

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Control Electrónico para las etapas de Escaldado y Desplumado en
una Planta Procesadora para pollos**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Rodrigo Carvajal Elizondo

Cartago, Noviembre de 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor Lector



Ing. Francisco Navarro Henríquez

Profesor Lector



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Noviembre 2010

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Rodrigo Carvajal E.

Rodrigo Carvajal Elizondo

Cédula: 1-1183-0283

Cartago, Noviembre 2010

Resumen

El trabajo desarrollado en este documento consiste en el diseño e implementación de dos máquinas que se utilizarán en la planta procesadora de pollos desarrollada por la empresa El Sabor de Occidente S.A.

Dicha planta procesadora se encuentra en el proceso de acondicionamiento de la planta física y adquisición de equipo, dentro de lo cual comprende las máquinas llamadas escaldadora y peladora, en las cuales está basado el proyecto que se presenta a continuación, dichos equipos son de suma importancia para este sistema productivo ya que el pollo después de pasar por ambas máquinas debe salir sin plumas y en buen estado, garantizando una buena calidad de manera que se permita iniciar la siguiente fase del proceso, donde se realiza la limpieza y el empaquetado del producto para su venta.

Se busca con el trabajo realizado lograr que ambas máquinas desarrollen un funcionamiento adecuado dentro del procesamiento del pollo, sumándole a esto elementos de control electrónico que permitan una mejor calidad del producto, una mayor eficiencia en el proceso productivo y facilitar la operación para el encargado de la planta.

Para lograr dichas mejoras se establece la implementación de un control automático de temperatura y un sistema de control del nivel de agua ambos para el proceso en la escaldadora, junto con el control de arranque de los motores para ambas máquinas y un panel de control compuesto con señales indicadoras y elementos de control para el correcto funcionamiento de estas dos etapas que forman parte del proceso productivo.

Summary

The work developed in this paper is the design and implementation of two machines to be used in chicken processing plant developed by the company El Sabor de Occidente S.A.

This processing plant is in the process of preparation and procurement of equipment, within which includes the machines called blanching and peeling, which is based on the current project, these equipment are critical to production system because the chicken after passing through both machines should go without feathers and ensuring good quality, so as to allow entry to the next stage of the process, which is the cleaning and packaging the product for sale.

We seek with this work ensure that both machines develop a proper functioning in the processing of chicken, adding to this a electronic control elements that allow for better product quality, greater efficiency in the production process and facilitate the operation for the principal of the plant.

To achieve these improvements was raised by the implementation of an automatic temperature control and a control system for water level both in the scalding process, along with control of engine start for both machines and set up a panel with signposts and control elements for the proper functioning of these steps in the production process.

Dedicatoria

Se lo dedico a mis padres, a Rolo que me acompañó desde el cielo y a mami María por su amor incondicional desde pequeño y hasta la fecha. Y a todos los amigos y familiares que en su momento me dieron su voz de aliento.

Agradecimiento

A Dios por acompañarme en todo momento y a mis padres por su soporte y ayuda en todo momento, que me alentaron a seguir luchando y dar lo mejor de mi para lograr concretar esta meta en mi vida.

Gracias.

Índice General

Capítulo 1:	Introducción	7
1.1	Entorno del proyecto	7
1.2	Problema existente.....	9
1.3	Solución propuesta	10
Capítulo 2:	Meta y objetivos	14
2.1	Meta.....	14
2.2	Objetivo General.....	14
2.3	Objetivos Específicos.....	14
Capítulo 3:	Marco teórico.....	16
3.1	Descripción de los sistemas productivos utilizados en mataderos de pollos actualmente	16
3.2	Principios relacionados con la solución del problema	19
3.2.1	Datos técnicos del escaldado y pelado en pollos	19
3.2.2	Modelado de un sistema	20
3.2.3	Transferencia de Calor.....	21
3.2.4	Motores eléctricos y reductores de velocidad.....	24
3.2.5	Dispositivos electrónicos.....	30
3.2.5.1	Sensores de Temperatura	30
3.2.5.2	Sensores de Nivel para líquidos	34
3.2.6	Control automático.....	38
3.2.6.1	Tipos de control	39
3.2.6.2	Diseño de un controlador	40
Capítulo 4:	Procedimiento metodológico.....	45
4.1	Reconocimiento y definición del problema	45
4.1.1	Generalidades	45
4.1.2	Descripción sintética del problema.....	46
4.2	Obtención y análisis de información.....	46
4.3	Evaluación de las alternativas y síntesis de la solución	46
4.4	Implementación de la solución	47

4.5	Reevaluación y diseño.....	47
Capítulo 5:	Descripción detallada de la solución	48
5.1	Análisis de soluciones y descripción final.....	48
5.2	Control automático	53
5.2.1	Modelado matemático y cálculo de reguladores	53
5.2.1.1	Diseño teórico del control de temperatura.....	53
5.2.1.2	Diseño experimental del control de temperatura.....	66
5.2.1.3	Diseño teórico del control de nivel.....	71
5.3	Descripción de hardware.....	80
5.3.1	Panel de control	80
5.3.2	Sensores	81
5.3.3	Motores y reductores de velocidad	85
5.3.4	Sistema de calentamiento	87
5.4	Descripción de software	88
5.4.1	Descripción general de las características utilizadas	89
5.4.2	Explicación del funcionamiento de los bloques de programación	90
Capítulo 6:	Análisis de resultados	93
6.1	Diseño de las máquinas, costo y capacidad.....	93
6.2	Aplicación del control de temperatura.....	96
6.3	Aplicación del control de nivel	98
6.4	Control de velocidad de los motores	100
6.5	Panel de control y botoneras, con opción manual y automático.....	102
6.5	Implementación del software	105
6.6	Implementación del proceso productivo	106
Capítulo 7:	Conclusiones y recomendaciones	107
7.1	Conclusiones.....	107
7.2	Recomendaciones.....	108
Bibliografía		109
Apéndices		111

A1.	Linealización y Variables de desviación	111
A2.	Código implementado en el PLC Pico GFX-70.....	113
A.3	Datos de la cotización realizada a Repagro S.A.	118

Índice de Figuras

Figura 1.1	Fotos del proyecto implementado	13
Figura 3.1	Entrada y salida de una escaldadora en línea [10]	17
Figura 3.2	Entrada y salida de una desplumadora en línea [10].....	17
Figura 3.3	Sistemas para una producción rudimentaria [11]	18
Figura 3.4	Ejemplo de Tablas teóricas para el cálculo de la potencia en motores [5]	27
Figura 3.5	Diagrama para la reducción de velocidad de un motor [12].....	29
Figura 3.6	Diagrama para el aumento de velocidad de un motor [12]	30
Figura 3.7	Curva característica de un transductor PT100 [14].....	32
Figura 3.8	Configuración de un Termopar [13].....	32
Figura 3.9	Diagrama sensor de nivel tipo flotador [6]	34
Figura 3.10	Ejemplos de sensores de nivel con acople magnético [7].....	35
Figura 3.11	Funcionamiento sensor ultrasónico [8].....	36
Figura 3.12	Ubicación de sensores de presión	37
Figura 3.13	Sensores de presión, Sumergible (A), Hidrostático (B) y Diferencial (C) [9]	38
Figura 3.14	Sistema con realimentación de estado [16].....	44
Figura 5.1	Diagrama eléctrico de la solución final (etapa de control).....	50
Figura 5.2	Diagrama eléctrico de la solución final (etapa de potencia).....	51
Figura 5.3	Respuesta al escalón del modelo teórico de la planta para el control de temperatura	56
Figura 5.4	Diagrama con realimentación no unitaria del modelo teórico	57
Figura 5.5	Respuesta al escalón del modelo teórico con realimentación no unitaria	58
Figura 5.6	Respuesta al escalón del modelo teórico en tiempo continuo y discretizado	59
Figura 5.7	Respuesta al escalón del modelo teórico discretizado	60
Figura 5.8	Respuesta al escalón del modelo teórico discretizado con compensador de adelanto.....	63
Figura 5.9	Diagrama de bloques para análisis del error de estado estacionario.....	63

Figura 5.10	Diagrama final para la simulación del sistema.....	64
Figura 5.11	Respuesta al escalón del modelo teórico con compensador completo	65
Figura 5.12	Respuesta experimental de la planta a modelar.....	67
Figura 5.13	Respuesta del modelo experimental para el control de temperatura	68
Figura 5.14	Diagrama representativo de la planta para el control de nivel de agua	71
Figura 5.15	Diagrama del modelo teórico con realimentación unitaria (control de nivel)	76
Figura 5.16	Respuesta al escalón del modelo teórico con realimentación unitaria (control de nivel)	77
Figura 5.17	Diagrama del modelo teórico con compensador de atraso (control de nivel)	78
Figura 5.18	Respuesta al escalón del modelo teórico con compensador de atraso (control de nivel)...	78
Figura 5.19	Diagrama del sistema con compensador de atraso y ganancia proporcional.....	79
Figura 5.20	Respuesta al escalón del sistema con compensador de atraso y ganancia proporcional ..	79
Figura 5.21	Interior del panel de control finalizado.....	80
Figura 5.22	Conexión del sensor de temperatura con el PLC	83
Figura 5.23	Sensor de presión usado en el control de nivel de agua [7]	84
Figura 5.24	Conexión del sensor de presión con el PLC	85
Figura 5.25	Quemador HSG-400 utilizado en la escaldadora	87
Figura 5.26	PLC Pico-GFX 70 utilizado en el proyecto.....	88
Figura 6.1	Implementación final de las máquinas escaldadora y peladora	93
Figura 6.2	Respuesta de la planta con el control de temperatura aplicado.....	97
Figura 6.3	Respuesta del modelo de la planta para el control de nivel ante un escalón	98
Figura 6.4	Respuesta de la planta con el control de nivel aplicado.....	99
Figura 6.5	Montaje para el funcionamiento del motor de la máquina escaldadora	101
Figura 6.6	Montaje para el funcionamiento del motor de la máquina peladora	101
Figura 6.7	Panel de control diseñado (Parte externa)	102
Figura 6.8	Panel de control diseñado (Parte interna)	103
Figura 6.9	Botoneras colgantes implementadas para el manejo de las máquinas	104
Figura 6.10	Interfaz grafica del proceso en la pantalla del PLC	105
Figura 6.11	Fotografías del proceso productivo en funcionamiento	106

Índice de Tablas

Tabla 3.1	Algunos materiales utilizados en la fabricación de RTD's [13]	31
Tabla 3.2	Principales tipos de Termopares disponibles en el mercado [13]	33
Tabla 5.1	Descripción de los elementos del diagrama eléctrico final	52
Tabla 5.2	Comparación entre sensores RTD y Termocupla	82
Tabla 6.1	Costo de máquina escaldadora	95
Tabla 6.2	Costo de máquina peladora	95
Tabla 6.3	Comparación de la respuesta del modelado teórico y experimental	96

Capítulo 1: Introducción

Este capítulo presenta una breve explicación del entorno en que se realizó el proyecto, introduciendo al lector de manera concisa en la actividad productiva de la empresa y además se plantea el problema existente junto con la respectiva solución implementada.

1.1 Entorno del proyecto

La empresa El Sabor de Occidente S.A. es una pequeña empresa recientemente creada y está ubicada en el cantón de Palmares de Alajuela. Surge con el propósito de incorporarse en la producción avícola a nivel nacional, específicamente en el área del procesamiento de carne de pollo.

El objetivo inicial de la empresa es incursionar en el mercado al nivel del cantón y algunos otros lugares a sus alrededores, para lo cual se busca ofrecer un producto de alta calidad a un precio cómodo para el consumidor. Por ser una pequeña empresa es de suma importancia poder implementar el procesamiento del pollo de la manera más económica posible (minimizar gastos operacionales) pero que logre obtener el mejor aprovechamiento de la materia prima con que se cuenta.

La empresa debe iniciar con la preparación de los criaderos para engorde de los pollos, así como con el diseño de la planta física para su procesamiento. La información que existe con respecto al diseño y al funcionamiento de la planta física (específicamente la maquinaria) utilizada en este tipo de actividad productiva no es muy difundida, además de que las empresas que se dedican a esta actividad tienen un alto nivel de recursos económicos por lo que la maquinaria que utilizan son equipos industriales ya diseñados, ante lo cual para poder iniciar el funcionamiento fue esencial una ardua investigación de dicho proceso productivo.

Las etapas de producción en una planta procesadora para pollos se pueden dividir en los siguientes pasos. [1]

1. Aturdimiento
2. Sacrificio
3. Escaldado
4. Pelado
5. Desprendimiento de cabeza y corte de patas
6. Lavado y evisceración
7. Enfriamiento
8. Empaque y deshuesado

Dentro los puntos anteriores existen actividades manuales que serán encargadas de realizar por operarios de la planta, como el desprendimiento de cabeza, corte de patas y la evisceración inicialmente.

Por sus características otros de los procesos se llevan a cabo por medio de máquinas especializadas, como el escaldado, el pelado y el enfriamiento, las cuales deben tener la posibilidad de manejar diferentes especificaciones y elementos de control, de manera que faciliten la ejecución de las tareas en varios puntos del proceso productivo permitiendo además que el trabajo del encargado de la planta sea más eficiente.

1.2 Problema existente

Como parte indispensable del proceso de producción, la empresa debe contar con las máquinas que se utilizan en las etapas del escaldado y pelado del pollo.

El sistema de escaldado tiene como su objetivo utilizar agua caliente para aflojar las plumas del ave por medio del calor y la absorción del agua que hará dilatar los folículos del pollo, lo cual facilita la siguiente etapa que es el desplumado.

Por su parte el proceso de desplumado busca remover en su totalidad las plumas del pollo utilizando dedos de hule, esto depende en gran medida de un adecuado escaldado.

Se han hecho algunas consultas en empresas fuera del país que se dedican a la venta de este equipo especializado para producción avícola, se logra determinar que aquellos equipos que presentan los controles y características adecuadas para obtener un producto de alta calidad se encuentran a precios muy elevados y son para niveles de producción muy altos que se usan en grandes empresas, mientras que otros equipos con precios mucho más cómodos no presentan elementos de funcionamiento importantes en el sistema productivo, ante lo cual se pretende desarrollar un equipo intermedio, que logre presentar características que mejoren la calidad y productividad, pero que se acomoden a la etapa del inicio productivo y del presupuesto que se maneja para la adquisición de esta maquinaria en la empresa El Sabor de Occidente S.A.

1.3 Solución propuesta

El proyecto por sus características se dividió en dos fases, como primera fase se encuentra el diseño y construcción de la estructura física de las máquinas (escaldadora y peladora). Como segunda fase se diseñaron los sistemas de control y potencia electrónicos para cada una.

Ambas máquinas se diseñan teniendo como base dos aspectos, la capacidad productiva deseada por la empresa y el proceso semi-automatizado que se requería implementar en la planta. Para el primer elemento se definió que la máquina escaldadora procesaría entre 8 a 10 pollos y la peladora de 4 a 5 pollos. Tratando de cumplir no solo con la capacidad productiva sino además buscando cantidades complementarias para evitar cuellos de botella en el sistema productivo pues ambas máquinas están relacionadas en este aspecto.

En cuanto al diseño implementado conociendo las características de producción y las funciones de las máquinas, se establecen algunos elementos importantes que se tomaron en cuenta.

Para el caso de la escaldadora se tiene un sistema que mantiene una temperatura dentro de un rango adecuado, durante el tiempo establecido para el escaldado, además de que permite sumergir al pollo dentro del agua.

Para la etapa del desplumado, por las condiciones solicitadas, es necesario básicamente tener un sistema que haga girar al pollo para que este entre en contacto con unos dedos de hule situados en el interior de la peladora y que permita controlar el tiempo de duración del proceso.

a. Construcción de la maquinaria.

Las máquinas se diseñaron con base en características de modelos ya existentes en el mercado. Acoplado en el diseño detalles que significan aspectos trascendentales en este tipo de procesos y además de que se ajusten tanto al nivel de los recursos económicos destinados por la empresa como en el aspecto de la capacidad de producción establecida en las metas iniciales.

Para la escaldadora se implementa un diseño que utiliza un sistema de aspa que hace girar al pollo, el calentamiento del agua se realizará por medio de un quemador de gas LP ubicado en un tipo de horno. Toda la máquina es construida con láminas de acero inoxidable por su resistencia a altas temperaturas, en ambientes de trabajo con contacto al agua y su durabilidad. Además, el diseño facilita la manipulación del pollo y a nivel de producción tiene una capacidad de procesamiento aproximado entre 8 a 10 pollos.

La máquina desplumadora igualmente está construida con material de acero inoxidable, en este caso es un diseño tipo olla que internamente contiene los dedos de hule de una manera uniformemente distribuidos para evitar el maltrato del pollo. Se definió un diseño que facilite la manipulación del pollo y que sea seguro para el operador. En términos del proceso productivo y basándonos en los tiempos de duración del proceso de escaldado, la desplumadora en promedio procesa de 4 a 5 pollos, esto para evitar los cuellos de botella en el sistema de producción

b. Desarrollo del sistema de control y de potencia electrónico.

En conjunto con la construcción de la maquinaria se desarrolló el sistema electrónico que les fue acoplado. Esta fase se subdivide en 3 módulos principales, el sistema de potencia, el control de temperatura y el control del nivel de agua.

Etapa de potencia:

El sistema de potencia tiene como principal función controlar los motores que llevan a cabo el movimiento de las máquinas. Cada máquina funciona bajo distintos parámetros de tiempo y número de revoluciones de giro. Por lo tanto se diseñó un sistema para los motores que permita un encendido y apagado adecuado, con sus respectivos contactores y protecciones, estableciendo por medio de reductores y sistemas de poleas la velocidad de giro adecuada y el tiempo de funcionamiento.

Etapa de control de temperatura:

Este control se diseñó con el fin de lograr mantener un valor de temperatura constante, que es seleccionado dentro de un rango establecido para este proceso. A partir de la máquina diseñada se realizaron pruebas del comportamiento de la temperatura, además de determinar un modelo matemático de la planta, al cual se aplicaron los análisis respectivos de control para generar un compensador adecuado.

