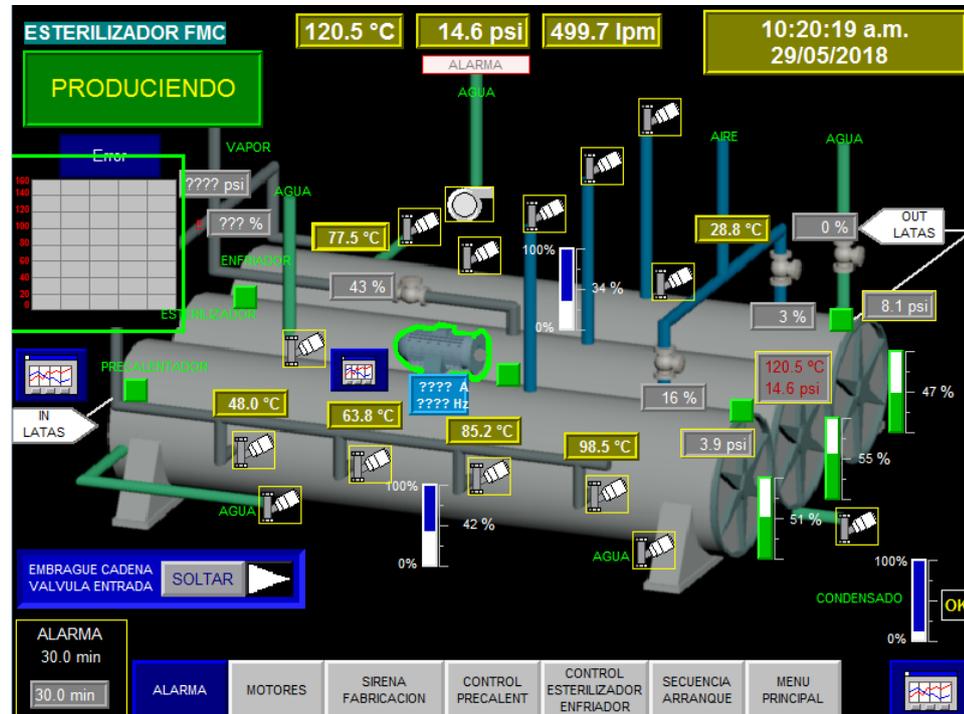


Figura 42. Funcionamiento del esterilizador rotatorio con el sistema HRS.

El tubo de precalentamiento posee 4 válvulas On/off de ingreso de vapor, cada válvula posee un control PID independiente, el tubo de precalentamiento posee una válvula proporcional de ingreso de vapor, que es controlador con un control PID. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 42, el esterilizador rotatorio en la etapa del tubo de precalentamiento tiene las válvulas de ingreso de vapor apagadas. La temperatura de salida del agua en la entrada del tubo de enfriamiento se mantiene en 77.5 °C. Esto sucede, ya que el sistema de recuperación de energía recupera el calor que genera mediante la transferencia térmica en los intercambiadores, y la ganancia térmica del condensado del tubo de esterilización. El funcionamiento del esterilizador rotatorio no se ve afectada, y no altera su proceso de producción. Con ello, obtenemos un resultado eficaz en el ahorro de energías en la producción de productos esterilizados, ya que se realiza en las instalaciones de la empresa envasadora de alimentos de Lima Norte.

3.2. Resultados del ahorro de vapor y agua

3.2.1. Dato patrón

Para realizar el cálculo de ahorro económico, se usarán los datos del costo por cada recurso proporcionado por la empresa envasadora de alimentos, el cual se describe en la tabla 5.

Tabla 5

Datos de costos de los recursos.

Recurso	Precio
Costo Vapor (Ton)	S/. 56.04
Costo de agua torre (m ³)	S/. 8.56
Costo de agua en caldera (m ³)	S/. 6.67

Datos recopilados del área de sostenibilidad y medio ambiente de la empresa envasadora de alimentos.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Calculo de costos generales de ahorro energético

Los siguientes reportes de ahorro de vapor y agua, comprenden al funcionamiento del sistema de recuperación de energía (HRS) durante un mes con producción continua del esterilizador rotatorio con un total de 428.5 horas de funcionamiento.

En la tabla 6, se presenta los resultados obtenidos del ahorro de vapor que el sistema de recuperación de energía HRS obtuvo en el esterilizador rotatorio, asimismo, la reducción del consumo energético y disminución de toneladas de CO₂ que es generada en la sala de calderas, estos datos se obtuvieron del registro de datos del Scada.

Tabla 6

Resultado del ahorro del consumo de vapor.

Descripción	Unidad
Consumo de vapor padrón histórico (kg)	1,285,500
Consumo total de vapor con HRS (kg)	750,638
Flujo de vapor con HRS (kg/h)	1,751.8
Ahorro vapor (kg)	534,862
Porcentaje de ahorro	42%
Ahorro económico	S/. 29,973.67
Ahorro energía (GigaJoules)	1,095
Disminución CO ₂ (Toneladas)	61.44

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6 se muestra el ahorro económico de vapor aproximadamente alrededor de S/. 29,973.67 soles por mes, reduciendo el consumo de vapor en un 42% de lo que se consumía sin el funcionamiento del HRS.

En la tabla 7 se muestra el ahorro de agua que se obtuvo en el esterilizador rotatorio cuando el sistema de recuperación de energía (HRS) funcionó durante un mes, estos datos fueron se sacaron del registro que se realizó el SCADA.

Tabla 7

Resultado del ahorro del consumo de agua

Descripción	Unidad
Consumo padrón histórico (L)	1,105,530
Consumo de agua con HRS (L)	500,844
Ahorro de agua por vapor (L)	534,862
Ahorro de agua (L)	604,686
Ahorro total agua (L)	1,139,548
Porcentaje de ahorro	55%
Ahorro económico	S/. 8,743.64

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 7, el ahorro económico de agua se estima aproximadamente alrededor de S/. 8,743.64 soles por mes, reduciendo el consumo de agua en un 55% de lo que se consumía sin el funcionamiento del sistema de recuperación de energía (HRS).

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de la implementación del sistema de recuperación de energía, instalado en el esterilizador rotario de la empresa envasadora de alimentos de Lima Norte.

