

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
AUTOMÁTICO DE GENERACIÓN DE AGUA CALIENTE
PARA LIMPIEZA DE CUBETAS EN LA INDUSTRIA DE
ELABORACIÓN DE GALLETAS**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

PRESENTADA POR

Bach. CÓRDOVA CORNEJO, LUIS ERNESTO

Bach. RAMOS QUISPE, EDER ROGER

Asesor: Mg. Ing. PALOMARES ORIHUELA, RICARDO J.

LIMA-PERÚ

2019

DEDICATORIA

A mis padres, Gloria y Ernesto; mis hermanos, Nuria y Jesús; mi tía, Gladys y en memoria de mis abuelos Isabel, Luis y Maximiliano.

Luis Córdova

Dedico esta tesis a mis padres, hermana y colegas quienes me apoyaron con sus consejos y sabiduría durante todo el proceso de investigación de esta tesis.

Eder Ramos

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo y su confianza en mí, todo lo que soy es gracias a ustedes. A mi familia materna y paterna por su apoyo y cariño. A Zaira Delgado por siempre creer en mí. A Rafael Calle, Jaime Segura y Luis Tapia por su contribución a mi desarrollo profesional. A la Universidad Ricardo Palma por mi formación académica y a mi asesor Ricardo Palomares por su apoyo en la elaboración de esta tesis.

Luis Córdova

Mi sincero agradecimiento a la escuela de Ingeniería Mecatrónica y a los ingenieros asesores encargados del curso que nos apoyaron durante todo el proceso de investigación de esta tesis.

Eder Ramos

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Problematización	3
1.1.1. Problema general	4
1.1.2. Problema específico.....	4
1.2. Objetivo	5
1.2.1. Objetivo General.....	5
1.2.2. Objetivos Específicos	5
1.3. Justificación	6
1.4. Alcances y Limitaciones de la Investigación	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes de la Investigación	9
2.1.1. Antecedentes Nacionales	9
2.1.2. Antecedentes Internacionales	10
2.2. Ópticas de la Investigación.....	12
2.2.1. Hipótesis General	12
2.2.2. Hipótesis Específica	12
2.3. Selección de Variables.....	12
2.4. Bases teóricas.	13
2.4.1. Sistema automático.....	13
2.4.1.3.1. Control de dos posiciones.....	18
2.4.1.3.2. Control proporcional	20
2.4.1.3.3. Control proporcional Integral	21
2.4.1.3.4. Control proporcional derivativo	22
2.4.1.3.5. Control proporcional Integral Derivativo	24
2.4.2. Generación de agua caliente.	26
2.4.2.1.1. Transferencia de calor y sus mecanismos.....	26
2.4.2.1.1.1. Conducción	26
2.4.2.1.1.2. Convección.....	27
2.4.2.1.1.3. Radiación.....	28
CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	29
3.1. Condiciones Iniciales.....	29
3.1.1. Condiciones de operación.....	29
3.1.2. Condiciones de diseño	29
3.2. Diseño Mecánico	30
3.2.1. Calentador.....	33
3.2.2. Tanque de almacenamiento	36
3.2.3. Bomba de recirculación de sistema	41

3.2.4.	Bomba de impulsión de agua caliente	42
3.2.5.	Interconexión de equipos (tuberías)	42
3.2.6.	Estructura.....	45
3.2.7.	Ensamble de sistema en skid (paquete)	46
3.3.	Diseño eléctrico	47
3.3.1.	Diseño de tablero de control.....	47
3.4.	Diseño electrónico y de instrumentación	55
3.4.1.	Selección de equipos electrónicos	55
3.4.2.	Selección de instrumentación	59
3.4.2.1.	Instrumentación para el tanque.....	60
3.4.2.2.	Instrumentación para la bomba de agua	61
3.4.2.3.	Instrumentación para el calderín.	63
3.4.2.4.	Instrumentación para el suministro de agua de reposición.....	65
3.5.	Diseño de software	66
3.5.1.	Programación del HMI	72
3.6.	Implementación del sistema	73
3.6.1.	Instalaciones mecánicas.....	73
3.6.2.	Instalaciones eléctricas.	77
3.6.3.	Instalaciones de instrumentación.....	81
3.6.4.	Desarrollo e implementación de software	82
CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS		87
4.1.	Pruebas	87
4.1.1.	Prueba 1	87
4.1.2.	Prueba 2	87
4.1.3.	Prueba 3	87
4.1.4.	Prueba 4	88
4.1.5.	Prueba 5	88
4.2.	Resultados.....	88
4.2.1.	Resultado de la prueba 1	88
4.2.2.	Resultado de la prueba 2.....	92
4.2.3.	Resultado de la prueba 3.....	93
4.2.4.	Resultado de la prueba 4.....	94
4.2.5.	Resultado de la prueba 5.....	96
CONCLUSIONES		97
RECOMENDACIONES		98
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		99
ANEXOS.....		101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1- Variables e indicadores.....	13
Tabla N°2- Resumen de condiciones de operación	31
Tabla N°3- Cálculo de potencia de calentamiento teórica para proceso de lavado	32
Tabla N°4- Cálculo de potencia de quemador para proceso de lavado	33
Tabla N°5- Selección de caldera o calentador de agua.....	35
Tabla N°6- Cálculo de volumen de tanque de almacenamiento para proceso de lavado	36
Tabla N°7- Dimensiones generales de tanque de alimentación.....	37
Tabla N°8- Parámetros para bomba de recirculación	41
Tabla N°9- Cálculo de potencia de la bomba	41
Tabla N°10- Parámetros para bomba de impulsión.....	42
Tabla N°11- Cálculo de potencia de la bomba de impulsión	42
Tabla N°12- Cálculo de diámetro por velocidad	43
Tabla N°13- Cálculo de caída de presión	44
Tabla N°14- Cuadro de cargas	47
Tabla N°15- Selección de interruptores térmicos secundarios.....	48
Tabla N°16- Requerimientos para el PLC	56
Tabla N°17- Modelos de PLC	57
Tabla N°18- Modelos de HMI	57
Tabla N°19- Modelos de variador.....	58
Tabla N°20- Sensores y actuadores necesarios para el sistema.....	59
Tabla N°21- Sensores de Temperatura	60
Tabla N°22- Indicador de Temperatura	60
Tabla N°23- Switch de nivel	61
Tabla N°24- válvula esférica	61
Tabla N°25- Transmisor de presión.....	61
Tabla N°26 Indicador de presión - manómetro	62
Tabla N°27- Indicador de presión - Manovacúmetro.....	62
Tabla N°28- Switch de temperatura	62
Tabla N°29- Indicador de temperatura	63
Tabla N°30- Indicador de presión	63

Tabla N°31- Indicador de temperatura	63
Tabla N°32- Indicador de presión - manómetro	64
Tabla N°33- Switch de temperatura	64
Tabla N°34- Switch de flujo	64
Tabla N°35- Válvula esférica	65
Tabla N°36- Filtro tipo “Y”.....	65
Tabla N°37- válvula check	65
Tabla N°38- válvula reguladora de presión	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1- Tipos de automatización.....	14
Figura N°2- Proceso simple de un intercambiador de calor	16
Figura N°3- Control de proceso del intercambiador de calor	16
Figura N°4- Oscilación de temperatura con control on-off	18
Figura N°5- Zona neutra cercana al Set Point	19
Figura N°6- Control Proporcional	20
Figura N°7- Respuesta a un escalón del controlador PI	21
Figura N°8- Respuesta del controlador PI a un cambio de carga.....	22
Figura N°9- Control proporcional derivativo	23
Figura N°10- Control proporcional integral derivativo	24
Figura N°11- Ilustración de sistema automático de generación de agua caliente.....	30
Figura N°12- Ilustración de calentador	34
Figura N°13- Ilustración de calentador de agua	36
Figura N°14- Selección de espesor de aislamiento	40
Figura N°15- Ilustración de tanque de almacenamiento.....	40
Figura N°16- Selección de espesor de aislamiento de tuberías	44
Figura N°17- Ilustración de plataforma o base auto – portante.....	45
Figura N°18- Vista de planta de plataforma o base auto – portante.....	45
Figura N°19- Ensamble mecánico del sistema de calentamiento	46
Figura N°20- Datos eléctricos de cable NHF-80.....	48
Figura N°21- Esquema multifilar de fuerza	49
Figura N°22- Esquema multifilar de fuerza - Variadores.....	50
Figura N°23- Esquema multifilar de alimentación 220 VAC – 24 VDC.....	50
Figura N°24- Esquema multifilar de entradas digitales S7-1214C.....	51
Figura N°25- Esquema multifilar de salidas digitales S7-1214C.....	51
Figura N°26- Esquema multifilar de entradas y salidas digitales SM1223.....	52
Figura N°27- Esquema multifilar de módulo de control de variador 1.....	52
Figura N°28- Esquema multifilar de módulo de control de variador 2.....	53
Figura N°29- Esquema multifilar de señales audiovisuales.....	53
Figura N°30- Esquema multifilar de señales de entrada RTD y salida analógica	54
Figura N°31- Esquema en vista 2D de exterior de tablero de control	54

Figura N°32- Esquema de vista 2D frontal interior y frontal exterior de tablero de control.....	55
Figura N°33- Acondicionamiento de señales de transmisión.....	66
Figura N°34- Bloque de marca de emergencia.....	67
Figura N°35- Bloque de condición para temperatura	67
Figura N°36- Bloque de condición para la presión.....	68
Figura N°37- Bloque de condición para el nivel mínimo.....	68
Figura N°38- Bloque de configuración para la entrada Start.....	69
Figura N°39- Bloque de configuración para la marca Stop.....	69
Figura N°40- Bloque de activación de la válvula de suministro.....	69
Figura N°41- Bloque de desactivación de la válvula de suministro.....	70
Figura N°42- Bloque de activación de la bomba y calentador.....	70
Figura N°43- Bloque de activación de válvula de gas.....	70
Figura N°44- Bloque de seteo de marca de bomba 2.....	71
Figura N°45- Condiciones de accionamiento para la bomba dos.....	71
Figura N°46- Bloque PID.....	71
Figura N°47- Escalamiento de la válvula de gas.....	72
Figura N°48- Visualización de la página principal del HMI.....	72
Figura N°49- Visualización de la página dos del HMI.....	73
Figura N°50- Tanque – calentador.....	74
Figura N°51- Pintado de tanque – calentador.....	75
Figura N°52- Instalación mecánica de elemento calefactor.....	75
Figura N°53- Instalación mecánica de bomba y líneas de agua caliente.....	76
Figura N°54- Instalación mecánica de línea de ingreso de agua fría.....	76
Figura N°55- Vista 3D de tablero de prototipo.....	77
Figura N°56- Vista isométrica y frontal de tablero de control.....	78
Figura N°57- Instalación de riel DIN y canaletas.....	78
Figura N°58- Instalación de componentes.....	79
Figura N°59- Cableado interno.....	79
Figura N°60- Instalación de componentes en puerta de tablero.....	80
Figura N°61- Instalación de tablero.....	80
Figura N°62- Instalación de termómetro.....	81
Figura N°63- Instalación de sensor PT100.....	81

Figura N°64- Electroválvula y cableado de instrumentos.....	82
Figura N°65- Control PI y salida PWM.....	83
Figura N°66- Modo Manual – Prototipo.....	84
Figura N°67- Modo automático – Prototipo.....	84
Figura N°68- Pantalla modo manual - Prototipo.....	85
Figura N°69- Pantalla modo automático - Prototipo	85
Figura N°70- Pantalla de seguimiento de señales y control PI – Prototipo.....	86
Figura N°71- Prototipo de sistema de calentamiento.....	86
Figura N°72- Ingreso de agua al sistema	88
Figura N°73- Pantalla de sistema de calentamiento	89
Figura N°74- Proceso de calentamiento	89
Figura N°75- Corroboración de calentamiento	90
Figura N°76- Modulación PI	90
Figura N°77- Proceso de bombeo	91
Figura N°78- Cambio de Set Point	92
Figura N°79- Prueba con Set Point cambiado	92
Figura N°80- Prueba con diferentes puntos de consigna.....	93
Figura N°81- PWM de salida de potencia	93
Figura N°82- Equipo mezclador rudimentario.....	94
Figura N°83- Accionamiento de bomba de suministro	95
Figura N°84- Preparación para proceso de lavado de cubeta.....	96
Figura N°85- Lavado eficaz de cubeta	96

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en Lima – Perú durante el año 2019 en la cual participaron los bachilleres Córdova Cornejo Luis Ernesto y Ramos Quispe Eder Roger, de allí que el propósito de la investigación consistió en demostrar como un óptimo Sistema automático de generación de agua caliente repercute efectivamente en la limpieza de cubetas.

El presente estudio se justificó por cuanto posee valor teórico, utilidad práctica, por su conveniencia y en base a los beneficios netos que genera esta investigación. Así mismo, la importancia de esta investigación se enfoca en optimizar el proceso de producir agua caliente mediante la automatización y hacer más eficiente el uso de la energía.

El referencial teórico se fundamenta en el concepto de Instrumentación Industrial de Antonio Creus, quien sustenta las diferentes características de los elementos de instrumentación y así poder hacer una elección correcta. Otro referencial teórico que tuvimos en cuenta es Control Avanzado de Procesos de José Acedo Sánchez, quien sustenta las diversas teorías de control dependiendo el tipo de proceso se va emplear. Para el capítulo de pruebas el prototipo trabajó a la temperatura de 60°C igual que el diseño elaborado en la tesis y se demostró que el sistema automático de generación de agua caliente mantiene la temperatura del tanque de agua con un margen de error de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. En la prueba final se comprobó que todo el sistema implementado funcionó al 100% cumpliendo con todos los objetivos planteados y siendo un sistema seguro para el operador.

Palabras clave: Sistema automático de generación de agua caliente, limpieza de cubetas.

ABSTRACT

The present investigation was carried out in Lima - Peru during the year 2019 in which the Cordova Cornejo Luis Ernesto and Ramos Quispe Eder Roger graduates participated, hence the purpose of the investigation was to demonstrate as an optimal automatic hot water generation system Effectively affects the cleaning of cuvettes.

This study was justified because it has theoretical value, practical utility, for its convenience and based on the net benefits generated by this research. Likewise, the importance of this research focuses on optimizing the process of producing hot water through automation and making energy use more efficient.

The theoretical reference is based on the concept of Industrial Instrumentation by Antonio Creus, who supports the different characteristics of the instrumentation elements and thus be able to make a correct choice. Another theoretical reference that we took into account is Advanced Process Control by José Acedo Sánchez, who supports the various control theories depending on the type of process being used. For the test chapter, the prototype worked at a temperature of 60 ° C, just like the design elaborated in the thesis and it was demonstrated that the automatic hot water generation system maintains the water tank temperature with a margin of error of ± 1.5 ° C. In the final test, it was verified that the entire system implemented worked 100% fulfilling all the objectives set and being a safe system for the operator.

Keywords: Automatic hot water generation system, cleaning of cuvettes.

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de la presente investigación “Diseño e implementación de un sistema automático de generación de agua caliente para limpieza de cubetas en la industria de la elaboración de galletas” se consideró los siguientes antecedentes: José Abelardo Novoa Piedra en su tesis titulada “Diseño de la instalación de servicios de agua caliente en un hotel *****” , así mismo Javier Augusto Barriga Hoyle en su tesis titulada "Control y automatización de los sistemas de caldero y proceso de cocimiento para planta cervecera usando controladores lógicos programables”, finalmente la investigación de Anrango Tuquerrez Edwin Patricio en su tesis titulada “Sistema de lavado automático del tanque enfriador de leche para microempresas de almacenamiento de leche”.

Para la investigación se ha formulado el problema general de la siguiente manera: Generar agua caliente mezclando mecánicamente vapor saturado con agua fría no es la manera más eficiente de usar la energía disponible, no mantiene constante la temperatura deseada y presenta riesgos para la integridad de los operadores en el lavado de cubetas en la industria de elaboración de galletas. Interrogante que a través de la investigación se ha dado respuesta.

El motivo fundamental de la investigación considera como nuestro Sistema automático de generación de agua caliente repercute en la Limpieza de cubetas en función al mejoramiento del proceso de limpieza en las industrias galleteras. Así mismo los resultados obtenidos de las investigaciones servirán de base para incentivar en mejorar el diseño e implementar nuevos sistemas basados en otros requerimientos.

El objetivo principal es Diseñar e implementar un sistema automático de generación de agua caliente para limpieza de cubetas en la industria de la elaboración de galletas.

Así mismo para un estudio sistematizado del problema, la investigación se ha estructurado de la siguiente manera:

Capítulo I: Se expuso una introducción de la tesis, el planteamiento del problema, los objetivos y la justificación de la investigación. La problemática se basa principalmente en como muchas industrias galleteras tienen un sistema básico de generación de agua

caliente el cual trae consigo varias problemáticas como pérdida de horas de trabajo del operario al calibrar el sistema, presión de agua irregular el cual puede ocasionar daños hacia el operario y pérdida de materiales para producción de vapor.

Capítulo II: Se describieron los antecedentes relacionados con el desarrollo de esta tesis y conceptos teóricos que encuadran y sirven de guía para esta investigación. Se explicaron las bases teóricas relacionadas a sistema automático y control de procesos para aplicarlas en nuestra investigación Así mismo se describió las formas y tecnologías disponibles para la generación de agua caliente.

Capitulo III: Se describieron el diseño e implementación de todo el sistema propuesto. Se inicio con la descripción de las condiciones iniciales del sistema, luego se desarrolló el diseño mecánico, diseño eléctrico, diseño de control e instrumentación. Después se explicó como fue el proceso de implementación del sistema el cual se fue implementando por etapas para finalmente integrar todas las partes y hacer las pruebas correspondientes.

Capitulo IV: Se describieron las pruebas realizadas sobre sistema automático de generación de agua caliente para lavado de bandejas, así como el análisis de los resultados obtenidos.

Para finalizar la investigación se redactan las conclusiones, recomendaciones y se describe la referencia bibliográfica utilizada como también se consideran los anexos con información que valida la investigación realizada.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problematización

Actualmente en muchas fábricas dedicadas a la producción de galletas automatizan sus procesos para elaborar sus productos, en una etapa inicial de esta automatización se encuentra la elaboración de los distintos tipos de masa para los diferentes productos, cada masa tiene una formula diferente el cual hace que esta varíe en color, densidad, viscosidad, textura, etc. Estas masas son elaboradas en cubetas para después ser vertidas en sistema continuos de horneado. En el momento para hacer la limpieza de estas cubetas es donde el operario tiene a su disposición un sistema mecánico para generar agua caliente pero el operario tiene que calibrarlo de forma manual y el requerimiento de temperatura es variable dependiendo del tipo de masa a limpiar.

Este sistema es manual e ineficiente para el proceso de lavado de cubetas, esto se debe a que la forma común de generación de agua caliente para remoción de masa se realiza a través de un mezclador vapor – agua, el cual consta de una válvula de regulación de vapor y una válvula de regulación de agua fría, es así como se obtiene agua caliente como producto de la mezcla de vapor y agua fría. Esta regulación mecánica se realiza para obtener una presión y temperatura requerida en función al tipo de masa sobrante a remover durante el proceso de limpieza del equipamiento del proceso de la masa. La temperatura se mide a través de un termómetro ubicado en el mezclador.

Es preciso mencionar que este proceso manual hace que el operario pierda tiempo calibrando la temperatura a la que quiere llegar, así como re – calibrando cuando se cambian las características o condiciones de la masa y se tiene que cambiar la temperatura del agua.

Asimismo, el vapor se utiliza de forma directa lo que impide tener una recuperación de condensado, por ello es necesario utilizar más agua y productos químicos para recuperar el vapor perdido. Se debe evaluar las ventajas que implicaría dejar de usar vapor directo y considerar maneras más eficientes de generar agua caliente teniendo como base el costo de generación de vapor por ton/hr que se consume en la generación de agua caliente.

Además, se genera falta de estabilidad en el valor deseado de temperatura ya que la presión de vapor y el caudal de agua no tienen regulación constante y no se tiene un control adecuado en este sistema mecánico de mezcla.

También se debe tener en cuenta que las fluctuaciones en las líneas de agua fría pueden ocasionar accidentes por quemaduras por contacto con el agua caliente a muy altas temperaturas si es que fallan los sistemas de seguridad en los mezcladores de vapor – agua fría. Según el Ministerio del trabajo y promoción del empleo en su informe “Anuario estadístico del 2018” menciona que desde el mes de enero hasta diciembre se han reportado 20132 accidentes en total y se reporta 606 casos por quemaduras el cual equivale al 3,01% del total de accidentados.

En base a la información recopilada es que se busca solucionar el problema de la generación de agua caliente en esta tesis titulada “Diseño e implementación de un sistema automático de generación de agua caliente para limpieza de cubetas en la industria de la elaboración de galletas”, donde se debe buscar optimizar el proceso de generación de agua caliente para que el operario no pierda tiempo en la calibración manual, evite posibles quemaduras y la empresa ahorre su consumo de agua y vapor.

1.1.1. Problema general

Generar agua caliente mezclando mecánicamente vapor saturado con agua fría no es la manera más eficiente de usar la energía disponible, no mantiene constante la temperatura deseada y presenta riesgos para la integridad de los operadores en el lavado de cubetas en la industria de elaboración de galletas.

1.1.2. Problema específico

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad resolver los siguientes problemas específicos:

- a) La generación de agua caliente se realiza de forma mecánica, no automatizada, por lo que no es funcionalmente eficiente para garantizar los requerimientos de temperatura y presión necesarios.

- b) Se tiene que modificar la temperatura de forma manual de acuerdo con la temperatura adecuada para remover cada tipo de masa.
- c) El sistema tiene baja eficiencia debido a que el vapor usado no se recupera en forma de retorno de condensado, ya que se inyecta directamente para calentar el agua.
- d) El sistema tradicional conlleva varios riesgos para la integridad del operador al usar vapor directo como fuente motriz y de calor. Más aun cuando el mezclador no tiene elementos de protección ante fallas o condiciones inadecuadas del agua fría y vapor.

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema automático de generación de agua caliente para limpieza de cubetas en la industria de la elaboración de galletas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Diseñar un sistema automático de generación de agua caliente que garantice los valores de temperatura y presión adecuados.
- b) Diseñar un sistema automático que permita seleccionar y ajustar la temperatura de agua caliente de acuerdo con las necesidades de lavado dentro de los parámetros de operación del sistema.
- c) Diseña un sistema con una forma eficiente para poder calentar el agua requerida para el lavado de cubetas de almacenamiento de masa en la industria de elaboración de galletas.
- d) Diseñar un sistema con condiciones adecuadas de seguridad para los operadores. Que minimice el posible el acercamiento o contacto con energías peligrosas.

1.3. Justificación

En la justificación técnica se puede apreciar ver la importancia reflejada en el proceso de limpieza al momento de automatizar el proceso de generación de agua caliente y este nuevo sistema permitirá tener un control óptimo de temperatura del agua facilitando el trabajo en función a la necesidad puntual de un nivel de temperatura determinado, automatizar la forma en cómo se caliente el agua permitirá tener diversos puntos de selección de temperatura y si a esto se le agrega la posibilidad de tener posibilidad de memorizar estos puntos niveles de temperatura permitiría mejorar la eficiencia del proceso.

Esta justificación técnica a su vez lleva a una justificación social la cual repercute en garantizar condiciones de trabajo seguras para los operarios evitando que puedan sufrir quemaduras por agua a muy altas temperaturas. Un sistema manual de regulación tiene mucha más probabilidad de incidencia de accidentes que un sistema automático, controlado y con dispositivos de seguridad.

En la justificación económica se tiene que la importancia de esta máquina nos permitirá el ahorro de costos operativos y de mantenimiento de un sistema tradicional mecánico - manual. Asimismo, se ahorraría en costo de hora – hombre al disminuir el tiempo del proceso de lavado de las cubetas de preparación de masa.

La importancia de esta investigación radica en optimizar el proceso de producir agua caliente mediante la automatización y hacer más eficiente el uso de la energía.

1.4. Alcances y Limitaciones de la Investigación

La presente tesis contempla el diseño e implementación de un sistema automático de generación de agua caliente para limpieza de cubetas en la industria de la elaboración de galletas, pero es necesario mencionar que para el capítulo de pruebas y resultados se hizo una implementación en prototipo debido al alto costo del diseño planteado ya que este está orientado hacia una aplicación industrial, sin embargo el prototipo implementado demuestra cumplir con nuestros objetivos planteados en esta tesis.

Este sistema está conceptualizado a ser compacto, seguro y flexible en las aplicaciones de limpieza de cubetas. Su aplicación está orientado a plantas que disponen de Gas Natural.

Este sistema está conformado por:

a) Sistema de control

- Un PLC el cual hace el control, además de monitorear los sensores y controlar los actuadores.
- HMI para interacción con el usuario.
- Instrumentación de control.
- Actuadores

b) Sistema de calentamiento

- Calderín a Gas Natural
- Instrumentación de seguridad.

c) Sistema de bombeo

- Bomba de impulsión
- Variador de frecuencia
- Manguera y pistola para lavado de baja presión.

d) Plataforma metálica y soportes

e) Conexión mecánico y eléctrico entre sistemas.

Las limitaciones que se presentaron fueron las siguientes:

- Para realizar este proyecto de tesis necesitamos conocimientos de ingeniería relacionada a la termodinámica, funcionamiento de sensores de presión y temperatura, ingeniería de control, utilización de software CAD.
- Otra de las limitaciones que tuvo esta investigación fue la adquisición de componentes ya que los diseñados en esta tesis son de alta calidad y por lo tanto de alto presupuesto económico, esto trae como consecuencia que tuvimos que desarrollar un prototipo, pero respetando nuestras variables y objetivos a cumplir.
- Para la limitación espacial se considera que el diseño de nuestra máquina deberá ocupar el mínimo espacio posible.
- Para la limitación temporal esta tesis de grado comprende el periodo de mayo del 2019 a noviembre del 2019.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Mantener la inocuidad en los procesos de elaboración de alimentos procesados es parte fundamental de las buenas prácticas de manufactura en la industria alimentaria. A fin de mantener un nivel adecuado de higiene en el proceso de elaboración de la masa para la elaboración de galletas se debe lavar los recipientes o cubetas con agua caliente y un agente de limpieza, de esta manera se remueve los restos de masa y se mantiene el nivel de inocuidad necesario.