Etapa de control de nivel de agua:

Cada cierto número de procesos de escaldado, se procede a evacuar una cantidad de agua esto con el fin de lograr eliminar el agua sucia del proceso con agua limpia, por lo cual se implementó un control para reponer el agua perdida, esto verificando un nivel de agua dentro de la máquina que debe ser suficiente para lograr sumergir en su totalidad a las aves. Este control se llevo a cabo con un análisis de las

ecuaciones que implican el flujo de agua, especialmente usando ecuaciones que relacionan la presión con la altura del recipiente.

En el caso de los sistemas de control electrónico, el procesamiento de datos y su implementación se realizó por medio del PLC Pico GFX-70 de Allan Bradley, el cual se instaló en un panel de control que además cuenta con los indicadores luminosos y selectores para el funcionamiento del proceso productivo.

A continuación se muestran fotografías del proyecto ya implementado.



Figura 1.1 Fotos del proyecto implementado

Capítulo 2: Meta y objetivos

2.1 Meta

Obtener un pollo totalmente desplumado al finalizar su procesamiento en las etapas de escaldado y pelado.

2.2 Objetivo General

Desarrollar la estructura física de las máquinas y los sistemas de control electrónico que permitan cumplir con los requerimientos de producción y calidad de las etapas de escaldado y desplumado.

Indicador: La cantidad de pollos diarios obtenidos en buenas condiciones después de ser procesados en estas dos etapas deberá ser de un 95%.

2.3 Objetivos Específicos

2.3.1 Diseñar la etapa de control electrónico que permita mantener la temperatura interna de la máquina escaldadora dentro de un rango de 56°C a 60°C.

Indicador: Utilizando un sensor de temperatura se medirá que la temperatura mantenga un rango entre 56°C a 60°C con una incertidumbre de $\pm 1^\circ\text{C}$.

2.3.2 Realizar un sistema electrónico que permita establecer un tiempo de funcionamiento y cantidad de revoluciones por minuto para el motor de la máquina escaldadora.

Indicador: El tiempo de duración estará entre un rango de 2 a 3 minutos, a un velocidad aproximada de 5 revoluciones por minuto.

2.3.3 Diseñar la etapa de control electrónico para mantener un nivel de agua para el proceso de escaldado.

Indicador: Se medirá un rango de nivel de agua en el interior de la escaldadora, aproximadamente se desea mantener entre el 70% y 80% del volumen total de la máquina que se diseñe.

2.3.4 Realizar un sistema electrónico que permita establecer un tiempo de funcionamiento y cantidad de revoluciones por minuto para el motor de la máquina desplumadora.

Indicador: El tiempo de duración estará entre un rango de 30 segundos a 1 minuto, con una velocidad de 100 revoluciones por minuto.

2.3.5 Construir un panel de control para la selección de operación del sistema con control manual o automático.

Indicador: Por medio de indicadores luminosos se informará al operador del modo de operación en que se encuentra la máquina.

Capítulo 3: Marco teórico

En este apartado se pretende explicar las características de la implementación del escaldado y desplumado del pollo en la industria, para así comprender mejor el sistema desarrollado en el proyecto, el cual se presentará en detalle más adelante, además se explica los principales conceptos teóricos involucrados y análisis matemáticos que fueron utilizados para lograr implementar la solución a los problemas planteados.

3.1 Descripción de los sistemas productivos utilizados en mataderos de pollos actualmente

Como se hizo mención en el Capítulo 1 de este documento el proyecto se basa en el diseño completo de las máquinas peladora y escaldadora para el procesado de la carne de pollo.

En esta área productiva se manejan principalmente dos tipos de sistemas:

➤ Sistema de producción en línea:

Este sistema es utilizado por empresas con una gran capacidad de producción, donde se procesan más de cinco mil pollos por día. Utilizan equipos muy caros que permiten aumentar la capacidad productiva, disminuir la manipulación del pollo por parte de los operarios y presentan características que mejoran la calidad del producto.

En el caso de la máquina escaldadora, se usa un sistema con canales, donde el pollo que se encuentra guindando de unos ganchos transportadores pasa por dicho canal a cierta temperatura, en ocasiones se divide en dos pasos, donde en una parte se encuentra a mayor temperatura que la otra, presentan sistemas de burbujeo por medio de entradas de aire, y controles para variar la temperatura y el tiempo en que el pollo se encuentra dentro de agua.

De igual forma la peladora es un tipo de canal, con varios montajes de dedos de hule que se pueden ajustar al tamaño del pollo y la velocidad con que realizan el pelado de las plumas. Este sistema principalmente permite que el pollo se golpee

menos a la hora del pelado. A continuación se muestra dos figuras que presenta un ejemplo de este sistema.



Figura 3.1 Entrada y salida de una escaldadora en línea [10]



Figura 3.2 Entrada y salida de una desplumadora en línea [10]

➤ **Sistema de producción rudimentario:**

Este tipo de plantas procesadoras manejan cantidades entre los mil a dos mil pollos diarios, se utilizan equipos industriales más baratos o hechos por la misma empresa. Lo que se busca es que cumpla con las funciones mínimas para el sistema de producción.

En el caso del proceso de escaldado y pelado utilizan sistemas tipo olla, el proceso depende en gran medida del operario, ya que no tienen controles automáticos, generalmente solo cuentan con algún indicador, de manera que el encargado de la planta debe de transportar las aves de una etapa a la otra, de revisar parámetros como una temperatura adecuada de la escaldadora, tiempos de duración de los procesos y cualquier otra variable a revisar o fallo que presente el sistema.



Figura 3.3 Sistemas para una producción rudimentaria [11]

3.2 Principios relacionados con la solución del problema

3.2.1 Datos técnicos del escaldado y pelado en pollos

El proceso de escaldado presenta principalmente cuatro elementos que son de suma importancia mantener bajo control, los cuales son: temperatura interna del agua donde se mantiene el pollo, tiempo de duración del proceso, agitación del agua e inmersión total del pollo.

La temperatura del proceso y duración son las que definen el color con que se obtiene el pollo (amarillo o blanco), mientras que los dos últimos elementos se encargan de facilitar el pelado del pollo, ya que el agua caliente se encarga de dilatar los folículos y humedecer las plumas, una inmersión completa evita que las plumas de alguna parte del cuerpo no pase por este proceso lo cual afectara el proceso en el momento del desplume. [1]

El proceso del pelado o desplume ocurre seguidamente del escaldado, es un punto crítico del proceso productivo, ya que hay muchas posibilidades de que el pollo sufra desgarros en la piel o desgarros en articulaciones, lo cual se reflejara en la perdida de gramos de carne, ya que se puede llegar a dañar partes o la totalidad de un pollo.

El pelado principalmente basa su adecuado funcionamiento en un buen escaldado, ya que entre más fácil de quitar estén las plumas menos tiempo ocupa que el pollo dure en el proceso de desplume. Además podemos citar otros elementos importantes en este proceso como son:

- Rociado de agua sobre el pollo durante el proceso (preferiblemente tibia).
- Distancia entre la escaldadora y la peladora menor a 1 metro.
- Dedos de hule en buen estado y adecuada dureza.

3.2.2 Modelado de un sistema

Para poder implementar cualquier tipo de control continuo o discreto se debe contar con el modelo de la planta física a la cual se desea aplicar el control, ya que por medio de este modelo, que en si es una abstracción matemática del sistema físico real, se basa el diseño y se realizan las pruebas para la implementación del controlador.

Según la teoría para determinar el modelo de un sistema existen dos métodos principales que son: [2]

➤ **Modelado Teórico:**

En este caso el modelo se obtiene desarrollando un análisis teórico que se basa en las leyes básicas de la física, para describir el comportamiento dinámico de algún proceso.

➤ **Identificación del sistema:**

Este método utiliza la experimentación, ya que la obtención del modelo del sistema se basa en datos obtenidos al experimentar con la planta física de interés.

Cada uno tiene sus ventajas y desventajas, por ejemplo el uso de un modelado teórico se utiliza para procesos que no son muy complejos y donde el modelo obtenido no deba ser muy exacto, sin embargo, muchas ocasiones este análisis llega a utilizar parámetros cuyo valor solo se obtiene con la experimentación de la planta real.

Por su parte al utilizar un método de identificación es indispensable que la planta permita la realización de pruebas y es preferible para procesos muy concretos, una desventaja se debe a que en ocasiones surgen modelos con significados físicos muy complejos, ya que los parámetros que lo forman no tienen relación directa con alguna magnitud física como si es el caso del modelado teórico.

Por lo anterior se dice que lo ideal es llegar a la obtención de un modelado realizando una combinación de los dos métodos.

3.2.3 Transferencia de Calor

Todo cuerpo está formado por partículas muy pequeñas las que se encuentran en movimiento, entre mayor sea el movimiento de las partículas esto aumentará la temperatura del cuerpo. De forma que la energía total (cinética y potencial) de las partículas se le llama energía térmica del cuerpo. Esta cantidad de energía térmica es por lo tanto diferente para los estados de la materia (sólida, líquida y gaseosa) debido a las características de las partículas que cada uno.

La transferencia de calor estudia la velocidad (razón de cambio) con la cual el calor se intercambia entre cuerpos fríos y calientes, los cuales se les llama receptor y fuente. Esta transferencia está relacionada con la razón de intercambio de la energía térmica entre los cuerpos, lo cual básicamente es la diferencia de temperatura que existe entre cuerpos y es lo que permite la existencia de la transferencia de calor.

Una explicación más concisa de lo mencionado anteriormente es que el calor se define como la energía que fluye como causa de la existencia de una diferencia de temperatura, y la temperatura es una medida de la energía cinética promedio de un cuerpo determinado.

Dicha transferencia de calor entre cuerpos puede darse de 3 formas: [3]

→ **Conducción**, se da principalmente entre sólidos, al entrar en contacto partículas con mayor temperatura transfieren energía cinética a las partículas con menor temperatura.

→ **Convección**, permite en intercambio de energía entre partículas por el movimiento de líquidos, provocado por diferencia de temperatura y densidades.

→ **Radiación**, en este caso el calor se transfiere por ondas electromagnéticas, una parte de la energía se absorbe por el cuerpo y otra se pierde (refleja).

Cuando uno enfrenta alguna tarea en la cual se utiliza un proceso que implica la transferencia de calor existen algunos aspectos o problemas típicos con los que se debe trabajar:

→ La cantidad de calor que debe transferirse.

→ La razón de cambio o tiempo en que puede transferirse el calor debido a la naturaleza de los cuerpos.

→ La diferencia de potencial (Diferencia de temperatura).

→ La cantidad de energía mecánica que debe disiparse para facilitar la transferencia del calor.

→ La extensión y el arreglo de la superficie que separa la fuente y el receptor.

Al trabajar con un sistema térmico, es necesario analizar y comprender algunos aspectos que se determinan por la rama de la física llamada termodinámica, esta rama estudia a nivel macro las transformaciones de la energía y como esta se convierte en trabajo.

Esta ciencia se basa en dos leyes fundamentales:

1. Primera ley de la termodinámica: al realizar trabajo sobre un sistema, la energía interna del sistema variara. Y la diferencia entre la cantidad de energía interna del sistema y la cantidad externa, se denomina calor.
2. Segunda ley de la termodinámica: cuando una parte de un sistema cerrado interacciona con otra, la energía tiende a dividirse por igual, hasta que el sistema alcance un equilibrio térmico.

Los sistemas termodinámicos pueden dividirse en tres tipos: [4]

Sistema aislado: El cual no intercambia ni energía ni materia con sus alrededores.

Sistema cerrado: Este sistema intercambia energía (calor y trabajo) pero no materia con sus alrededores.

Sistema abierto: Este sistema intercambia tanto energía como materia con los alrededores.

Se define que un sistema está en equilibrio térmico si la temperatura de dicho sistema es la misma que la de sus alrededores. Este equilibrio se logra cuando las variables que describen su estado toman el mismo valor para el sistema y sus alrededores. Dependiendo del sistema se tendrán distintas variables termodinámicas para describirlo (Ejemplo: Masa. Volumen, presión, temperatura).

Dichas variables pueden ser de dos tipos, extensivas e intensivas, será extensiva si su valor es proporcional al tamaño del sistema que describe (la masa y el volumen), será intensiva si su valor no depende del tamaño ni de la cantidad de materia del sistema (la temperatura y la presión).

Retomando la Primera ley de la termodinámica, cuando un sistema pasa de un estado A, a un estado B la podemos definir como:

$$\Delta U = Q - W_{\text{externo}} \quad (3.1)$$

U = Energía interna del sistema

Q = Cantidad total de transferencia de calor, positiva si entra al sistema o negativa si sale del sistema.

W_{externo} = Trabajo total, negativo cuando entra al sistema y positivo si sale del sistema.

3.2.4 Motores eléctricos y reductores de velocidad

En la industria actual es casi que indispensable el uso de algún motor eléctrico para lograr el funcionamiento de cualquier tipo de proyecto, y ante la gran variedad de motores que existen es de suma importancia llegar a seleccionar el tipo adecuado no solo para lograr un buen funcionamiento si no para no caer en gastos innecesarios. A continuación se hacen mención de algunos aspectos en los cuales se basa la selección de un motor.

Tipo de función a realizar: [5]

Construcción Abierta: Son más baratos, tienen fácil acceso a sus componentes internos, no se pueden utilizar a la intemperie o en ambientes húmedos y polvorientos.

Construcción Protegida: Mantiene las ventajas del tipo anterior pero puede usarse en la intemperie, tiene protección contra goteo.

Construcción Cerrada: Ideales para trabajos en la intemperie o ambientes hostiles con mucha humedad, polvo, mucha presencia de agua.

Tipo de servicio a realizar:

Servicio permanente o continuo: El motor estará funcionando constantemente o durante varias horas a plena carga alcanzando una temperatura máxima, la cual no deberá sobrepasar el límite permitido.

Servicio de corta duración: La carga estará en su máxima capacidad durante un periodo corto de tiempo, seguidamente se pondrá en vacío o se hará una desconexión del motor, permitiendo que se enfríe el motor.

Servicio intermitente: En este caso se alterna el tiempo de funcionamiento y el tiempo de reposo, de manera que el calentamiento del motor sube escalonadamente hasta un valor final, el cual se alcanza en una mayor cantidad de tiempo que el caso del servicio continuo.

Para cualquier tipo de servicio el motor debe mantenerse por debajo de la temperatura máxima definida en las especificaciones y además debe suministrar el par requerido por el dispositivo a accionar.

Revoluciones del motor:

Para este aspecto lo que se recomienda es utilizar velocidades normales de serie, ya que motores con velocidades anormales son más caros y puede dificultarse en caso de posibles sustituciones.

Potencia del motor:

En el caso de la potencia si se selecciona un valor menor al de una posible máxima potencia requerida por el sistema se puede llegar a dañar el motor, por otra parte si se sobre dimensiona la potencia del motor se puede estar dando un gasto excesivo ya que pocas veces se llega a trabajar a una potencia máxima.

Existen tres procedimientos para realizar el cálculo de la potencia los cuales son:

- Cálculo de la potencia del motor para plena carga:

Para este tipo de cálculo se utilizan las siguientes dos ecuaciones

$$P = \frac{Q * v}{\eta} \left[\frac{Kg * m}{s} \right] \quad (3.2)$$

$$P = \frac{Q * v}{102 * \eta} \left[Kw \right] \quad (3.3)$$

$$M = \frac{Q * v}{n * \eta} \left[n * Kg \right] \quad (3.4)$$

P = Potencia y M = Par del motor

Q = Peso de la carga (Kg)

v = velocidad de movimiento de la carga (m/s)

n = Velocidad de giro del motor (rpm)

η = Rendimiento de la máquina

El valor de Q varía según el mecanismo, puede ser de elevación o traslación por ejemplo.

- Cálculo de la potencia del motor con base en un diagrama de trabajo teórico:

Este modo utiliza gráficas teóricas y supone algunos puntos como:

- El frenado se realiza desconectando el aparato de mando de forma que el motor quede sin corriente.
- Para la aceleración de las masas se supone el doble del par nominal.
- Se utilizarán las curvas de velocidad de motores.
- Utiliza la relación entre cargas α

$\alpha = \text{Par motor (desplazamiento de la carga)} / \text{Par motor (desplazamiento de la carga + carga en vacio)}$

Donde la carga en vacio será el gancho o recipiente de carga y se representa el valor de la aceleración por un factor tomando en cuenta el efecto de las masas como:

$$\varepsilon = \frac{0,28}{1000} * \frac{\sum GD^2 * n^2 * \eta}{Q * s} \quad (3.5)$$

Una vez obtenido el factor ε , se utiliza las graficas para determinar el coeficiente γ el cual permitirá obtener el valor del par del motor y su potencia media por las ecuaciones:

$$M = 955 * \frac{Q * v}{n * \eta} * \gamma \quad [\text{m} * \text{Kg}] \quad (3.6)$$

$$P = \frac{Q * v}{102 * \eta} * \lambda \quad [\text{Kw}] \quad (3.7)$$

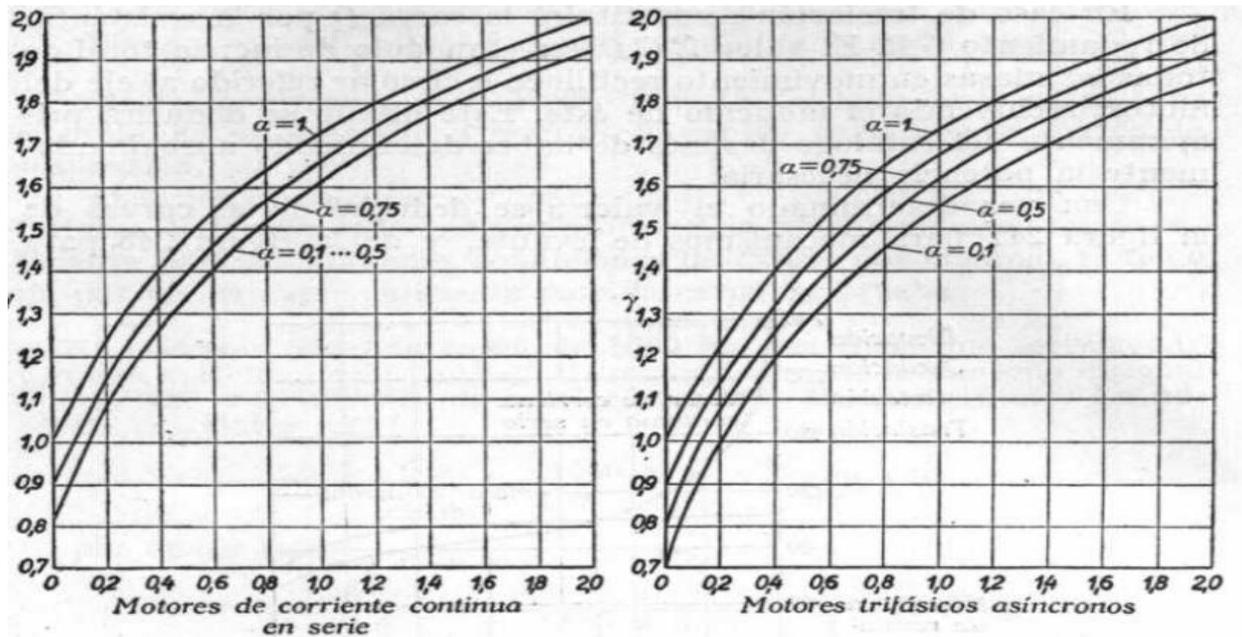


Figura 3.4 Ejemplo de Tablas teóricas para el cálculo de la potencia en motores [5]

- Cálculo de la potencia del motor con base en un diagrama de trabajo exacto:

Este método es más exacto pero requiere mayor número de cálculos y de información, ya que el diagrama de trabajo se divide en cuatro componentes (Gráficas del respectivo factor) que son:

- a. Diagrama de velocidad
- b. Diagrama de recorrido
- c. Diagrama de par
- d. Diagrama de potencia

Reductores de Velocidad

Como se mencionó anteriormente un factor importante en el funcionamiento de los motores es la velocidad, generalmente las velocidades rondan valores de 1800, 1750, 1600 o 3600 rpm, valores sumamente altos para el funcionamiento de la mayoría de maquinaria industrial y en general cualquier otro dispositivo.