3.3. Resultados de la implementación del sistema de recuperación de energía

Las siguientes imágenes muestran los equipos instalados en campo del sistema recuperación de energía.



Figura 43. Intercambiadores de placas del HRS instalados.

Fuente: Elaboración propia



Figura 44. Válvula de control Salida de agua en Tubo de Enfriamiento.

Nota: Elaboración propia



Figura 45. Válvula On/off en tubo de precalentamiento.

Fuente: Elaboración propia



Figura 46. Bomba centrífuga de recirculación de agua en tubo de precalentamiento.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

La implantación del sistema de recuperación de energía usando algoritmos de control PID, genero un ahorro significativo en el consumo de vapor y agua, de esta manera, contrastamos la idea planteada en la hipótesis afirmativa.

Los intercambiadores de placas cumplen un rol muy importante en la transferencia térmica, ya que estos son los que reingresan la energía que se genera en el esterilizador rotatorio. Se contrasta la hipótesis específica planteada en el desarrollo de este proyecto, al dimensionar los intercambiadores de placas aplicando fluidos en contracorriente, y posterior ello el uso del software CAS para su dimensionamiento y selección

La selección del controlador lógico CompactLogix y la pantalla operador Panel View, en este proyecto ha sido de gran importancia, y esto se contrasta con la conclusión de Ugarte D. (2016), el cual implemento un sistema usando esta tecnología, pero con otra versión de controlador y HMI. La pantalla de operación HMI, en el cual se desarrolló los gráficos del proyecto, muestra las variables de proceso, con esto el operador de la planta puede visualizar y controlar los equipos asociados al sistema de recuperación de energía.

4.2 Conclusiones

El desarrollo de los lazos de control, la programación de la lógica de funcionamiento en el controlador lógico CompactLogix y panel operador HMI, obtuvo resultados óptimos en la reducción del consumo de vapor en el esterilizador rotatorio. Generado un ahorro general significativo tanto de vapor y agua que se usan para la esterilización de los productos alimenticios de dicha empresa.

El dimensionamiento y selección de los intercambiadores, genero una reducción del consumo de vapor en el tubo de precalentamiento significativamente, así mismo, la reutilización de condensado del tubo de esterilización hacia la zona 4 del tubo de precalentamiento, genero un ahorro sustancial en la reducción de vapor.

El ahorro del consumo de vapor y agua se vio reflejada en los gráficos de tendencia, con un 45% de ahorro en vapor y un 55% de ahorro en agua, asimismo, esto genero un ahorro económico positivo en el uso y generación de estos recursos en la empresa envasadora de alimentos.

El tablero de control y fuerza cumple un rol muy importante en el funcionamiento de los equipos de campo, ya que, el controlador lógico CompactLogix por su arquitectura de control, el modo de programación y la comunicación con el servidor Scada, logra registrar las señales de temperatura, nivel, y flujo del sistema de recuperación de energía (HRS).

REFERENCIAS

45TESYSULINE.pdf. (s. f.). Recuperado de

http://stevenengineering.com/Tech_Support/PDFs/45TESYSULINE.pdf

1769-in067_-en-p.pdf. (s. f.). Recuperado de

https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1769-in067_-en-p.pdf

1769-um021_-es-p.pdf. (s. f.). Recuperado de

http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1769-um021_-es-p.pdf

2711p-um001_-en-p.pdf. (s. f.). Recuperado de

https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/2711p-um001_-en-p.pdf

AjustetanteoPID.pdf. (s. f.). Recuperado de

<http://www.tiemporeal.es/archivos/AjustetanteoPID.pdf>

alfa-laval-m6_che00071es.pdf. (s. f.). Recuperado de

https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/product-leaflets-languages/spanish/alfa-laval-m6_che00071es.pdf

Automation, R. (s. f.). Instrucciones generales de los controladores Logix5000 Manual de referencia, 989.

C07.pdf. (s. f.). Recuperado de

http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C07.pdf

Cancio N. C. (2015). *Evaluación del impacto técnico-económico de una caldera con R-500 convertida a gas natural en una planta industrial*. Lima - Perú

catalogo.pdf. (s. f.). Recuperado de

http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/CI/Arranque_Proteccion_Motores/TesysU/materiales/documentacion/catalogo.pdf

Creus, A. (2010). *Instrumentacion Industrial*. (Alfaomega, Ed.) (8 edition). México:
Alfaomega Grupo Editor.

Diana E. R (2016). *Diseño de controladores PID avanzado para el control robusto de una unidad de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar*. Lima-Perú.

Diego P. U. (2016). *Desarrollo de un controlador inteligente para un bastidor inverso de una planta desalinizadora de agua de mar*. Lima-Perú.

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2016). *Modern Control Systems* (13 edition). Hoboken:
Pearson.

Jaramillo, O. A. (s. f.). INTERCAMBIADORES DE CALOR, 33.

Milosawlewitsch, M. (2011). *Resintonización de Control Pid Mediante Identificación en Lazo Cerrado*. Editorial Academica Espanola.

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.

PABLO, D. (2008). *PLC - AUTOMATIZACION Y CONTROL INDUSTRIAL*. Argentina:
HASA.

pids.pdf. (s. f.). Recuperado de <http://www.isa.cie.uva.es/~maria/pids.pdf>

Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2006). *Metodología de la investigación*.
MacGraw-Hill/Interamericana.

Sánchez, J. A. (s. f.). INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL BÁSICO DE PROCESOS,
24.

Sergio N. G. (2014). *Desarrollo de un sistema de control predictivo multivariable de un generador de vapor de tubos de agua*. Lima-Perú.

Scott, A. (2015). *Learning RSLogix 5000 Programming: Building PLC solutions with Rockwell Automation and RSLogix 5000*. Packt Publishing - ebooks Account.

Sintonización de lazos de control de nivel en sistemas de tanques interactuantes empleando el software de Expertune. (s. f.), 50.