Para obtener agua caliente tradicionalmente se usa vapor saturado y agua fría que por su paso a través de un mezclador permite producir agua caliente, en este sistema mecánico no se recupera condensado ya que el vapor se inyecta directamente.

Hoy en día hay diversas formas disponibles de generar agua caliente, pueden ser a través de calderines de con quemadores a GLP o GN, calentadores con resistencias eléctricas, intercambiadores vapor – agua, etc.

La aplicación de la automatización permite mejorar la eficiencia de los procesos y el uso efectivo de la energía disponible permiten alcanzar muchas mejoras productivas y económicas.

Diversas tesis nacionales e internacionales se han desarrollado hacia automatizar procesos, así como a la aplicación técnicas modernas en la industria alimentaria, específicamente en el área de la seguridad sanitaria. A continuación, presentamos las tesis afines a nuestro proyecto de tesis.

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Nacionales

Novoa, J (2015) en su tesis se resaltan las siguientes conclusiones:

El sistema de producción de agua caliente seleccionado para el presente proyecto es un intercambiador – acumulador, pues mantiene los niveles de temperatura y presión en valores establecidos, tiene bajo nivel de ruido, es eficiente, y los costos

de instalación, funcionamiento, operación y mantenimiento son menores que los de cualquier otro tipo de sistema.

La potencia del equipo de producción de agua caliente es de 200 HP (150 kW) con lo cual satisface el requerimiento de agua caliente que según normas debe estar a 50°C con un flujo de 1 l/s. La capacidad del tanque de almacenamiento es de 5000 litros de acuerdo a lo recomendado en normas. Con estos equipos seleccionados se garantiza que la distribución de agua caliente sea a las condiciones establecidas en el Reglamento Nacional de Edificaciones. (P.89)

Barriga, J (1995) en su tesis menciona como parte de sus conclusiones: “Otro factor que impulsa a las empresas industriales nacionales a modernizarse, es mantener o mejorar la calidad de sus productos al menor costo. Optando por ello, hacia la automatización de sus procesos”. (P.185)

Mendoza, R (2017) en su tesis menciona como parte de sus conclusiones: “Las premisas de diseño nos han permitido identificar las variables de control y los instrumentos y actuadores necesarios para llevar a cabo el proceso de automatización”. (P.118)

Balcázar, J y Tesén, C (2015) en su tesis menciona como parte de sus conclusiones: “Con la implementación del sistema de control propuesto se logra optimizar el proceso, garantizando un aumento en la producción de 8 toneladas más por mes haciendo más productivo el molino”. (P.85)

2.1.2. Antecedentes Internacionales

Saladamando, L (2018) en su tesis se resaltan las siguientes conclusiones:

Debido a que el ahorro de un nuevo sistema viene dado por los gastos evitados de energía en el consumo de agua caliente por tener un sistema más eficiente es que los sistemas más eficientes son más apropiados para hogares con alto consumo de agua ya que proveen menores costos a lo largo de todo su ciclo de vida.

Así mismo se menciona que: Otro factor a tener en cuenta que ha sido extensamente estudiado y se le denomina “Efecto rebote” es que en un hogar luego de un cambio

de tecnología a un sistema más eficiente posiblemente pasen a aumentar su consumo de agua caliente, disminuyendo por tanto el ahorro económico proyectado a cambio de una mejora en el confort. Esto es un escenario factible debido a que en la actualidad los costos de generación de agua caliente son significativos y muchas familias reducen su confort para evitar altos gastos y además muchas veces se tienen calefones eléctricos de baja capacidad que generan una reducción del confort si la cantidad de integrantes de la familia no es acorde a la capacidad del equipo. (p.123)

Arellano, J (2011) en su tesis se resaltan las siguientes conclusiones:

El PLC en las maquinarias simplifica el mantenimiento, disminuye las paradas por correcciones o cambios de dispositivos eléctricos, y una de las ventajas más importantes es que se puede tener un control y monitoreo de las acciones que se están realizando y poder llevar un registro de datos. También existe la posibilidad de crear gráficos de los diferentes parámetros eléctricos utilizando la PC un analizador industrial u otro elemento de monitoreo y control. Con la automatización de la máquina se mejoran los costos de producción en dos aspectos; el primero, antes debía ser operada constantemente por dos personas lo cual ahora no es necesario y segundo que debía ser utilizada por personal con experiencia en su manejo debido a los riesgos, ahora puede ser utilizada por cualquier persona con los conocimientos y precauciones básicas de operación. (P.83)

Anrago, E (2018) en su tesis sus conclusiones más importantes manifiestan que:

El correcto diseño de los procesos de limpieza evita contaminación de la leche en los tanques de enfriamiento y para eso se tiene parámetros primordiales como son: tiempo, temperatura, velocidad de agua y la concentración de líquidos. La circulación de agua en cada una de las etapas es un promedio de 1 minuto. En la etapa con solución alcalina y ácida, después de circular el agua se dejó un tiempo de 5 minutos; con la finalidad de que el vapor actúe removiendo todos los residuos de la leche en el tanque; para que con la etapa de enjuague intermedio y final respectivamente sea más fácil de eliminar los residuos grasos y las proteínas. Los sistemas de limpieza que se utiliza son: Limpieza manual que algunas de las

microempresas de leche lo realizan todavía en la actualidad, con la desventaja que de que el trabajador debe entrar y realizar la limpieza, y el resultado del lavado depende mucho del estado de ánimo. Los sistemas CIP que tienen muchas ventajas como: optimiza y ahorro el consumo de agua, la limpieza automática en lugares inaccesibles evita la manipulación de los detergentes químicos, etc. (P.77)

2.2. Ópticas de la Investigación

2.2.1. Hipótesis General

El adecuado diseño de un sistema automático de generación de agua caliente para limpieza de cubetas permitirá optimizar la efectividad del proceso de lavado, mejorar la eficiencia en el consumo de energía y aumentar el nivel de seguridad para el usuario.

2.2.2. Hipótesis Específica

- a) La correcta selección de equipos, instrumentos, PLC y accesorios determinará la adecuada automatización del sistema de generación de agua caliente que garantice los parámetros de temperatura, presión y flujo requeridos.
- b) El desarrollo del tipo de control adecuado para este sistema, así como una programación eficiente permitirá disponer de diferentes niveles de temperatura para optimizar el proceso de lavado.
- c) El correcto análisis y selección del tipo de energía más adecuado para el proceso de calentar agua permitirá ser eficientes en el uso de los recursos energéticos.
- d) La correcta selección y uso de elementos de seguridad en el sistema propuesto permitirá asegurar un alto nivel de seguridad para los operadores.

2.3. Selección de Variables

Para demostrar y comprobar la hipótesis, se tiene las variables y los indicadores que a continuación se indican en la tabla N.º 1:

Tabla N.º 1: Variables e indicadores

VARIABLES	INDICADORES
Variable 1: Sistema automático de generación de agua caliente	Elementos del sistema automático Precisión en el sistema de control
Variable 2: Limpieza de cubetas	Nivel de temperatura Nivel de Presión

Fuente: Elaboración propia

2.4. Bases teóricas.

2.4.1. Sistema automático.

Un sistema automático puede definirse como un sistema en que la intervención del operador no es necesaria de forma permanente. En consecuencia, se puede desglosar que un sistema automático es un sistema que tiene un control automático. A continuación, se mencionan algunos alcances al respecto:

Todo sistema de control automático a nivel de industria está relacionado al control de un proceso. Al respecto (Acedo, J, 2003, p. 159) menciona lo siguiente:

Un proceso es un bloque que se identifica porque tiene una o más variables de salida de las cuales es importante conocer y mantener sus valores. Como consecuencia estas variables han de ser controladas actuando sobre otra serie de variables denominadas manipuladas.

Un sistema de control automático mide una variable y actúa de una determinada para que esa variable se mantenga en un valor deseado o de referencia. Un sistema de control no automático, al actuar en lazo abierto, puede hacer cambiar el valor de la variable pero no llevarla al valor de referencia.

Con respecto a la automatización y su influencia en la industria (Pacheco, O, 2009, P. 2) indica lo siguiente:

La historia de la automatización industrial está caracterizada por períodos de constantes innovaciones tecnológicas. Esto se debe a que las técnicas de automatización están muy ligadas a los sucesos económicos mundiales.

En un contexto industrial se puede definir la automatización como una tecnología que está relacionada con el empleo de sistemas mecánicos-eléctricos basados en computadoras para la operación y control de la producción.

Hay tres clases muy amplias de automatización industrial que podemos ver el grafico N.º 1: automatización fija, automatización programable, y automatización flexible.

La automatización fija se utiliza cuando el volumen de producción es muy alto, y por tanto se puede justificar económicamente el alto costo del diseño de equipo especializado para procesar el producto, con un rendimiento alto y tasas de producción elevadas. Además de esto, otro inconveniente de la automatización fija es su ciclo de vida que va de acuerdo con la vigencia del producto en el mercado.

La automatización programable se emplea cuando el volumen de producción es relativamente bajo y hay una diversidad de producción a obtener. En este caso el equipo de producción es diseñado para adaptarse a la variación de configuración del producto; esta adaptación se realiza por medio de un programa (Software).

Por su parte la automatización flexible es más adecuada para un rango de producción medio. Estos sistemas flexibles poseen características de la automatización fija y de la automatización programada. Los sistemas flexibles suelen estar constituidos por una serie de estaciones de trabajo interconectadas entre sí por sistemas de almacenamiento y manipulación de materiales, controlados en su conjunto por una computadora. (Pacheco, O, 2009, P. 2)

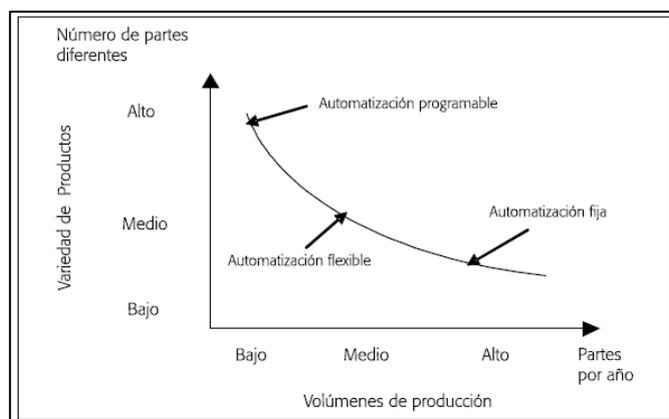


Figura N.º 1: Tipos de automatización
Fuente: Artículo “Aspectos Generales de la Automatización industrial del sector farmacéutico”

2.4.1.1. Tipos de automatización.

Asimismo, se puede tener en consideración que existen diferentes tipos de automatización.

Existen cinco formas de automatizar en la industria moderna, de modo que se deberá analizar cada situación a fin de decidir correctamente el esquema más adecuado. Los tipos de automatización son:

- Control Automático de Procesos
- El Procesamiento Electrónico de Datos
- La Automatización Fija
- El Control Numérico Computarizado
- La Automatización Flexible.

El Control Automático de Procesos, se refiere usualmente al manejo de procesos caracterizados de diversos tipos de cambios (generalmente químicos y físicos); un ejemplo de esto lo podría ser el proceso de refinación de petróleo.

El Proceso Electrónico de Datos frecuentemente es relacionado con los sistemas de información, centros de cómputo, etc. Sin embargo, en la actualidad también se considera dentro de esto la obtención, análisis y registros de datos a través de interfaces y computadores.

La Automatización Fija, es aquella asociada al empleo de sistemas lógicos tales como: los sistemas de relevadores y compuertas lógicas; sin embargo, estos sistemas se han ido flexibilizando al introducir algunos elementos de programación, tal es el caso de los Controladores Lógicos Programables PLC'S. (Pacheco, O, 2009, p. 3)

2.4.1.2. Control de procesos.

Proceso desde el punto de vista de producción, se conoce generalmente como un lugar donde materia, y muy a menudo energía, son tratados para dar como resultado un producto deseado o establecido. Por ejemplo, son procesos de producción: reactores, hornos, intercambiadores de calor, etc. La Figura N° 2 muestra, de forma simplificada, un intercambiador de calor.

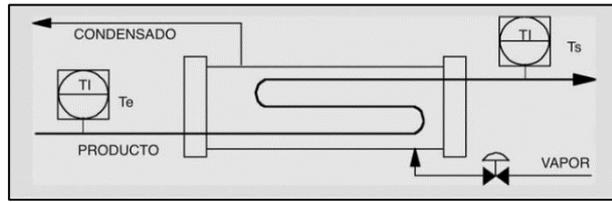


Figura. N°2: Proceso simple de un intercambiador de calor

Fuente: Control avanzado de procesos, J. Sánchez

Desde un punto de vista de control, su significado es más específico. Un proceso es un bloque que se identifica porque tiene una o más variables de salida de las cuales es importante conocer y mantener sus valores. Como consecuencia estas variables han de ser controladas actuando sobre otra serie de variables denominadas manipuladas. Con el fin de simplificar se va a tratar un proceso con una sola variable controlada, siendo necesario otra variable manipulada para mantener la primera en su valor de referencia. (Sanchez, J, 2003, p. 153)

En la figura N°3 se muestra el sistema de control de proceso de intercambio de calor anterior con los principales elementos que lo componen. Como puede verse en el circuito o lazo de control básico con realimentación está formado por los bloques siguientes: Proceso, Transmisor, Controlador y Elemento Final de Control.

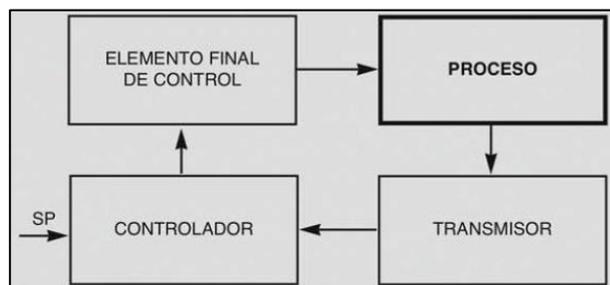


Figura. N°3: Control de proceso del intercambiador de calor.

Fuente: Control avanzado de procesos, J. Sánchez

Las variables básicas en los procesos industriales son: Caudal, Presión, Nivel y Temperatura. Existe otra variable asociada a la calidad de los productos detectada por medio de analizadores. Cada variable tiene su propia característica, independiente de la aplicación particular. El conocimiento de estas características es muy útil a la hora de diseñar o ajustar el lazo de control. El caudal es la variable

con mayor velocidad de respuesta mientras que la calidad o composición es la variable con mayor retardo. Las restantes variables se comportan con retardos, de menor a mayor, en el orden que se han relacionado. (Sanchez, J, 2003, p. 154)

El control se realiza según el lazo de control típico formado por el proceso (por ejemplo, tanque, tuberías y bombas en el caso de nivel, e intercambiador de calor y serpentín en el caso de control de temperatura), el transmisor, el controlador y la válvula de control. El proceso consiste en un sistema que ha sido desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado: tratamiento del material mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación. Los procesos revisten las formas más diversas, desde las más simples hasta las más complejas. (Creus, A, 2010, p. 499)

2.4.1.3. Métodos o formas de control.

Aunque existen variantes sobre alguno de los métodos de control que se describen. los más utilizados son los siguientes:

- Control de dos posiciones.
- Control proporcional (P).
- Control proporcional con acción integral (PI).
- Control proporcional con acciones integral y derivativa (PID).

Antes de pasar a describir los diferentes modos de control, conviene mencionar que el control PID es la técnica de control básico más utilizada en la industria, donde más de un 90 % de los lazos de control utilizan la acción proporcional combinada con acción integral. Existe otro tipo de lazos que, debido a sus características dinámicas de retardo, utilizan además la acción derivativa, como ocurre en general con las temperaturas.

En los apartados siguientes se va a describir el comportamiento del lazo de control PID denominado «ideal», dada su independencia entre cada una de las acciones, de forma que la salida final de control es la suma de los efectos de cada una de ellas. Este tipo de algoritmo es el descrito por la Asociación de Instrumentación. Sistemas y Automatización (ISA). (Sanchez, J, 2003, p. 175)

2.4.1.3.1. Control de dos posiciones.

Comúnmente llamado control Todo-Nada, también Abierto-Cerrado, On-Off etc. Como su nombre indica, en el control de dos posiciones el elemento final de control solo ocupa una de las dos posiciones posibles. Para llevar a cabo este tipo de control se sustituyen las válvulas manuales por automáticas y se montan actuadores de solenoide sobre las mismas, operándose por medio de pulsadores desde un lugar centralizado. Las válvulas solamente podrán asumir dos estados:

- Totalmente abiertas (ON).
- Totalmente cerradas (OFF).

La forma de control disponible para el operador se denomina dos posiciones o control Todo-Nada. Se supone por el momento que el nivel se mantiene constante y que el objetivo es controlar la temperatura en un valor deseado o punto de consigna de 100 °C. El operador compara la lectura del indicador con el valor deseado o de referencia que mantiene en la mente, y adopta una estrategia de control que puede ser denominada forma de control. La forma o método más obvio será cortar totalmente el vapor, cerrando la válvula «A», cuando la temperatura sobrepase los 100 °C y suministrar todo el vapor abriendo esta válvula cuando la temperatura disminuya por debajo de los 100 °C. La temperatura tendrá una oscilación similar a la que aparece en la Figura 4, típica de esta forma de control puesto que, en un momento determinado, se suministra toda la energía disponible y en el momento siguiente se deja de suministrar. (Sanchez, J, 2003, p. 177)

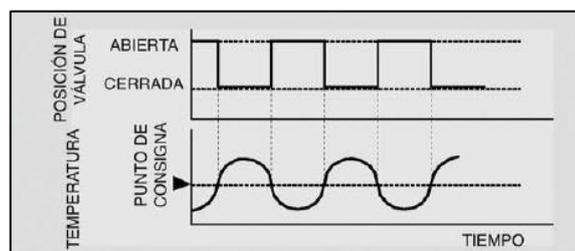


Figura. N°4: Oscilación de temperatura con control on-off

Fuente: Control avanzado de procesos, J. Sánchez

El intercambio de calor no se realiza instantáneamente, sino que transcurre un tiempo para que la energía se transfiera al líquido en el tanque o deje de transferirse. Como consecuencia, la temperatura oscilará en un rango de valores por encima y por debajo de los 100 °C. La amplitud de la oscilación depende fundamentalmente del retardo (LAG) del proceso y la atención que el operador preste para determinar el momento en que realiza el cambio de posición de la válvula.

Con el fin de evitar que la válvula este abriendo y cerrando muy a menudo, se puede dejar una zona neutra alrededor del Set Point. De forma gráfica la acción del control de dos posiciones con zona neutra puede verse en la Figure N.º 5. Mientras la temperatura se encuentre dentro de la zona, la válvula no cierra si la temperatura está subiendo o no abre si está bajando.

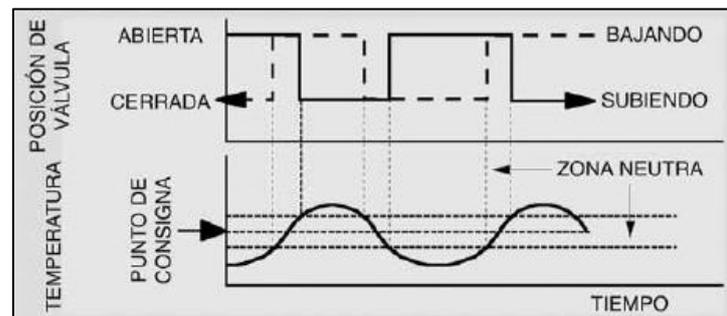


Figura. N°5: Zona neutra cercana al Set Point

Fuente: Control avanzado de procesos, J. Sánchez

Sin tener en cuenta la zona neutra, la forma de control Todo-Nada puede expresarse matemáticamente de la forma siguiente:

$$E = SP - PV$$

Si $PV > SP$ la salida será igual a 0 %

Si $PV < SP$ la salida será igual a 100 %

Siendo:

E = Error

SP = Punto de Consigna

PV = Variable de Proceso

La posición de válvula (V) será, por tanto: $V = f(\text{signo } E)$

- CERRADA cuando E es negativo
- ABIERTA cuando E es positivo (Sanchez, J, 2003, p. 178)

2.4.1.3.2. Control proporcional

En el sistema de posición proporcional existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, la válvula se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación. O, en otras palabras, la posición de la válvula es una copia inversa de la variable controlada.

En la Figura 6 puede verse la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de consigna es 50 °C y cuyo intervalo de actuación es de 0-100 °C. Cuando la variable controlada está en 0°C o menos, la válvula está totalmente abierta; a 100 °C o más está totalmente cerrada, y entre 0 y 100°C la posición de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada. Por ejemplo, a 25 °C está abierta en un 75% y a 50 °C en un 50%.

Ganancia, que es la relación entre la variación de la señal de salida del controlador a la válvula de control y la variación de la señal de entrada procedente del elemento primario o del transmisor. Por ejemplo, una ganancia de 2 seleccionada en un controlador de temperatura, con señal de entrada procedente de un transmisor de 0-100 °C, significa que ante un aumento en la temperatura del proceso de 40 °C a 60 °C (20% de la escala de 0-100 °C), la señal de salida a la válvula de control cambiará un 40% ($2 \times 20\%$), es decir, que si la válvula estaba en el 60% de su carrera pasará al 20% (o sea, cerrará del 60% al 20%, lo que equivale a un cambio en su posición del 40%). (Creus, A, 2010, p. 499)

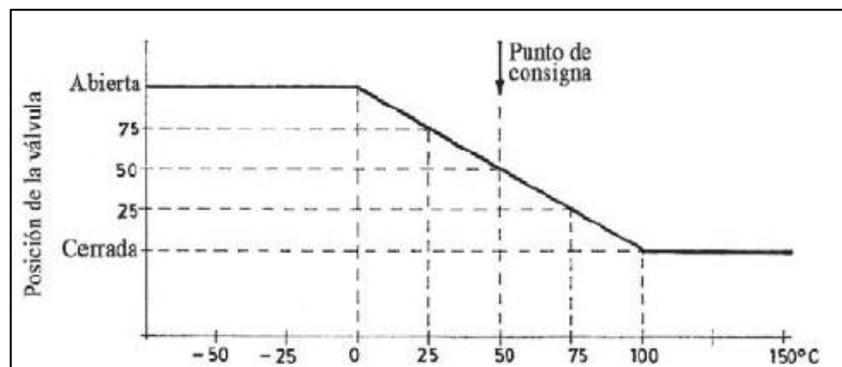


Figura. N°6: Control Proporcional

Fuente: Instrumentación industrial, A. Creus

2.4.1.3.3. Control proporcional Integral

El control integral actúa cuando existe una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción de la proporcional tal como se ve en la figura N.º 7

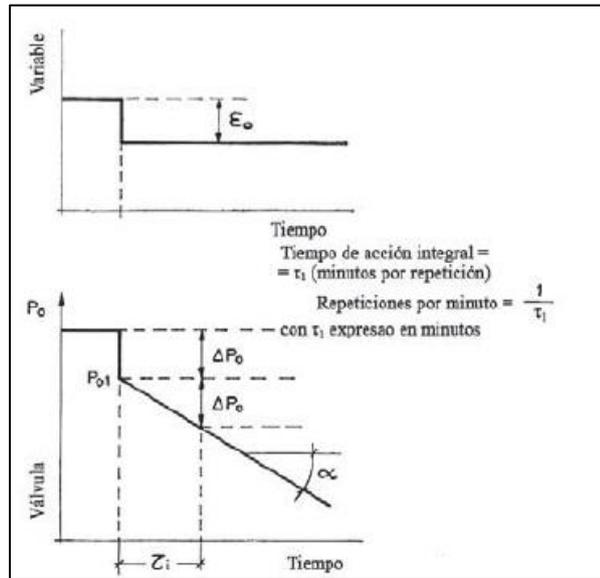


Figura. Nº7: Respuesta a un escalón del controlador PI

Fuente: Instrumentación industrial, A. Creus

Se caracteriza por el llamado tiempo de acción integral en minutos por repetición (o su inversa repeticiones por minuto) que es el tiempo en que, ante una señal en escalón, la válvula repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional. Como esta acción de control se emplea para obviar el inconveniente del offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la acción proporcional, sólo se utiliza cuando es preciso mantener un valor de la variable que iguale siempre al punto de consigna.

Si en un lazo de control de temperatura de margen 0-100°C, de ganancia 2 (banda proporcional 50%), el tiempo de acción integral es de 1 minuto/repetición y la temperatura está estabilizada en el punto de consigna de 50°C, un nuevo punto de consigna de 60°C (que representa el 10% de variación respecto a la escala del instrumento) dará lugar a un movimiento inmediato del índice de la señal a la válvula de control del 20% (debido a la acción proporcional) y, después, este índice se desplazará a

una velocidad lenta (a causa de la acción integral), tal que al cabo de 1 minuto habrá repetido el 20% del movimiento inicial provocado por la acción proporcional. (Creus, A, 2010, p. 511)

En la figura 8 puede verse las curvas de la acción proporcional + integral cuando hay un cambio de carga en el proceso.