Lo dicho en el párrafo anterior es lo que provoca el uso de los llamados reductores de velocidad, que en sí son engranajes, mecanismos circulares o dentados, diseñados con base en la función del motor a utilizar, los cuales son acoplados al motor y van a permitir el uso del motor para velocidades diferentes de la que han sido diseñados.

Una mal diseño o fallas de fabricación de los reductores de velocidad puede llegar a ocasionar daños y deficiencias en la máquina, pueden generar ruidos no deseados, mal funcionamiento o calentamiento de la máquina en la que se utilice.

Un tipo de reductor de velocidad es lo que se llama motorreductor, este presenta mejores características que el uso de engranajes mecánicos como:

- a. Mayor eficiencia en la transmisión de potencia suministrada por el motor
- b. Menor espacio requerido
- c. Mayor seguridad en la transmisión, reduciendo costos de mantenimiento
- d. Menor tiempo requerido en la instalación

Ya sea por motorreductores o engranajes las dos opciones que se tienen en su funcionamiento son, la reducción o el aumento de las revoluciones obtenidas del motor principal. A continuación se presentan dos diagramas que ejemplifican ambos casos.

El eje del motor se coloca en la polea roja y el eje con la velocidad deseada está en la polea verde, se definen a $D1$ y $D2$ como los diámetros y $N1$ y $N2$ las velocidades.

$$N1 * D1 = N2 * D2$$

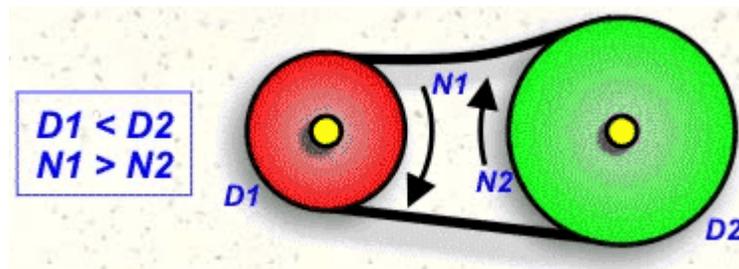


Figura 3.5 Diagrama para la reducción de velocidad de un motor [12]

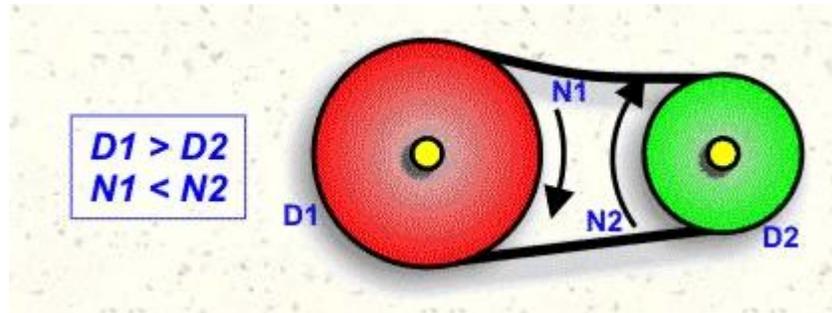


Figura 3.6 Diagrama para el aumento de velocidad de un motor [12]

3.2.5 Dispositivos electrónicos

3.2.5.1 Sensores de Temperatura

A nivel industrial la medición de temperatura se da en una gran cantidad de procesos, en este proyecto es una parte esencial ya que permite realizar el control de temperatura del escaldado.

Para fines del proyecto se analizaron varias opciones que ofrece el mercado, determinando que los dos tipos más adecuados que se encontraron son los Termopares y las RTD, seguidamente se hace una explicación de sus características principales con el fin de facilitar la mejor elección.

➤ RTD

Sus siglas significan Detector Resistivo de Temperatura, su funcionamiento se basa en el hecho de algunos tipos de materiales al ser expuestos a cambios de temperatura sufren variaciones en el valor de su resistencia eléctrica de manera proporcional.

De manera tal que utilizando la corriente que circula por la RTD podemos medir el valor de temperatura real de algún sistema. Dichas RTD están hechas principalmente de cobre, níquel o platino (metales puros tienen un coeficiente de resistencia de temperatura muy constante).

Tabla 3.1 Algunos materiales utilizados en la fabricación de RTD's [13]

Material	Rango de Temperatura	Nota
Platino (Pt)	-260~1000 °C (-440~1800 °F)	Mayoría de aplicaciones la temperatura máxima es 500 °C
Cobre (Cu)	-200~260 °C (-330~500 °F)	
Níquel (Ni)	-200~430 °C (-330~800 °F)	No tiene buena linealidad
Balco (70%Ni – 30%Fe)	-100~230 °C (-150~450 °F)	No tiene buena linealidad, su fabricación no es costosa y tiene una alta resistencia;
Tungsteno (W)	-100~1200 °C (-150~2200 °F)	

A continuación se presenta una gráfica característica de la respuesta de un tipo de RTD de platino denominada PT100 (utiliza una resistencia de 100 Ω)

$$R_{PT100} = 100(1 + 0.003908T - 6(10^{-7}) * T^2 - 2(10^{-13})T^3) \quad (3.8)$$



Figura 3.7 Curva característica de un transductor PT100 [14]

➤ **Termopar**

Este tipo de sensor consiste en la unión de dos cables o hilos de diferente tipo de material por un extremo y libres en su otro extremo. Al aplicar una temperatura en el punto de unión generara una diferencia de potencial entre los extremos que se encuentran separados, como se muestra en la siguiente figura.

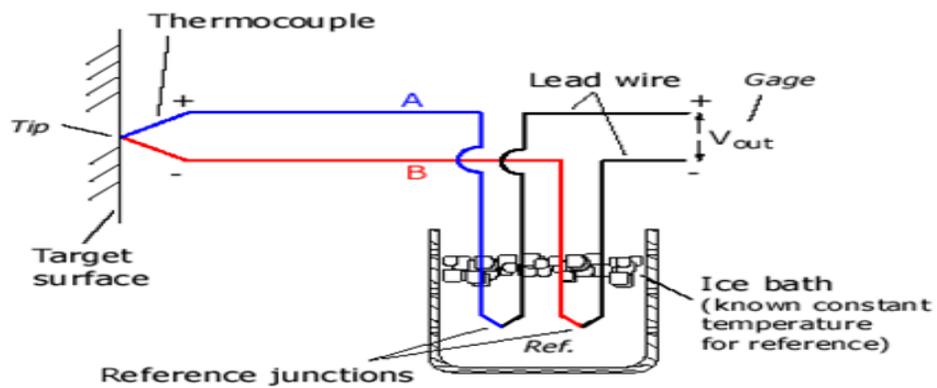


Figura 3.8 Configuración de un Termopar [13]

Cada uno de los alambres que se utilizan para la construcción de un termopar tienen un coeficiente llamado: coeficiente de Seebeck, este describe el cambio de potencial con respecto al cambio en la temperatura en un material definido y es función no lineal de la temperatura.

Un termopar es un sensor de temperatura relativa, esto quiere decir que requiere de una temperatura de referencia, en el caso de la figura anterior se utiliza agua helada con este propósito. Sin embargo es un método poco práctico, por lo que generalmente se suele utilizar junto con otro sensor que dará la lectura de referencia.

A continuación se presenta una tabla con los algunos tipos de termopares:

Tabla 3.2 Principales tipos de Termopares disponibles en el mercado [13]

Tipo	Material (+ & -)	Rango de Temperatura °C (°F)	Sensibilidad 25°C (77°F) μV/°C (μV/°F)	Error*
J	Hierro & Constantan (Fe & Cu-Ni)	-210~1200 (-350~2200)	51.7 (28.7)	LT:±2.2~1.1°C(± 4~2°F) HT:±0.375~0.75%
K	Cromel & Alumel (Ni-Cr & Ni-Al)	-270~1350 (-450~2500)	40.6 (22.6)	LT:±2.2~1.1°C(± 4~2°F) HT:±0.375~0.75%
T	Cobre & Constantan (Cu & Cu-Ni)	-270~400 (-450~750)	40.6 (22.6)	LT:±1~2% HT:±1.5% or ±0.42°C(±0.75°F)
R	Platino & 87% Platino/ 13% Rodio (Pt & Pt-Rh)	-50~1750 (-60~3200)	6 (3.3)	LT:±2.8°C(±5°F) HT:±0.5%
S	Platino & 90% Platino/ 10% Rodio (Pt & Pt-Rh)	-50~1750 (-60~3200)	6 (3.3)	LT:±2.8°C(±5°F) HT:±0.5%

3.2.5.2 Sensores de Nivel para líquidos

Para el desarrollo del proyecto se debía contar con sistema continuo de medición de un nivel de líquido, esto con el fin desarrollar el control de nivel de agua dentro de la máquina escaldadora.

A continuación se presentan tres tipos de sensores que permiten realizar este tipo de control:

➤ Sensor de Flotador

Este tipo de sensor es posiblemente el que realiza el proceso de manera más sencilla en relación con los demás, sin embargo, tiene el inconveniente de que por sí solo el flotador es un transductor del nivel de líquido a un movimiento mecánico, lo complicado es como convertir el movimiento mecánico a una señal eléctrica adecuada.

Una manera de implementarlo es el acople directo, esto es utilizando el flotador conectado por algún tipo de cadena y mediante algún engranaje conectar el movimiento a una etapa electrónica que me convierta el movimiento giratorio de los engranajes a una señal eléctrica. Este tipo de sistema presenta problemas ya que las partes mecánicas del sistema están expuestas a daños, dependiendo del acople mecánico pueden presentar poca exactitud, el cual además de ser complicado puede requerir mucho espacio físico.

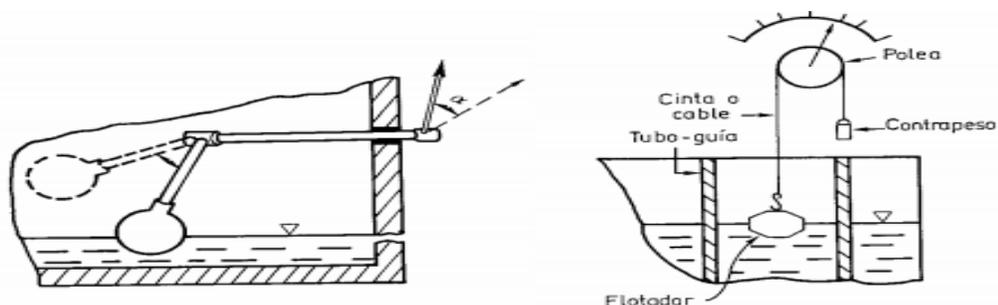


Figura 3.9 Diagrama sensor de nivel tipo flotador [6]

Otra manera de realizar este tipo de mecanismo es lo que se llama un acople magnético, aquí se utiliza un tubo colocado verticalmente en el interior del recipiente y de un material adecuado para las condiciones de trabajo, internamente de este se encuentra un flotador con un imán, externamente se colocan dos flotadores con magnetos de polos opuestos de manera que se atraen, a si el movimiento de los magnetos se refleja en el imán que se encuentra dentro del tubo, dicho imán posee las conexiones necesarias para generar la señal eléctrica que indique el nivel del liquido a partir del movimiento vertical del imán.

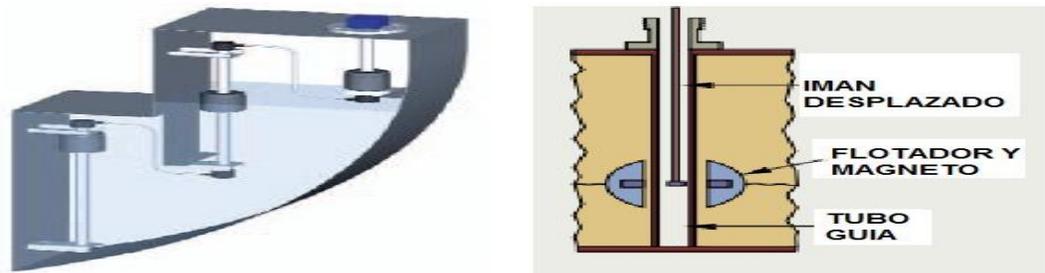


Figura 3.10 Ejemplos de sensores de nivel con acople magnético [7]

➤ Sensor Ultrasónico

En la actualidad es un sistema muy utilizado principalmente en recipientes totalmente cerrados, su funcionamiento se basa en la utilización de ondas sonoras con frecuencias entre los 20 KHz a 500 KHz.

El transductor se encuentra en tope del recipiente y utiliza un tipo de cristal piezoeléctrico que convierte impulsos eléctricos en energía sonora. Este envía ráfagas de ondas sonoras, las cuales al entrar en contacto con el líquido genera un tipo de ecos que se reflejan hacia el transductor, de manera que este puede calcular la distancia del líquido con base en el tiempo que dura entre enviar y recibir determinada ráfaga de ondas.

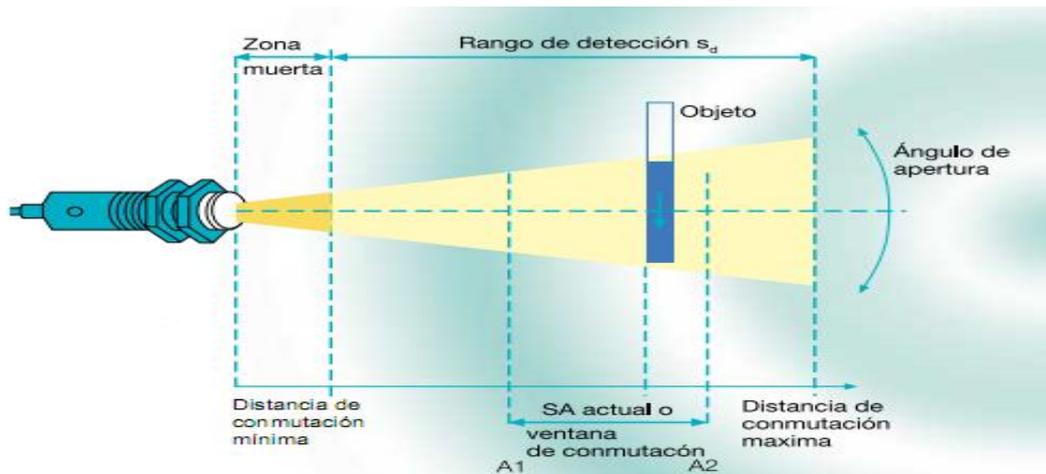


Figura 3.11 Funcionamiento sensor ultrasónico [8]

Sin embargo este tipo de sensores presentan deficiencias en su funcionamiento bajo algunas condiciones, los cambios bruscos de temperatura afectan la velocidad a la cual se transmiten las ondas sonoras, si el líquido presenta espuma o alguna otra sustancia puede absorber las ondas en vez de reflejarlas y por último si el líquido presenta movimientos fuertes donde se generan tipos de olas, estas pueden provocar mediciones inexactas.

➤ Sensor de Presión

Este tipo de sensor se basa en el hecho de que no importa la forma de un recipiente la presión que ejerce el líquido contenido en este dependerá del nivel al que se encuentre el líquido (la altura). Podemos hacer mención de tres tipos de transductores de presión.

Sensor sumergible, estos se introducen dentro del líquido hasta llegar casi al fondo del recipiente, de manera que miden la presión sobre ellos definiendo así la altura desde el nivel del líquido hasta eje del dispositivo. Se usan solo para sistemas donde el recipiente este abierto y preferiblemente si el líquido se mantienen limpio en la mayor parte del proceso.

Sensores de presión hidrostática, este tipo de sensores utiliza una membrana la cual recibe sobre si una presión ejercida por la columna del líquido comprimiendo el aire dentro de la membrana a una presión igual a la ejercida por el líquido, se utiliza principalmente para recipientes abiertos.

Sensor de presión diferencial, este presenta al igual que el caso anterior una membrana para su funcionamiento, dicho sensor posee dos entradas, una se coloca en el fondo del recipiente y otra a un valor de presión conocida o a la presión atmosférica, de manera que el valor obtenido es la diferencia de ambas presiones y el cual indica el nivel del liquido, su uso principal es en recipientes cerrados.