Tema7_parte1.pdf. (s. f.). Recuperado de http://umh1772.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/799/2013/02/Tema7_parte1.pdf

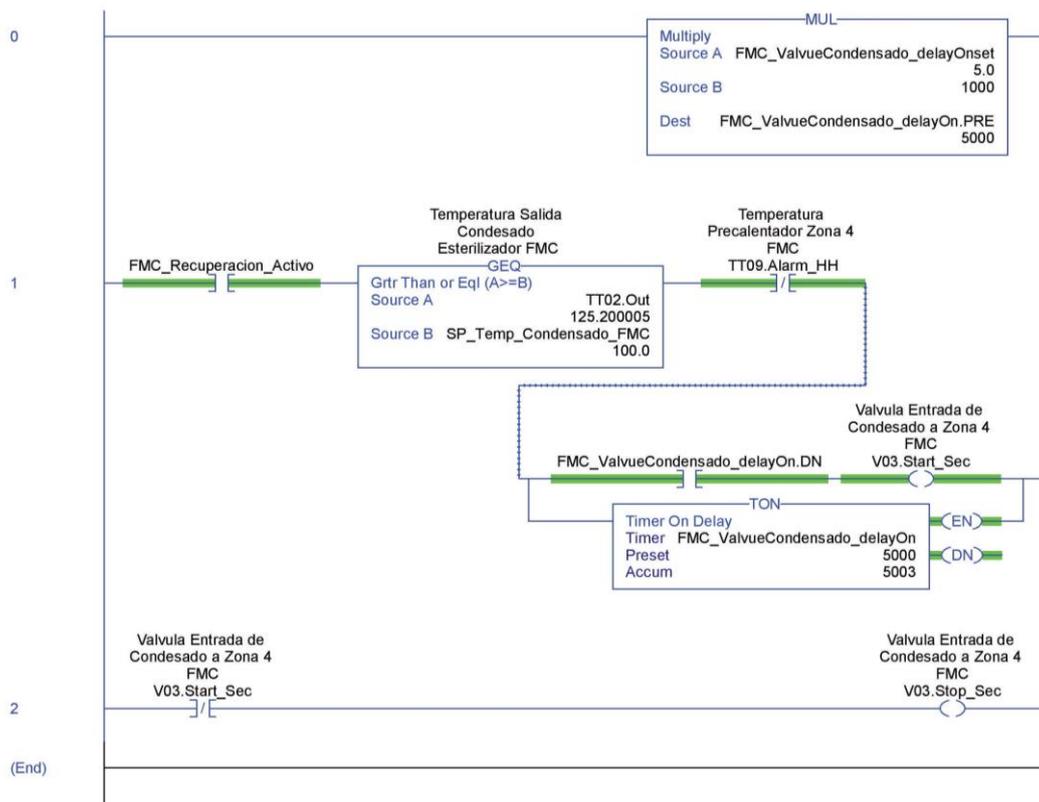
tesis.pdf. (s. f.). Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10190/tesis.pdf?sequence=1>

T-ESPE-057195.pdf. (s. f.). Recuperado de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12998/1/T-ESPE-057195.pdf>