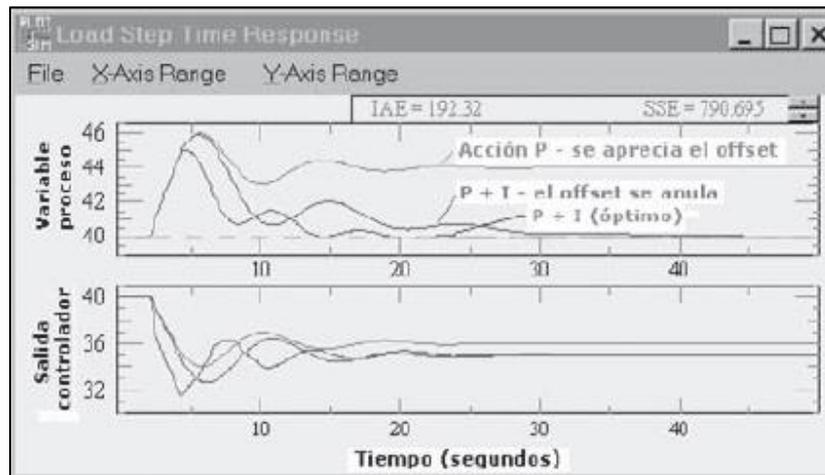


Figura. N°8: Respuesta del controlador PI a un cambio de carga

Fuente: Instrumentación industrial, A. Creus

Una característica particular que presentan los controladores de acción proporcional + integral, en la puesta en marcha del proceso, es el rebasamiento del punto de consigna. Sea por ejemplo el caso del control de temperatura de un horno. El rebasamiento del punto de consigna se presenta porque la unidad integradora empieza a actuar cuando la temperatura llega al límite inferior de la banda proporcional, y continúa actuando mientras la temperatura no alcance el punto de consigna. Durante todo este tiempo, la acción integral ha elevado ya la señal a la válvula de control, provocando una aportación de calor excesiva. Cuando la temperatura rebasa el punto de consigna, se invierte el signo de la señal de desviación, y el integrador hace disminuir la señal a la válvula de control, en un valor conveniente para eliminar el offset. (Creus, A, 2010, p. 512)

2.4.1.3.4. Control proporcional derivativo

En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, el control derivativo actúa cuando existen cambios en la variable. Esta actuación es

proporcional a la pendiente de la variable, es decir, a su derivada. En la figura 9 puede verse el movimiento de la válvula de control ante los cambios en la variable provocados por un cambio de carga.

La acción derivada se caracteriza por el llamado tiempo de acción derivada en minutos de anticipo que es el intervalo durante el cual, la variación de la señal de salida del controlador, debida a la acción proporcional, iguala a la parte de variación de la señal debida a la acción derivativa cuando se aplica una señal en rampa al instrumento.

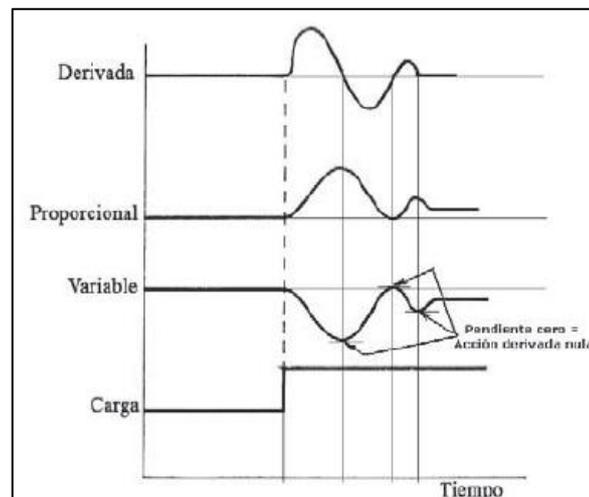


Figura. N°9: Control proporcional derivativo

Fuente: Instrumentación industrial, A. Creus

La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión en la variable controlada. No obstante, un tiempo de acción derivada demasiado grande, da lugar a que la variable cambie demasiado rápidamente y rebase el punto de consigna con una oscilación que puede ser amortiguada o no. Es decir, una acción derivada demasiado grande puede dar lugar a inestabilidades en el proceso. Un tiempo de acción derivada que sea demasiado pequeño permite que la variable esté oscilando demasiado tiempo con relación al punto de consigna. El tiempo óptimo de acción derivativa es aquél que retorna la temperatura al punto de consigna con el mínimo de oscilaciones.

La aplicación de la acción derivada permite aumentar la ganancia del controlador durante los cambios de la variable, lo que compensa parte del retardo inherente al proceso y permite el uso de una ganancia más grande (banda proporcional más pequeña) con un

offset menor. La acción derivada puede ayudar a disminuir el rebasamiento de la variable durante el arranque del proceso y puede emplearse en sistemas con tiempos de retardo considerables porque permite una recuperación rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso. (Creus, A, 2010, p. 514)

2.4.1.3.5. Control proporcional Integral Derivativo

La unión en un controlador de las tres acciones proporcional, integral y derivativa (PID) forma un instrumento controlador que presenta las siguientes características, donde suponemos que se presenta un cambio de carga por aumento de la demanda de agua caliente, ver figura N.º 10.

La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna. La señal P (proporcional) mueve la válvula siguiendo fielmente los cambios de temperatura multiplicados por la ganancia. Un aumento de la ganancia conduce a una mayor acción proporcional y un control más rápido.

La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna. La señal I (integral) va sumando las áreas de diferencia entre la variable y el punto de consigna, repitiendo la señal proporcional según su T_i (minutos/repetición). Una disminución del tiempo de acción integral proporciona una mayor acción integral y un control más rápido.

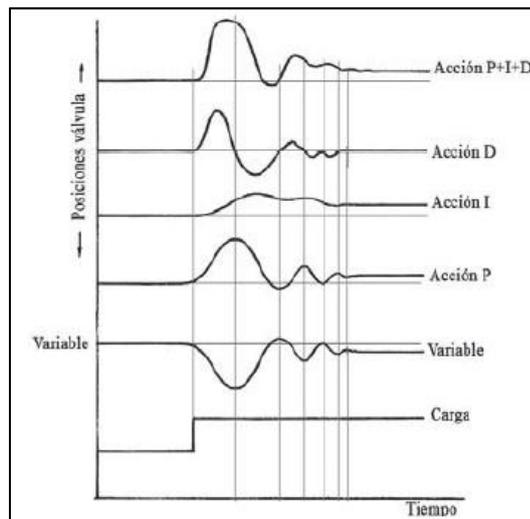


Figura. N°10: Control proporcional integral derivativo

Fuente: Instrumentación industrial, A. Creus

La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada. La señal D (derivada) es la pendiente (tangente) de la curva descrita por la variable, con lo que anticipa la posición de la válvula en el tiempo debida a la acción proporcional según el valor de Td (minutos de anticipo). Un aumento del tiempo de acción derivada incrementa la acción derivada y proporciona un control más rápido (Creus, A, 2010, p. 515)

2.4.1.4. Función de transferencia y diagrama de bloques

El concepto función de transferencia es uno de los más importantes en el estudio de la dinámica de proceso y del control automático de proceso, por lo que es recomendable considerar aquí algunas de sus propiedades y características.

La función de transferencia ya se definió como la relación de la transformada de Laplace de la variable de salida sobre la transformada de Laplace de la variable de entrada. La función de transferencia se representa generalmente por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K(a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + 1)}{(b_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + 1)} \quad (1)$$

Donde:

G(s) = representación general de una función de transferencia

Y(s) = transformada de Laplace de la variable de salida

X(s) = transformada de Laplace de la función de forzamiento o variable de entrada

K, as y bs = constantes.

En la ecuación N°1 se muestra la mejor manera de escribir la función de transferencia; cuando se escribe de esta manera, K representa la ganancia del sistema y tiene como unidades las de Y(s) sobre las unidades de X(s). Las otras constantes, las a y las b, tienen como unidades (tiempo), donde i es la potencia de la variable de Laplace, s, que se asocia con la constante particular, lo que da como resultado un término sin dimensiones dentro del paréntesis, ya que la unidad de s es 1/tiempo.

La función de transferencia define completamente las características de estado estacionario y dinámico, es decir, la respuesta total de un sistema que se describe mediante una ecuación diferencial lineal. Ésta es característica del sistema, y sus términos determinan si el sistema es estable o inestable y si su respuesta a una entrada no oscilatoria es oscilatoria o no. Se dice que el sistema o proceso es estable cuando su salida se mantiene limitada (finita) para una entrada limitada. (Smith, C, 1991, p. 104)

2.4.2. Generación de agua caliente.

2.4.2.1. Formas de producir agua caliente

Existen diversas formas de calentar agua. Para elevar la temperatura del agua debe haber una transferencia de energía (calor) hacia esta para elevar su temperatura al nivel deseado.

2.4.2.1.1. Transferencia de calor y sus mecanismos

El calor es la forma en cómo se transmite energía de un sistema a otro, el resultado se puede apreciar en como un sistema baja su temperatura y otro sistema sube su temperatura.

La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja. (Cengel, Y, 2007, p. 17)

2.4.2.1.1.1. Conducción

La conducción se puede interpretar como la transferencia de energía en un mismo medio como la interacción entre las partículas más energizadas hacia las adyacentes menos energizadas.

La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las

vibraciones de las moléculas en una redícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. (Cengel, Y, 2007, p. 17)

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. (Cengel, Y, 2007, p. 18)

La conducción está dominada por la ley de Fourier la cual determina que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura:

$$q = KA \frac{dT}{dx} \text{-----}(2)$$

En donde “ q ” es la rapidez de transferencia de energía térmica y $\partial T/\partial x$ es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. A la constante positiva “ k ” se le llama la conductividad térmica del material y el signo menos se inserta para que se satisfaga el segundo principio de la termodinámica; es decir, el calor deberá fluir de mayor a menor temperatura. (Rolando, A, 2016, p. 6)

2.4.2.1.1.2. Convección

La convección se puede interpretar como la transferencia de energía en forma de calor de un punto a otro de un fluido mediante el movimiento o transporte de masa.

Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia. (Cengel, Y, 2007, p. 25)

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de

temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como

$$q = h(T_{sup} - T_{\infty}) \text{-----}(3)$$

en donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W/m^2 \cdot ^\circ C$ o $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. Note que en la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. (Cengel, Y, 2007, p. 26)

2.4.2.1.1.3. Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra.

En los estudios de transferencia de calor es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica. (Cengel, Y, 2007, p. 27)

CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se realizó el diseño del sistema teniendo como base las condiciones iniciales. Este diseño se realizó con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en función a las variables señaladas.

3.1. Condiciones Iniciales

3.1.1. Condiciones de operación.

- Temperatura mínima de ingreso de agua: 20 grados centígrados
- Flujo mínimo de ingreso: 3 GPM
- Presión mínima de ingreso: 15 PSI
- Temperatura de salida: 40 a 60 °C
- Flujo de salida máximo: 4.63 GPM por Pistola
- Presión de salida: 60 PSI
- Modo manual - automático
- Modo Pre – programable, modo Manual - Automático
- Autonomía mínima de 35 min

3.1.2. Condiciones de diseño

Diseño mecánico

- El sistema tiene un área no mayor a 8 m² y su lado corto no deberá ser mayor a 2.0 metros.
- Los perfiles de la estructura están conformados por acero que debe ser fácil de soldar y atornillar, debe tener una densidad de 7860 kg/m³.

Diseño eléctrico

- El suministro eléctrico será de 220 VAC 3 fases.
- El voltaje de control será 24 VDC.

Diseño electrónico e instrumentación

- El controlador deberá proveer mínimo 8 entradas y salidas digitales y 4 entradas y salidas analógicas.
- El sistema deberá incorporar un HMI para interacción con el usuario.
- Medición de temperatura con una precisión mínima de 0.5 °C.
- El sistema deberá contar con instrumentación de seguridad.
- Control de nivel para un tanque de almacenamiento de agua.

Diseño de software

- La programación deberá garantizar el suministro de agua a la temperatura elegida dentro de los parámetros de operación.
- Debe indicar fallas y alarmas del sistema.
- Debe considerar varias temperaturas y presiones preprogramadas.
- Deberá contemplar un modo manual y automático de funcionamiento.

3.2. Diseño Mecánico

En esta sección se desarrolló el dimensionamiento y selección de los elementos mecánicos del sistema. En la figura N° 11 se pudo apreciar el diseño mecánico general del sistema automatizado.

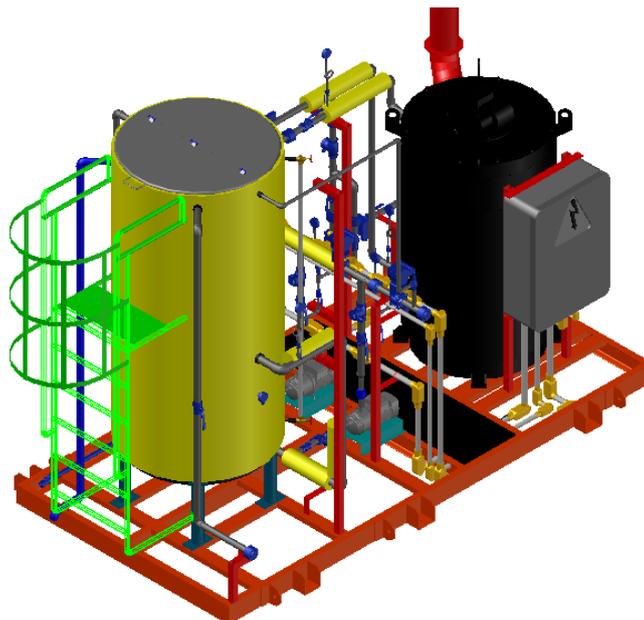


Figura N°11: Ilustración de sistema automatizado de generación de agua caliente.
Fuente: Elaboración propia.

Se tuvo en cuenta las condiciones iniciales de operación resumidas en la tabla N.º 2.

Tabla N.º 2: Resumen de condiciones de operación

Consumo de agua (Vº boquilla) - gpm :	4.63	gpm
Presión de agua en Boquilla (psig)	60	psig
Temperatura inicial (°C)	20	°C
Temperatura final (operación) (°C)	60	°C
Equipos de Lavado	5	unid
Simultaneidad	3	unid
Tiempo máximo de Trabajo	35	min

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se resumió las consideraciones importantes para el diseño mecánico del sistema de calentamiento; en primer lugar, el flujo de cada pistola (Equipo de lavado); en segundo lugar, la presión que se requiere en la boquilla de cada pistola; en tercer lugar, la temperatura mínima de ingreso de agua al sistema de calentamiento; en cuarto lugar, la temperatura a la que entregará como máximo el sistema; en quinto lugar, instalaciones máximas de pistolas de lavado; en sexto lugar, máxima cantidad de pistolas en uso en simultaneo; y en séptimo lugar, la autonomía máxima del sistema.

Con estas consideraciones en primer lugar se tuvo que calcular la energía térmica necesaria para calentar el agua (potencia de calentamiento).

Se tuvo que el para calcular la potencia de calentamiento necesaria para calentar el agua se aplicará, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, la ecuación (4):

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p \Delta T \quad \left(\frac{kJ}{s}\right) \text{-----(4)}$$

Donde:

\dot{Q} : Calor en kJ/s (kW)

\dot{m} : Flujo másico en kg/s

C_p : Calor específico en kJ/kg °C

ΔT : Diferencia de temperaturas final e inicial en °C.

Se obtuvo el flujo másico del flujo considerando hasta 3 equipos de lavado máximos en simultaneo a 4.63 gpm por equipo y considerando la densidad del agua a 1 kg/l para simplificar el cálculo.

Se tuvo que:

$$\dot{V} = 4.63 \text{ gpm} \times 3 = 13.89 \text{ gpm} = 0.875 \frac{l}{s}$$

Para calcular el flujo másico se usó la ecuación (5):

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho \text{ -----(5)}$$

Donde:

\dot{m} : flujo másico en kg/s

\dot{V} : flujo volumétrico en l/s

ρ : densidad en kg/l

Reemplazando en la ecuación (5):

$$\dot{m} = 0.875 \frac{l}{s} \times 1 \frac{kg}{l} = 0.875 \frac{kg}{s}$$

Se obtuvo de tablas que el Cp del agua es 4,18 kJ/kg °C, luego se reemplazó en la ecuación (1). Se muestra el resultado obtenido en la tabla N.º 3:

Tabla N.º 3: Cálculo de potencia de calentamiento teórica para proceso de lavado

Descripción	\dot{m} Total	C_p Agua	T_i Agua	T_f Agua	ΔT Agua	\dot{Q}	\dot{Q}
	(kg/s)	(KJ/Kg °C)	(°C)	(°C)	(°C)	(kW)	(BHP)
	0.875	4.186	20	60	40	146.51	14.93

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N.º 3 se pudo indicar de forma resumida los parámetros y el resultado de la potencia teórica necesaria.

Se consideró que con una eficiencia del 80% el sistema de calentamiento debería tener una potencia, según tabla N.º 4 de:

Tabla N.º 4: Cálculo de potencia de calentador para proceso de lavado

Potencia de calentador:	18.67	BHP	624.9	Mbtu/hr
Potencia de calentador:	183.13	Kw		
Eficiencia del calentador:	80%			
Potencia calorífica disponible:	146.51	Kw	499.9	Mbtu/hr

Fuente: Elaboración propia

Según lo que se obtuvo de pudo observar que el sistema tendría una potencia de 624.9 Mbtu/hr (183.13 kW) como energía necesaria para calentar el flujo de agua considerando una salida máxima de 13.89 GPM que equivale al uso de tres pistolas en simultaneo.

Luego de tener determinada la potencia de calentamiento se definió los elementos mecánicos principales del sistema de calentamiento:

- Calentador.
- Tanque de almacenamiento.
- Bomba de recirculación.
- Bomba de impulsión de agua caliente.
- Interconexión de equipos (tuberías).
- Plataforma mecánica.

Como parte del diseño mecánico de desarrolló la selección y diseño de los elementos mecánicos del sistema.

3.2.1. Calentador

Para el calentar el agua se consideró un calentador de paso o caldera de calefacción, este equipo consta de un quemador, cuerpo y serpentín de calentamiento. También es conocido como calentador de fuego indirecto. En la figura N.º 12 se pudo apreciar la estructura de un calentador a fuego indirecto con serpentín.



Figura N°12: Ilustración de calentador de
Fuente: Sigma Thermal. Calentador de Fluido Térmico HC-1. Recuperado de
<https://www.sigmathermal.com/es/productos/sistemas-de-fluido-termico/>

Selección del calentador

De acuerdo con la potencia de calentamiento que se obtuvo en la tabla N.º 4 de alrededor de 183.13 kW o 624.9 MBtu/hr. Esta potencia correspondió a calentadores de baja potencia. Se tuvo que, en función a los objetivos y condiciones iniciales, considerar además calentadores con quemadores compactos o de tipo paquete, de fácil instalación y montaje.

El quemador del calentador se consideró que sea de tipo modulante de tal manera emita el calor requerido de acuerdo con la cantidad de energía térmica requerida.

Se planteó que el calentador debería ser de paso (no acumulativo) de tal manera que sea más fácil su mantenimiento y tenga bajo peso.

En cuanto al combustible se consideró el uso de Gas Natural debido a su bajo costo y eficiencia en la combustión, esto en función a los objetivos contemplados de eficiencia energética.

En la tabla N.º 5 se pudo comparar diferentes opciones de quemador.

Tabla N.º 5: Selección de caldera o calentador de agua.

Marca	TERMODINAMICA	HURST	POWERMASTER
Serie / Modelo	CAS-20-V-2-04-X-220	4VTHW	VT2-IC
Potencia (MBtu/hr)	425-700	670	670
Potencia (kW)	125 - 205	196	196
Tipo de trabajo	ON-OFF/Mod.	ON-OFF/Mod.	ON-OFF/Mod.
Partes húmedas	AISI 304	-	-
Diámetro de ingreso	1 ½"	2 ½"	1 ½"
Diámetro de salida	1 ½"	3"	1 ½"
Voltaje	220 VAC	120 VAC	230 VAC
Controles	Encendido directo, sensor de varilla de llama con prueba de encendido de 4 segundos	Encendido directo	Encendido directo
Combustible	Gas Natural	Gas Natural	Gas Natural
Consumo de Gas (m3/h)	11.3	23.7	22.2
Peso vacío (kg)	1280	991	1326
Peso con agua (kg)	1347	1291	1739

Fuente: Elaboración propia

Se pudo observar y evaluar que la caldera de la marca Termodinámica presentaba las características más acordes a las necesidades de la aplicación. Se tuvo que el calentamiento es instantáneo a través de un serpentín de acero inoxidable, es decir el calentador no acumula agua más allá de la que pasa por el serpentín. Así mismo este serpentín es de acero inoxidable AISI 304 lo cual permite una excelente resistencia a la corrosión. El mantenimiento del sistema será más sencillo a diferencia de los otros equipos. Además, el consumo de gas es menor.

Se observó además que el sistema de combustión es modulante lo que permite que el equipo sea eficiente en el proceso de calentamiento.

En conclusión, se optó por la opción de Termodinámica que fue la que mejor se adaptó a los requerimientos y condiciones iniciales de la presente tesis.

A continuación, se pudo apreciar en la figura N° 13 el calentador de agua modelo CAS-20-V-2-04-X-220 de la marca Termodinamica.

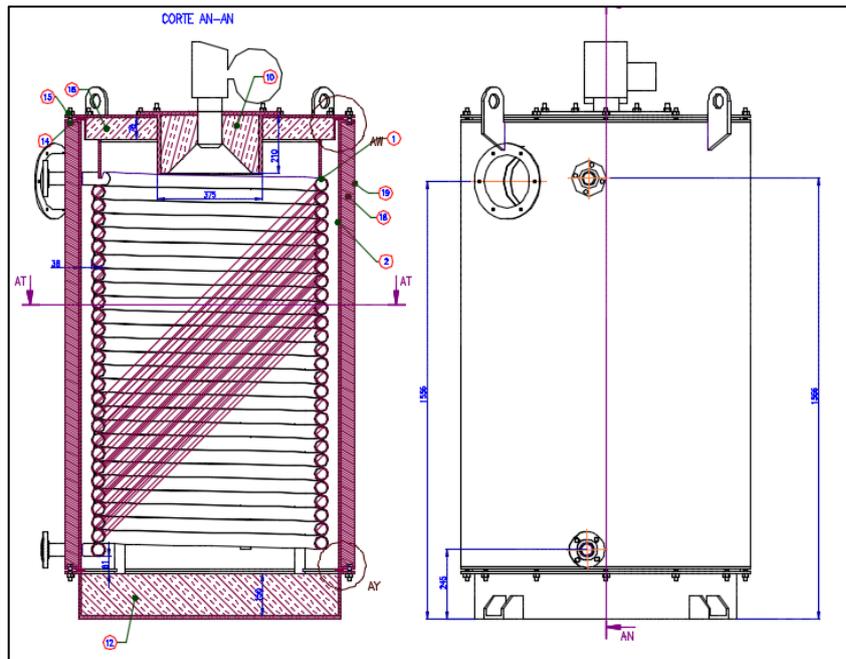


Figura N° 13: Ilustración de calentador de agua
 Fuente: Cortesía de TERMODINAMICA S.A.
 Recuperado de Plano mecánico de Calentador CAS-20-V-2-04-X-220.

3.2.2. Tanque de almacenamiento

Para dimensionar el volumen del tanque se tuvo en consideración en consideración las condiciones de operación.

De acuerdo con las condiciones iniciales se requiere tener una autonomía de 35 min.

Volumen:

Para el cálculo del volumen se consideraron las condiciones iniciales, se multiplicó el flujo de cada equipo de lavado por el número máximo de equipos en simultaneo y por el tiempo de autonomía. Asimismo, se consideró un factor de disponibilidad del 90% del volumen del tanque por lo que se dividirá entre 0.90. En la tabla N° 6 se resume lo mencionado:

Tabla N° 6: Cálculo de volumen de tanque de almacenamiento para proceso de lavado

Flujo (gpm)	N° de Pistolas en simultaneo	Flujo total (gpm)	Tiempo de autonomia (min)	Volumen (Gln)	Factor de disp.	Volumen Final (Gln)	Volumen Final (m3)
4.63	3.0	13.89	35	486.15	0.90	540.17	2.04

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo un volumen total de $2.04 \text{ m}^3 \cong 2.00 \text{ m}^3$

Dimensiones:

Por fines prácticos se consideró un tanque cilíndrico, con tapas bombeadas, de sección de diámetro 1m. En la tabla N.º 7 se sintetizó las dimensiones y volumen del tanque de almacenamiento.

Tabla N.º 7: Dimensiones generales de tanque de alimentación

Diámetro (mts)	Altura (mts)	Volumen (m ³)	Volumen (gln)
1.00	2.20	1.99	577.48

Fuente: Elaboración propia

Material:

Para seleccionar el material se tuvo la consideración principal que el agua a almacenar va a ser usada como agua caliente sanitaria para lavado de bandejas en contacto con masa de galletas. Al ser una aplicación alimentaria lo más recomendable fue usar Acero Inoxidable AISI 304L que es resistente a la corrosión, con extra bajo contenido de carbono y adecuado para la industria alimentaria.

Espesor:

Para el cálculo del espesor de tanque de almacenamiento se usó la norma ASME VIII DIV. 1. Se calcularon los parámetros necesarios para el cálculo del espesor.

• **Presión hidrostática:**

Se utilizó la ecuación

$$\Delta P = \rho \times g \times h \text{-----(6)}$$

Donde:

ΔP : Presión hidrostática

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

g : Fuerza de gravedad (m/s²)

h : Altura de la columna de líquido (m)

Se consideró la altura del agua en el tanque en 2.00 m, y se tuvo que la densidad del agua a la temperatura de operación es 983.13 kg/m³. Se reemplazó en la ecuación 6

$$\Delta P = 983.13 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times 2.00 m = 19,289.01 \frac{kg}{m \times s^2} = 2.80 psi$$

- **Presión de operación y diseño:**

$$P_{op} = 50 psi$$

$$P = P_{op} + \Delta P + (1 + \Delta P) \times 0.15 \text{-----}(7)$$

$$P = 50 psi + 2.80 psi + (1 + 2.80 psi) \times 0.15 = 53.37 psi$$

- **Temperatura de operación y diseño:**

$$T_{op} = 60 ^\circ C$$

$$T = T_{op} \pm 15$$

$$T = 75 ^\circ C$$

- **Límite elástico, factor de soldadura:**

$$s = 29000 psi$$

$$E = 0.85$$

- **Sobre espesor por corrosión**

$$CA = 0.12 in = 3.5 mm$$

- **Relación de esfuerzos**

$$\partial_L = \frac{p \times r}{2t} < \partial_C = \frac{p \times r}{t} < \frac{\partial_{Adm.acero}}{F_s} = \frac{29000}{1.2} psi$$

$$\partial_L = 2826.8 < \partial_C = 5653.6 < \frac{\partial_{Adm.acero}}{F_s} = 24166.6 psi$$

Con los parámetros obtenidos se calculó el espesor de acuerdo con el ASME VIII usando la ecuación N.º 8

$$t = \frac{P \times R}{s \times E - 0.6 \times P} + CA \text{-----}(8)$$

Donde:

t : Espesor (mm)

P : Presión de diseño (psi)

R : Radio interno del cilindro (mm)

s : Esfuerzo del material (psi)

E : Factor de soldadura

CA : Tolerancia o factor de corrosión

Se aplicó la ecuación N.º 8 y se obtuvo:

$$t = \frac{53.37 \text{ psi} \times 500 \text{ mm}}{18800 \text{ psi} \times 0.85 - 0.6 \times 53.37 \text{ psi}} + 3.5 \text{ mm}$$

$$t = 4.72 \text{ mm}$$

De acuerdo con lo obtenido se decidió usar un espesor de 3/16" o 4.76 mm, que es el espesor comercial más cercano. Este mismo espesor cumple lo recomendado en la norma API 650.