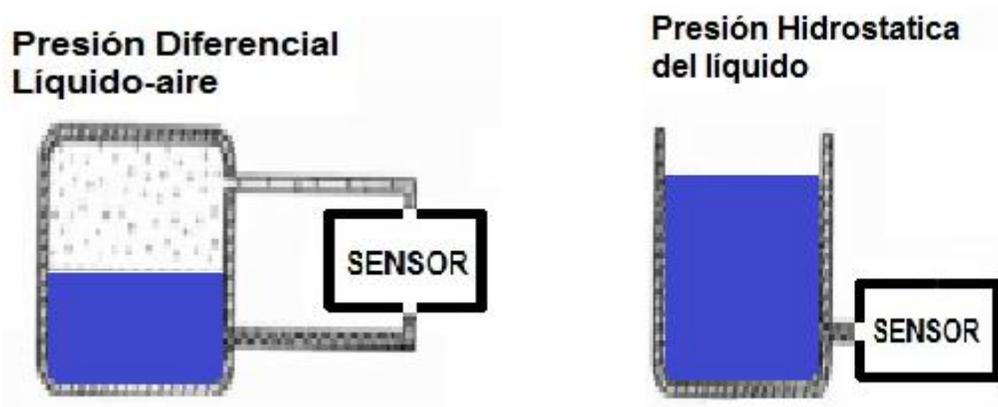


Figura 3.12 Ubicación de sensores de presión



Figura 3.13 Sensores de presión, Sumergible (A), Hidrostático (B) y Diferencial (C) [9]

3.2.6 Control automático

El propósito del control automático en un proceso es mantener una determinada variable (temperatura, presión, flujo, velocidad, entre otras) en un valor establecido (Set point) o dentro de un rango de valores, mediante la manipulación de otra variable, aun ante la presencia de perturbaciones al sistema.

El efecto de implementar controladores automáticos a un proceso productivo tiene varios beneficios entre los que ponemos citar:

- Reducir costos de producción, aprovechando mejor la materia prima y reduciendo el tiempo de elaboración.
- Mejorar la calidad del producto elaborado.
- Facilitar la tarea desarrollada por los trabajadores.
- Realizar operaciones que el ser humano no puede realizar o que son de alto riesgo para la integridad del trabajador.

Como se puede observar el desarrollo de un adecuado control genera factores sumamente positivos, por lo que a continuación se hace referencia a elementos teóricos necesarios para su aplicación.

3.2.6.1 Tipos de control

Aquí nos referimos a las formas o estrategias para desarrollar un sistema de control, podemos definir tres tipos principales:

➤ Control por realimentación

En este tipo de control la variable del proceso que se debe controlar debe ser medida continuamente a la salida del sistema, el valor medido se utiliza como entrada del dispositivo de control, a si este valor realimentado en el sistema es usado para tomar la decisión sobre la acción a ejecutar sobre otra variable que puede ser manipulada, con el fin de regular dicha variable a controlar.

Su principal ventaja es que es quizás el control más fácil de implementar y el cual puede corregir cualquier tipo de perturbación que sufra el sistema. Ante lo cual surge su principal desventaja, la cual es que para lograr ejecutar el control es necesaria una medición adecuada de la variable a controlar y además no se puede corregir la perturbación hasta un tiempo después cuando se vea reflejada en la variable a controlar.

➤ Control por acción precalculada

Para este tipo de control en vez de medir el valor de la variable a controlar lo que se realiza es medir las variables que representan las perturbaciones del sistema, con dicha medición se toma la respectiva decisión de la acción a tomar sobre alguna variable a manipular, para lograr corregir el efecto de la perturbación antes de que logre afectar la variable a controlar.

La ventaja de este tipo de control es que si se realiza de manera correcta puede llegar a mantener un control sobre la variable a controlar muy preciso, pero por otro lado tiene dos elementos que representan desventajas de suma importancia, primero son controles más difíciles de implementar y generalmente de mayor costo económico y como segundo punto y quizás el de mayor importancia es que si en el proceso surge un tipo de perturbación que no se contempló en el diseño es imposible tomar alguna acción para corregir sus efectos en el sistema.

➤ **Combinación de realimentación y precalculada**

Este control como su nombre lo indica es una combinación de los dos anteriores, de manera que obtiene tanto mediciones de las perturbaciones como de la señal a controlar, y a partir de estas el control define las acciones a tomar sobre alguna variable, con lo cual se realizan las acciones correctivas del caso.

3.2.6.2 Diseño de un controlador

En el desarrollo de un regulador se puede hablar de tres aspectos fundamentales que mencionamos a continuación: [15]

a. Estructura de regulación

Este punto inicia con el análisis general del sistema donde se aplicará el regulador, principalmente conlleva la tarea de realizar los procesos necesarios para la obtención de la ecuación del modelo matemático que represente a la planta, y a partir de esta definir qué salida se debe regular y cual entrada ocupa el regulador, además que otros elementos se deben acoplar al regulador para su funcionamiento y la mejor ubicación de regulador dentro de la estructura completa del circuito de regulación.

b. Estructura del regulador

En este punto es donde se define el tipo de regulador a utilizar, generalmente se decide por implementar el menos complejo siempre y cuando sea adecuado para cumplir con los requisitos y condiciones especificados del diseño.

Generalmente cuando se hablan de especificaciones se hace mención al cumplimiento de valores para parámetros tanto para el comportamiento en estado estable como en su respuesta transitoria, y generalmente refiriéndose al caso del análisis en el dominio del tiempo tenemos:

➤ Error de estado estacionario

El error de estado estacionario normalizado ante una entrada escalón se puede definir como:

$$Y_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{e(t)}{A} = \lim_{t \rightarrow s} [-T(s)] \quad (3.9)$$

$e(t)$ = es la función del error.

A = es la amplitud del la señal escalón.

$T(s)$ = es la Transmitancia de error, la cual relaciona la entrada del sistema con el error.

➤ Sobreimpulso máximo

El sobreimpulso máximo se puede definir como:

$$M = Y_{\max} - Y_{ss} \quad (3.10)$$

Donde Y_{\max} es el valor máximo de la señal de salida y Y_{ss} es su valor en estado estable.

➤ **Tiempo de retardo.**

El tiempo de retardo, t_d , es el tiempo transcurrido desde la aplicación de la señal escalón hasta que la salida alcance el 50% de su valor final.

➤ **Tiempo de subida.**

Se le designa como t_r , y es el tiempo que tarda la respuesta al escalón en cambiar de 10% a 90% de su valor final.

➤ **Tiempo de estabilización.**

Se le designa como t_s , se define como el tiempo requerido para que la respuesta al escalón disminuya y se mantenga dentro de un porcentaje específico de su valor final y por lo general el porcentaje que se utiliza es un 2% o 5%.

c. Parámetros del regulador

En este punto como ya se definió el tipo de regulador no queda otra cosa más que escoger los parámetros para cumplir con lo solicitado en las especificaciones, a este proceso también se le llama cálculo o diseño del regulador.

Existe una gran variedad de procesos para realizar el diseño del controlador, dos de los más utilizados son los siguientes:

➤ **Diseño a partir de la respuesta en frecuencia**

Se basa en la utilización de la respuesta en frecuencia de lazo abierto del sistema, manipulando por medio de las gráficas de magnitud y de fase de bode, con el fin de obtener el comportamiento deseado en lazo cerrado.

➤ **Diseño por ubicación de polos**

Este tipo de diseño se basa en la representación del sistema en variables de estado o por medio de la función de transferencia. Ya que las características dinámicas del sistema se pueden deducir y modificar a partir de la ubicación de los polos y ceros, ante lo cual se busca encontrar la forma de manipular dicha ubicación con el fin de satisfacer las especificaciones del diseño.

Es importante mencionar que estos sistemas no son totalmente exactos, por lo que se recomienda realizar pruebas por medio de simulaciones y las iteraciones necesarias hasta llegar a un adecuado funcionamiento. Dos de los procedimientos más utilizados son los siguientes:

- **Realimentación de estado**

En este procedimiento se utiliza la descripción de la planta por variables de estado utilizando las ecuaciones dinámicas. Lo que se busca es desplazar los polos del sistema por realimentación de estado de la matriz K, de manera que se genera un nuevo sistema con una nueva matriz A, definida por $\tilde{A} = (A - BK)$

A partir de las especificaciones se define la ubicación deseada de los polos y seguidamente se calcula la matriz K (las dos formas más utilizadas para su cálculo es por sustitución o por el método de Ackerman).

Cuando se utiliza la realimentación de estado no importa el orden del sistema, pero es necesario que el sistema que se trabaja sea totalmente controlable y observable.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) && \rightarrow \text{Ecuaciones dinámicas} \\ y(t) &= Cx(t) + D \end{aligned} \quad (3.11)$$

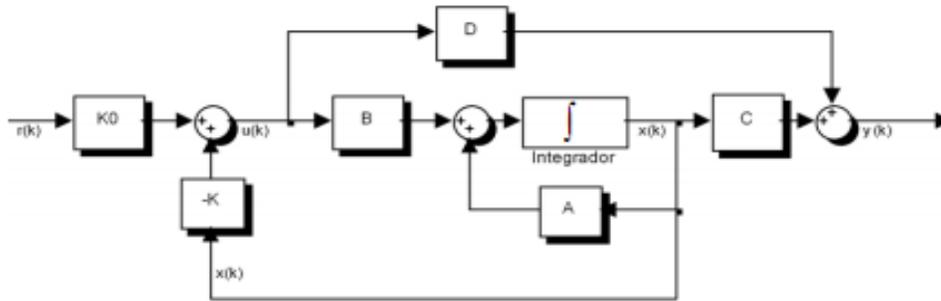


Figura 3.14 Sistema con realimentación de estado [16]

- **Lugar de las raíces**

El objetivo de este método es el de ubicar los polos dominantes de lazo cerrado en un área seleccionada para que se cumplan las especificaciones pedidas.

Esto se logra por medio de una combinación de ganancia, polos y ceros que se agregan al sistema de manera que se deforme el lugar de las raíces y se ubiquen los polos de la manera deseada.

Es necesario por lo tanto convertir las especificaciones del tiempo en sus respectivos valores en el dominio del plano S, para definir la región dentro de la cual se ubicaran los polos para cumplir con dichas especificaciones.

Este método parte del hecho de que el sistema es o puede aproximarse a uno sistema de segundo orden, definido como:

$$\hat{G}_R = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.12)$$

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

En este capítulo se detalla el proceso mediante el cual se fue desarrollando la solución al problema presente en el proyecto de una manera ingenieril con el cual se logra plantear los controles electrónicos necesarios. Se hace mención de cómo se inicia con definir el problema y la realización de investigaciones sobre diversos campos necesarios en su desarrollo, esto para luego calcular los modelos matemáticos del sistema a implementar y mediante la valoración de lo investigado y pruebas lograr obtener la mejor solución al problema.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

4.1.1 Generalidades

Luego de una serie de consultas e investigaciones la empresa El Sabor de Occidente S.A. toma la decisión de incursionar en la producción de carne de pollo, para tal fin era indispensable para su comienzo contar con las máquinas para dicho proceso, dentro de las cuales están la escaldadora y la peladora. Luego de un cierto periodo de tiempo recolectando cotizaciones e información de este tipo de sistema productivo avícola, surge la idea de que la empresa invierta recursos en la construcción de dichas máquinas.

Ante lo cual se procede a recolectar información sobre el proceso desarrollado por las máquinas, respecto a su estructura física, características propias del funcionamiento del proceso productivo y elementos electrónicos aplicados, surgiendo principalmente la necesidad de establecer elementos de control que no solo permitirán un funcionamiento adecuado del proceso, si no, que además se logrará mejorar la calidad de dicho proceso.

4.1.2 Descripción sintética del problema

La empresa no cuenta con la máquina escaldadora y peladora necesarias para la puesta en marcha del matadero de pollos.

4.2 Obtención y análisis de información

La obtención de información en este proyecto era una etapa sumamente importante, ya que no se contaba con muchas especificaciones técnicas de la maquinaria a desarrollar. El desarrollo del proyecto se dividió en dos áreas, por un lado se investigó la teoría de todo lo relacionado al manejo de este sistema productivo, se buscaron diseños ya existentes de este tipo de máquinas y se realizaron consultas a personas que habían trabajado en este tipo de proceso. Y de manera paralela con base en las especificaciones de diseño se fueron definiendo los elementos electrónicos necesarios para la puesta en marcha de la posible solución e investigando sobre el funcionamiento de los mismos, como son sensores y modelos de PLC's, información obtenida de libros, internet, revistas y consultas a personas relacionadas con los dispositivos.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de la solución

En conjunto con el encargado de la empresa se desarrollaron ideas con el fin de establecer el diseño de ambas máquinas que mejor se adaptara a las necesidades de la empresa y que cumpliera con especificaciones del proceso productivo, posteriormente se explicara de cuáles fueron las posibles soluciones en este aspecto.

En cuanto al desarrollo de los controles electrónicos a implementar, basándose en información teórica se maneja siempre una idea bastante concisa, lo cual implicaba la obtención de los modelos matemáticos para los dos controles a implementar, para ello se aplicaron métodos teóricos y experimentales. A partir de estos modelos obtenidos se diseñaron los reguladores que cumplieran con las especificaciones de funcionamiento.

4.4 Implementación de la solución

Definida las estructuras de las máquinas, y a partir de las especificaciones de las velocidades de los motores para cada proceso, se implementaron las configuraciones utilizando tanto reductores mecánicos como juegos de poleas.

Como solución al desarrollo del control electrónico, luego de investigaciones se decidió por el uso del PLC Pico GFX-70, el cual permitió implementar los controles desarrollados teóricamente, y se realizó un diagrama eléctrico que permitiera el manejo de las máquinas tanto manual como automático, todos los dispositivos electrónicos se instalaron en una caja de control junto con el PLC. Se probaron por separados el funcionamiento del PLC, sensores, relés y contactores de los motores, para luego realizar su montaje en el panel de control principal.

4.5 Reevaluación y diseño

Debido a la poca información con respecto a la adecuada velocidad de operación de la peladora se tiene la opción de modificar dicha velocidad de forma fácil ya que se confeccionaron dos poleas más para hacer dichos cambios. En el panel de control se dejó espacio libre para la colocación de un posible módulo extra de salidas del PLC para futuras implementaciones.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En este apartado se profundiza en el desarrollo del proyecto, se realiza una descripción de las ideas planteadas en la solución, las modificaciones sufridas para llegar a la implementación final. Se presenta la información respectiva sobre los cálculos matemáticos necesarios para la solución, además los elementos de hardware seleccionados y el desarrollo del software necesario para la puesta en marcha del diseño.

5.1 Análisis de soluciones y descripción final

Como se menciona en el punto 4.3 en cuanto al diseño de las máquinas se manejó una estructura muy similar a modelos ya utilizados en el mercado, por lo tanto el trabajo consistió en establecer el tamaño de las máquinas de acuerdo a la capacidad productiva que se ocupaba, definiendo finalmente un tamaño para procesar como mínimo 8 pollos y 4 pollos en la escaldadora y peladora respectivamente.

En el caso de la escaldadora se concluyó que la mejor opción era la implementación de un quemador junto con un horno para realizar el calentamiento del agua, ya que por sus características permite mantener el calor por lapsos largos de tiempo. Dicho horno se elaboró usando ladrillos y pegamentos refractarios los cuales son especiales para mantener el calor y trabajar a altas temperaturas.

Como siguiente paso se enfocó el trabajo en la parte de potencia, lo primero que se realizó fue la selección de los motores para cada máquina, y a partir de la información del proceso productivo adquirido se definieron las velocidades de funcionamiento de ambos motores. Dichas velocidades se diseñaron utilizando reductores mecánicos y sistemas de poleas, este proceso se explica con más detalle en la sección 5.3.3.

Al llegar a este punto ya se habían analizado varias versiones de PLC para el desarrollo del control electrónico del proyecto, se decidió por implementar el PLC Pico GFX-70 el cual presentaba dos elementos de importancia, que son un módulo que permite implementar controles PID y una cantidad de entradas analógicas necesarias para la lectura de los sensores, además que de los proveedores consultados fue la opción que más rápido permitía disponer del dispositivo, lo cual fue un factor determinante por efectos del tiempo para la entrega del proyecto.

Se inicia de manera simultánea con los cálculos matemáticos para el desarrollo de los compensadores usados en los controles automáticos, la programación y pruebas de funcionamiento del PLC y el diseño del diagrama eléctrico para la implementación del proyecto. Sobre el desarrollo de los cálculos para el control automático se profundiza en la siguiente sección mientras la implementación del PLC se analiza en la sección 5.4. El diagrama eléctrico implementado se ilustra en las Figuras 5.1 y 5.2, además se explican cada uno de los componentes del circuito en la Tabla 5.1.

A partir del diagrama eléctrico se inicio con el montaje del panel de control, el cual se elaboró utilizando canaletas con el fin de mantener el orden en el cableado y además se trató de separar lo máximo que se pudiera los elementos de control de los de potencia con el fin de evitar algún tipo de ruido en las señales de control. Ya con el panel montado se inicio la etapa de pruebas de los controles y del proceso productivo.