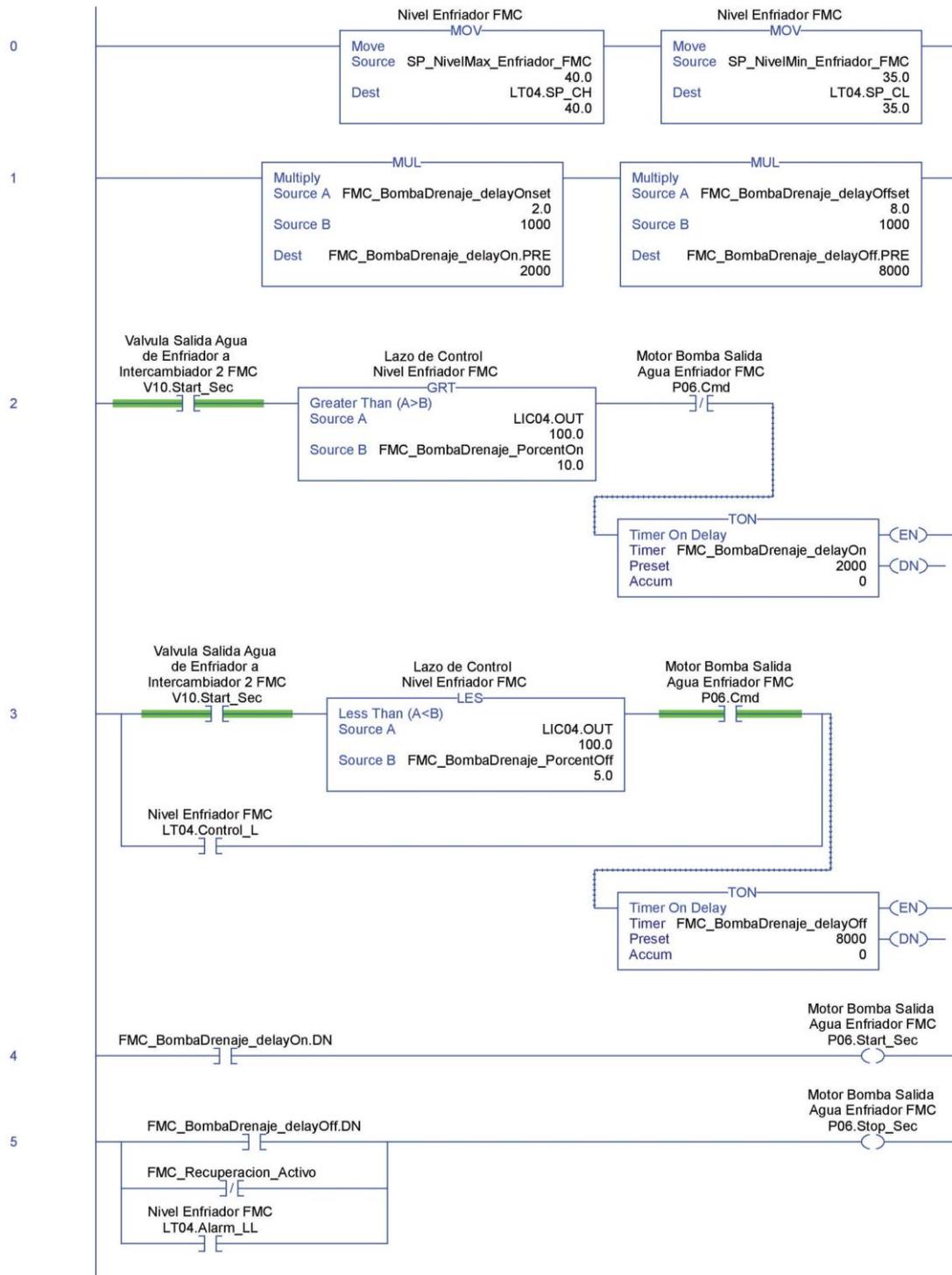
ANEXOS

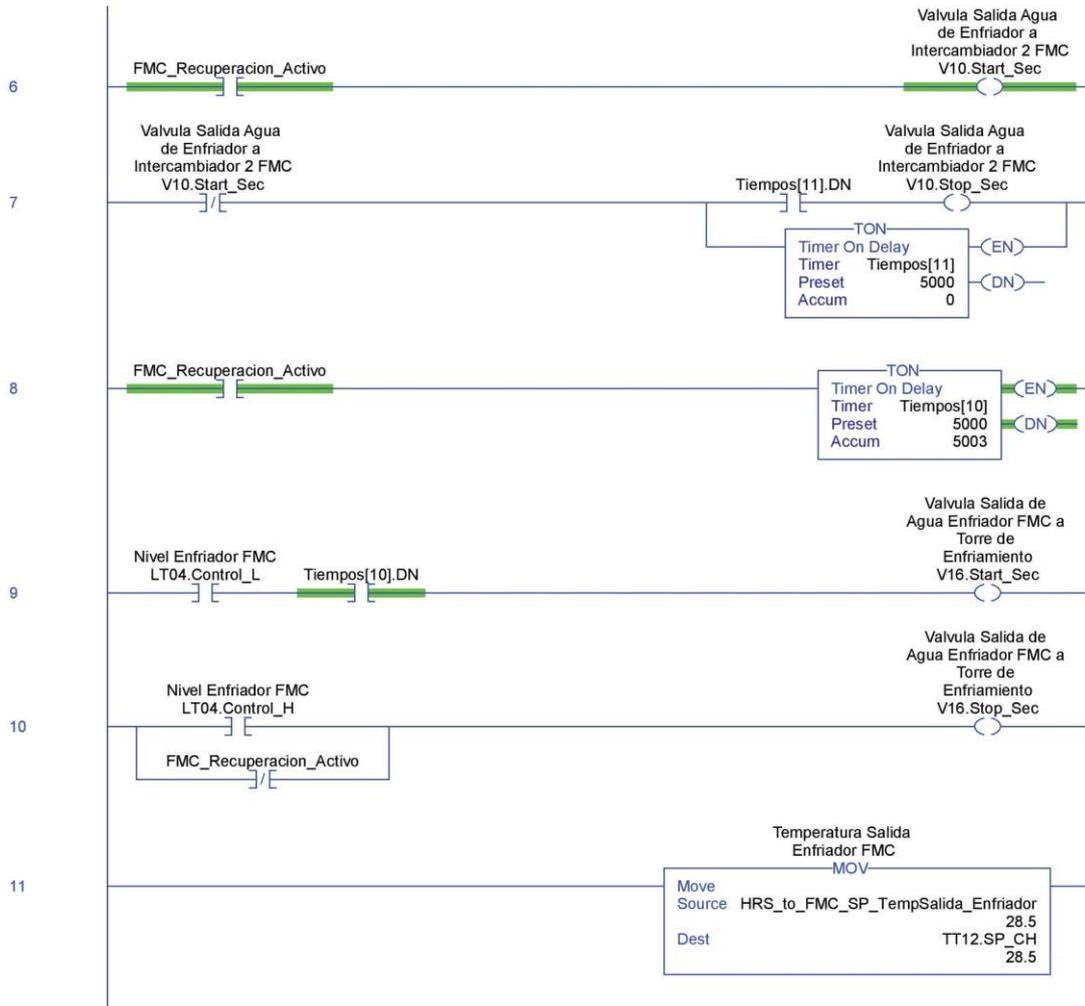
Anexo n°1: Lógica de programación del sistema de recuperación de energía en el software studio 5000