Aislamiento:

Para mantener la temperatura en el tanque se tuvo que aislar con material aislante para temperatura media fabricado con lana de fibra mineral, según norma ASTM C-547 tipo I y ASTM C-795, factor de conductividad térmica de 0.043 W/m°K a 100°C.

Calculation Type:	Personnel Protection	
Process Temp:	60.0	°C
Ambient Temp:	15.0	°C
Wind Speed:	0.4	m/s
Max Surface Temp:	15.6	°C
Jacket Material:	All Service Jacket	
Jacket Emissance:	0.9	
Insulation Layer 1:	850F Mineral Fiber PIPE, Type I, C547-15	50.8 mm

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m²)	Efficiency (%)
Bare	60.0	458.80	
Layer 1 (50.8)	18.9	29.25	93.62

Figura N°14: Selección de espesor de aislamiento
Fuente: Recorte de pantalla software 3E Plus V.41

Para determinar el espesor del aislamiento se usó el software 3E Plus V.41, en la figura N° 14 se pudo apreciar el resultado considerando 2” de espesor. Acabado con chaqueta de aluminio calibre 0.4mm, roladas, pestañadas y traslapadas en ambos sentidos.

De acuerdo con el resultado obtenido se decidió usar el espesor de 2” que fue suficiente para mantener la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento

Luego se procedió a dibujar el tanque de almacenamiento, el que se pudo apreciar en la figura N° 15. El tanque consta de tomas de ingreso de agua caliente, descarga, retorno de descarga y purga de fondo; asimismo, conexiones para interruptores de nivel, termómetro, sensor de temperatura y visores de columna de nivel.

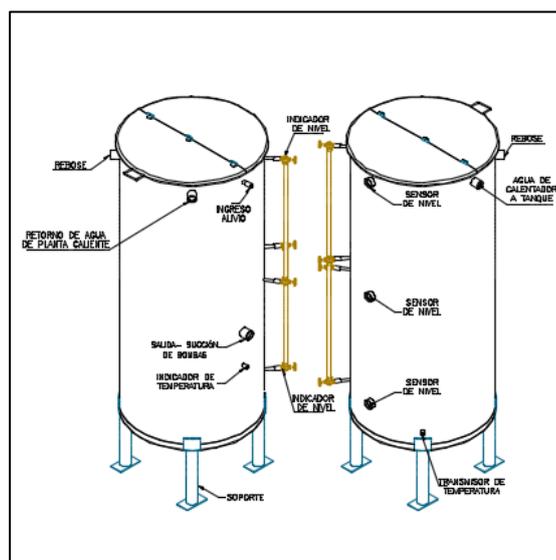


Figura N°15: Ilustración de tanque de almacenamiento.
Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Bomba de recirculación de sistema

Para dimensionar la bomba de recirculación se consideró la potencia de calentamiento disponible, temperatura inicial, temperatura final, flujo y presión de operación tal como se muestra en la tabla N° 8:

Tabla N° 8: Parámetros para bomba de recirculación

Potencia calorífica disponible:	146.72	Kw		
Temperatura inicial:	20	°C		
Temperatura final en tanque:	60	°C		
Flujo de agua para calentam.	0.88	Kg/s	13.89	gpm
Presión de operación (Po)	60.00	psig		

Fuente: Elaboración propia

Se calculó la potencia de la bomba de recirculación de acuerdo con la ecuación N° 9, por lo que se tuvo que la potencia absorbida por la bomba viene dada por:

$$P = \frac{\dot{Q} \times H \times \gamma}{75 \times \eta} \text{-----(9)}$$

Donde:

P : Potencia (HP)

\dot{Q} : Caudal (l/seg)

H : Altura manométrica total (m)

γ : Peso específico kg/dm³

η : Eficiencia

Luego de realizar el cálculo se plasmó el resultado en la tabla N.º 9. Se tuvo que:

Tabla N.º 9: Cálculo de potencia de la bomba

Caudal (V°1) (gpm)	ADT (m.c.a)	Eficiencia de bomba	F.Seguridad	Potencia bomba N°1(Kw)	Pot. (HP)
13.89	47.87	70%	1.3	0.76	1.02

Fuente: Elaboración propia

Para seleccionar la bomba además de lo ya calculado se tuvo en consideración que la temperatura de operación estuvo determinada en 60 °C por lo que la bomba debería estar preparada para trabajar a esta temperatura.

3.2.4. Bomba de impulsión de agua caliente

Para dimensionar la bomba de recirculación se consideró la potencia de calentamiento disponible, En la tabla N.º 10 se pueden apreciar los parámetros de operación.

Tabla N.º 10: Parámetros para bomba de impulsión

Temperatura:	60	°C
Flujo de agua para calentamiento:	13.89	gpm
Presión de operación (Po)	60.00	psig

Fuente: Elaboración propia

Se calculó la potencia de la bomba de recirculación de acuerdo con la ecuación N.º 9, por lo que el resultado se pudo resumir en la tabla N.º 11:

Tabla N.º 11: Cálculo de potencia de la bomba de impulsión

Caudal (Vº1) (gpm)	ADT (m.c.a)	Eficiencia de bomba	F.Seguridad	Potencia bomba Nº1(Kw)	Pot. (HP)
13.89	47.87	70%	1.3	0.76	1.02

Fuente: Elaboración propia

Para seleccionar la bomba se tuvo en consideración que la temperatura de operación estuvo determinada en 60 °C por lo que la bomba debería estar preparada para trabajar a esta temperatura.

3.2.5. Interconexión de equipos (tuberías)

Para el caso de las tuberías se tuvo en consideración el flujo, la presión de operación del sistema seleccionar la bomba además de lo ya calculado se tuvo en consideración que la temperatura de operación estuvo determinada en 60 °C.

Se dimensionó el diámetro de las tuberías de interconexión entre equipos usando la ecuación N.º 10 considerando la velocidad del fluido en 1.2 m/s.

$$d = \sqrt{\frac{\dot{Q}}{3600 \times v} \times \frac{4}{\pi}} \text{-----(10)}$$

Donde:

d : Diámetro (m)

\dot{Q} : Caudal (m³/h)

v : Velocidad (m/s)

En la tabla N° 12 se pudo apreciar el resultado de aplicar la ecuación N° 10 tomando como base la velocidad del fluido y el caudal correspondiente:

Tabla N.º 12: Cálculo de diámetro por velocidad

Q (GPM)	Q(m ³ /h)	v(m/s)	d(m)	d(pulg.)	d(pulg.)	d(pulg.) Selec.
13.89	3.15	1.2	0.030	1.20	~1 ¼"	1 ½"

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla N° 12 se consideró el valor inmediato superior, es decir, 1 ½" de diámetro teniendo en cuenta que la salida del calentador es de 1 ½" de diámetro.

Asimismo, se tuvo en consideración la caída de presión en la línea en contraste con la velocidad seleccionada, para esto se usó la ecuación N° 11.

$$\Delta p = \frac{\mu \times l \times v^2 \times \rho \times SG}{2 \times d} \text{-----(11)}$$

Donde:

Δp : Caída de presión (Pa)

μ : Coeficiente de fricción = 0.0228 aproximado

v : Velocidad (m/s) = 1.2 m/s

d : Diámetro interno de la tubería (m), para AISI 304 SCH 40 es 0.0409 m

ρ : Densidad del agua a 60°C (kg/m³) = 983.13 kg/m³

SG : Gravedad específica del agua = 0.98

l : Longitud de la tubería = 20 m (considerando pérdidas por accesorios)

En la tabla N° 13 se pudo apreciar el cálculo de la caída de presión con una velocidad de 1.2 m/s y una longitud de 20 metros considerando las equivalencias en los accesorios.

Tabla N° 13: Cálculo de caída de presión

L (m)	Q(m ³ /h)	v(m/s)	d. int(m)	Δp (Pa)	Δp (psi)
20	3.15	1.2	0.04	7734.12	1.12

Fuente: Elaboración propia

La caída de presión es 1.8 % con respecto a la presión de operación (60 psi) lo cual fue favorable para el diseño.

Aislamiento:

Para evitar pérdidas de energía en las tuberías se tuvo que aislar con material aislante para temperatura media fabricado con lana de fibra mineral, según norma ASTM C-547 tipo I y ASTM C-795, factor de conductividad térmica de 0.043 W/m²K a 100°C.

Para determinar el espesor del aislamiento se usó el software 3E Plus V.41, en la figura N° 16 se pudo apreciar el resultado considerando 1 1/2" de espesor. Acabado con chaqueta de aluminio calibre 0.4mm, rolas, pestañadas y traslapadas en ambos sentidos

System Application:	Pipe - Horizontal		
Dimensional Standard:	ASTM C 585 Rigid		
Calculation Type:	Personnel Protection		
Process Temp:	60	°C	
Ambient Temp:	15	°C	
Wind Speed:	0.4	m/s	
Max Surface Temp:	16	°C	
Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m)	Efficiency (%)
Bare	60.0	105.80	
Layer 1 (40.0)	17.2	9.92	90.63

Figura N°16: Selección de espesor de aislamiento de tuberías

Fuente: Recorte de pantalla software 3E Plus V.41

3.2.6. Estructura

Para la estructura se diseñó una base auto – portante o skid, será formado por un perímetro de perfil C de 6” x 10.5 lbs/pie, las bombas, tanque de almacenamiento y tablero serán soportados en dicho bastidor, los demás amarres serán de Canal de 4” x 5.4 lbs/pie, las estructuras serán soldadas eléctricamente a tope bajo el procedimiento GMAW.

En la figura N° 17 se pudo apreciar el diseño de la estructura.

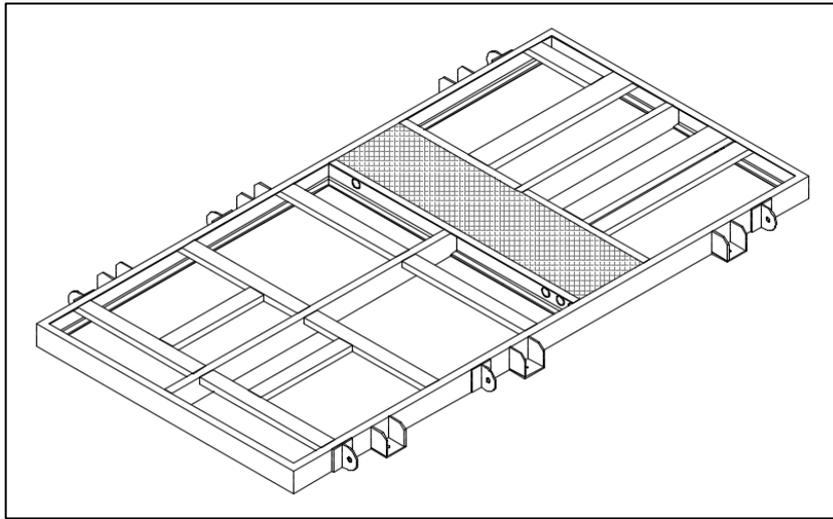


Figura N°17: Ilustración de plataforma o base auto – portante.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 18 se pudo apreciar la vista de planta de la plataforma considerando la medida en milímetros y las indicaciones de soldadura.

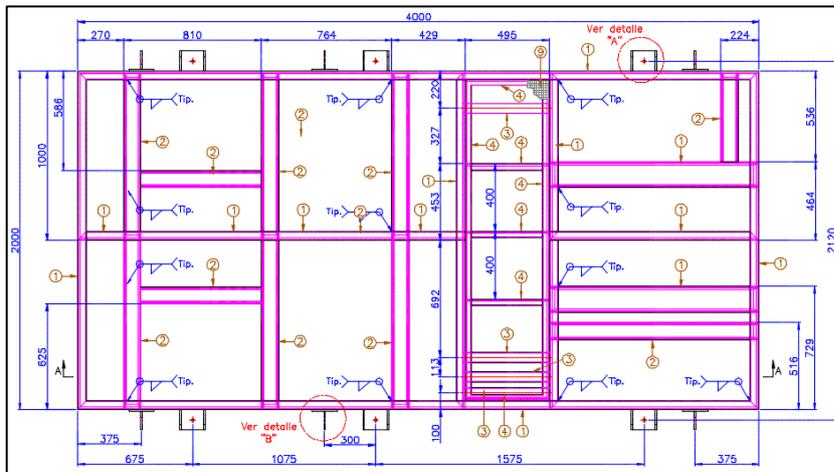


Figura N°17: Vista de planta de plataforma o base auto – portante.
Fuente: Elaboración propia

3.2.7. Ensamble de sistema en skid (paquete)

Una vez se tuvo todos los componentes diseñados y seleccionados se realizó el ensamble del sistema en arreglo de skid.

En la figura N° 19 se pudo apreciar el diseño final del sistema con todos los componentes unidos a través de las líneas de interconexión

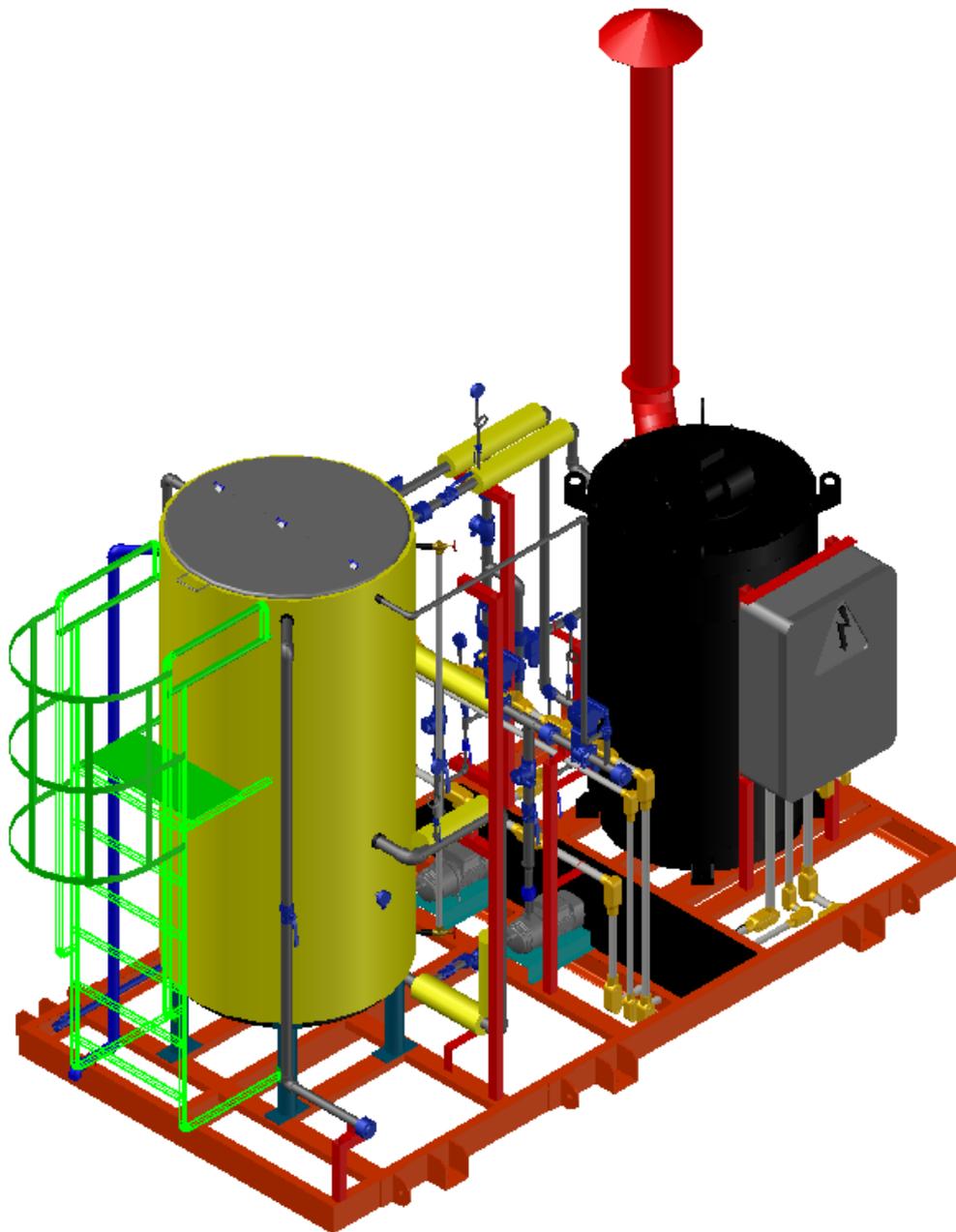


Figura N°19: Ensamble mecánico del sistema de calentamiento
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Diseño eléctrico

Para el diseño eléctrico se tuvo en cuenta las consideraciones iniciales, así como el consumo eléctrico total (equipos, actuadores y sistema de control).

Se realizó un cuadro de cargas que se desarrolló en la tabla N° 14.

Tabla N° 14: Cuadro de cargas

EQUIPOS	Pn(W)	Tensión (V)	Nº de fases	In (A)	Id = In x 1.25(A)	F. Simul.	Isim (A)
VARIADOR 1	1500	220	3	7.400	9.250	0.8	7.400
VARIADOR 2	1500	220	3	7.400	9.250	0.8	7.400
CALENTADOR	880	220	1	4.000	5.000	0.8	4.000
FUENTE DC	440	220	1	2.000	2.500	1	2.500
ELECT. VAL. 1	4.4	220	1	0.020	0.025	0.5	0.013
ELECT. VAL 2	4.4	220	1	0.020	0.025	0.5	0.013
ELECT. VAL 3	4.4	220	1	0.020	0.025	0.5	0.013
ELECT. VAL 4	4.4	220	1	0.020	0.025	0.5	0.013
PILOTOS	88	220	1	0.400	0.500	0.8	0.400
OTROS	550	220	1	2.500	3.125	1	3.125
TOTAL	4975.6	-	-	23.780	29.725	-	24.875

Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Diseño de tablero de control

Para el diseño del tablero de control se tuvo como consideración inicial la selección de los interruptores termomagnéticos principal y secundarios del sistema.

Selección de interruptores termomagnéticos:

De acuerdo con la tabla N° 14: Cuadro de cargas se tuvo que la corriente máxima total de diseño del sistema es 29.725 amperios por lo que se seleccionará el interruptor térmico principal considerando un factor de seguridad de 1.3, por lo que se tuvo como corriente de selección (Is):

$$I_s = I_d \times FS$$

$$I_s = 29.725 \times 1.3 = 38.64 \text{ A}$$

Del valor obtenido se seleccionó un interruptor con la corriente nominal superior más cercana al valor de la corriente de selección, se tuvo que 40 A es la corriente nominal más cercana de forma comercial. Por lo tanto, el interruptor principal se seleccionó de 40 A.

Los interruptores secundarios se seleccionaron de la misma manera que con el interruptor principal, en este caso considerando un factor de seguridad (F.S) de 1.2. En la tabla N° 15 se pudo apreciar el resumen de los cálculos:

Tabla N° 15: Selección de interruptores térmicos secundarios.

EQUIPOS	Id (A)	F. S	Is (A)	Is comercial (A)
VARIADOR 1	7.400	1.2	8.800	10.000
VARIADOR 2	7.400	1.2	8.800	10.000
CALENTADOR	5.000	1.2	6.000	6.000
FUENTE Y OTROS	4.000	1.2	4.800	6.000
ADICIONAL	2.000	1.2	2.400	4.000

Fuente: Elaboración propia

Selección de cable de interconexión en tablero de control e interconexión a equipos:

Para la selección de los cables dentro del tablero se tuvo que para poder realizar el correcto cableado de los componentes el cable debe ser lo más flexible posible. Es por ello por lo que se optó por usar cable con conductor de cobre blando flexible, clase 5. Se tuvo además en consideración unas características adicionales, que el cable debería ser libre de halógenos (HFFR) de acuerdo con la norma IEC 60754-1 y contar con retardante de llama, norma IEC 60332-1-2, se tal manera que sea de alta confiabilidad.

Se optó por el cable de tipo H07Z1-K (NHF-80), en la figura N° 20 se pudo apreciar la capacidad del cable en función a su sección nominal.

DATOS ELÉCTRICOS			
Sección [mm ²]	Max. DC Resist. Cond. 20°C [Ohm/km]	Amperaje aire 30°C [A]	Amperaje ducto 30°C [A]
1,5	13,3	18	14
2,5	7,98	30	24
4	4,95	35	31
6	3,3	50	39
10	1,91	74	51

Figura N°20: Datos eléctricos de cable NHF-80
Fuente: INDECO

De acuerdo con lo que se observó en la figura N.º 20 y teniendo en consideración las corrientes de diseño calculadas previamente se tuvo que:

- Acometida del tablero hacia ITM principal se seleccionó cable de 10 mm².
- Circuitos de alimentación hacia variadores se seleccionó cable de 4 mm².
- Circuitos de alimentación hacia fuente y otros se seleccionó cable de 2.5 mm².
- Circuito de 24 V DC se seleccionó cable de 2.5 mm².

Para el caso del cableado hacia las bombas se consideró el cable N2XCOH 0,6/1kV; VDF para aplicaciones con variadores de frecuencia, la sección se considera la misma que para el cable NHF-80. Para el caso del cableado de instrumentación se consideró cable de instrumentación apantallado de 2x2.5 mm² y 3x2.5mm² dependiendo del instrumento.

En todos los casos antes mencionados se desprecia la caída de tensión debido a la corta distancia de las conexiones dentro del skid de calentamiento. Seguidamente se procedió a realizar los planos eléctricos del sistema, en el apartado de diseño de instrumentación y control se desarrolló la selección de los elementos de automatización incluidos en el tablero de control

Desarrollo de planos eléctricos:

En la figura N.º 21 se pudo apreciar el esquema multifilar de fuerza y distribución. Están considerados las protecciones termomagnéticas principal, para las bombas, para el calentador, para los elementos de control y para una toma eléctrica para un computador.

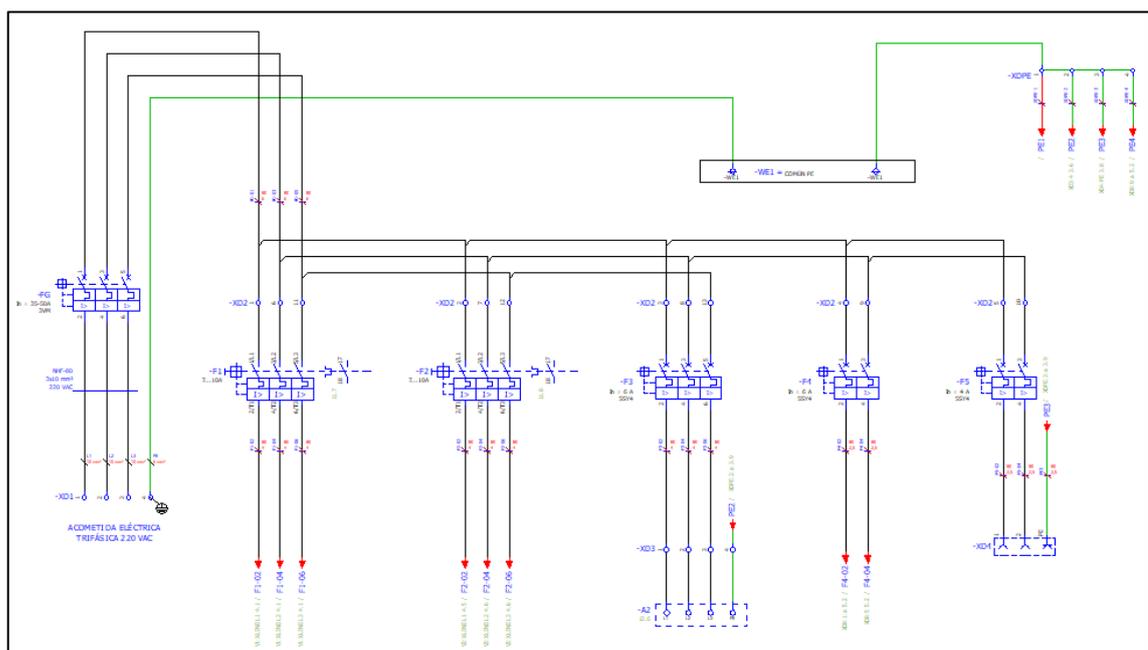


Figura N°21: Esquema multifilar de fuerza
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 24 se pudo apreciar el esquema multifilar de entradas a PLC S7-1214C. Esta contempla la conexión de las entradas digitales para la lógica de funcionamiento del sistema.