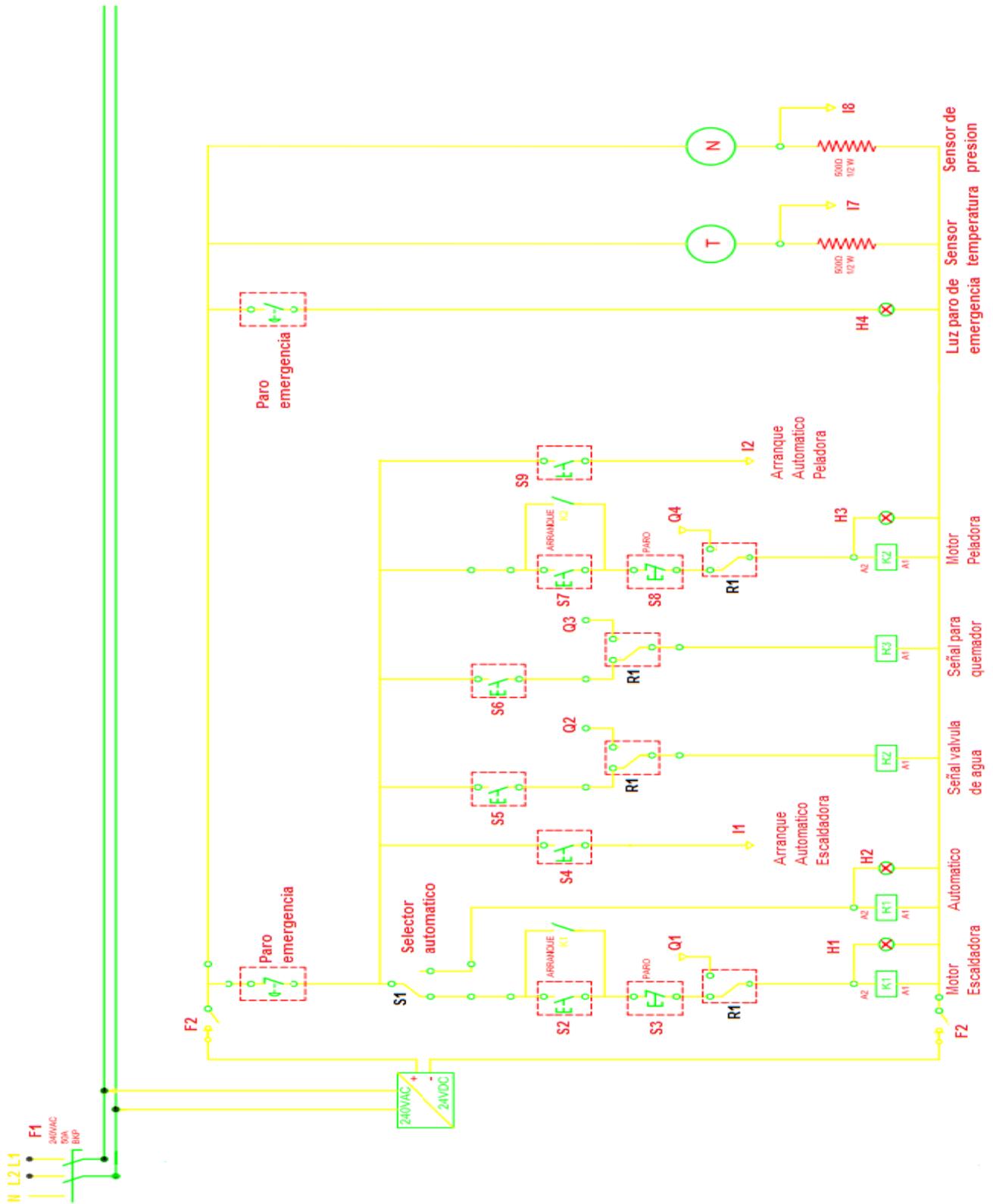


Figura 5.1 Diagrama eléctrico de la solución final (etapa de control)

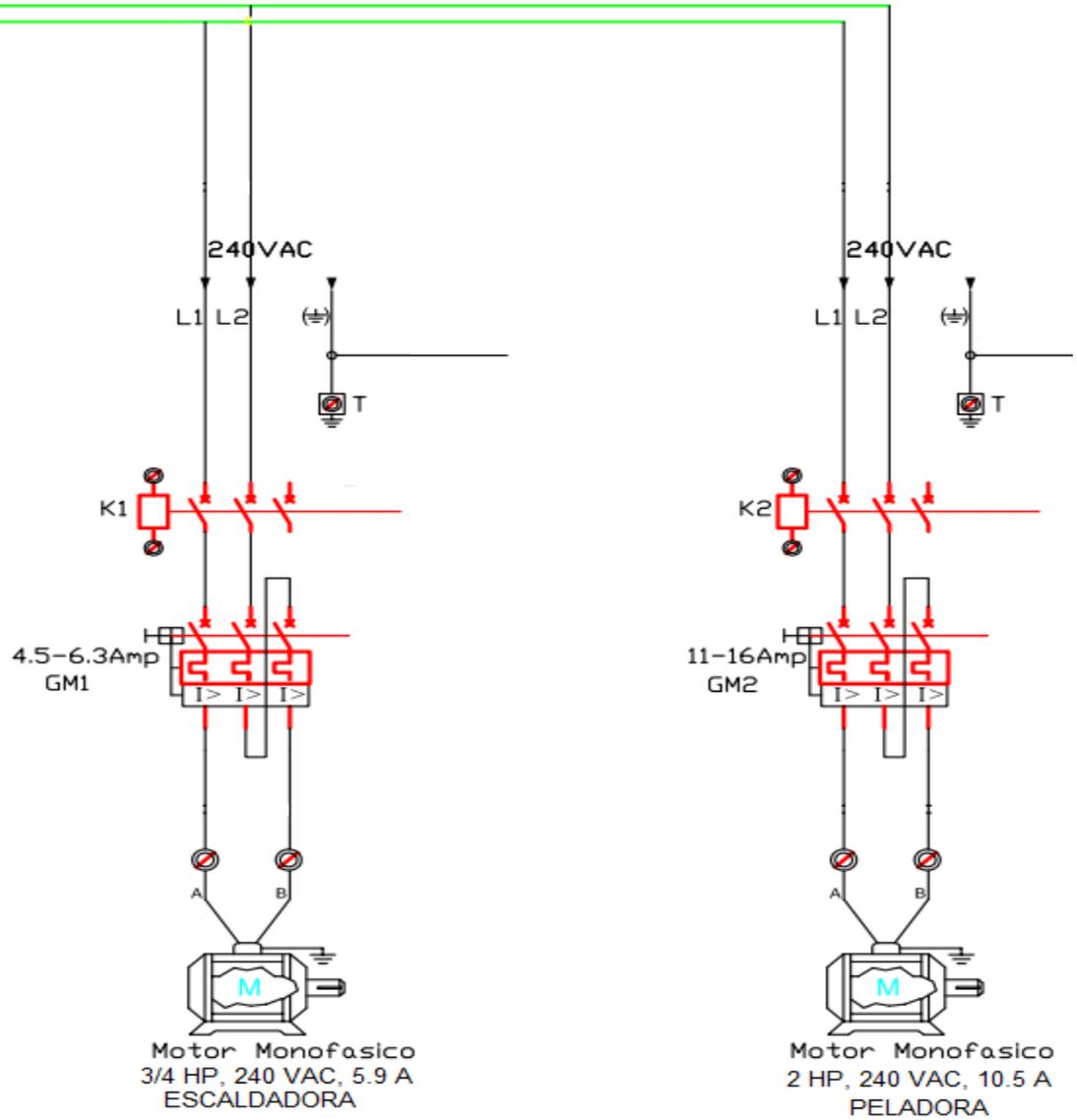


Figura 5.2 Diagrama eléctrico de la solución final (etapa de potencia)

Tabla 5.1 Descripción de los elementos del diagrama eléctrico final

ELEMENTO	FUNCION	ELEMENTO	FUNCION	ELEMENTO	FUNCION
F1	Disyuntor Protección 220V	S9	Botón Arranque automático peladora	R2	Relé válvula de agua
F2	Disyuntor Protección 24V	I1	Entrada digital al PLC	R3	Relé del quemador
S1	Selector manual o automático (relé de 4 polos)	I2	Entrada digital al PLC	H1	Luz activación escaldadora
S2	Botón Arranque manual escaldadora	I7	Entrada analógica al PLC	H2	Luz de modo automático
S3	Botón Paro manual escaldadora	I8	Entrada analógica al PLC	H3	Luz activación Peladora
S4	Botón Arranque automático escaldadora	Q1	Arranque de la escaldadora con señal del PLC	H4	Luz Paro de Emergencia
S5	Botón Activación manual de válvula de agua	Q2	Activación válvula de agua con señal del PLC	K1	Contactador Motor escaldadora
S6	Botón Activación manual del quemador	Q3	Activación del quemador con señal del PLC	K2	Contactador Motor Peladora
S7	Botón Arranque manual peladora	Q4	Arranque de la peladora con señal del PLC	GM1	Guarda motor escaldadora
S8	Botón Paro manual peladora	RI	Contactos del Relé de 4 polos	GM2	Guarda motor peladora

5.2 Control automático

5.2.1 Modelado matemático y cálculo de reguladores

Como se explicó en el apartado teórico la primera tarea a desarrollar es el cálculo de los modelos matemáticos utilizados para el diseño de los reguladores. Para el caso del control de temperatura se calcula un modelo teórico y otro experimental (Identificación de sistema) y para el control de nivel solo se usa un modelo teórico. Una vez definidos estos modelos se realizan los cálculos de los reguladores para cada caso.

5.2.1.1 Diseño teórico del control de temperatura

Para este modelado principalmente nos referimos a lo mencionado en el apartado del marco teórico respecto a la transferencia de calor, en este caso el elemento a analizar es el depósito de agua, en el cual se presenta transferencia de calor por conducción y convección. A continuación se enuncian algunas consideraciones que se toman para el desarrollo del modelo. [17]

- El agua del tanque presenta una temperatura homogénea debido al movimiento del aspa en su interior.
- Por la utilización del horno cerrado se considera que el calor es aplicado de manera uniforme al sistema.
- Se supone un nivel de agua constante por la aplicación del control de nivel.

Para el desarrollo del modelo nos basamos en el balance de energía de un sistema, que indica que la tasa de acumulación de energía del proceso es igual a la energía de entrada del proceso menos la energía de salida del proceso. En nuestro caso tenemos lo siguiente:

$$q = \rho_a CV \frac{\partial T}{\partial t} + KA_L(T - T_0) + A_a h_a (T - T_0) \quad (5.1)$$

Energía que entra al sistema:

$$q = \text{Energía del quemador}$$

Energía que sale o que almacena el sistema:

$$\rho_a CV \frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow \text{Energía absorbida por el agua} \quad (5.2)$$

ρ_a = Densidad del agua

C = Calor específico del agua

V = Volumen del agua

$$KA_L(T - T_0) \rightarrow \text{Energía perdida por conducción en las paredes del depósito} \quad (5.3)$$

$$K = \frac{\sigma_s}{\ell} \rightarrow \text{Constante de transmisión del material} \quad (5.4)$$

σ_s = Conductividad térmica del acero

ℓ = Grosor del material

T = Temperatura del sistema y T_0 = Temperatura del exterior

A_L = Área total sin cubrir por el ladrillo refractario

$$A_a h_a (T - T_0) \rightarrow \text{Energía perdida por convección en el ambiente} \quad (5.5)$$

A_a = Superficie del agua en el depósito

h_a = Constante de convección del agua

Valores:

$$\rho_a = 1000 \frac{Kg}{m^3}$$

$$C = 4,181 \frac{KJ}{KgK}$$

$$V = 0,277m^3$$

$$K = \frac{\sigma_L}{\ell} = \frac{15 \frac{W}{mK}}{2,66 \times 10^{-3} m} = 5,64 \times 10^3 \frac{W}{m^2 K}$$

$$A_L = 0,698m^2$$

$$A_a = 0,976m^2$$

$$h_a = 500 \frac{W}{m^2 K}$$

Si reacomodamos la ecuación original del balance de energía (5.1) como:

$$\rho_a CV \frac{\partial T(t)}{\partial t} = q(t) + KA_L T_0(t) - KA_L T(t) + A_a h_a T_0(t) - A_a h_a T(t) \quad (5.6)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación anterior y reordenando nos queda:

$$T(s)[\rho_a CV * S + KA_L + A_a h_a] = Q(S) + (KA_L + A_a h_a)T_0(S) \quad (5.7)$$

$$T(s)[\tau * S + 1] = Q(S) + (KA_L + A_a h_a)T_0(S) \quad (5.8)$$

$$\tau = \frac{\rho_a CV}{(KA_L + A_a h_a)} \quad (5.9)$$

Obteniendo:
$$T(S) = \frac{Q(S)}{(\tau * S + 1)} + \frac{(KA_L + A_a h_a)T_0(S)}{(\tau * S + 1)} \quad (5.10)$$

El sistema total esta caracterizado por dos funciones de transferencia, sin embargo, solo la primera de ellas relaciona el valor de la temperatura del líquido con la

potencia suministrada al sistema la cual es utilizada como modelo de análisis, la otra función se toma como una perturbación al sistema.

$$\tau = \frac{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 4.181 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{C}} * 0.277 \text{m}^3}{(5.64 \times 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} * 0.698 \text{m}^2 + 0.976 \text{m}^2 * 500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}})} = \frac{1158.137 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{C}}}{4424.72 \frac{\text{W}}{\text{C}}} \quad (5.11)$$

$$\tau = 261.74 \text{segundos}$$

Como modelo teórico de la planta se define a la siguiente ecuación:

$$G(S) = \frac{T(S)}{Q(S)} = \frac{0.00382}{(S + 0.00382)} \quad (5.12)$$

Del cual se obtiene una respuesta ante una señal escalón.

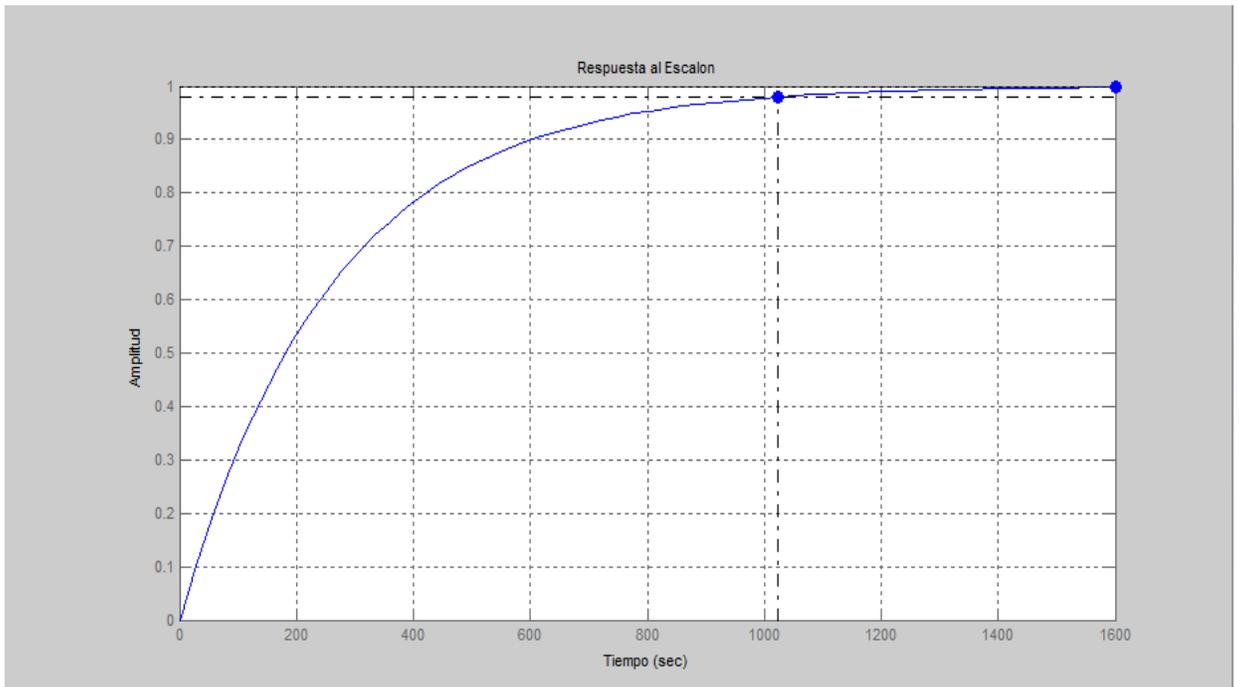


Figura 5.3 Respuesta al escalón del modelo teórico de la planta para el control de temperatura

De dicha grafica se puede determinar que no presenta error de estado estacionario y que tiene un tiempo de estabilización de 1020 segundos (17 minutos).