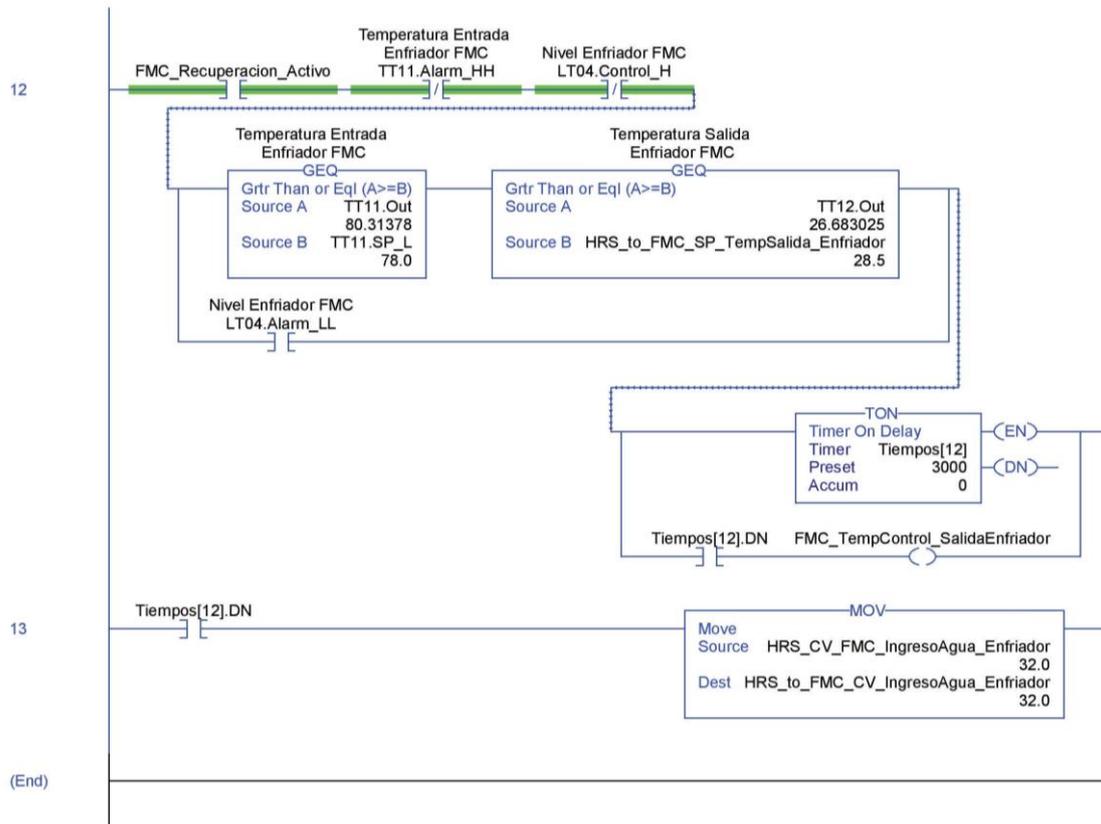
- Secuencia del tubo de esterilización



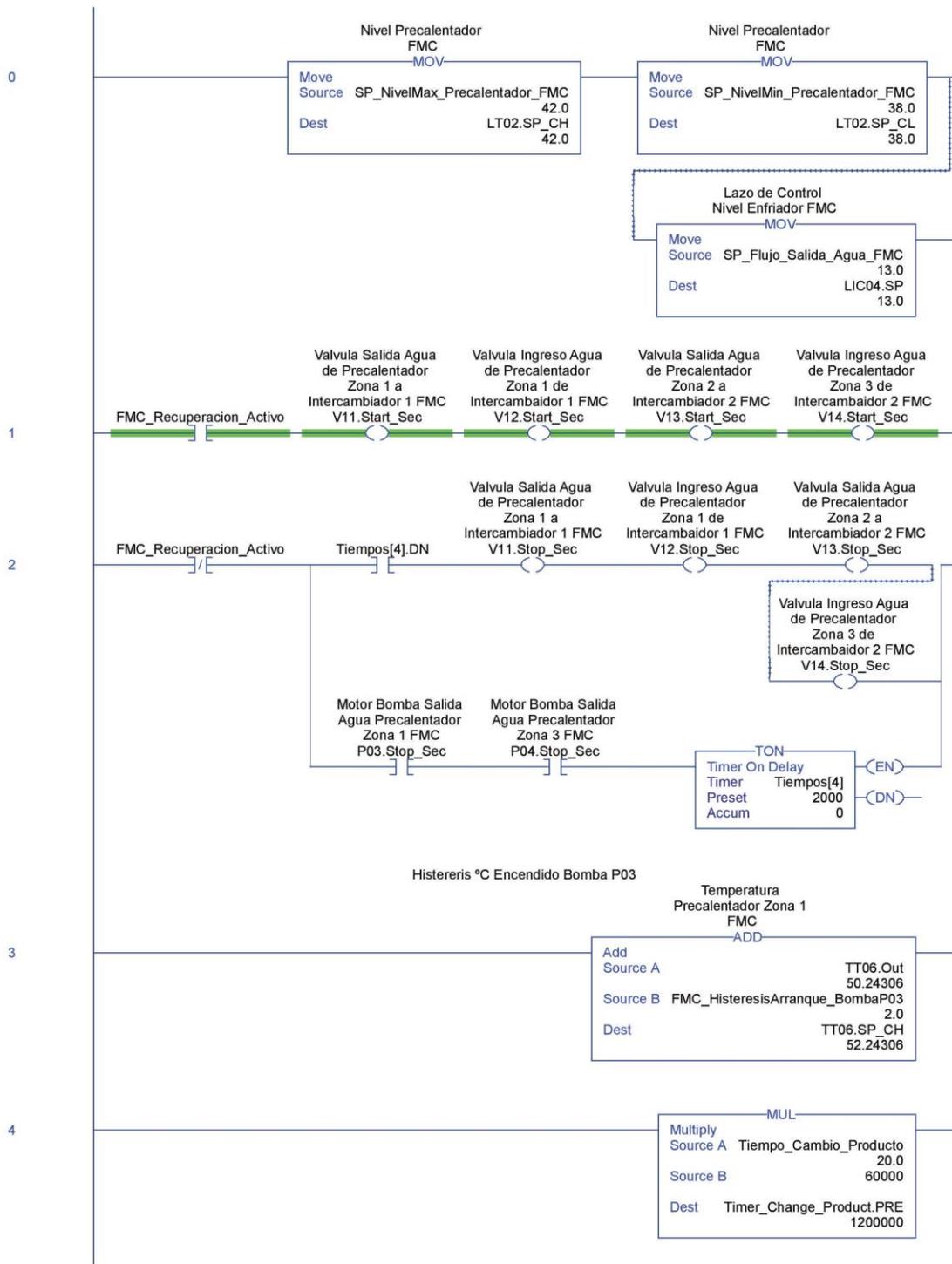
- **Secuencia del tubo de enfriamiento**