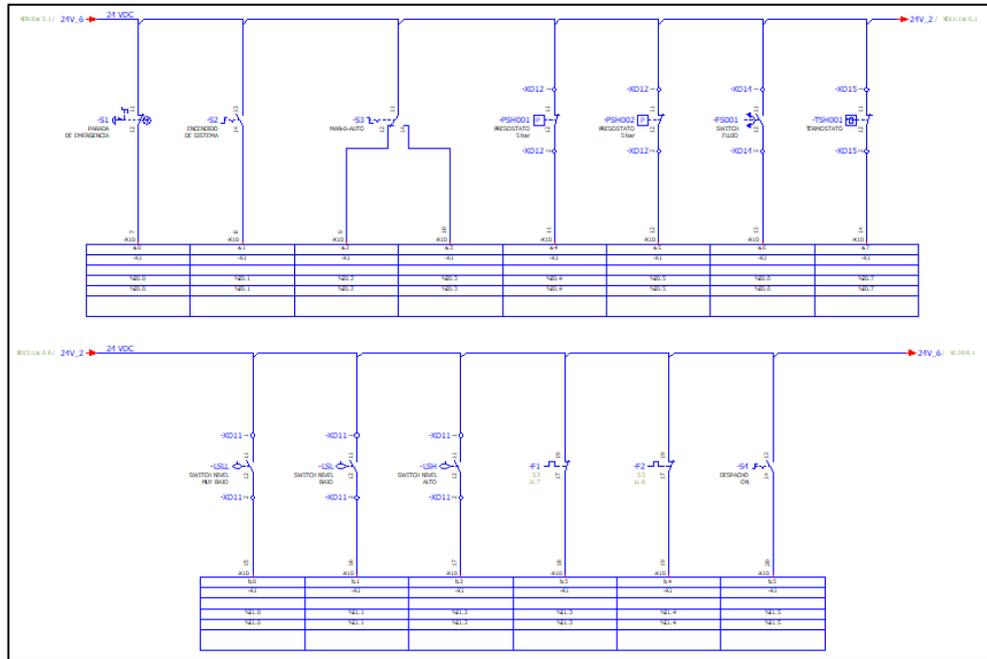


Figura N°24: Esquema multifilar de entradas digitales S7-1214C.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 25 se pudo apreciar el esquema multifilar de salidas de PLC S7-1214C. Cómo son arranque de variadores, calentador, electroválvulas, avisos y alarmas.

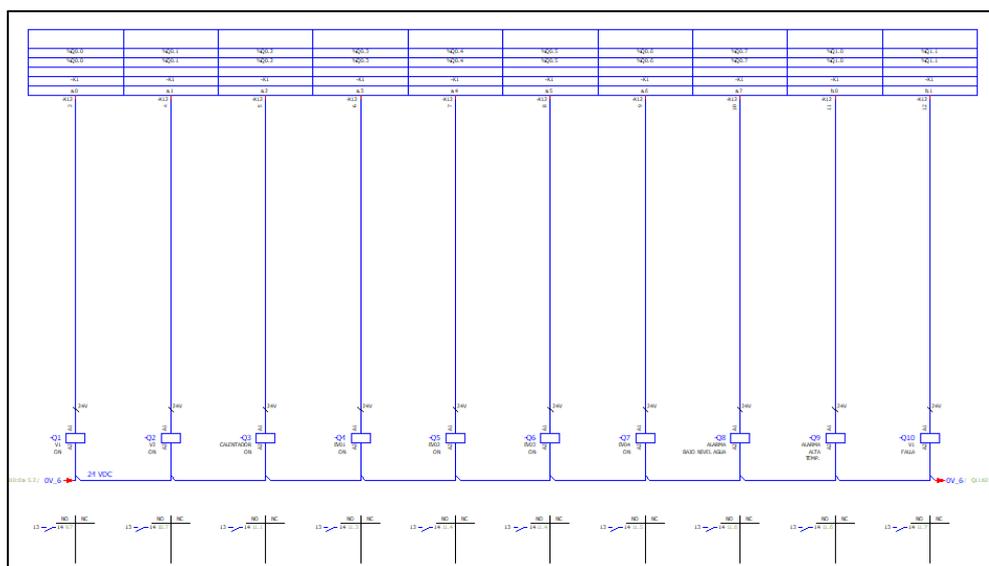


Figura N°25: Esquema multifilar de salidas digitales S7-1214C
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 26 se pudo apreciar el esquema multifilar de entradas y salidas de módulo de E/S digitales SM 1223. Ingreso de contactos de aviso de guardamotores y salida de alarmas de falla de bombas

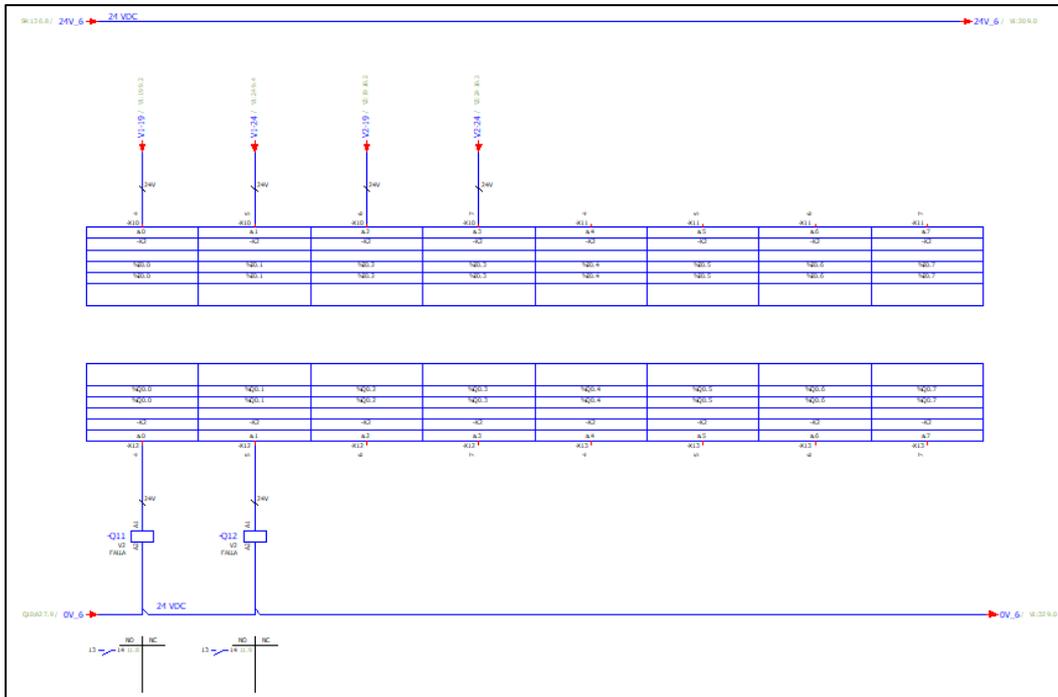


Figura N°26: Esquema multifilar de entradas y salidas digitales SM1223
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 27 se pudo apreciar el esquema multifilar de control de variador 1. Se puede apreciar la conexión del transmisor de presión respectivo, el contacto de arranque, y las salidas de arranque y falla.

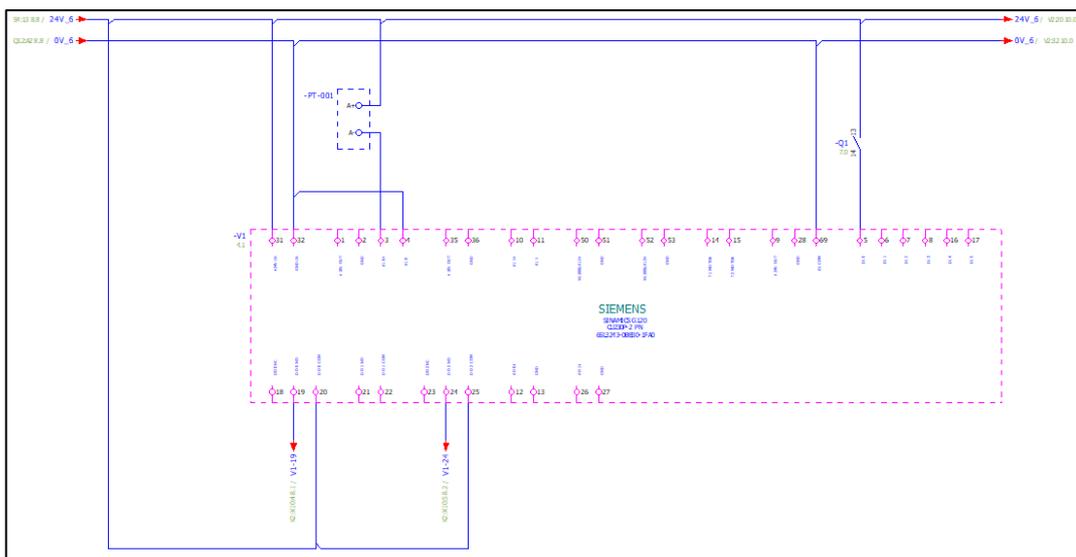


Figura N°27: Esquema multifilar de módulo de control de variador 1.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 28 se pudo apreciar el esquema multifilar de control de variador 2. Se puede apreciar la conexión del transmisor de presión respectivo, el contacto de arranque, y las salidas de arranque y falla.

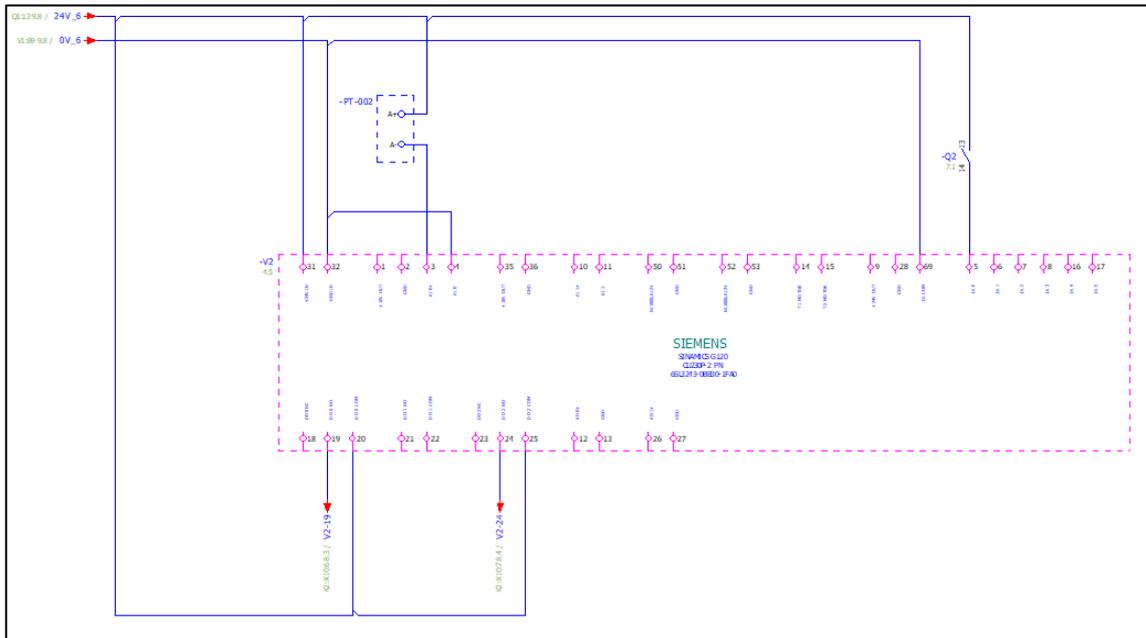


Figura N°28: Esquema multifilar de módulo de control de variador 2.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 29 se pudo apreciar el esquema multifilar de accionamiento de electroválvulas, salida a calentador y señales audiovisuales de indicación y alarma.

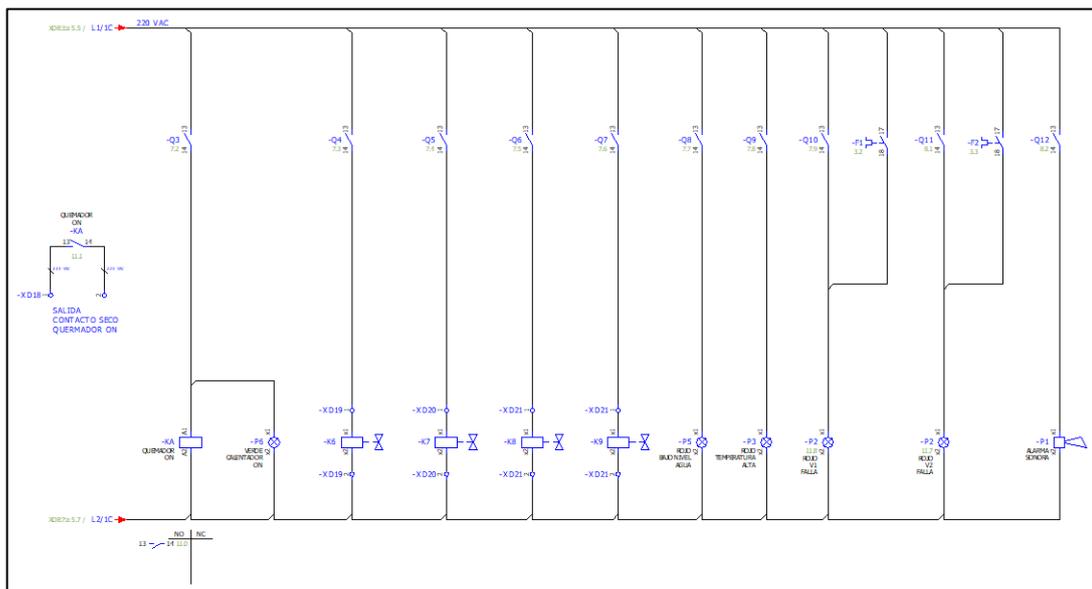


Figura N°29: Esquema multifilar de señales audiovisuales.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 30 se pudo apreciar el esquema multifilar de señales de temperatura de los dos sensores PT-100 instalados hacía el módulo de entradas y salida analógica hacía el calentador.

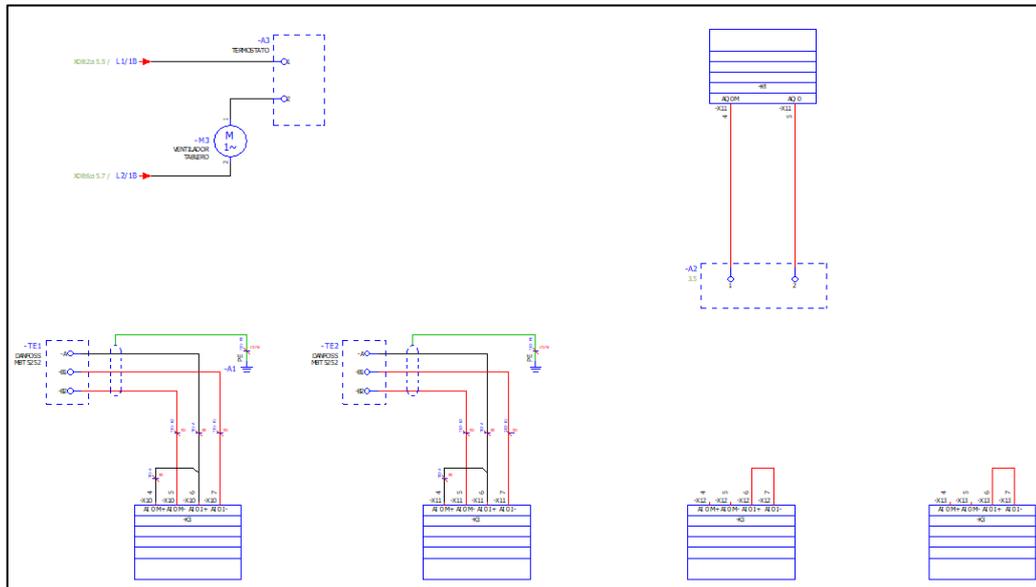


Figura N°30: Esquema multifilar de señales de entrada RTD y salida analógica.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 31 se pudo apreciar el esquema de vista 3D isométrico de tablero de control que incluye el HMI de 7", parada de emergencia, pilotos indicadores de estado de bombas - alarmas y selectores.

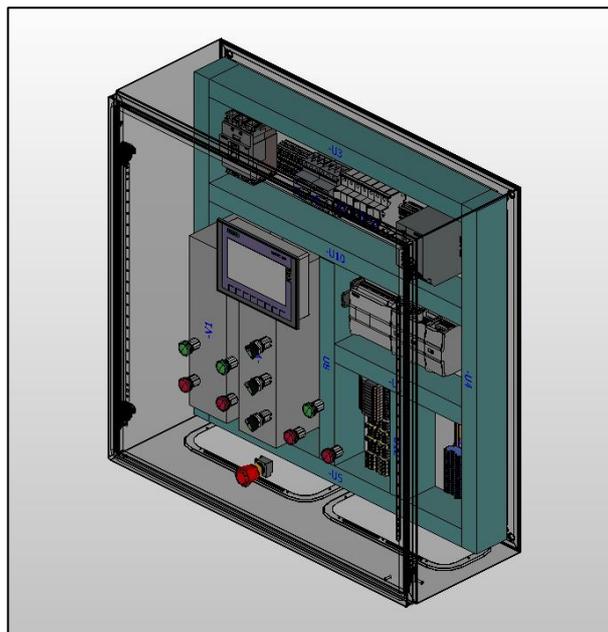


Figura N°31: Esquema en vista 3D de exterior de tablero de control.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N°32 se pudo apreciar el esquema de vista 2D frontal interior y frontal exterior de tablero de control. En ella se aprecia la distribución de los componentes en el interior del tablero

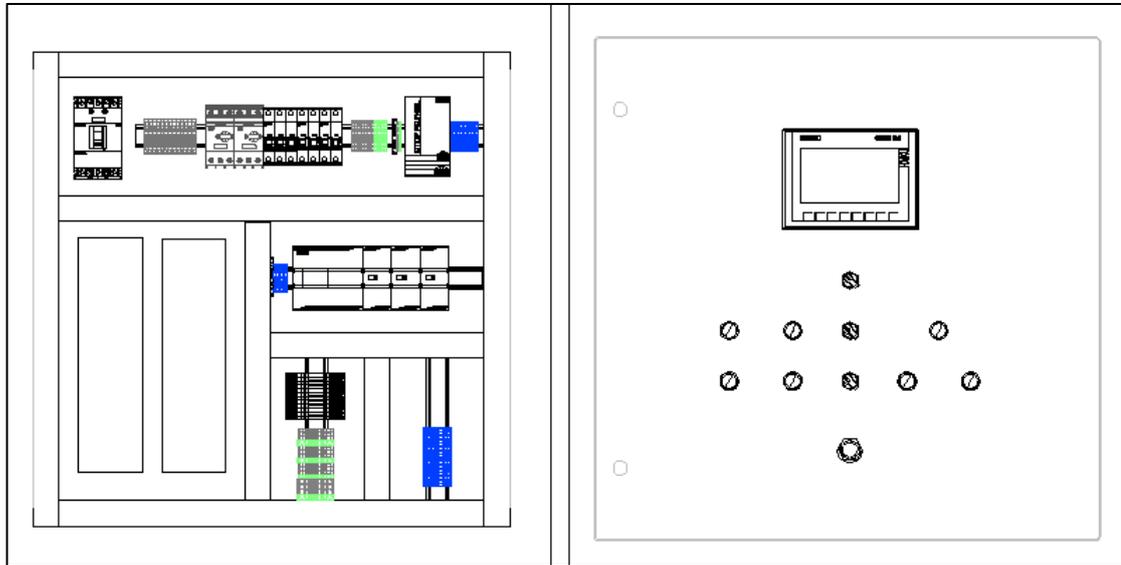


Figura N°32: Esquema de vista 2D frontal interior y frontal exterior de tablero de control.
Fuente: Elaboración propia

3.4. Diseño electrónico y de instrumentación

Para el diseño electrónico y de instrumentación se tuvo en consideración las condiciones iniciales y requerimientos del propio sistema para su seguridad y buen funcionamiento.

En primero lugar, se realizó el diseño electrónico que corresponde a los elementos electrónicos que realizaran una acción de control sobre el sistema o parte de él. Para un buen diseño electrónico fue fundamental que los equipos electrónicos seleccionados sean los más idóneos para ser el centro del control automático del sistema.

En segundo lugar, se realizó la selección de los instrumentos necesarios para el sistema de calentamiento automático, parte de esta instrumentación será de visualización, otra parte como elemento de un lazo de control y otra parte como seguridad del proceso.

3.4.1. Selección de equipos electrónicos

Para el sistema se necesitó la implementación de los siguientes elementos electrónicos:

- PLC
- HMI

- Variador

PLC:

Para seleccionar el PLC se tuvo que definir la cantidad de entradas y salida, así como otras características necesarias que el PLC a seleccionar debía contemplar. Los requerimientos para el PLC se mostraron en la tabla N.º 16 que se pudo apreciar a continuación.

Tabla N.º 16: Requerimientos para el PLC

Área	Tipo	E/S Análoga - Digital	Cantidad
Tanque de agua	Sensor de nivel	Entrada digital	3
	Sensor de temperatura	Entrada análoga	1
Bomba de agua	Sensor de nivel	Entrada análoga	2
	Sensor de temperatura	Entrada digital	2
	Sensor de nivel	Entrada digital	4
	Sensor de temperatura	Entrada digital	1
Caldero	Sensor de nivel	Salida digital	3
	Sensor de temperatura	Entrada digital	1
	Sensor de nivel	Entrada digital	1
	Sensor de temperatura	Salida análoga	1
Suministro de agua	Sensor de nivel	Salida digital	1
Control de variadores	Sensor de temperatura	Puerto ethernet	1
Control HMI	Sensor de nivel	Puerto ethernet	1
Total			
Entradas digitales			12
Entradas análogas			3
Salidas digitales			4
Salidas análogas			1

Fuente: Elaboración propia

Una vez planteados los requerimientos para la selección del PLC se buscó alternativas de PLC y los más aproximados se mostraron en la tabla N.º 17 a continuación.

Tabla N.º 17: Modelos de PLC

	MODELO		
PLC	Siemens s7-1214c	Allen Bradley micro 830	Schneider Modicon 221
E/S digitales	14/entradas 10/salidas	14/entradas 10/salidas	9/entradas 7/salidas
E/S análogas	2	No	2
Conexión ethernet	Si	No	Si
Lazos PID	16	1	1

Fuente: Elaboración propia. Tomado de catálogos de productos Siemens, Allen Bradley y Schneider

De la tabla N.º 17 el PLC Siemens S7-1214C fue escogido como el más adecuado ya que contó con todos los requerimientos necesarios.

Seleccionado este producto los demás componentes por seleccionar se consideraron de la misma marca como garantía de buena compatibilidad e interacción entre estos.

HMI:

Como el PLC seleccionado es de la marca Siemens el modelo de HMI tiene que ser de la misma marca para que ambos puedan ser programados en el mismo software y evitar errores de compatibilidad, para la visualización del sistema se necesitó una gama básica de modelos HMI y se comparó los siguientes modelos de HMI para escoger de la siguiente tabla N.18:

Tabla N.º 18: Modelos de HMI

Modelo	Tipo de montaje	Tamaño	Tipo de conexión
SIMATIC KTP400 Basic	Fijo	Pantalla TFT 4"	Ethernet
SIMATIC KTP700 Basic	Fijo	Pantalla TFT 7"	Ethernet
SIMATIC KT700 Color	Fijo	Pantalla TFT 7"	Serial RS 485
SIMATIC HMI KP 700 Confort	Giratorio	Pantalla TFT 7"	Ethernet

Fuente: Lista de precios Siemens 2019

Como el monitoreo en el sistema es constante se necesita una alta vía de transmisión de datos y un tamaño adecuado donde pueda entrar el sistema de generación de agua caliente, se concluyó que el modelo KTP700 Basic TFT 7” es el más adecuado.

Variador:

Para la selección del variador tuvimos que seleccionar un modelo de la tabla N.º19 y seguir usando la marca Siemens para evitar problemas de incompatibilidad entre los equipos ya que nuestro PLC y HMI seleccionados anteriormente también son de la marca Siemens, en este caso el variador cumple una función importante ya que se encargara de regular la potencia del motor cuando ocurran caídas de presión y así mantener la presión constante en las líneas de suministro de agua hacia la planta.

Tabla N° 19: Modelos de variador

Características	Modelo		
	V20	G120	S120
Aplicación	Bomba centrífuga	Bomba centrífuga	Bomba helicoidal
Fuente de alimentación	200V - 240V	200V - 240V	380V - 480V
Control de movimiento	Simple	Medio	Alto
Comunicación	Modbus RTU RS485	Profibus, Profinet y Ethernet IP	Profibus, Profinet y Ethernet IP

Fuente: Lista de precios Siemens 2019

Para la determinación del variador se tuvo que seleccionar un modelo que tenga aplicaciones en el control de bombas centrífugas, la fuente de alimentación es de 220V, que tenga un control de frecuencia medio y por último que tenga comunicación por Profinet igual que los equipos seleccionados anteriormente, debido a todas estas condiciones el modelo seleccionado fue el Sinamics G120

3.4.2. Selección de instrumentación

Para el sistema automático de generación de agua caliente se necesitó la implementación de los siguientes sensores y actuadores que se muestran en la tabla N.º 20:

Tabla N° 20: Sensores y actuadores necesarios para el sistema

	Tipo	Estado	Cantidad
Tanque	Válvula de esférica	C.N.M	1
	Switch de nivel		3
	Indicador de Temperatura		1
	Transmisor de T° Pt100		1
	Válvula esférica	N.C	1
Bomba de agua	Indicador de Presión		3
	Válvula esférica	N.A	3
	Válvula esférica	N.A	4
	Filtro "Y"		2
	Unión universal		7
	Transmisor de Presión		2
	Switch de presión		2
	Válvula check		2
	Válvula solenoide	N.C	3
	Válvula de Globo	C.N.M	1
	Unión reductora		2
	Válvula de alivio		1
	Indicador de Temperatura		1
	Indicador de presión		1
	Válvula esférica	N.A	1
	Caldero	Indicador de Temperatura	
Indicador de presión			1
Válvula esférica		N.A	1
Switch de Temperatura			1
Switch de Fluido			1
Válvula de Globo		C.N.M	1
Unión universal			1
Suministro de agua de Reposición	Válvula esférica	N.A	2
	Válvula esférica	N.C	1
	Unión universal		3
	Válvula filtro "Y"		1
	Válvula solenoide	N.C	1
	Válvula check		1
	Válvula de Globo	C.N.M	1
	Total		58

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.1. Instrumentación para el tanque

De los elementos más importantes para la instrumentación del tanque tenemos:

- a) Transmisor de temperatura: Para la selección del sensor de temperatura se tuvieron las opciones de la tabla N.º 21:

Tabla N.º 21: Sensores de Temperatura

Sensor	Sensibilidad $\Omega/^\circ\text{C}$	Rango $^\circ\text{C}$	Linealidad
Termopar J	0,05	-200 a 700	Lineal
RTD Pt100	0,39	-50 a 600	Lineal
Termistor NTC	200	-50 a 300	No Lineal

Fuente: Elaboración propia

Como nuestro sistema trabaja en un rango de temperatura de 0-100°C no necesitamos una alta sensibilidad, pero sí necesitamos que sea lineal la lectura de temperatura, entonces el sensor más apropiado es el sensor Pt100.