Ahora si utilizamos el modelo anterior de la planta sin ningún tipo de regulador aplicado, y definimos el sistema actual con el siguiente diagrama, donde se realimenta el sistema con un valor constante de 0.4 que representa la ganancia de la curva teórica de un sensor RTD:

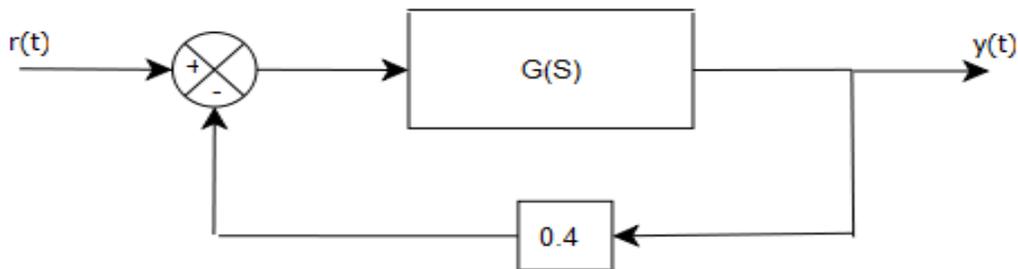


Figura 5.4 Diagrama con realimentación no unitaria del modelo teórico

Al aplicar una señal escalón al sistema se obtiene la grafica de la Figura 5.5, la cual presenta un tiempo de estabilización alrededor de 735 segundos (12.25 minutos) y presenta un valor final de 0.714 lo que sería un error de estado estacionario de 28.6% (calculado con la ecuación (3.9) del marco teórico). Se puede comprobar dicho error de estado estacionario utilizando la transmitancia equivalente al ser un sistema con realimentación no unitaria con la siguiente fórmula:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1}{1 + G_E(S)} \right] \quad (5.13)$$

$$G_E(S) = \frac{G(S)}{1 + [G(S) * (H(S) - 1)]} \quad (5.14)$$

$$e_{ss} = 28.57\% \quad (5.15)$$

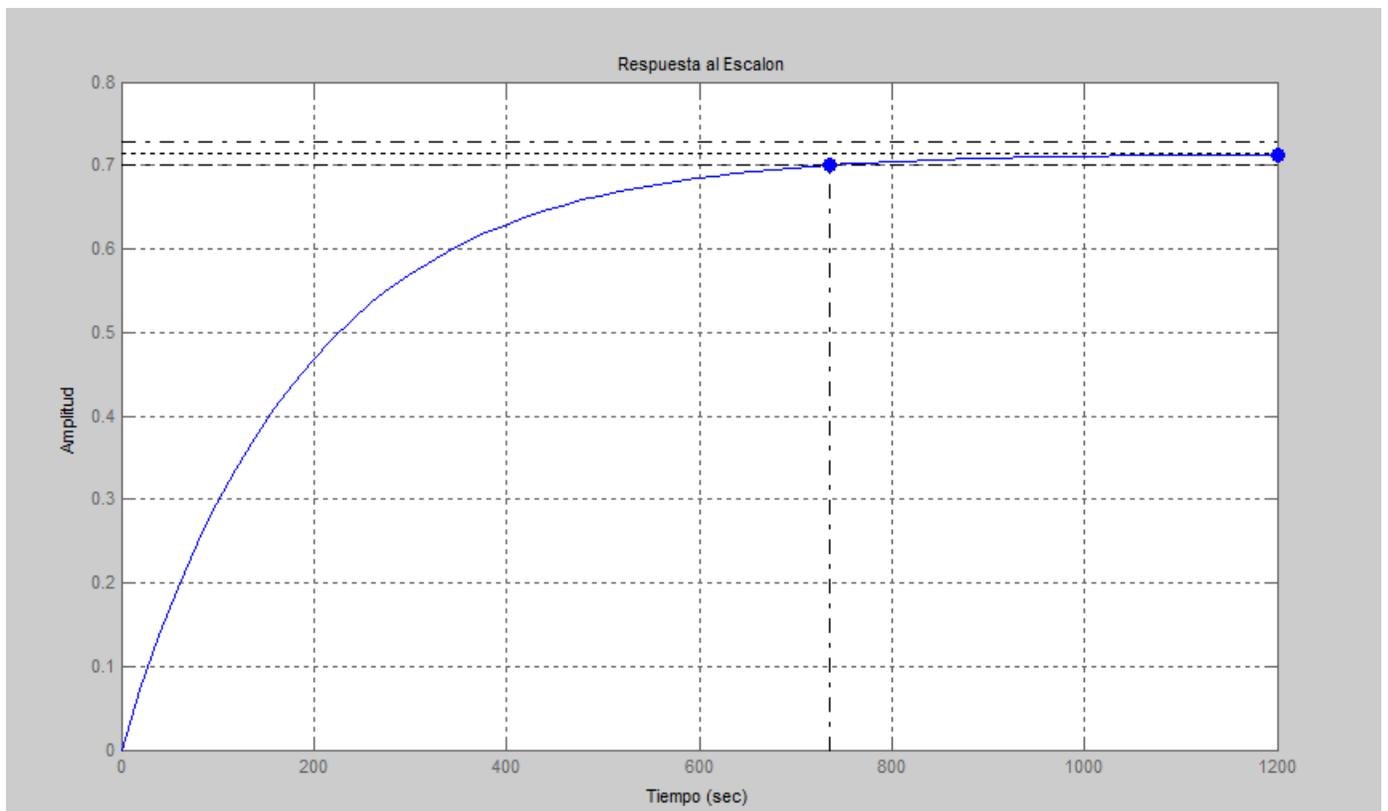


Figura 5.5 Respuesta al escalón del modelo teórico con realimentación no unitaria

Seguidamente se procede a discretizar la planta para luego poder desarrollar el controlado en tiempo discreto, el cual se implementa de manera digital en el dispositivo de control.

Para realizar la discretización de la planta se utilizaron dos métodos, el método de Retenedor de Orden Cero (ZOH) y el método de Tustin [18]. El tiempo de muestreo a utilizar se puede calcular de dos formas, a partir del tiempo de estabilización de la grafica de la planta ante un escalón con realimentación unitaria, de donde se tiene que

$$T_s = \frac{\tau}{10} = \frac{128s}{10} = 12.8s .$$

Otra manera es utilizando la función de transferencia del sistema con realimentación unitaria, y a partir del polo que se ubique más cerca del origen se

define que $T_s = \frac{1}{10 * |p|} = \frac{1}{10 * |0.00764|} = 13.1s$, por ser menor se decide utilizar un $T_s = 12.8s$. (5.16)

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento ante un escalón tanto del modelo continuo como de los dos modelos ya discretizados. Como se observa la mejor aproximación se da por el método de Tustin, ya que el ZOH se retrasa bastante con respecto a la señal en tiempo continuo.

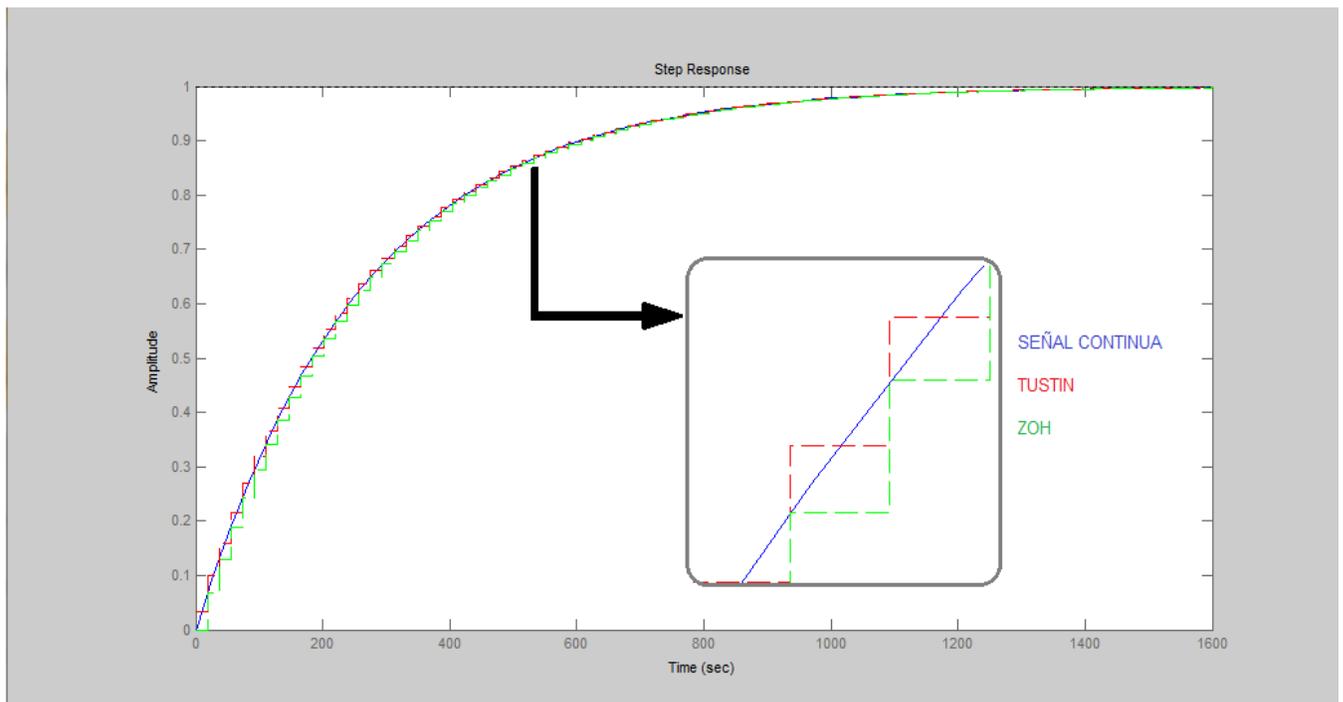


Figura 5.6 Respuesta al escalón del modelo teórico en tiempo continuo y discretizado

Obteniendo como planta discretizada la siguiente:

$$G(z) = \frac{0.02423 z + 0.02423}{(z - 0.9523)} \quad (5.17)$$

Si se analiza el comportamiento del sistema con la planta ya discretizada pero sin aplicarle ningún control, se obtiene la siguiente gráfica. De la cual se puede definir que se tiene un error de estado estacionario de un 28% (valor final de 0.721), y presenta un tiempo de estabilización aproximado de 720 segundos (12 minutos). Por efectos de la perturbación aplicada se observa que el sistema aumenta el error a un valor de un 35% (valor final de 0.65).

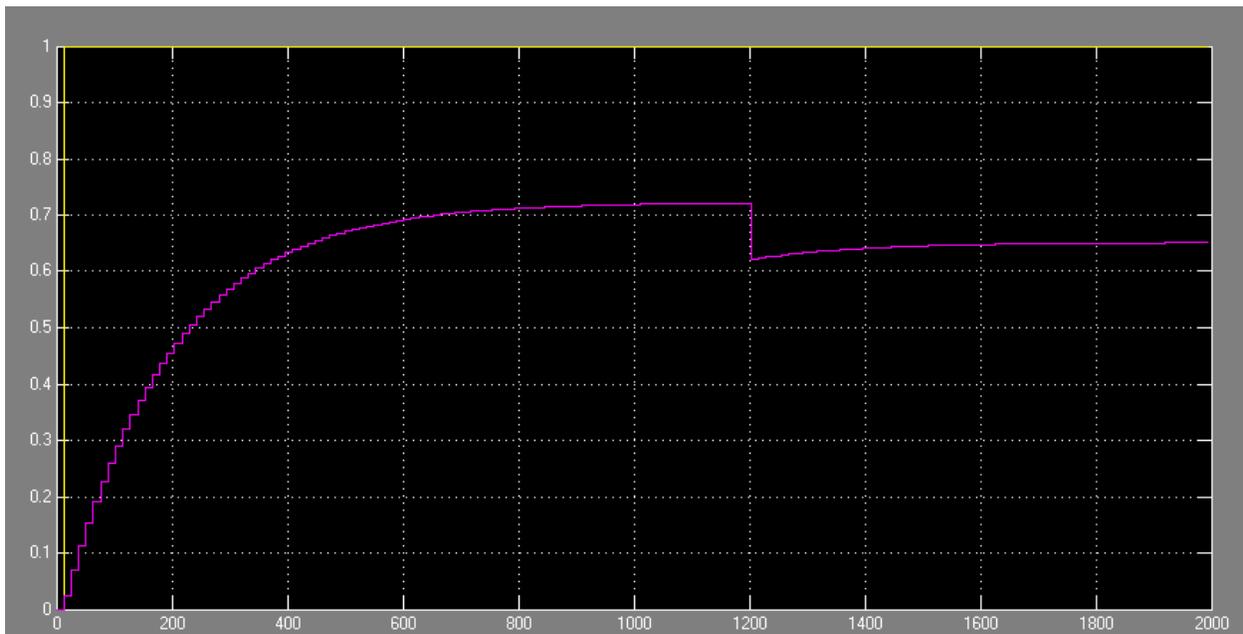


Figura 5.7 Respuesta al escalón del modelo teórico discretizado

Para obtener un control adecuado se busca cumplir con dos elementos de las características dinámicas, primero disminuir el tiempo de estabilización a 10 minutos ($t_{2\%} \leq 600s$) con un sobreimpulso menor o igual de un 2% ($M \leq 0.02$) y el principal que es obtener error en estado estacionario de $e_{ss} \leq 2\%$).

A partir de las especificaciones anteriores tenemos los siguientes valores:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\left(\frac{\ln M}{\pi}\right)^2}{1 + \left(\frac{\ln M}{\pi}\right)^2}} \quad (5.18)$$

$$\zeta \geq 0.7797$$

$$\frac{4}{\zeta * Wn} \leq 600s \quad (5.19)$$

$$\zeta * Wn \geq 0.00667$$

$$Wn = 0.00855$$

Calculamos el punto que cumple con esas condiciones como:

$$S1 = -\zeta * Wn \pm jWn\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (5.20)$$

$$S1 = -0.00667 \pm j0.00535$$

Se discretiza el punto anterior con T= 12.8 s.

$$Z1 = e^{(S1*T)} \quad (5.21)$$

$$Z1 = 0.9160 \pm j0.0628$$

Primero se calcula el compensador de adelanto para satisfacer las condiciones dinámicas con el método de la bisectriz [19], recordando que al tener realimentación no unitaria tenemos que $\widehat{G}(z) = G(z) * 0.4$.

Se calculan los ángulos como sigue:

$$\phi = 180^\circ - \angle \widehat{G}(z) \Big|_{z=Z1} = 180^\circ - 118.15^\circ = 61.85^\circ \quad (5.22)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im } z_1}{1 - \text{Re } z_1} \right) = 36.78^\circ \quad (5.23)$$

Se obtiene el cero y el polo:

$$z_0 = 1 - |z_1 - 1| \cdot \frac{\cos\left(\frac{\theta + \phi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta - \phi}{2}\right)} = 0.9299 \quad (5.24)$$

$$p_0 = 1 - |z_1 - 1| \cdot \frac{\cos\left(\frac{\theta - \phi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta + \phi}{2}\right)} = 0.8430 \quad (5.25)$$

Se calcula la ganancia:

$$k_c = \frac{1}{\left| \frac{(z - z_0)}{(z - p_0)} \hat{G} \right|_{z=z_1}} = \frac{1}{0.1711} = 5.8 \quad (5.26)$$

Definiendo el compensador de adelanto como:

$$\boxed{K_{lead} = 5.8 \cdot \frac{z - 0.9299}{z - 0.8430}} \quad (5.27)$$

De manera que aplicando el compensador de adelanto al sistema se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 5.8. Como se observa se redujo el error de estado estacionario al 3%, y el tiempo de estabilización se establece en 570 s (9.5 minutos) valor que cumple con la especificación de ser menor o igual a 10 minutos además no presenta sobreimpulso. Luego de ser aplicada la perturbación el sistema aumenta su error a un valor de 9%.

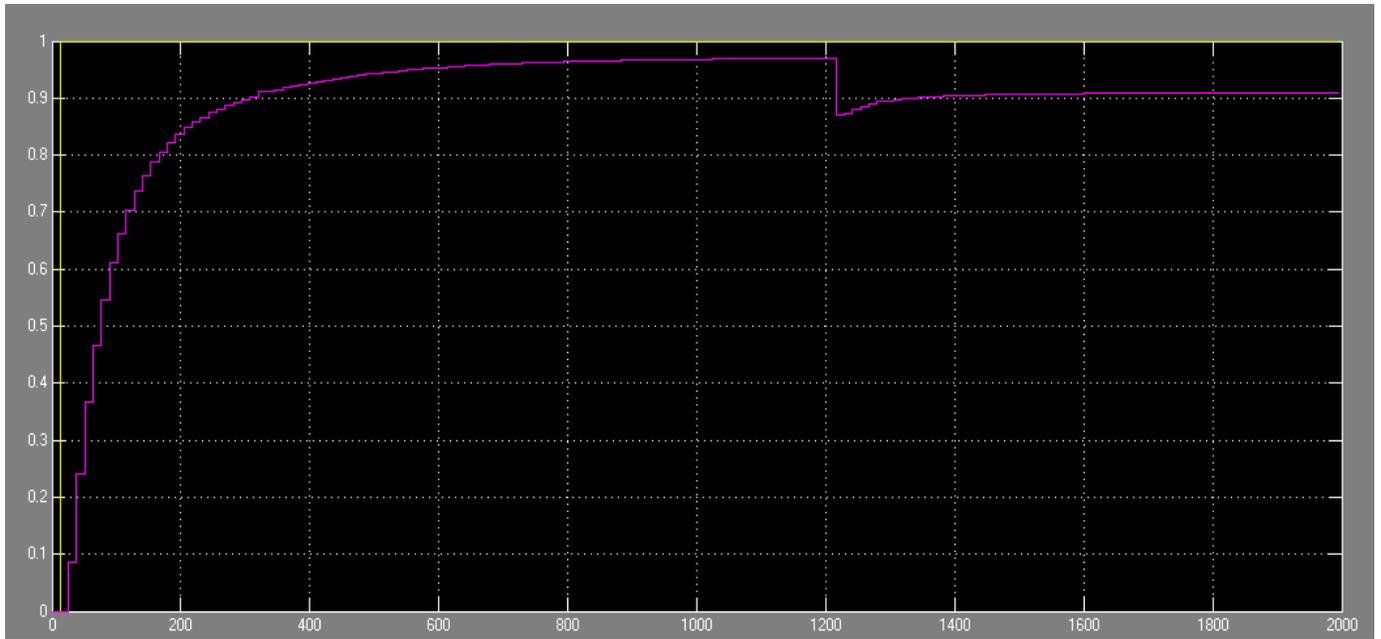


Figura 5.8 Respuesta al escalón del modelo teórico discretizado con compensador de adelanto

Como se comentó anteriormente, el error de estado estacionario no está dentro de lo solicitado, menor al 2%. Por lo que se procede a obtener un compensador de atraso para efectuar dicha corrección del error.