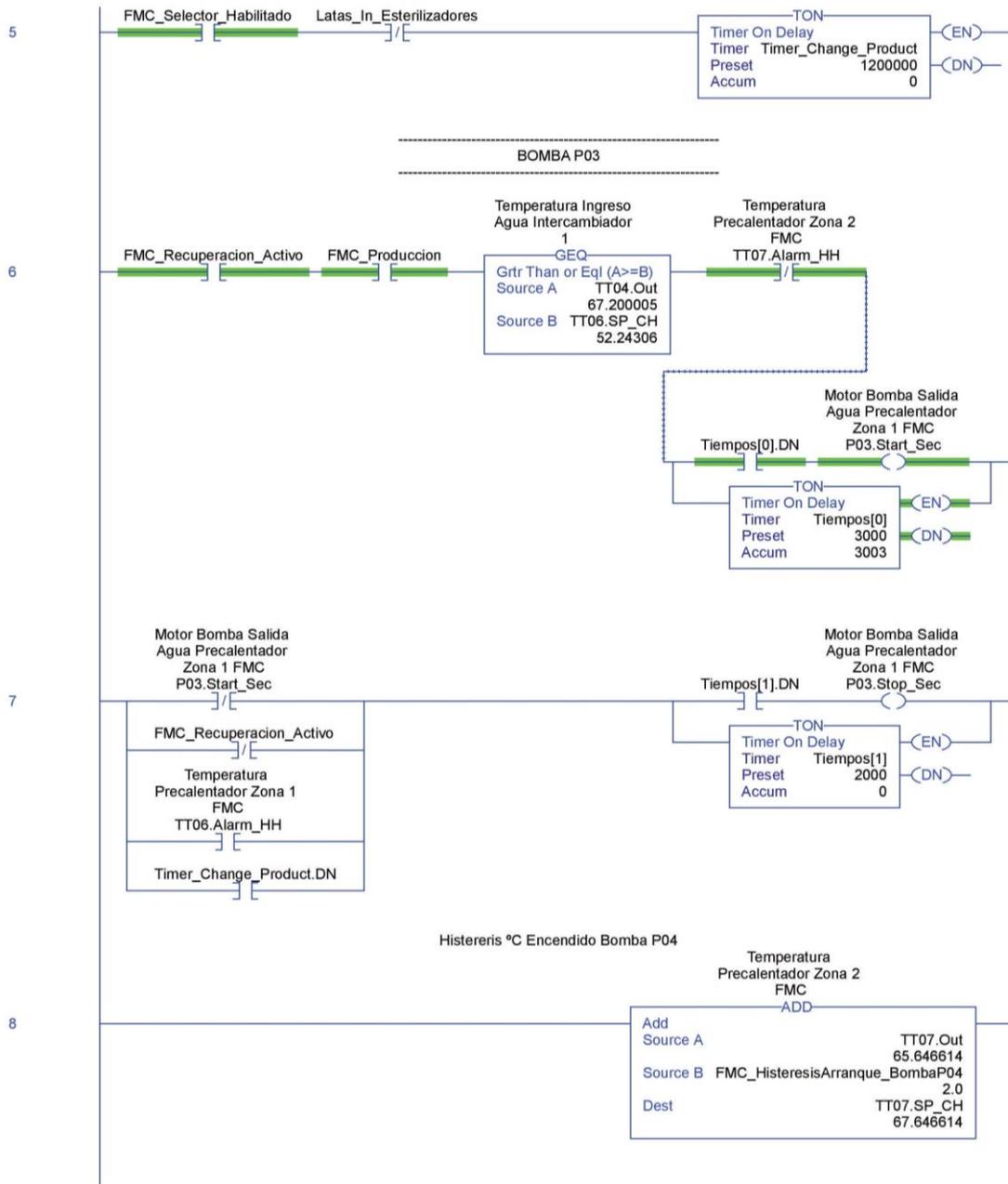


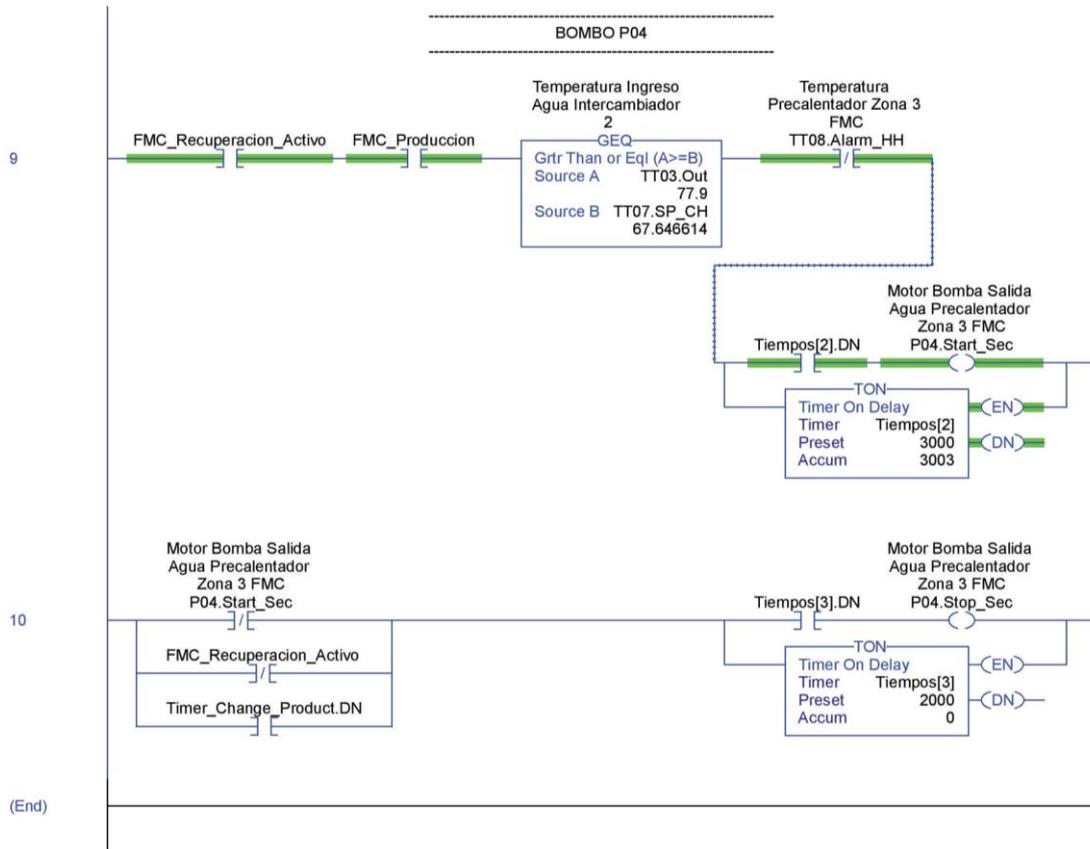




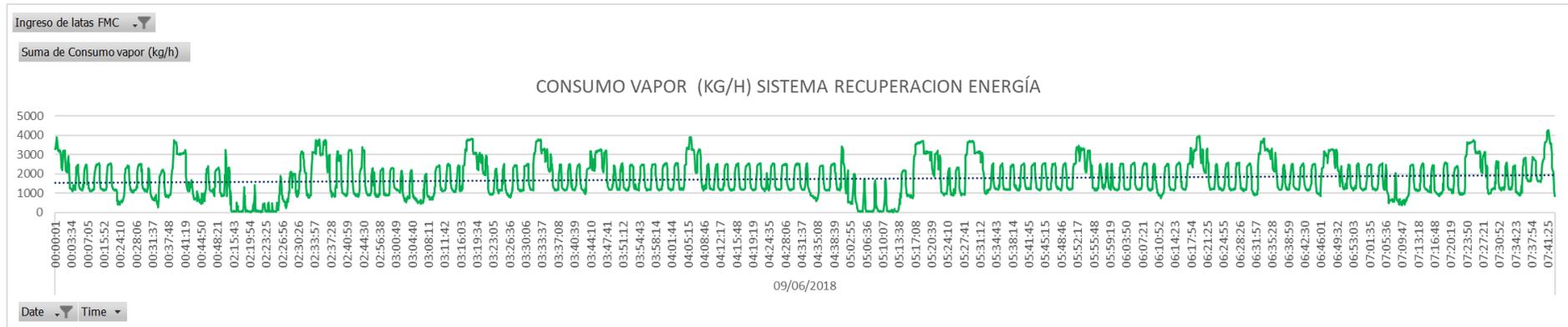