- b) Indicador de Temperatura: Según nuestras condiciones iniciales, nuestro rango de trabajo es de 45-60° por lo tanto usaremos un termómetro bimetálico de la marca Nuova Fima con las características de la tabla N.º 22:

Tabla N.º 22: Indicador de Temperatura

Indicador de Temperatura - Termómetro Bimetálico			
Marca	Rango	Dimensiones	Max. Presión de trabajo
Nuova Fima	0-100°	4.32" (109,8mm)	200 psi - 15Bar

Fuente: Elaboración propia

- c) Switch de nivel: Para nuestro control de tanque hemos utilizado tres Switch de nivel tipo boya de montaje horizontal Marca: Nivelco Modelo: NIVOMAG MKA-21N-0 con características de la tabla N.º 23 y se han ubicado en tres niveles denominados Nivel alto, Nivel bajo y Nivel muy bajo, cada uno cumpliendo con una función diferente.

Tabla N° 23: Switch de nivel

Switch de nivel tipo boya				
Marca	Modelo	Max. Presión de trabajo	Temperatura del liquido	Activación
Nivelco	NIVOMAG MKA-21N-0	2.5MPa - 25Bar	-25°C... + 250°C	Tipo Switch On - Off

Fuente: Elaboración propia

- d) Válvula esférica: Se utilizó una válvula esférica para el control ON-OFF de forma manual en la línea de suministro de agua con características de la tabla N.º 24:

Tabla N° 24: válvula esférica

Válvula esférica			
Marca	Material	Medida	Presión Máx.
Apollo	Acero Inoxidable	3/4"	150 psi

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2. Instrumentación para la bomba de agua

- a) Transmisor de presión: El transmisor de presión capta el medio físico de presión y lo transmite a través de una señal eléctrica estándar puede ser de 4-20 mA. características de la tabla N.º 25:

Tabla N.º 25: Transmisor de presión

Transmisor de Presión				
Marca	Rango	Tiempo de respuesta	Señal	Tensión
Danfoss	0 - 10Bar	Líquido - 4ms Aire - 35ms	4-20mA	9 - 32 V

Fuente: Elaboración propia

- b) Indicadores de presión: Cada etapa de Bombeo (suministro y recirculación) cuenta con un indicador de presión para verificar el correcto funcionamiento de estas, en manómetro cuenta con características de la tabla N.º 26 y el manovacuómetro en la tabla N.º 27:

Tabla N.º 26: Indicador de presión - manómetro

Indicador de presión - Manómetro			
Marca	Rango	Dimensiones	Max. Presión de trabajo
Nuova Fima	0-8 Bar	110,6 mm	200 Psi - 15Bar

Fuente: Elaboración propia

Tabla N.º 27: Indicador de presión - Manovacuómetro

Indicador de presión - Manovacuómetro			
Marca	Rango	Dimensiones	Max. Presión de trabajo
Nuova Fima	-2... +4 Bar	110,6 mm	200 Psi - 15Bar

Fuente: Elaboración propia

- c) Switch de presión: Los Switch de presión activan una señal de contacto eléctrico el cual detendrá las bombas por seguridad contra sobre presión; cada etapa de bombeo tendrá un switch de presión, cuenta con las características de la tabla N.º 28:

Tabla N.º 28: Switch de temperatura

Switch de Temperatura				
Marca	Modelo	Rango	Diferencial	Temperatura del medio
Danfoss	KP 62	-30 + 120°C	1.5 Bar	-40... + 65°C

Fuente: Elaboración propia

- a) Indicador de Temperatura: Según nuestras condiciones iniciales, nuestro rango de trabajo es de 45-60° por lo tanto usaremos un termómetro bimetálico de la marca Nuova Fima con las características de la tabla N.º 29:

Tabla N° 29: Indicador de temperatura

Indicador de Temperatura - Termómetro Bimetálico			
Marca	Rango	Dimensiones	Max. Presión de trabajo
Nuova Fima	0-100°	4.32" (109,8mm)	200 psi - 15Bar

Fuente: Elaboración propia

- b) Indicadores de presión: Cada etapa de Bombeo (suministro y recirculación) cuenta con un indicador de presión para verificar el correcto funcionamiento de estas, las características se muestran en la tabla N.º 30:

Tabla N.º 30: Indicador de presión

Indicador de presión - Manómetro			
Marca	Rango	Dimensiones	Max. Presión de trabajo
Nuova Fima	0-8 Bar	110,6 mm	200 psi - 15Bar

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.3. Instrumentación para el calderín.

- a) Indicador de Temperatura: Según nuestras condiciones iniciales, nuestro rango de trabajo es de 45-60° por lo tanto usaremos un termómetro bimetálico de la marca Nuova Fima con las características de la tabla N.º 31:

Tabla N° 31: Indicador de temperatura

Indicador de Temperatura - Termómetro Bimetálico			
Marca	Rango	Dimensiones	Max. Presión de trabajo
Nuova Fima	0-100°	4.32" (109,8mm)	200 psi - 15Bar

Fuente: Elaboración propia

- b) Indicadores de presión: Cada etapa de Bombeo (suministro y recirculación) cuenta con un indicador de presión en este caso se verifica la presión de agua en la salida del caldero, las características se muestran en la tabla N.º 32:

Tabla N.º 32: Indicador de presión - manómetro

Indicador de presión - Manómetro			
Marca	Rango	Dimensiones	Max. Presión de trabajo
Nuova Fima	0-8 Bar	110,6 mm	200 Psi - 15Bar

Fuente: Elaboración propia

- c) Switch de temperatura: El Switch de temperatura capta el medio físico de temperatura y lo transmite a través de una señal eléctrica estándar, puede ser de 4-20 mA. que corta o des energiza el quemador a 32°C con una variación de 1°C, se utiliza como medida de seguridad a la salida del caldero con características de la tabla N.º 33:

Tabla N.º 33: Switch de temperatura

Switch de Temperatura				
Marca	Modelo	Rango	Diferencial	Temperatura del medio
Danfoss	KP 62	-30 + 120°C	1.5 Bar	-40... + 65°C

Fuente: Elaboración propia

- d) Switch de Flujo: El Switch de flujo se activa cuando no hay flujo y manda una señal eléctrica al controlador y haciendo que el quemador se apague. En este caso usamos un switch que trabaja con una presión max. De 60 Psi y con las siguientes características de la tabla N.º 34:

Tabla N.º 34: Switch de flujo

Switch de Flujo				
Marca	Material	Medida	Presión Máx.	Temperatura
Danfoss	Acero Inoxidable	3/4"	10 bar	+5... + 80°C

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.4. Instrumentación para el suministro de agua de reposición

- a) Válvula esférica: Se utilizó una válvula esférica para el control ON-OFF de forma manual en la línea de suministro de agua de reposición y con las características de la tabla N.º 35:

Tabla N° 35: Válvula esférica

Válvula esférica			
Marca	Material	Medida	Presión Máx.
Apollo	Acero Inoxidable	3/4"	150 psi

Fuente: Elaboración propia

- b) Válvula de filtro “Y”: después de la válvula esférica viene enseguida una válvula de filtro tipo “Y” para el filtrado de las impurezas que puedan venir en la línea de agua de reposición, de características de la tabla N.º 35:

Tabla N° 36: Filtro tipo “Y”

Filtro tipo “Y”				
Marca	Material	Medida	Presión Máx.	Temperatura Máx.
Spirax Sarco	Acero Inoxidable	3/4"	25 bar	260° C

Fuente: Elaboración propia

- c) Válvula check: También conocido como válvula antirretorno que nos ayudó para que el agua vaya en un solo sentido en la línea de suministro de agua de reposición con características de la tabla N.º 37:

Tabla N° 37: válvula check

Válvula check			
Marca	Material	Medida	Presión Máx.
Crane	Acero Inoxidable	3/4"	285 psi

Fuente: Elaboración propia

- d) Válvula reguladora de presión: con esta válvula pudimos regular la presión constante de agua si detectamos alguna caída de presión en alguna línea del sistema, al mantener constante la presión aseguramos que no varié la temperatura en el sistema de calentamiento, las especificaciones técnicas lo podemos ver en la tabla N.º 38:

Tabla N.º 38: válvula reguladora de presión

Válvula reguladora de presión					
Marca	Material	Medida	Presión Máx.	Δ presión	Temperatura
EQA	Acero al carbono	3/4"	4 bar	0,017 bar	-20... + 60°C

Fuente: Elaboración propia

3.5. Diseño de software

Para empezar la programación del PLC Siemens S7- 1200 primero tenemos que acondicionar nuestros transmisores de temperatura y presión tal como se muestra en la figura N.º 33, se procede a escalar las señales, en el caso del transmisor de temperatura se escala en el rango de 0 a 100°C y en el caso del transmisor de presión en el rango de 0 a 8 bar.

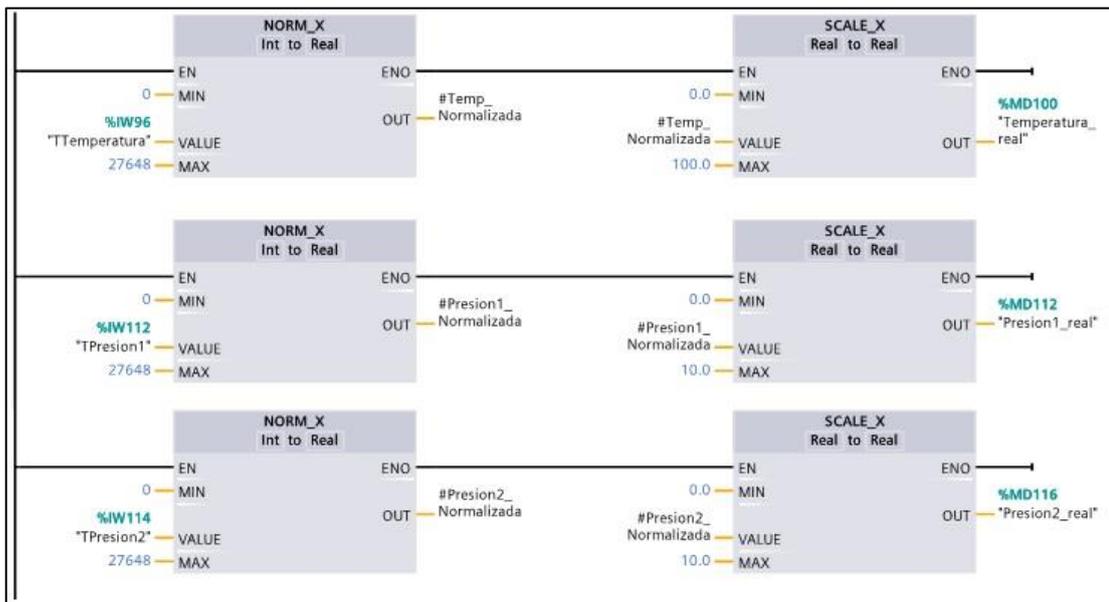


Figura N.º33: Acondicionamiento de señales de transmisión

Fuente: Elaboración propia

Después se procede a poner la marca de emergencia que cuando se accione desactivara la válvula de suministro, la bomba que circula hacia el calentador, la bomba que suministra hacia la planta y la válvula que suministra el gas al calentador tal como se muestra en la figura N.º 34:

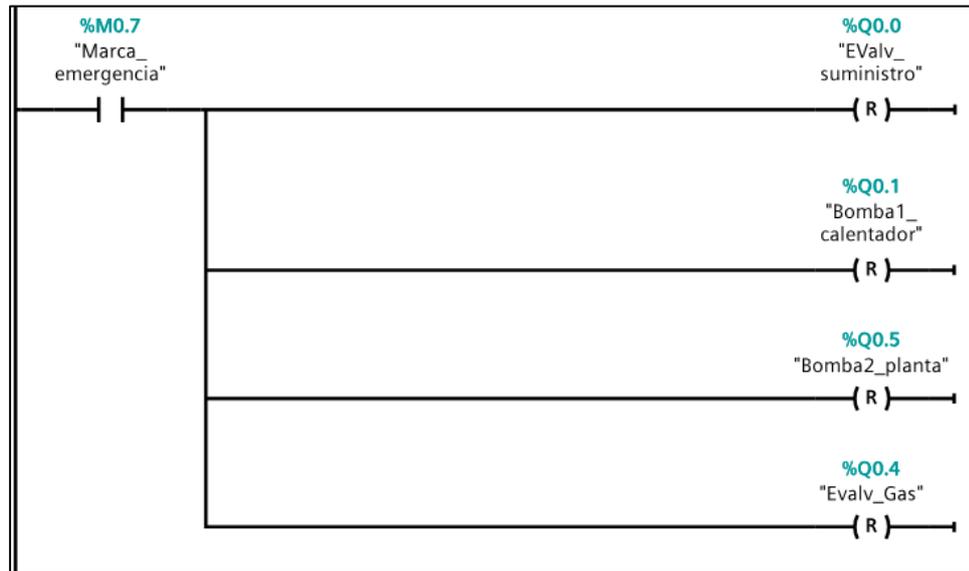


Figura N°34: Bloque de marca de emergencia.
Fuente: Elaboración propia

Siguiendo con la programación en la figura N.º 35 se procede a poner la siguiente condición, si la temperatura es mayor a 80°C se activa la marca de emergencia y esta apaga el calentador para que el tanque no salga del rango de temperatura de trabajo.

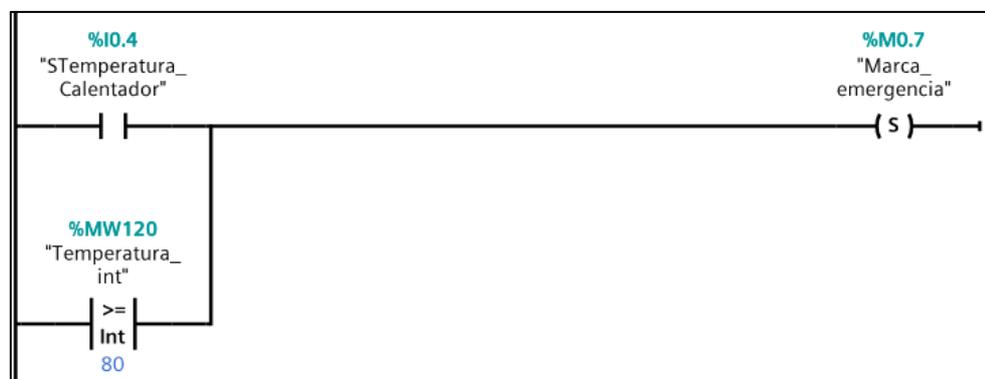


Figura N°35: Bloque de condición para temperatura.
Fuente: Elaboración propia

Otra condición que se incluyó en la programación fue la de poner un límite de 5 bar de presión de agua a la salida de las bombas, pasado este límite se activa la marca de emergencia el cual procederá apagar la bomba de circulación al caldero o la bomba de suministro hacia la planta tal como se muestra en la figura N.º 36

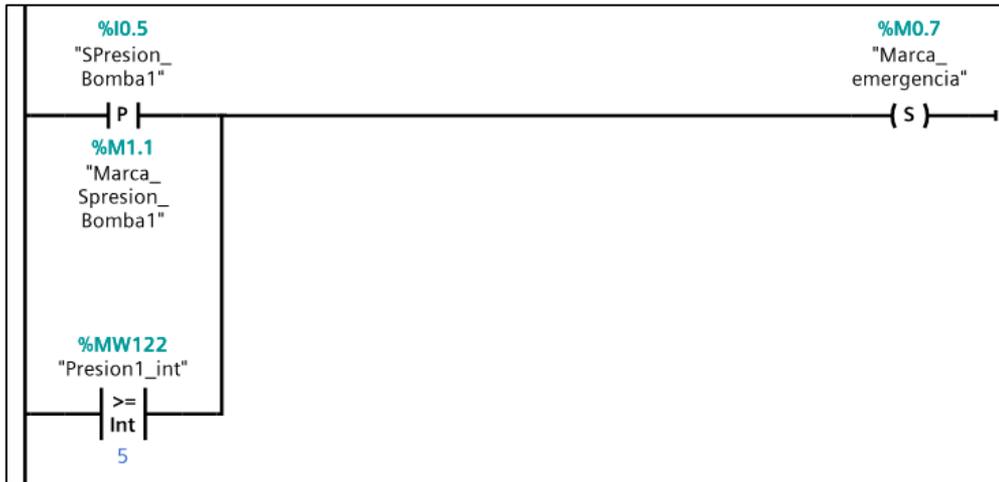


Figura N°36: Bloque de condición para la presión
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura N.º 37 se muestra el bloque donde se coloca la marca de nivel de tanque mínimo el cual si se activa procederá a desactivar las bombas de circulación hacia el tanque y la bomba de circulación hacia planta, también se desactivará la válvula que regula la salida de gas hacia el calentador.

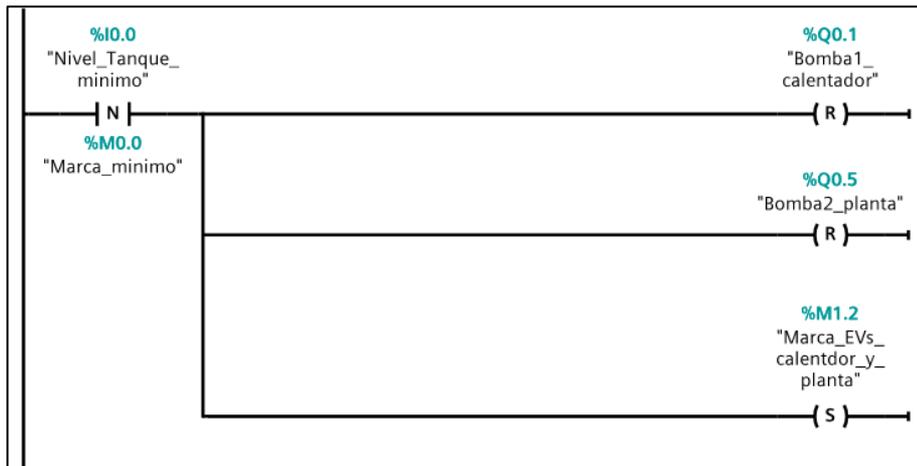


Figura N°37: Bloque de condición para el nivel mínimo
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura N.º 38 se muestra el bloque para configurar la entrada Start en cual activa la marca Start y la marca Stop.

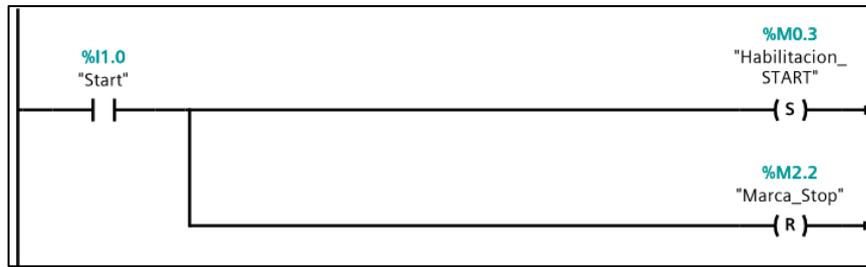


Figura Nº38: Bloque de configuración para la entrada Start
Fuente: Elaboración propia

En la figura N.º 39 vemos que si se activa la marca Stop se procederá apagar la bomba de circulación hacia el caldero, se cierra la válvula de suministro de agua y se cierra la válvula de suministro de gas para el caldero.

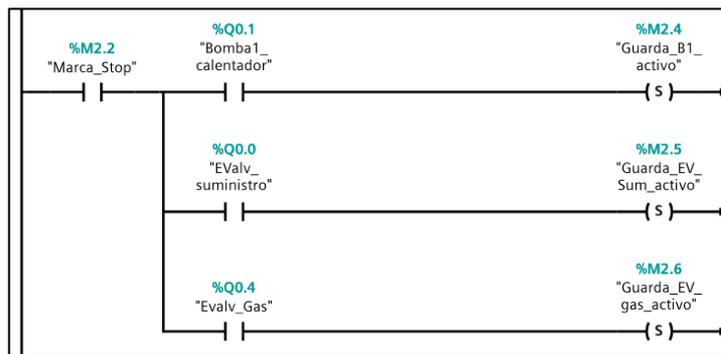


Figura Nº39: Bloque de configuración para la marca Stop
Fuente: Elaboración propia

La válvula de suministro de agua se abre al cumplir cualquiera de las dos líneas de condiciones tal como se muestra en la figura N.º 40:

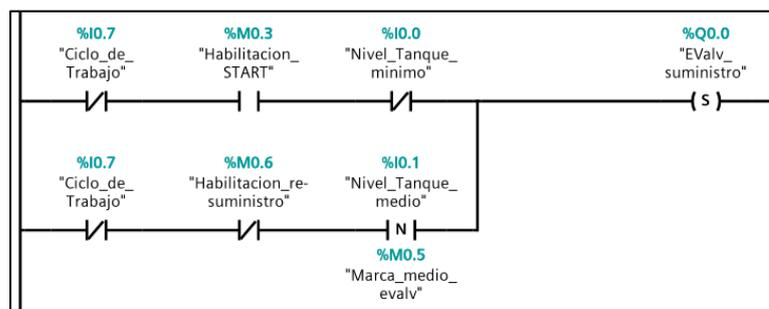


Figura Nº40: Bloque de activación de la válvula de suministro
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura N.º 41 vemos el bloque donde se configura la condición de que si se activa la señal de tanque al máximo se cierra la válvula de suministro para que el tanque no sobre pase su capacidad de almacenamiento.

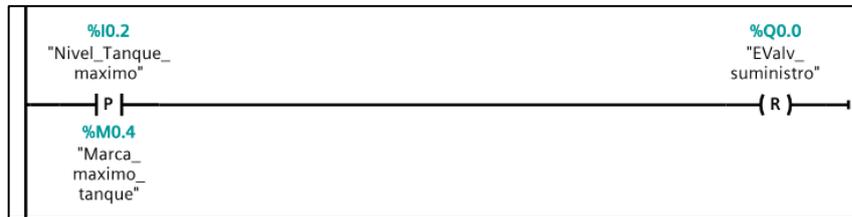


Figura Nº41: Bloque de desactivación de la válvula de suministro
Fuente: Elaboración propia

En la figura N.º 42 vemos que una vez lleno el tanque se procede activar las señales de la bomba uno para que circule el agua por el calentador y abre el solenoide del calentador.

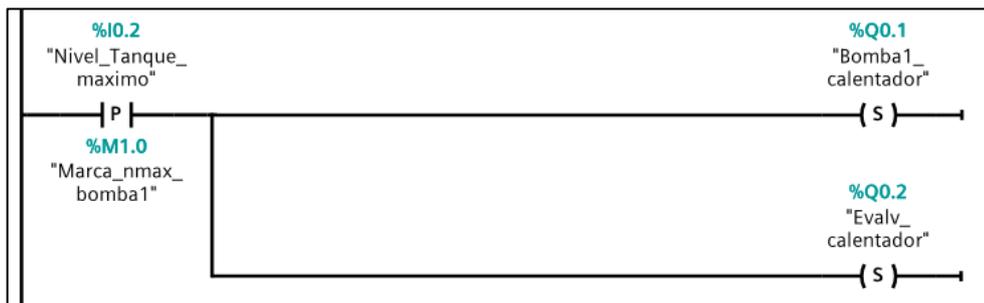


Figura Nº42: Bloque de desactivación de la válvula de suministro
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura N.º43 podemos ver el bloque que cuando se censa el flujo recién se enciende el calentador y abre el tren de gas el cual será controlado por un bloque PID

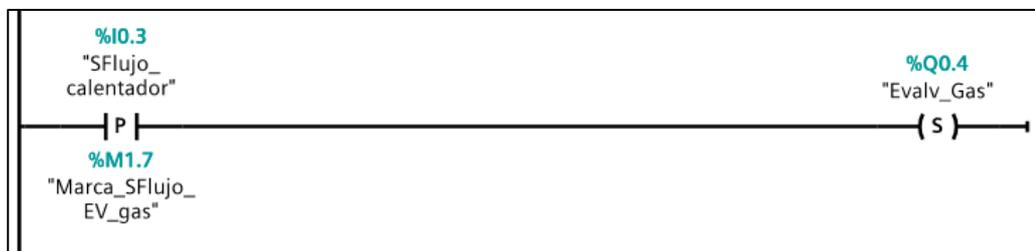


Figura Nº43: Bloque de activación de válvula de gas
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura N.º 44 podemos ver el bloque donde configura para cuando el switch de nivel medio marca un flanco descendente entonces apaga la bomba dos y por lo tanto no se podría enviar agua caliente hacia la planta.



Figura N.º44: Bloque de seteo de marca de bomba 2
Fuente: Elaboración propia

Una vez el calentador este prendido y la bomba uno este circulando la temperatura en el tanque tiene que llegar a 60°C, cuando se llegue al Set Point se activara la bomba dos el cual suministra agua caliente hacia la planta tal como se muestra en la figura N.º 45:

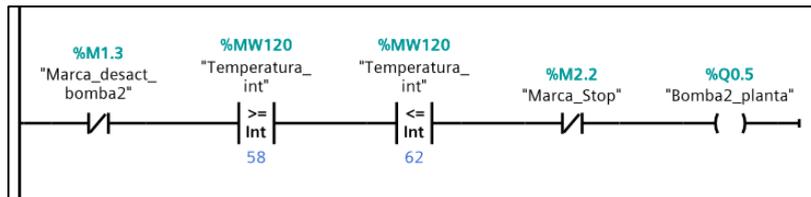


Figura N.º45: Condiciones de accionamiento para la bomba dos.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N.º 46 vemos el bloque donde se muestra la configuración del PID el cual tiene como entrada en censado de temperatura y como salida el porcentaje de apertura de la válvula.