Al presentar una realimentación no unitaria se reordena el sistema como sigue:

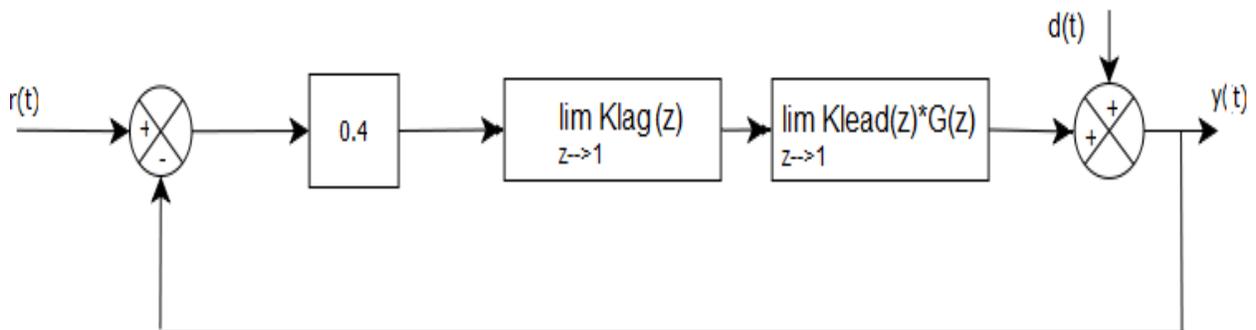


Figura 5.9 Diagrama de bloques para análisis del error de estado estacionario

Calculamos primero la \widehat{K}_p

$$\widehat{K}_p = \frac{1 - \widehat{e}_{ss}}{\widehat{e}_{ss}} = \frac{1 - 0.01}{0.01} = 99 \quad (5.28)$$

Luego obtenemos el error actual del sistema con el compensador de adelanto como:

$$K_p = \lim_{z \rightarrow 1} K_{lead}(z) * G(z) * 0.4 = 0.635 \quad (5.29)$$

Se define arbitrariamente el valor de Z1 tratando que no afecte la respuesta en estado dinámico que ya tenía el sistema, se trata de ubicar el cero a la derecha del polo dominante que se tenga (en nuestro caso 0.9523), por medio de simulaciones se llego a determinar que un valor adecuado de Z1 es de 0.9997 y se calcula P1 como sigue:

$$P1 = \frac{Z1 - 1}{(\widehat{K}_p / K_p)} + 1 = \frac{0.9997 - 1}{(99 / 0.635)} + 1 = 0.99999 \quad (5.30)$$

Con lo cual se obtiene un compensador de atraso igual a:

$$K_{lag} = \frac{z - 0.9997}{z - 1} \quad (5.31)$$

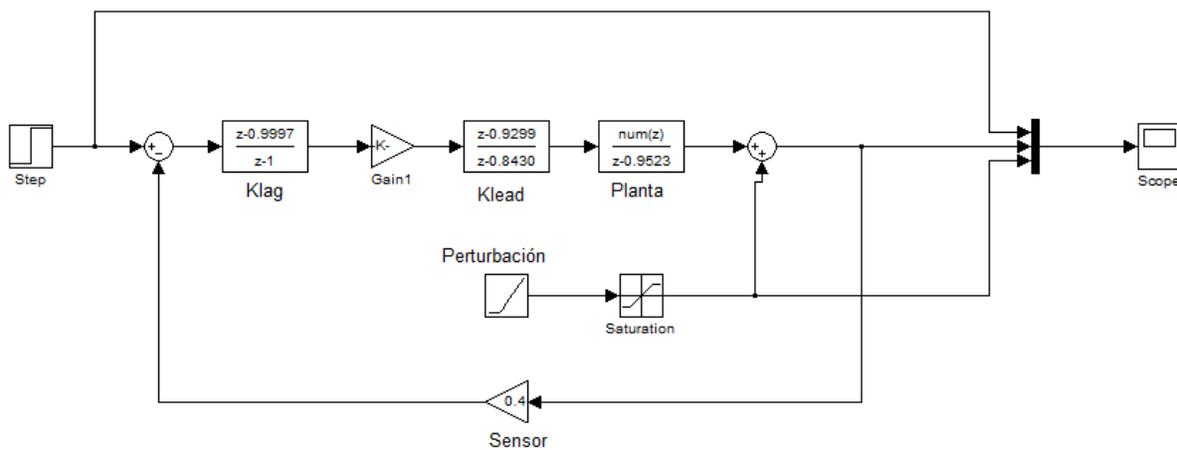


Figura 5.10 Diagrama final para la simulación del sistema

Si aplicamos el compensador de atraso al sistema como se muestra en la Figura 5.10 obtenemos la siguiente respuesta.

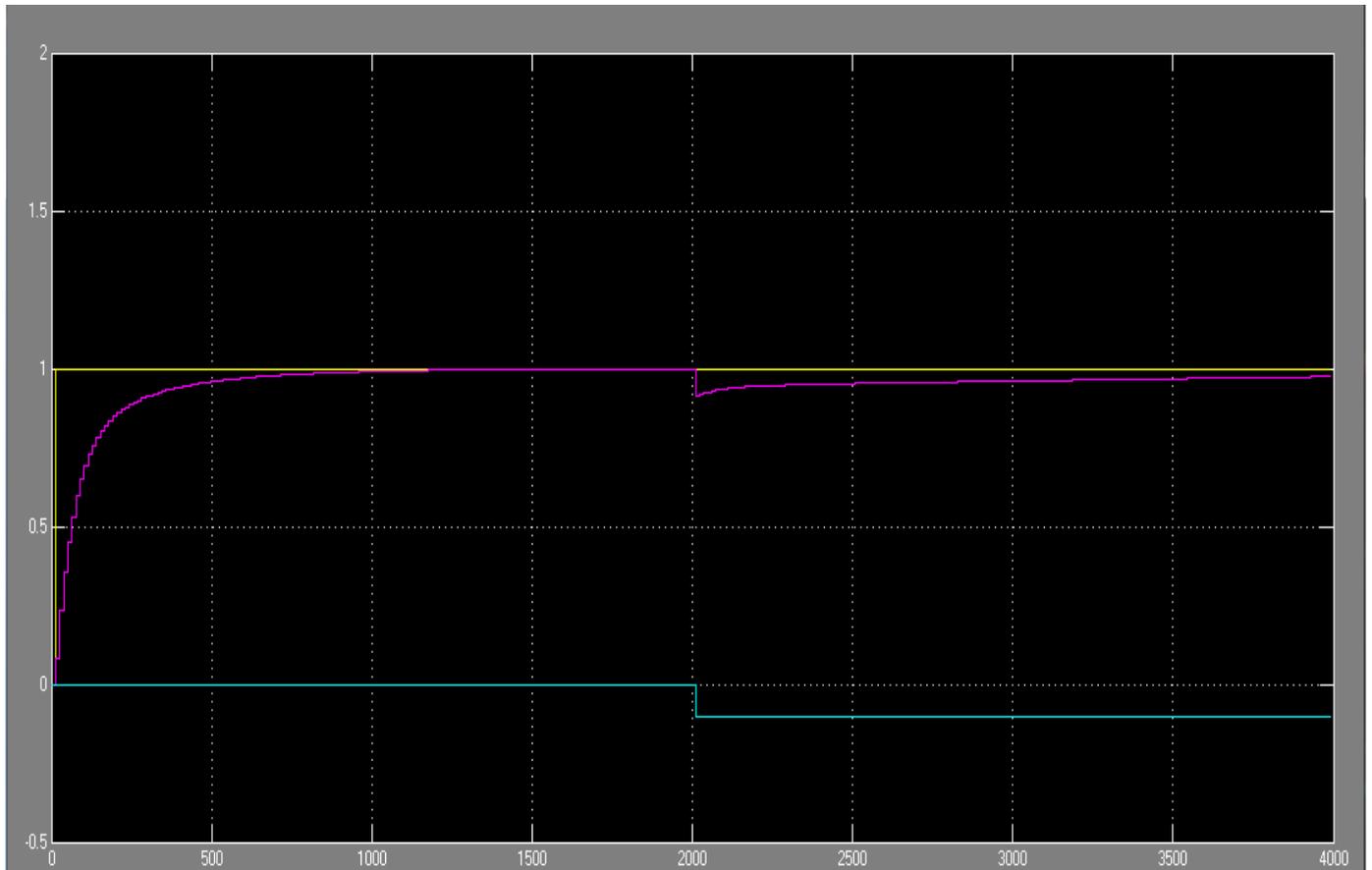


Figura 5.11 Respuesta al escalón del modelo teórico con compensador completo

De la cual se observa que se logra compensar ante una perturbación manteniendo el error en menos de 2% sin sobreimpulso y con un tiempo de estabilización cercano a los 10 minutos.

5.1.2.2 Diseño experimental del control de temperatura

Como se ha mencionado estamos en presencia de un sistema térmico, según la teoría puede representarse por una ecuación de primer orden con tiempo muerto, de la siguiente manera: [20]

$$G(s) = \frac{k \cdot e^{-st_d}}{s + a} \quad (5.32)$$

Además si nos referimos al modelado teórico calculado en la sección anterior se observa que el sistema se representa con una función de primer orden, por lo que podemos estar seguros de que el siguiente proceso de cálculo experimental es adecuado a la estructura del sistema.

Una manera de estimar los valores de los coeficientes de esta ecuación empíricamente es por medio de la curva de reacción de procesos, para lo cual se aplica una señal escalón a la entrada del sistema, este se encuentra en lazo abierto y se busca minimizar lo más que se pueda la presencia de perturbaciones.

Para nuestro caso dicha señal utilizada (Potencia del quemador) tiene un valor de 300 000 BTU/Hora o lo que es lo mismo 87.92 KW. Se obtiene la respuesta en la salida del sistema la cual se presenta a continuación.

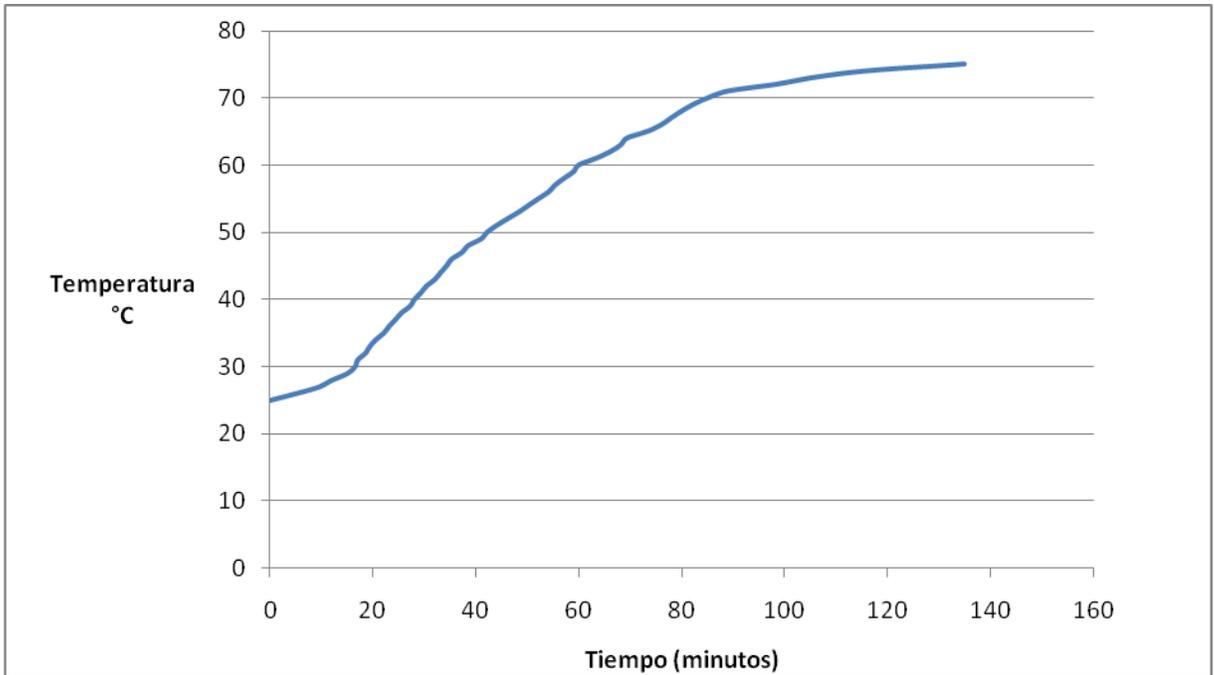


Figura 5.12 Respuesta experimental de la planta a modelar

Utilizando la gráfica anterior se calculan las constantes para la obtención de la ecuación del sistema.

Primero se calcula a , la cual se define como el recíproco de la constante de tiempo dominante del sistema $\frac{1}{\tau}$. Por lo que definimos τ como:

$$\tau = 2 * (t_{63.2\%} - t_{39.3\%}) \quad (5.33)$$

Dichos tiempos corresponden al punto donde la señal alcanza el 63.2% y el 39.3% de su valor en el rango entre el valor inicial y final de la respuesta. Teniendo como resultado que $\tau = 2 * (3300 - 2030) = 2540s$.

$$a = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{2540} = 0.39 \times 10^{-3} \quad (5.34)$$

Continuamos con el cálculo de la constante de ganancia estática, que se define a continuación

$$k = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) - T_i}{A} * a \quad (5.35)$$

$$k = \frac{75 - 25}{87.92} * 0.39 \times 10^{-3}$$

$$k = 0.22 \times 10^{-3}$$

De manera que podemos definir el modelo del sistema en tiempo continuo de la siguiente manera utilizando la ecuación (5.32) antes mencionada en el inicio de este apartado como:

$$G(s) = \frac{3.3 \times 10^{-7} * e^{-300s}}{s + 0.39 \times 10^{-3}} \quad (5.36)$$

Se puede aplicar un escalón de la misma magnitud al modelo de la planta anterior para corroborar su similitud con la respuesta experimental de la planta mostrada en la Figura 5.12. No se toma en cuenta el retardo en la simulación, pero se observa que el valor final es de 75°C y su tiempo de estabilización es de 10 000 segundos (166 minutos).

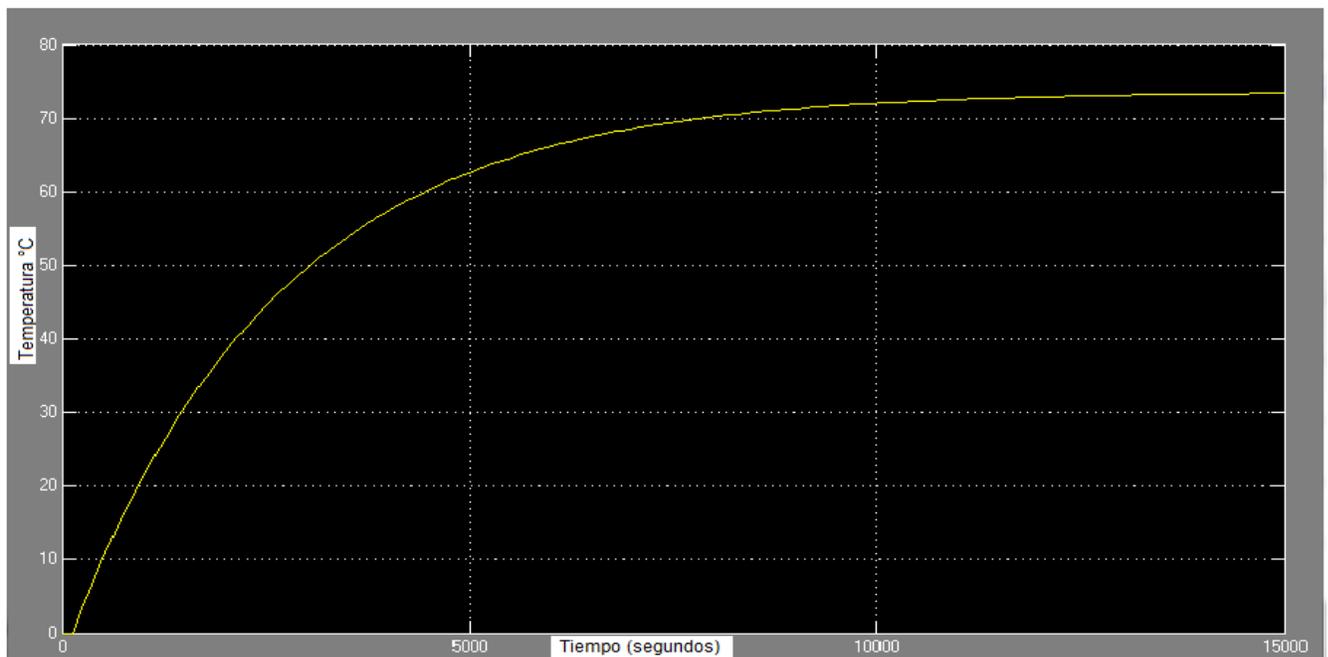


Figura 5.13 Respuesta del modelo experimental para el control de temperatura

Es posible definir modelo discreto por un tipo de aproximación por mapeo de polos.

$$G(z) = \frac{Kd * z^{-\text{ceiling}\left(\frac{td}{T}\right)}}{z - e^{-Ta}} \quad (5.37)$$

Antes de discretizar el modelo, se debe de establecer un período de muestreo T adecuado. Este puede ser encontrado de manera aproximada usando una constante de tiempo τ , la cual se puede definir como el tiempo dominante esperado del sistema, en el caso de estudio dicho tiempo es de de 120 segundos, definido por el comportamiento experimental de la planta.

$$\begin{aligned} T &\leq \frac{\tau}{10} = \frac{120}{10} \\ T &= 10s \end{aligned} \quad (5.38)$$

Una vez encontrada esta constante de tiempo, se puede determinar la ganancia estática de la función de transferencia en tiempo discreto, con la siguiente ecuación,

$$\begin{aligned} K_d &= \frac{\lim_{s \rightarrow 0} G(s)}{\lim_{z \rightarrow 1} G(z)} = \frac{k/a}{1/(1 - e^{-T*a})} \\ K_d &= 2.2 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (5.39)$$

Por último el modelo discretizado de la planta es

$$\boxed{G(z) = \frac{2.2 \times 10^{-3} * z^{-30}}{z - 0.996}} \quad (5.40)$$

A continuación se procede al desarrollo del cálculo del compensador, como se indicó anteriormente el proceso a controlar busca lograr un comportamiento que logre eliminar el error de estado estacionario y además que permita al sistema poder actuar ante cualquier perturbación presente.