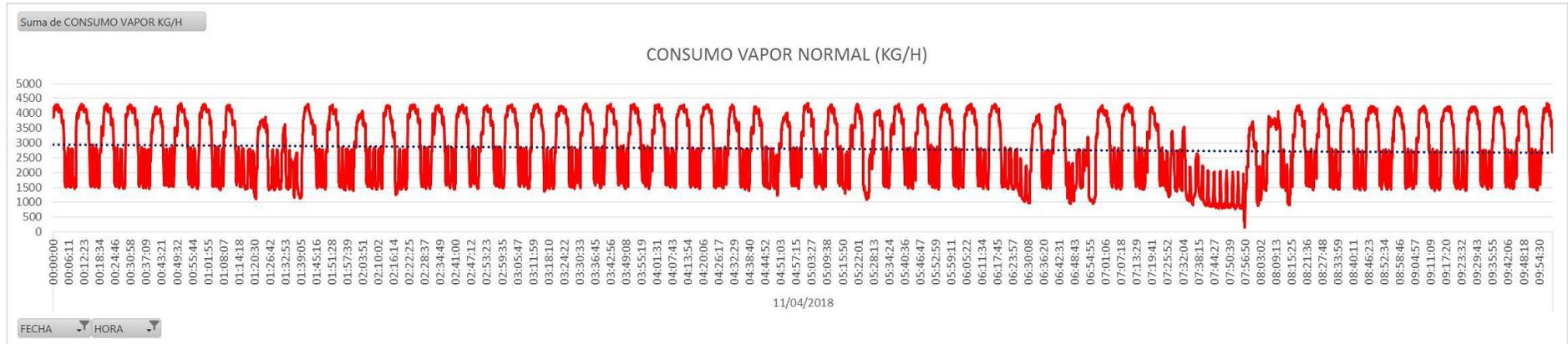
- **Secuencia del tubo de precalentamiento**