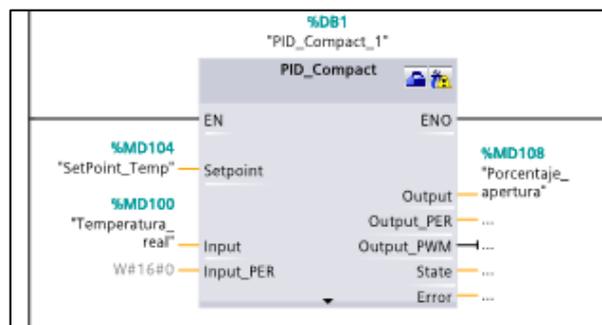


Figura N.º46: Bloque PID
Fuente: Elaboración propia

Para el control del porcentaje de apertura de la válvula de gas se tiene que normalizar la señal para después escalarla y así el bloque PID pueda controlarla tal como se muestra en la figura N.º 47:

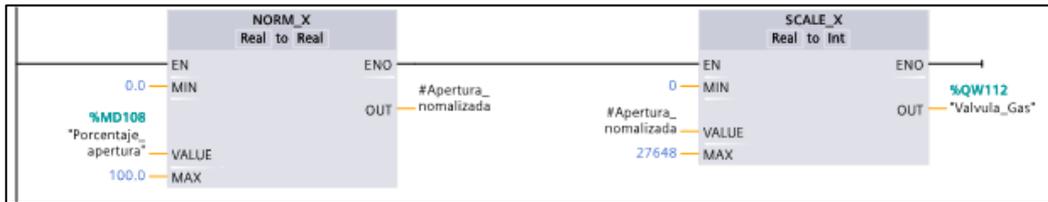


Figura N°47: Escalamiento de la válvula de gas
Fuente: Elaboración propia

3.5.1. Programación del HMI

Después de haber seleccionado el HMI se hace el diseño de la interfaz gráfica como se muestra en la figura N.º48 que representa el sistema con sus elementos más resaltantes como son: Tanque de almacenamiento, calentador, bombas, válvulas e instrumentos.

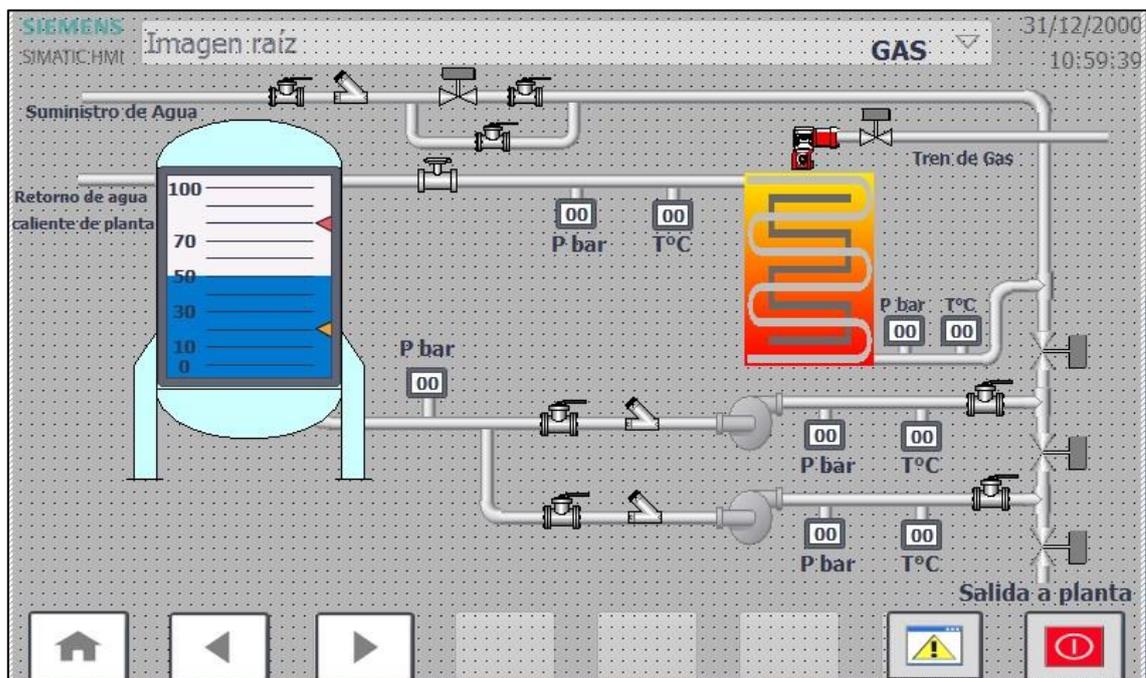


Figura N°48: Visualización de la página principal del HMI
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 49 se puede apreciar la pantalla de recetas donde se puede elegir una temperatura predeterminada de trabajo, de tal manera que se pueda preprogramar el sistema para una labor más eficiente y ordenada.

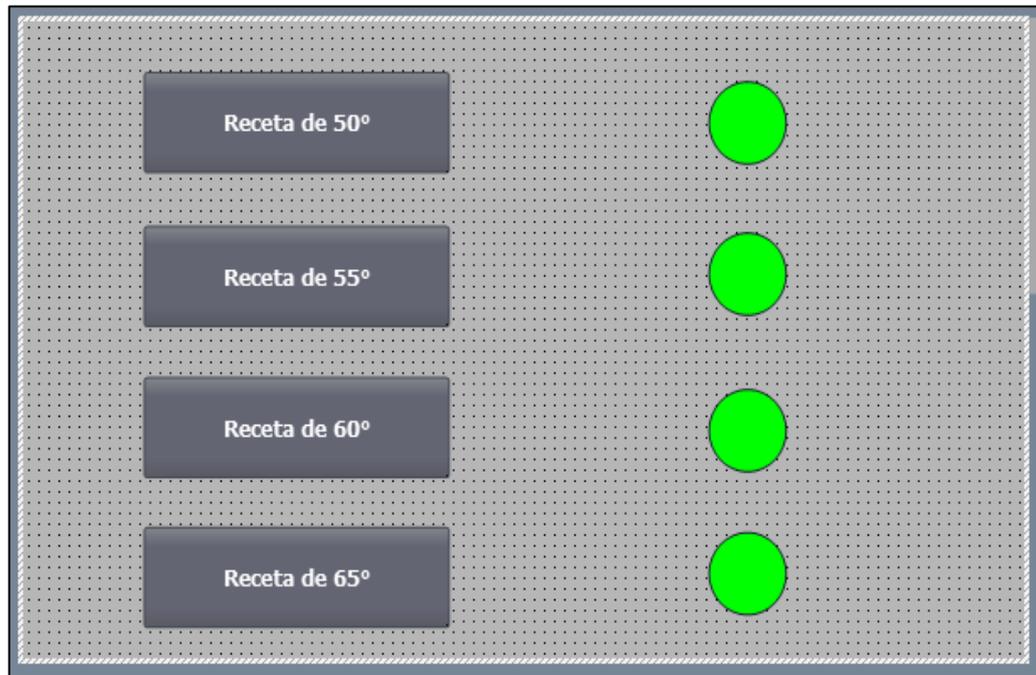


Figura N°49: Visualización de la página dos del HMI
Fuente: Elaboración propia

3.6. Implementación del sistema

En esta sección se desarrolló la implementación del prototipo del sistema automático; en la parte mecánica, se comenzó con la integración del calentador y el tanque de almacenamiento en un solo equipo para simplificar el sistema, luego se realizó la instalación de elemento calefactor y bomba de suministro; en la parte eléctrica - electrónica, ensamble de tablero de control y cableado general; en la parte de instrumentación, se realizó la instalación de válvulas, switch de nivel, termómetro, PT-100 y manómetro; y finalmente en la parte de software, se realizó el programa para controlar de forma automática el sistema.

3.6.1. Instalaciones mecánicas

Para la elaboración de la parte mecánica del sistema se escaló de 1:15 el volumen disponible de agua caliente disponible se escaló de 1:7 el flujo de agua caliente a suministrar y a un solo punto de despacho de agua caliente.

El calentador se fusionó con el tanque de almacenamiento en un solo equipo conservando la esencia del sistema de calentamiento de agua, la forma en que se suministró la energía térmica se cambió de un sistema con calor de combustión a un sistema calefactor eléctrico.

Se consideró al elemento que brinda energía térmica como una caja negra térmica donde es indiferente para este prototipo para efectos prácticos la forma en que se genera esta energía térmica.

En la figura N° 50 se muestra como quedó la integración en un solo equipo del tanque de almacenamiento y el calentador, este elemento integrado está conformado por un cilindro al que se le soldaron coplas de acero al carbono ASTM A105, 4 coplas de ½" y 1 copla de 2" para la instalación mecánica de un sensor PT-100, un termómetro, una salida de agua caliente, un ingreso de agua fría y una resistencia de inmersión de 5.5 kW.



Figura N°50: Tanque – calentador
Fuente: Elaboración propia

Luego de tener las conexiones mecánicas soldadas, se colocó una base interior al cilindro para evitar la oxidación y por el exterior se aplicó dos capas de pintura para una mejor presentación. El proceso realizado se muestra en la figura N° 51.



Figura N°51: Pintado de tanque - calentador
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 52 se muestra cómo se instaló mecánicamente el elemento calefactor (Resistencia de inmersión) de tal manera que pueda calentar el agua al interior del tanque (cilindro).



Figura N°52: Instalación mecánica de elemento calefactor
Fuente: Elaboración propia

Una vez instalado el calefactor de inmersión, se procedió a instalar la línea de succión, la bomba de impulsión y la descarga con una derivación de retorno al tanque como alivio y para ayudar a ecualizar la presión de descarga. Y ya que solo se tuvo un punto de descarga se consideró un 1 bar de presión a la descarga lo que nos daría una escala de 1:4 respecto a la presión de diseño. En la figura N° 53 se muestra cómo fue el proceso de instalación de bomba y líneas.



Figura N°53: Instalación mecánica de bomba y líneas de agua caliente
Fuente: Elaboración propia

Luego de esto se instaló la línea de ingreso de agua con una válvula de corte y una electroválvula para el control de ingreso de agua en función al nivel del agua en el tanque-calentador. En la figura N° 54 se muestra cómo se realizó esta labor.



Figura N°54: Instalación mecánica de línea de ingreso de agua fría
Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Instalaciones eléctricas.

Para la implementación de la parte eléctrica del prototipo se diseñó un tablero equivalente al diseño original teniendo en consideración la simplificación del sistema para la realización del prototipo.

Así mismo se escaló la potencia necesaria para calentar el agua, teniendo como limitación la potencia máxima disponible 5.8 kW para pruebas de la acometida eléctrica disponible para alimentar el tablero de control.

Por lo tanto, se optó por una resistencia de inmersión de 5.5 kW monofásica, con conexión de 2" NTP y longitud de inserción de 45 cm.

El tablero se diseñó para una potencia de 6 kW máxima o 28 Amperios en 220 VAC monofásico.

El tablero del prototipo diseñado se puede apreciar en la figura N° 55.

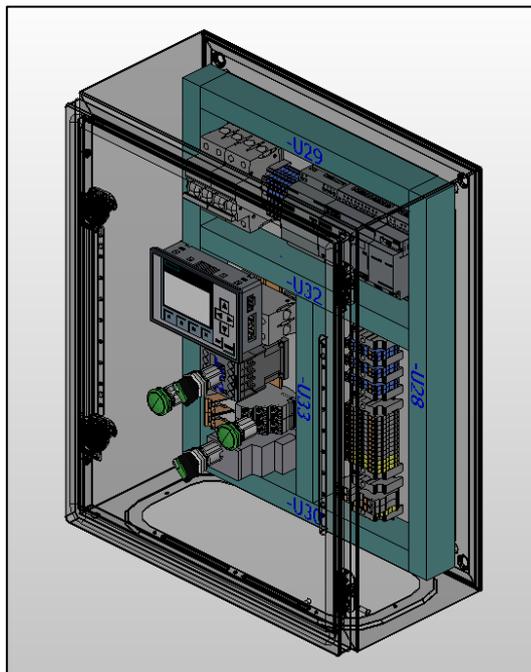


Figura N°55: Vista 3D de tablero de prototipo
Fuente: Elaboración propia

Así mismo se pudo apreciar las vistas frontal e isométrica del interior del tablero de control del prototipo en la figura N° 56.

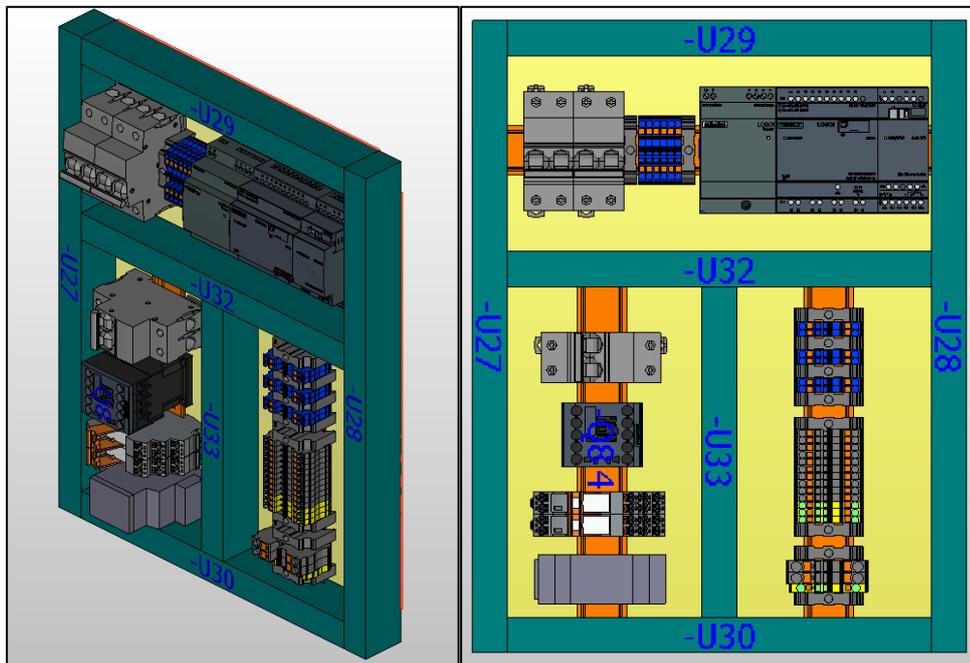


Figura N°56: Vista isométrica y frontal de tablero de control
Fuente: Elaboración propia

Una vez completado el diseño se procedió a ensamblar el tablero de control del prototipo tablero. Se comenzó por colocar las canaletas porta cable y los rieles DIN. En la figura N° 57 se ilustró el proceso.



Figura N°57: Instalación de riel DIN y canaletas
Fuente: Elaboración propia

Una vez se tuvo instalado las canaletas y el riel DIN se procedió a emplazar los componentes en su ubicación de acuerdo con el diseño realizado. En la figura N.º 58 se puede apreciar la acción.



Figura N.º58: Instalación de componentes
Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar la fijación de componentes se procedió a realizar el cableado interno y fijarlos en las canaletas. En la figura N.º 59 se puede apreciar el proceso.



Figura N.º59: Cableado interno
Fuente: Elaboración propia

Luego, se procedió a instalar los componentes en la puerta del tablero como son HMI, selector, interruptor y pilotos. En la figura N° 60 se puede apreciar el desarrollo de la instalación de los componentes.



Figura N°60: Instalación de componentes en puerta de tablero
Fuente: Elaboración propia

Una vez terminado el tablero se procede a ajustarlo con la base que construimos y ponerla justo al tanque – calentador. En la figura N° 61 se puede apreciar lo indicado.



Figura N°61: Instalación de tablero
Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Instalaciones de instrumentación

En la parte de instrumentación, se instaló el sensor de temperatura, un termómetro para visualizar y contrastar la temperatura dentro del tanque – calentador, así mismo la válvula solenoide para el control de ingreso de agua y finalmente el automático de nivel para indicar en qué nivel se encuentra el agua en el tanque – calentador.

En la figura N° 62 se puede apreciar la instalación del termómetro realizada.



Figura N°62: Instalación de termómetro
Fuente: Elaboración propia

Luego se realizó la instalación del sensor PT-100, en la figura N° 63 se puede apreciar la instalación del sensor PT-100 con conexión de ½” NPT, diámetro de bulbo 3/8” y longitud de inserción 8”



Figura N°63: Instalación de sensor PT100
Fuente: Elaboración propia

Por último, se instaló la válvula solenoide, el automático de nivel y se procedió a cablear los instrumentos hacia el tablero de control. Esto se puede apreciar a continuación en la figura N° 64.



Figura N°64: Electroválvula y cableado de instrumentos
Fuente: Elaboración propia

3.6.4. Desarrollo e implementación de software

Para la tarea de programación se tuvo como entradas digitales a:

- Selector de dos posiciones (Auto – 0 – Man): Entradas I2 e I3
- Pulsador con enclavamiento (Bomba ON): Entrada I4
- Nivel alto y bajo: Entradas I5 e I6

Como entradas analógicas:

- Señal de PT100: Entradas AI1

Como salidas digitales:

- Encendido de bomba: Salida Q1
- Salida PWM para resistencia: Salida Q2
- Apertura de solenoide para ingreso de agua: Salida Q3

Modos de operación

a) En el modo manual

Solo se puede activar la bomba para retirar el agua almacenada siempre que no esté activado el switch de bajo nivel.

b) En el modo automático

El sistema verifica el nivel del agua, si el nivel es bajo abre la válvula de ingreso de agua hasta llenar el tanque – calentador.

Una vez el tanque esté lleno el sistema comenzará a calentar el agua aplicando un control PI sobre el sistema.

Cuando el agua este en las condiciones adecuadas de temperatura se podrá activar el arranque de la bomba para suministrar agua caliente.

Extractos de programa de PLC de tablero de control de prototipo

A continuación, se muestran los extractos más resaltantes del programa desarrollado para el control del prototipo del sistema automático de calentamiento de agua. De la misma manera se muestran las pantallas más importantes desarrolladas para la interacción con el sistema.

En la figura N° 65 se pudo apreciar el extracto de control PI del sistema.

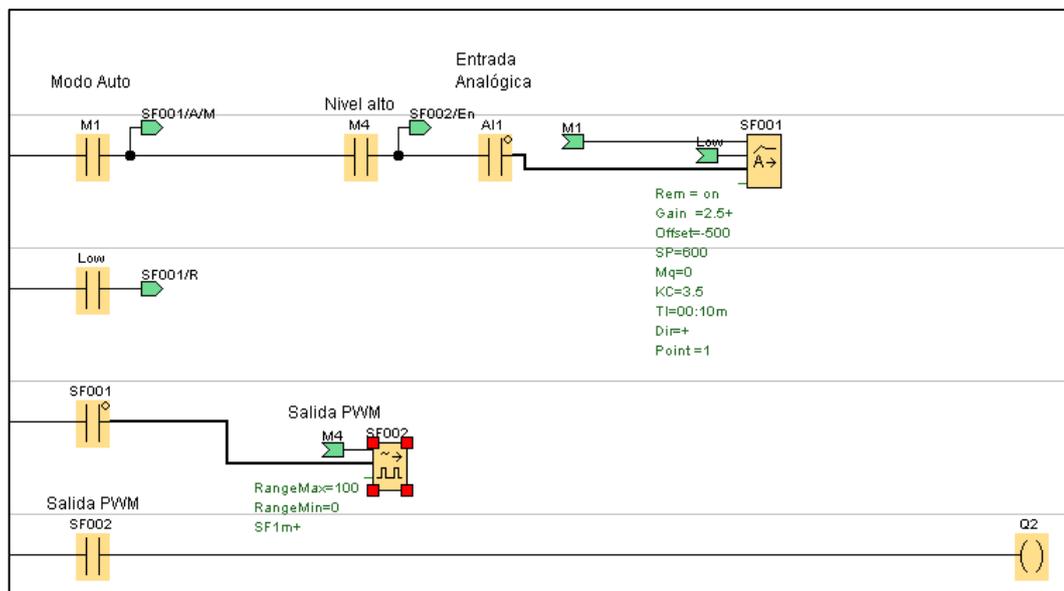


Figura N°65: Control PI y salida PWM
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 66 se pudo apreciar el modo manual, el selector debe moverse hacia el modo manual. Al activarse la señal en el PLC el sistema pasará a modo manual donde se podrá accionar la bomba para vaciar el tanque

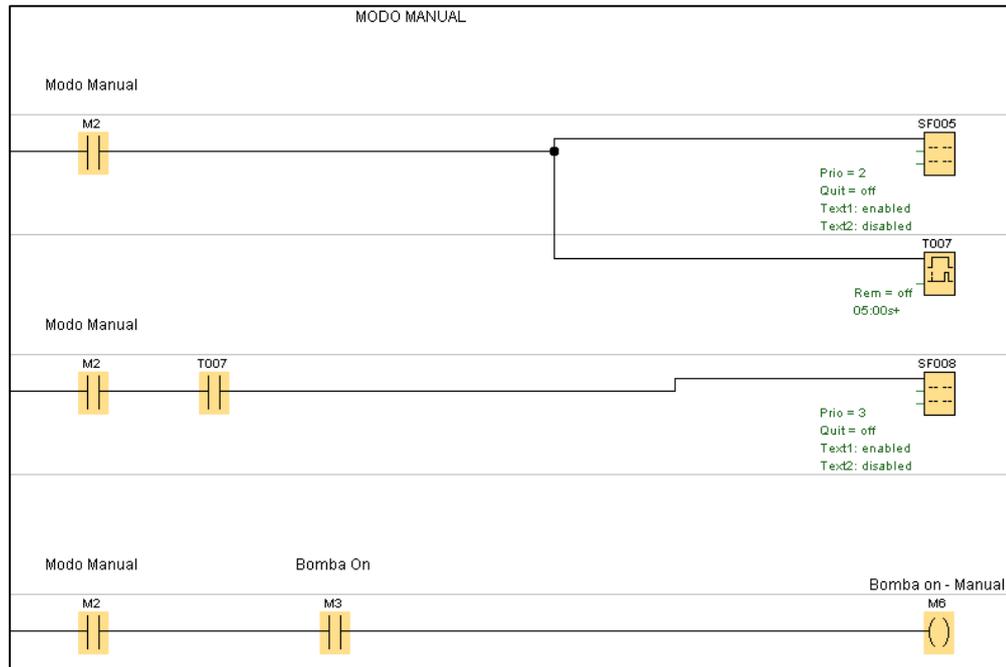


Figura N°66: Modo Manual - Prototipo
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 67 se pudo apreciar el modo automático, cuando el selector de ubica en modo automático el sistema controla el nivel de agua y calienta el agua de forma automática

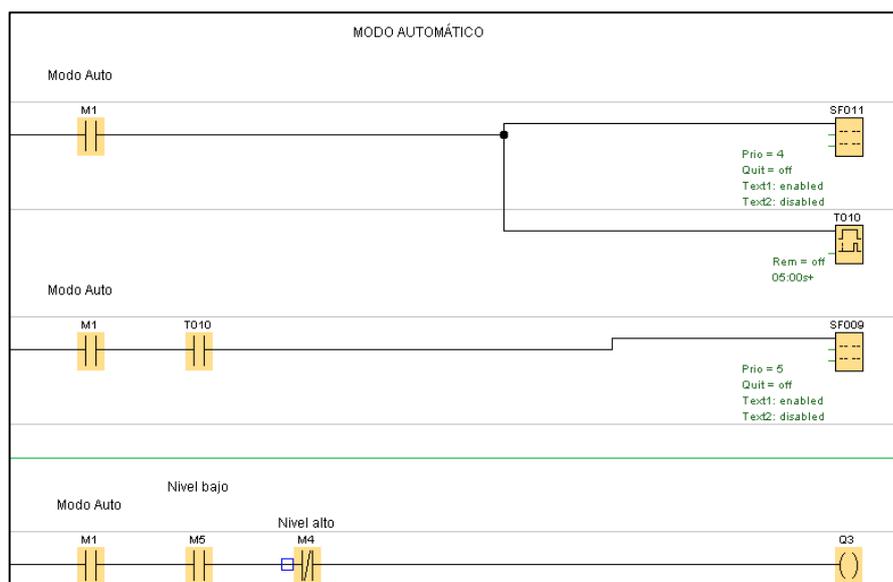


Figura N°67: Modo automático - Prototipo
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 68 se pudo apreciar la pantalla en modo manual una vez ubicado el selector en modo manual, la única acción permitida es accionar la bomba para poder vaciar el tanque en caso sea necesario.

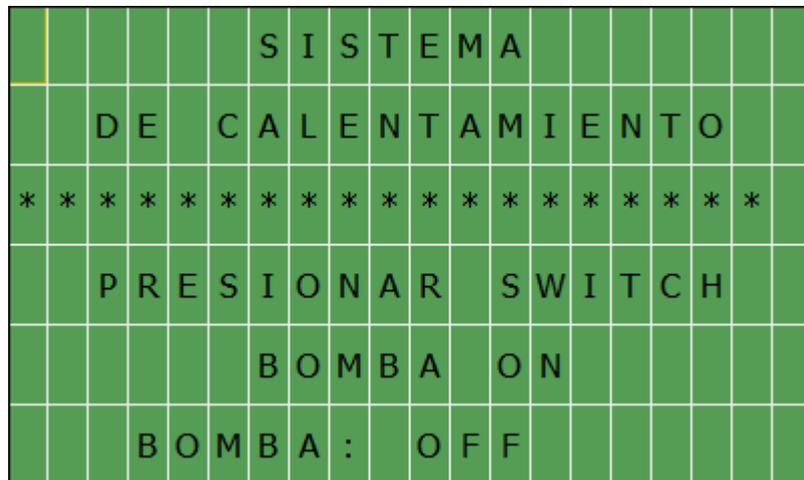


Figura N°68: Pantalla modo manual - Prototipo
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 69 se pudo apreciar la pantalla en modo automático, en ella se puede observar el valor de consigna (SP), el valor actual (PV), el estado de la bomba y la potencia de salida.