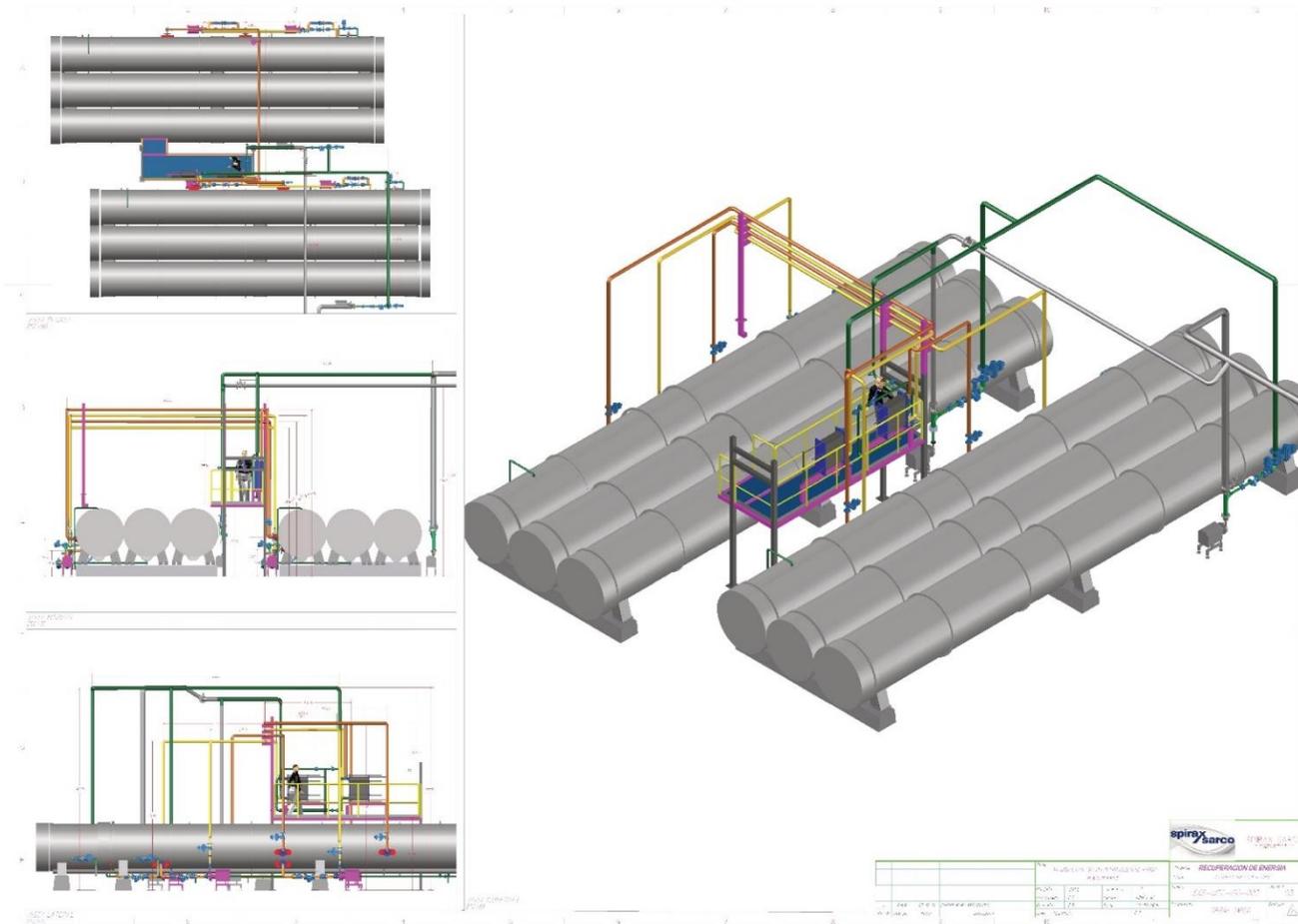




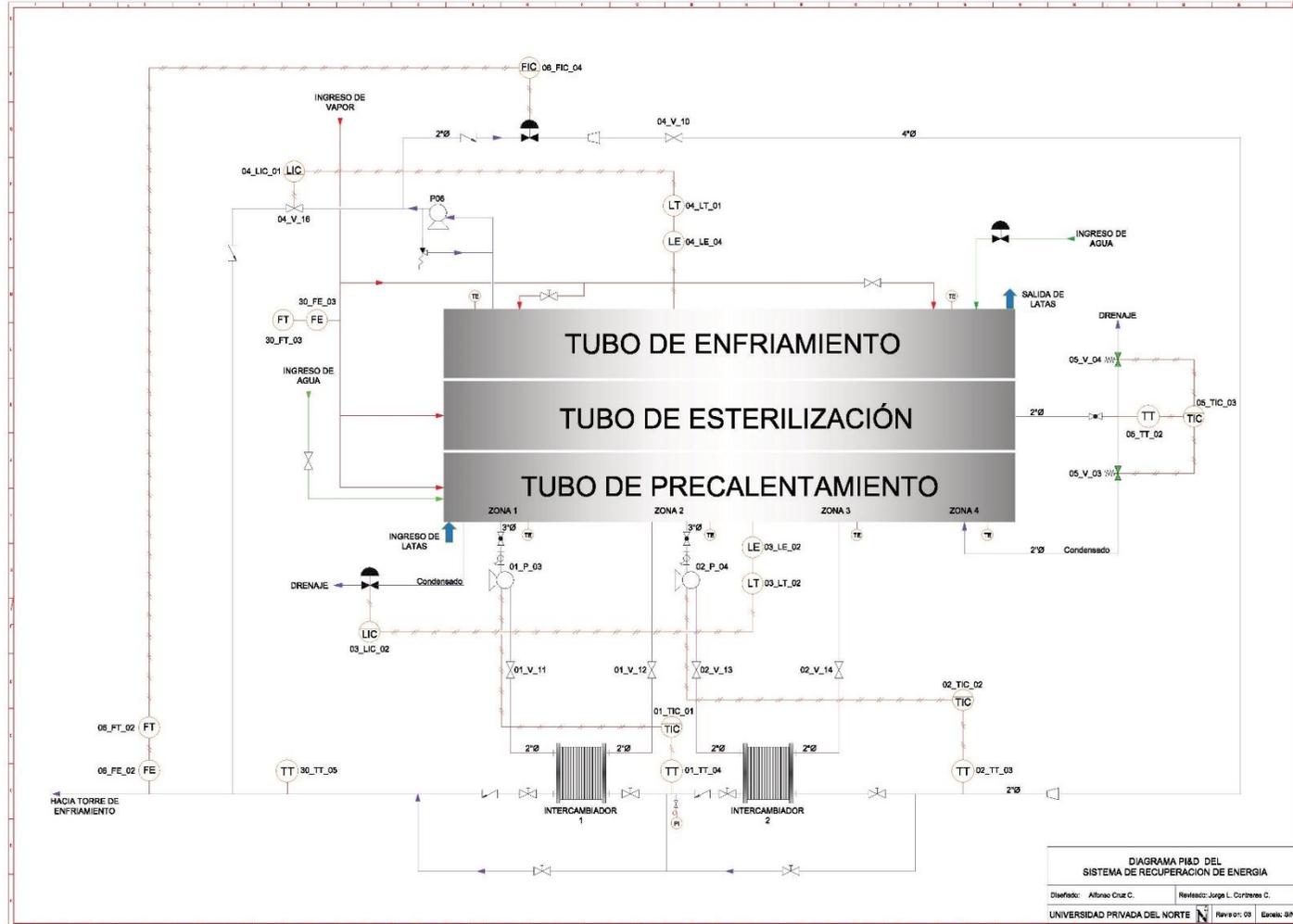
Anexo n°2: Registro de datos del consumo de vapor sin y con el sistema de recuperación encendido.



Anexo n°3: Plano mecánico del sistema de recuperación de energía



Anexo n°4: Diagrama PI&D del sistema de recuperación de energía



Anexo n°5: Esterilizador rotatorio



ANTIPLAGIO

El presente documento describe algunas frases usados en el desarrollo de esta tesis que no son plagio, ya que tiene coincidencias con frases usadas en otras investigaciones. La siguiente lista de frases son las que tiene mayor coincidencia:

- DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE ENERGIA
- SE ENCUENTRA EN LA PÉRDIDA DE AGUA EN LA
- REDUCIR LA TEMPERATURA DE AGUADE LA SALIDA DEL
- REDUCIR EL CONSUMO DE
- PARA LA TRANSFERENCIA TÉRMICA DE LOS
- EL CONSUMO DE VAPOR EN EL
- EN EL CONSUMO DE ENERGÍA
- PARA REDUCIR EL CONSUMO DE VAPOR EN LA ZONA
- LA TEMPERATURA DE REFERENCIA
- DE TRANSFERENCIA DE CALOR, Y CON
- FUNCIONAMIENTO DEL ESTERILIZADOR
- LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO
- A CONTINUACIÓN, SE MUESTRA LOS RESULTADOS OBTENIDOS
- LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE VAPOR EN EL ESTERILIZADOR

Alfonso Cruz Ccollca