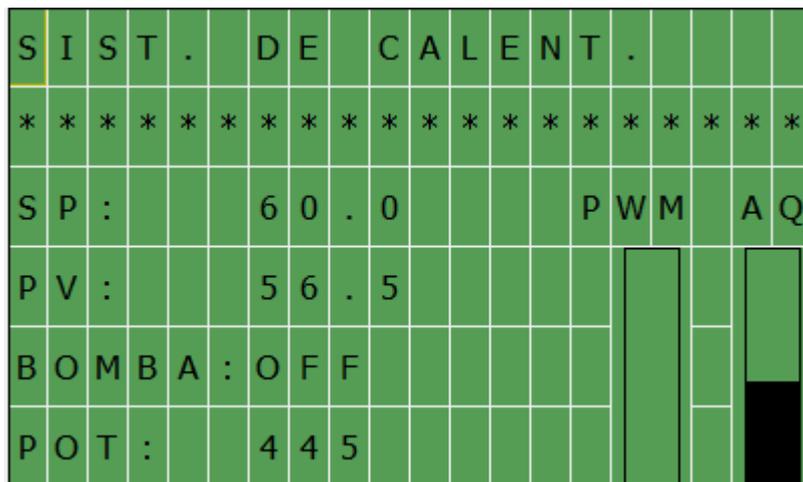


Figura N°69: Pantalla modo automático - Prototipo
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 70 se pudo apreciar la imagen de seguimiento en línea de señales y control PI del sistema de calentamiento automático. Donde se relacionan el valor presente, el valor de consigna y la salida de potencia

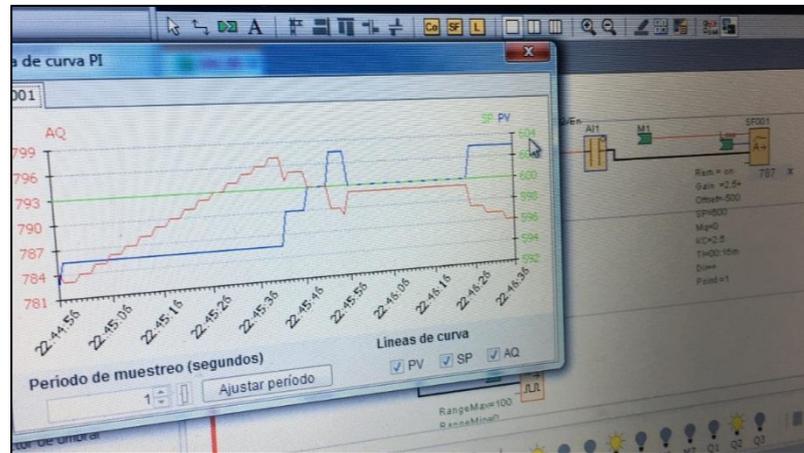


Figura N°70: Pantalla de seguimiento de señales y control PI - Prototipo
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el prototipo quedó en óptimas condiciones de funcionamiento, en la figura N° 71 se puede apreciar el aspecto final del prototipo con sus componentes integrados y en funcionamiento.



Figura N°71: Prototipo de sistema de calentamiento
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo corresponde a las pruebas y resultados obtenidos como resultado de la operación del sistema implementado. Las pruebas realizadas mostraron el comportamiento del sistema en el proceso de calentamiento de agua y además sirvieron como referencia para verificar el cumplimiento de los objetivos propuestos.

4.1. Pruebas

Para demostrar la eficacia del sistema automático de generación de agua caliente, este fue sometido a diversas pruebas bajo el soporte del diseño del proceso automatizado y la implementación del prototipo. Se observará el comportamiento del sistema a fin de definir su idoneidad y eficacia para la cual fue diseñado.

4.1.1. Prueba 1

Consiste en encender el sistema que determine el nivel del agua en el tanque – calentador, realice la acción de llenado de ser necesario, caliente el agua al set point deseado y permita bombear el agua a la presión mínima requerida. Esta prueba es para determinar que el sistema tiene el nivel de automatización requerido y garantice los parámetros de temperatura y presión requeridos.

4.1.2. Prueba 2

Consiste poder realizar el cambio de set point simulando diferentes condiciones de operación del sistema (diferentes valores de temperatura necesaria), el sistema deberá llegar a esos valores de set point. Esta prueba busca averiguar si el sistema permite proveer diferentes temperaturas de agua caliente.

4.1.3. Prueba 3

Consiste en encender el sistema de calentamiento automático y, durante su operación, verificar como el sistema entrega energía al agua y de tal forma determinar si se está haciendo uso eficiente de la energía a suministrar al sistema.

Esta prueba es para validar el uso eficiente de la energía de calentamiento.

4.1.4. Prueba 4

Consiste en evaluar que el sistema pueda ser operado de manera segura. Lo que se busca es que la operación del sistema sea lo más segura y amigable posible con el operador. La prueba es para demostrar que el sistema puede ser operado de forma segura para el operador.

4.1.5. Prueba 5

Consiste en realizar una prueba de lavado de cubeta con agua caliente. Lo que se busca es probar la factibilidad de la aplicación de lavado de cubetas.

4.2. Resultados

A continuación, presentamos los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con la respectiva explicación:

4.2.1. Resultado de la prueba 1

En la prueba número 1 se encendió el sistema para verificar el funcionamiento del sistema de calentamiento, comprobando que el sistema puede determinar el nivel del agua actual, calentar el agua hasta llegar al set point y una vez alcanzada la temperatura de operación deseada poder bombear el agua para su consumo en el proceso de lavado.

En la figura N° 72 se puede observar como el sistema al detectar bajo nivel de agua activa el solenoide de ingreso de agua e ingresa el agua.



Figura N°72: Ingreso de agua al sistema
Fuente: Elaboración propia

En las figuras N° 73 y N° 74 se puede observar como el sistema una vez conseguido el nivel alto realizar le proceso de calentamiento.



Figura N°73: Pantalla de sistema de calentamiento
Fuente: Elaboración propia



Figura N°74: Proceso de calentamiento
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 75 se puede apreciar como el sistema llega a la temperatura deseada y la mantiene con una variación de 1.5 °C.

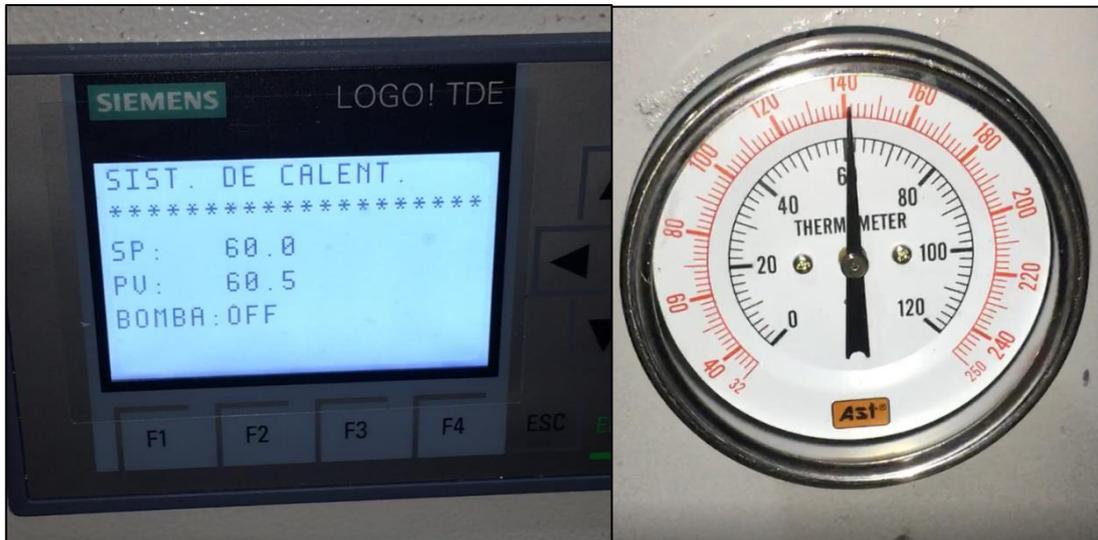


Figura N°75: Corroboración de calentamiento
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 76 se aprecia cómo el control PI modula la salida de potencia PWM para mantener el PV alrededor del SP.

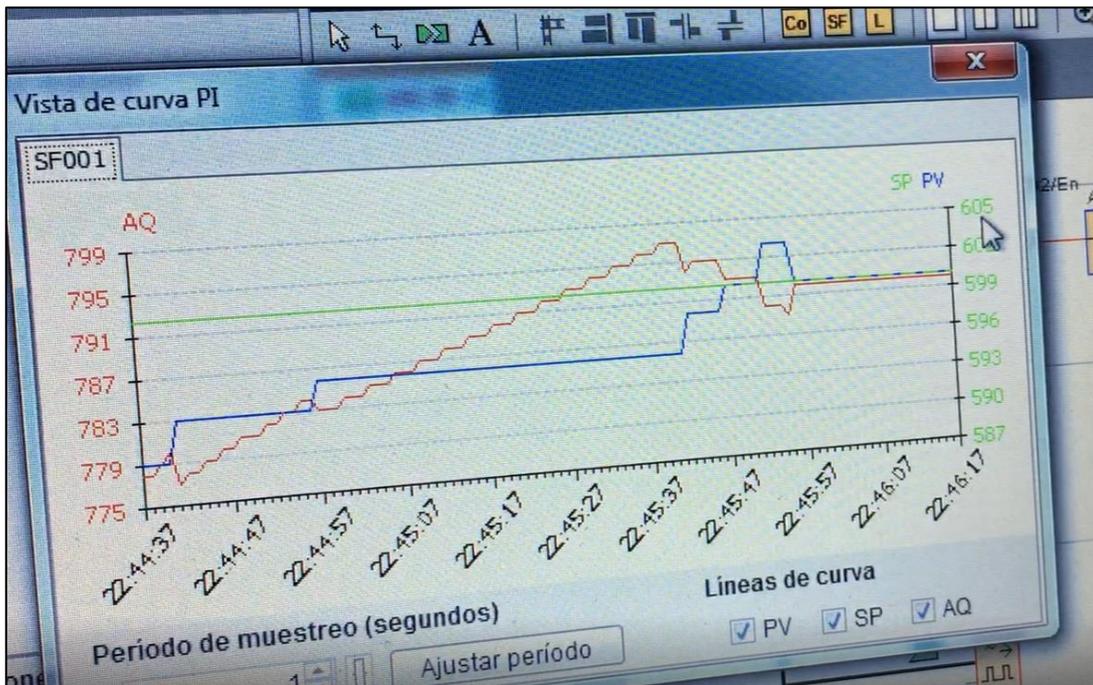


Figura N°76: Modulación PI
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 77 se puede apreciar que una vez alcanzada la temperatura se procede a hacer la prueba de bombeo del agua caliente con una presión de 1 bar. Se presionó el interruptor Bomba ON- OFF y la secuencia se desarrolló de acuerdo con los esperado.



Figura N°77: Proceso de bombeo
Fuente: Elaboración propia

Se pudo confirmar que el sistema opera de forma automática, mantiene la temperatura en el valor deseado y la presión en el valor necesario.

4.2.2. Resultado de la prueba 2

En la prueba dos se realizó el cambio de set point en los valores de 40°C y 50 °C. Con esta prueba se confirmará que el sistema puede proporcionar diferentes temperaturas de trabajo.

En la figura N° 78 se puede observar el procedimiento del sistema para cambiar el set point o consigna usando las teclas F1 y F2 del panel Logo TDE.

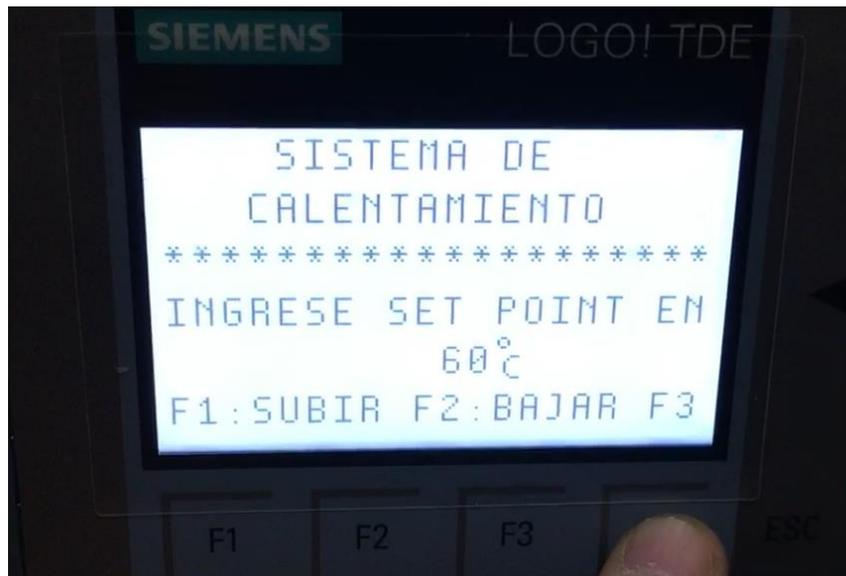


Figura N°78: Cambio de Set Point
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 79 se puede observar que ya se seleccionó el nuevo set point o consigna

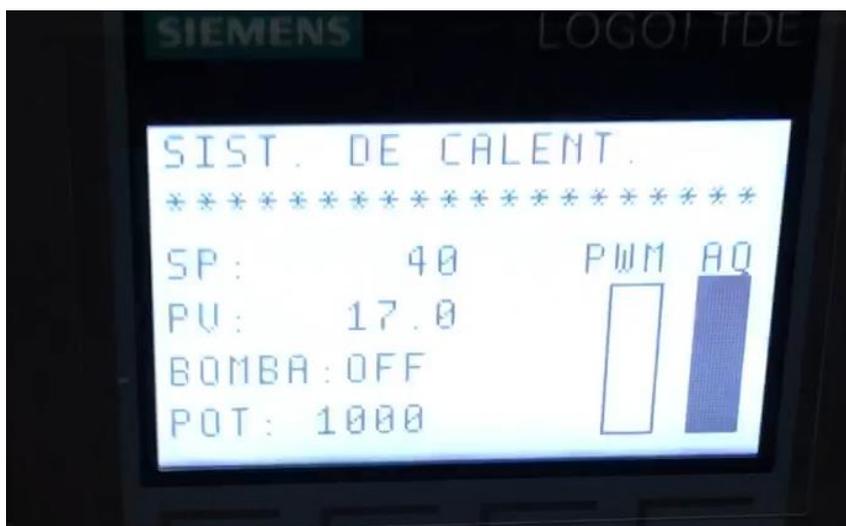


Figura N°79: Prueba con Set Point cambiado.
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 80, se puede apreciar como el sistema puede trabajar con diferentes puntos de consigna, con esta prueba se pudo confirmar que el sistema puede trabajar con diferentes puntos de temperatura.

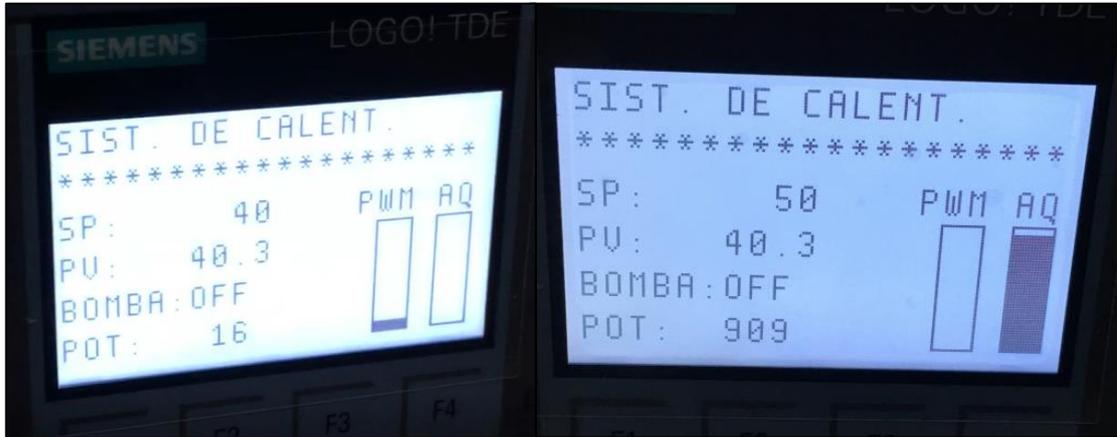


Figura N°80: Prueba con diferentes puntos de consigna
Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Resultado de la prueba 3

En la prueba tres se encendió el sistema, se seleccionó el punto de consigna y se evaluó como es sistema entrega energía al agua.

En la figura N° 81 se puede apreciar cómo mediante PWM mediante el uso de un relé de estado sólido el sistema entrega la energía necesaria de la potencia total del elemento calefactor disponible.

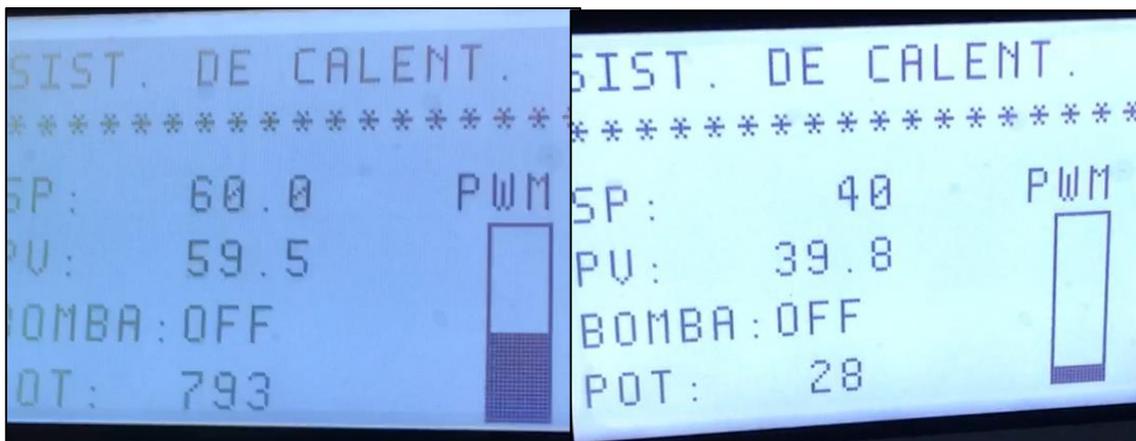


Figura N°81: PWM de salida de potencia
Fuente: Elaboración propia

Con esto se puede concluir que la potencia se entrega al sistema de forma eficiente, al entregar siempre la potencia mínima necesaria.

4.2.4. Resultado de la prueba 4

En la prueba N° 4 se hizo una comparación entre el sistema automático de calentamiento de agua y un sistema de tradicional de tipo mezclador vapor - agua en cómo es que está compuesto cada sistema y cuan expuesto está el operador a energías peligrosas.

En la figura N° 82 se puede apreciar un sistema rudimentario de mezcla vapor – agua para obtener agua caliente para limpieza, en este dispositivo es operador debe manipular en primer lugar la válvula esfera para abrir el ingreso de agua y seguidamente ir abriendo lentamente la válvula compuerta para liberar vapor y calentar el agua hasta la temperatura deseada. En este sistema el operador está expuesto muy de cerca al vapor que podría causarle quemaduras muy graves debido a una mala manipulación de la válvula de suministro de vapor o ante la caída en la presión o flujo en la línea de agua.



Figura N°82: Equipo mezclador rudimentario

Fuente: Vaportec

Tomado de: <https://vaportec.com.ve/productos/aplicaciones/instalacion-unidad-de-mezcla-agua-vapor/>

En el caso del sistema automático de calentamiento el operador solo debe acercarse al tablero de control programar la temperatura de operación y cuando comience el turno de lavado accionar el selector de suministro de agua caliente, como se puede apreciar en la figura N° 83. Así mismo este sistema está diseñado para trabajar con tres puntos de consumo en simultaneo, lo cual es una gran ventaja.



Figura N°83: Accionamiento de bomba de suministro
Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, el sistema cumple con condiciones de seguridad adecuadas que minimizan el riesgo de lesión en los operadores por cercanía a energías peligrosas.

4.2.5. Resultado de la prueba 5

Finalmente, se realizó la prueba de lavado de bandejas. Para ello se procedió a preparar una cubeta o bandeja de pruebas con grasa y restos de harina.

Una vez se tuvo preparado todo y el sistema ya estaba listo para dosificar agua caliente, se procedió a lavar la cubeta. En la figura N° 84 se puede apreciar la cubeta sucia y previo a ser lavada.



Figura N°84: Preparación para proceso de lavado de cubeta
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 85 se puede apreciar cómo se lava la cubeta eficazmente usando una pistola de lavado y el chorro de agua caliente a 60 °C.



Figura N°85: Lavado eficaz de cubeta
Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

De la presente investigación, podemos manifestar las siguientes conclusiones:

- 1) Fue posible diseñar un sistema automático de generación de agua caliente que garantice los valores de temperatura y presión adecuados, para ello en la prueba uno se demostró que el sistema cumple con calentar el agua a la temperatura escogida y permite suministrar el agua a una presión adecuada.
- 2) Fue posible diseñar un sistema automático que permita seleccionar y ajustar la temperatura de agua caliente de acuerdo con las necesidades de lavado dentro de los parámetros de operación del sistema, para ello en la prueba dos se ingresó diferentes temperaturas de consigna a lo que el sistema pudo cumplir con calentar el agua a cada una de las temperaturas seleccionadas.
- 3) Fue posible diseñar un sistema con una forma eficiente de poder calentar el agua requerida para el lavado de cubetas de almacenamiento de masa en la industria de elaboración de galletas, para ello se demostró en la prueba tres que el sistema entrega al agua siempre la energía necesaria que tal manera que es eficiente en el uso de la energía disponible.
- 4) Fue posible diseñar un sistema con condiciones adecuadas de seguridad para los operadores, que minimice el posible el acercamiento o contacto con energías peligrosas. Para ello en la prueba cuatro se concluye que el sistema cumple con adecuadas condiciones de seguridad para los operadores.
- 5) Fue posible lavar eficazmente una cubeta sucia con agua caliente generada de forma automática y segura. Para ello en la prueba cinco se concluye que se cumple con la factibilidad de la aplicación del sistema.

RECOMENDACIONES

- 1) El sistema puede ser mejorado implementando horarios de uso del sistema de tal manera que por que el proceso de lavado sea más estandarizado y automatizado.
- 2) El sistema puede ser mejorado implementando industria 4.0 en el proceso de generación de agua caliente de tal manera que se pueda ser más eficientes en el uso de la energía, así como monitorear los parámetros más importantes del sistema.
- 3) Puede incluirse un sistema de calentamiento en el interior del tanque de almacenamiento, de tal manera que el agua no usada dentro del tanque se mantenga caliente por mucho más tiempo.
- 4) Se puede mejorar el uso de la energía mediante el pre-calentamiento del agua de ingreso usando los gases de escape del calentador a gas. De esta manera de aprovecha al máximo la energía disponible.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acedo Sánchez, J. (2003). *Control Avanzado de Procesos*. Madrid: Diaz de Santos S.A.
- Acedo Sánchez, J. (2016). *Instrumentación y control básico de procesos*. Madrid.
- Aliaga Aliaga, D. E. (2015). *Analisis y mejor del proceso productivo de una línea de galletas en una empresa de consumo masivo*. En sus tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Anrango Tuquerrez, E. P. (2018). *Sistema de lavado automatico del tanque enfriador de leche para micro empresas de almacenamiento de leche*. En su tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra.
- Arellano Beltrán, J. C. (2011). *Automatización de maquina cortadora de latón paa forja utilizando un PLC para la fábrica ESACONTROL*. En su tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Balcázar Rodas, J. H., & Tesén Bravo, C. C. (2015). *Sistema de control automatizado para el secado de arroz en el molino El Pirata S.A.C*. En su tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque.
- Barriga Hoyle, J. A. (1995). *Control y automatización de los sistemas de caldero y proceso de cocimiento para planta cervecera usando controladores lógicos programables*. En su tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Campden, J. H. (2010). *Alimentación y bebidas guía de buenas practicas para la gestión de la calidad de vapor*. Barcelona: Spirax Sarco.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Creus, A. (2010). *Instrumentación Industrial*. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- F. G., S. (1996). *Sistema de control de procesos*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Flower Leiva, L. (1989). *Controles y automatismos eléctricos*. Bogota: Alfaomega Colombiana S.A.

- Rolando Wilder, A. (2016). *Análisis numerico de sistemas compactos de calentamiento de agua con energía solar*. en su tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Mendoza Yezquén, R. M., & Céspedes Verona, J. B. (2017). *Diseño y simulación de la automatización para el mejoramiento del sistema de almacenamiento y limpieza de los nuevos tanques de cerveza BBT en la planta Backus Motu*. en su tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque.
- Novoa Piedra, J. A. (2015). *Diseño de la instalación de servicios de agua caliente en un hotel ******. En su tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Pacheco Sánchez, O. E. (2009). *Automatización de una máquina industrial cerradora de tapas*. En su tesis de pregrado, Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- Rivera Veletanga, F. E. (2006). *Mejoramiento del sistema de abastecimiento de vapor para la planta ferrero del ecuador utilizando PLC*. En su tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- S.A, A. I. (2009). *Soluciones industriales de agua caliente*. Bélgica.
- Saldamando, L. (2018). *Análisis del consumo y generación de agua caliente sanitaria en el sector residencial uruguayo*. en su tesis de maestría, Universidad de la Republica Uruguay, Montevideo.
- Smith, C., & Corripio, A. (1991). *Control automático de procesos*. México D.F.: Limusa S.A.

ANEXOS

Anexo N°1- Matriz de consistencia.....	102
Anexo N°2- Plano P&ID.....	103
Anexo N°3- Plano mecánico general.....	104
Anexo N°4- Plano de tanque de alimentación.....	105
Anexo N°5- Plano de plataforma.....	106
Anexo N°6- Plano eléctrico de tablero de control.....	107
Anexo N°7- Plano eléctrico de tablero de control – Prototipo.....	121
Anexo N°8- Programa de PLC – Diseño.....	129
Anexo N°9- Programa de PLC – Prototipo.....	150