Se utilizó para tal efecto un compensador con una ganancia unitaria y que tiene la siguiente estructura:

$$K_{PI}(s) = k * \frac{(s + b)}{s} \quad (5.41)$$

Lo único que se debe calcular es la constante b , se encuentra aproximadamente entre el 95% y el 130% del recíproco de a del modelo continuo. Para el límite inferior de b se tiene un sistema que no será más rápido que el sistema original. Por otro lado, para el límite superior se produce un cambio más rápido, pero con la desventaja de tener un pequeño sobreimpulso en la salida y exigir más al regulador y actuador.

$$b = [0.95 * a, 1.30 * a] \quad (5.42)$$

Utilizamos el límite superior buscando mejorar la rapidez de actuación del control, se obtiene:

$$K_{PI}(s) = k * \frac{(s + 0.5 \times 10^{-3})}{s} \quad (5.43)$$

De similar forma se puede definir el compensador del sistema en tiempo discreto utilizando la siguiente ecuación:

$$K_{PI}(z) = \hat{k} \frac{(z - z_0)}{(z - 1)} \quad (5.44)$$

En este caso la variable a calcular es Z_0 , esta se obtiene usando el la constante b y el tiempo de muestreo T que se usaron en el tiempo continuo como se define a continuación.

$$\begin{aligned} Z_0 &= e^{-T*b} \\ Z_0 &= 0.9949 \end{aligned} \quad (5.45)$$

Con lo cual se obtiene el compensador en tiempo discreto como:

$$K_{PI}(z) = 1.0325 \frac{(z - 0.9949)}{(z - 1)} \quad (5.46)$$

5.1.2.3 Diseño teórico del control de nivel

Para este proceso es importante tomar en cuenta la estructura de la planta, por lo que en este desarrollo se utilizó el diagrama mostrado en la siguiente figura:

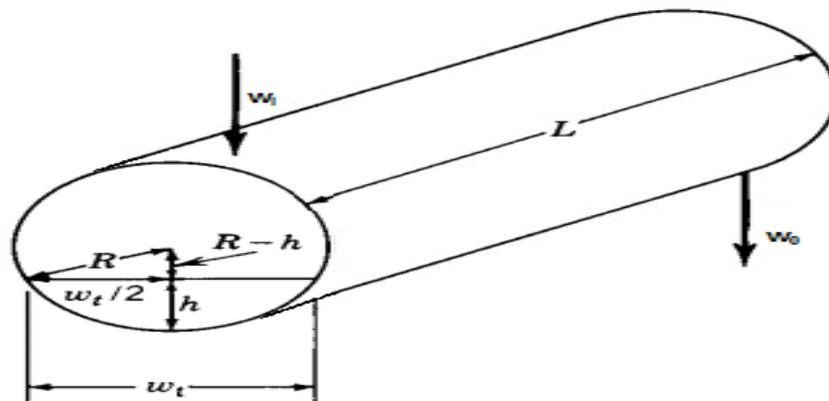


Figura 5.14 Diagrama representativo de la planta para el control de nivel de agua

Aquí se definen dos ecuaciones principales, una es la ecuación que describe el flujo de un líquido a través de la una válvula de salida y la otra es el balance de masa dinámico en el recipiente. [17]

➤ Flujo de un líquido a través de una válvula de salida

$$w(t) = C_v \sqrt{\Delta P(t)} [m^3/s] \quad (5.47)$$

$$\Delta P(t) = P_1 + (\rho g h(t)) - P_2 \quad (5.48)$$

- w → Flujo de agua a través de la válvula
- C_v → Coeficiente de la válvula
- $\Delta P(t)$ → Caída de presión a través de la válvula
- ρ → Densidad del líquido
- g → Aceleración de la gravedad
- h → Nivel del recipiente

Si revisamos la ecuación anterior, se observa la presencia de la variable dependiente $h(t)$ dentro de una raíz, lo cual implica una no linealidad, por lo que se procede a su linearización mediante el uso de variables de desviación [17]. (Ver Apéndice A1)

Si definimos que $f(v_p, h)$ como la parte derecha de la ecuación (5.47).

$$w_0(t) = \bar{w}_0 + \left. \frac{\partial f}{\partial h} \right|_{ss} (h(t) - \bar{h}) \quad (5.49)$$

$$w_0(t) = \bar{w}_0 + \frac{C_v \rho g}{2} \left[P_1 + (\rho g \bar{h}) - P_2 \right]^{-\frac{1}{2}} (h(t) - \bar{h}) \quad (5.50)$$

Y definimos el término C1 para simplificar la ecuación

$$C1 = \frac{C_v \rho g}{2} \left[P_1 + (\rho g \bar{h}) - P_2 \right]^{-1/2} \quad (5.51)$$

$$w_0(t) = \bar{w}_0 + C1(h(t) - \bar{h}) \quad (5.52)$$

➤ Balance de masa de estado dinámico [21]

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho w_i - \rho w_0 \quad (5.53)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho \frac{\partial V}{\partial t} \quad (5.54)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \rho w_i - \rho w_0 \quad (5.55)$$

(Con ρ constante)

Si nos referimos a Figura 5.14 que representa una estructura similar a la planta, podemos notar que por la configuración horizontal del tanque, la superficie del líquido en el tanque varía de igual forma que la altura del mismo, por lo que se tendría dos variables multiplicándose, ante esto se busca la manera de linealizar este sistema:

$$w_i - w_0 = W_T L \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.56)$$

Donde $W_T L$ es el área cambiante del líquido

De la figura podemos definir que uno de los lados del triángulo que se forma es:

$$\frac{W_T}{2} = \sqrt{R^2 - (R-h)^2} \quad (5.57)$$

$$W_T = 2\sqrt{(D-h)h} \quad (5.58)$$

Donde R = radio del círculo y D = diámetro del círculo

A partir de la ecuación (5.56) definimos que:

$$\frac{\partial h(t)}{\partial t} = \frac{w_i(t) - w_0(t)}{2L\sqrt{(D-h(t))h(t)}} \quad (5.59)$$

El cual representa una ecuación no lineal ante lo cual utilizamos el uso de variables de desviación para su linearización. Se define a la parte derecha de la ecuación (5.59) como $f(w_i, w_0, h)$. (Ver Apéndice A1)

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial t} = \left. \frac{\partial f}{\partial w_i} \right|_{SS} (w_i - \bar{w}_i) + \left. \frac{\partial f}{\partial w_0} \right|_{SS} (w_0 - \bar{w}_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial h} \right|_{SS} (h - \bar{h}) \quad (5.59)$$

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial t} = \frac{1}{2L\sqrt{(D-\bar{h})\bar{h}}} (w_i - \bar{w}_i) + \frac{-1}{2L\sqrt{(D-\bar{h})\bar{h}}} (w_0 - \bar{w}_0) + (\bar{w}_i - \bar{w}_0) \frac{\partial}{\partial h} \left[\frac{1}{2L\sqrt{(D-\bar{h})\bar{h}}} \right] \quad (5.60)$$

Donde el factor $(\bar{w}_i - \bar{w}_0) \frac{\partial}{\partial h} \left[\frac{1}{2L\sqrt{(D-\bar{h})\bar{h}}} \right]$ se hace cero debido a que en estado

estacionario se tiene que $\bar{w}_i = \bar{w}_0$

Por lo tanto la ecuación ya linealizada y usando las variables de desviación queda:

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial t} = \frac{1}{2L\sqrt{(D-\bar{h})\bar{h}}} (\hat{w}_i - \hat{w}_0) \quad (5.61)$$

Ahora sustituimos la ecuación (5.52) en la ecuación anterior

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial t} = \frac{1}{2L\sqrt{(D-\bar{h})\bar{h}}} [\hat{w}_i - C1(\hat{h}(t))] \quad (5.62)$$

Obtenemos a si la ecuación del modelo matemático sustituyendo los valores en (5.62).

$$D = 0.76 \text{ m}$$

$$\bar{h} = 0.35 \text{ m}$$

$$L = 1.22 \text{ m}$$

$$Cv = v * A$$

$$Cv = \sqrt{2 * g * h \max} * \pi * r^2 \quad (5.63)$$

$$Cv = \sqrt{2 * 9.8 * 0.35} * \pi * 0.03^2$$

$$Cv = 0.0074$$

$$C1 = \frac{Cv \rho g}{2} \left[P_1 + (\rho g \bar{h}) - P \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5.64)$$

(En nuestro sistema por su configuración se considera que tanto P_1 como P_2 están definidas como la presión atmosférica, por tanto se cancelan).

$$C2 = \frac{0.0074 * 1000 * 9.8}{2} * \frac{1}{\sqrt{1000 * 9.8 * 0.35}} \quad (5.65)$$

$$C2 = 0.619$$

$$0.924 * \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} = \hat{w}_i - 0.619(\hat{h}(t)) \quad (5.66)$$

Realizando la transformación en el plano S por medio de la transformada de Laplace se obtiene el siguiente modelo del sistema:

$$\boxed{\begin{aligned} G(S) &= \frac{H(S)}{W_i(S)} \\ G(S) &= \frac{1.08}{s + 0.67} \end{aligned}} \quad (5.67)$$

Una vez obtenida el modelo de la planta se utilizó dentro de un sistema realimentado pero sin la presencia de un compensador para conocer su comportamiento.

Por lo tanto podemos representar nuestro sistema como:



Figura 5.15 Diagrama del modelo teórico con realimentación unitaria (control de nivel)

Al aplicar una señal escalón al sistema se obtiene la grafica de la Figura 5.16, la cual presenta un tiempo de estabilización de 2.24 segundos y presenta un valor final de 0.617 lo que sería un error de estado estacionario de más de 38.3% (calculado con la ecuación (3.9) del marco teórico).

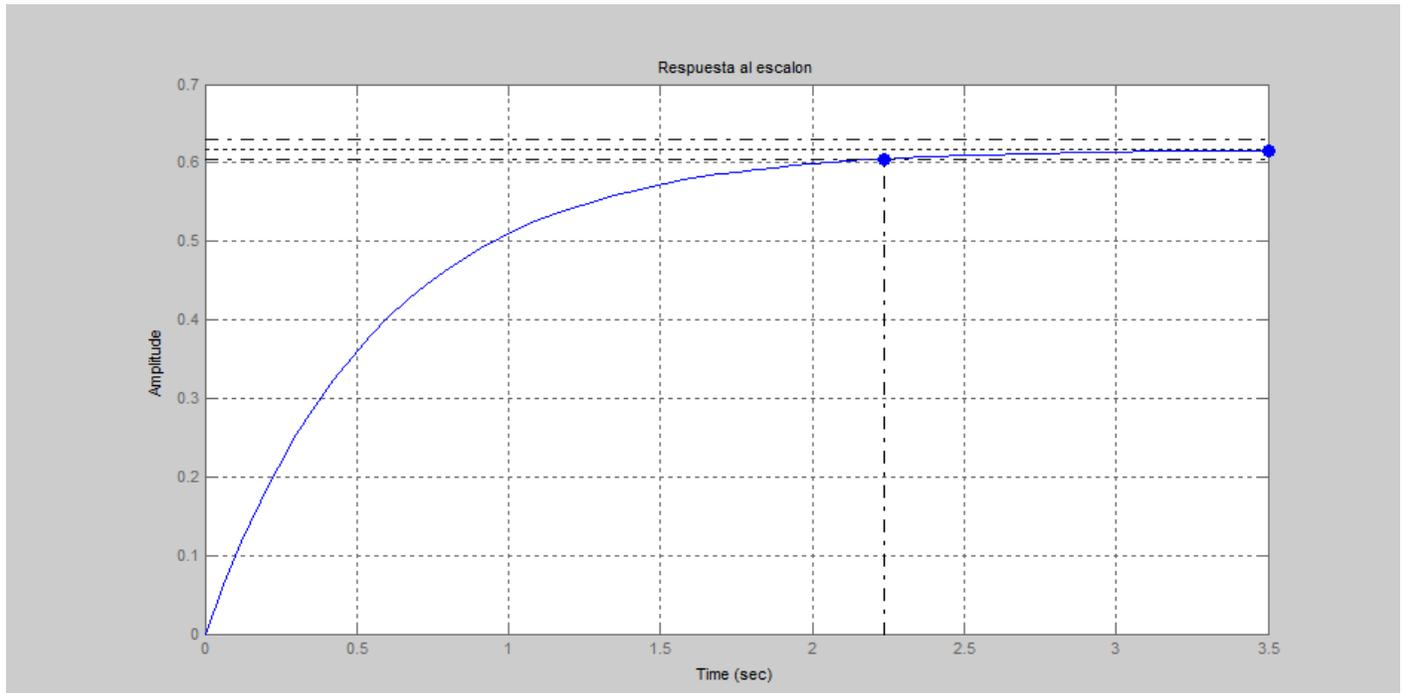


Figura 5.16 Respuesta al escalón del modelo teórico con realimentación unitaria (control de nivel)

Como se nota de la gráfica anterior el sistema no presenta sobreimpulso y su tiempo de estabilización es sumamente corto, por tanto la especificación que se busca corregir es el error de estado estacionario.

Si se busca llegar a un error del 0% podemos proceder a ubicar un compensador de atraso con un cero en el origen de la siguiente manera:

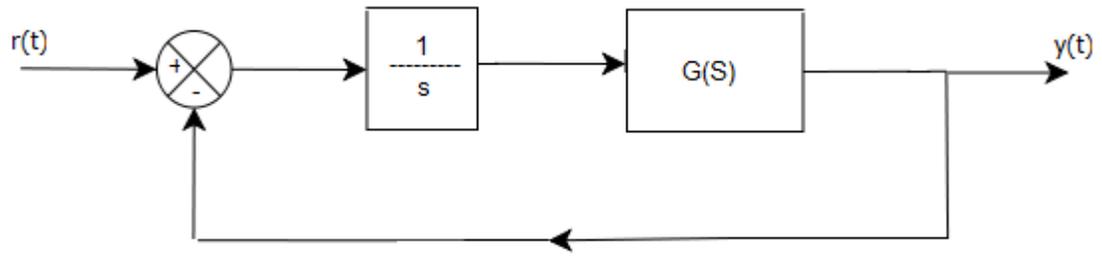


Figura 5.17 Diagrama del modelo teórico con compensador de atraso (control de nivel)

De la cual se obtiene la grafica de la Figura 5.18, de donde se observa que a pesar de que se logró hacer cero el error, se modificaron las condiciones de sobreimpulso y tiempo de estabilización.

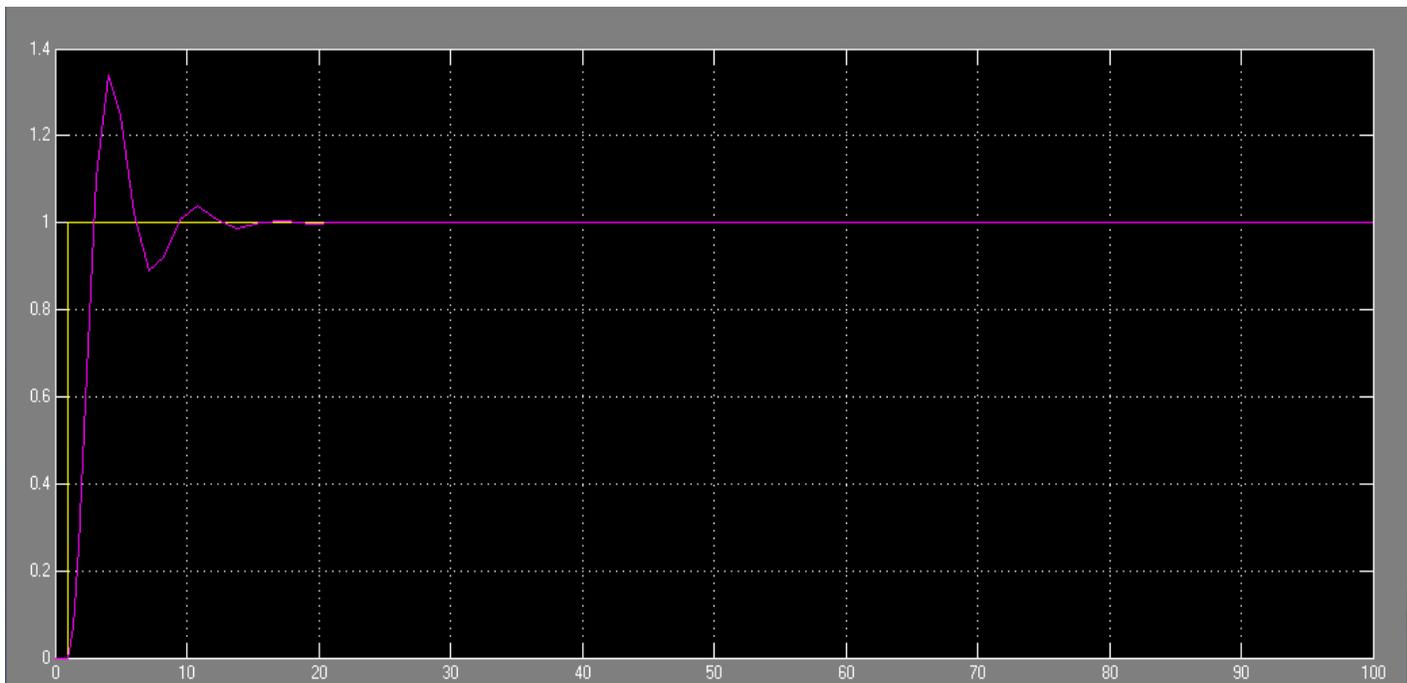


Figura 5.18 Respuesta al escalón del modelo teórico con compensador de atraso (control de nivel)

Al aplicarle un compensador de atraso, se llegó a la conclusión de que ejercía un efecto oscilante en el control, por lo que se procede a colocar una ganancia estática K en el camino de regulación con un valor de 0.003, con el cual nos aseguramos de eliminar el sobreimpulso aunque el sistema se haga un poco más lento pero evitando las oscilaciones.

A continuación se muestra el diagrama del sistema junto con su respuesta al escalón:

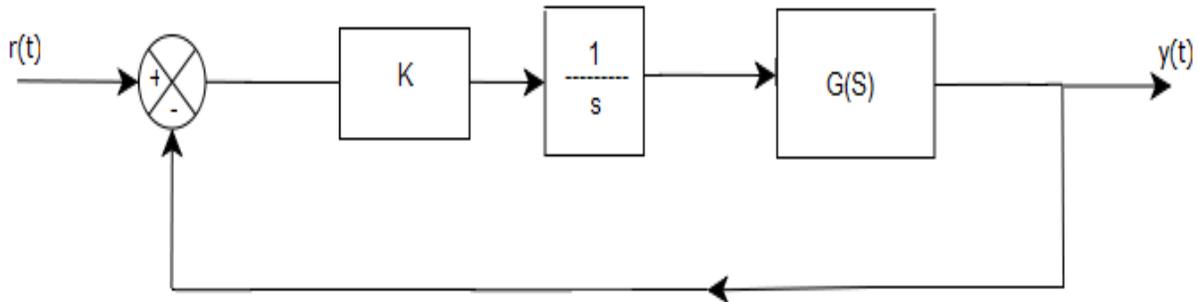


Figura 5.19 Diagrama del sistema con compensador de atraso y ganancia proporcional

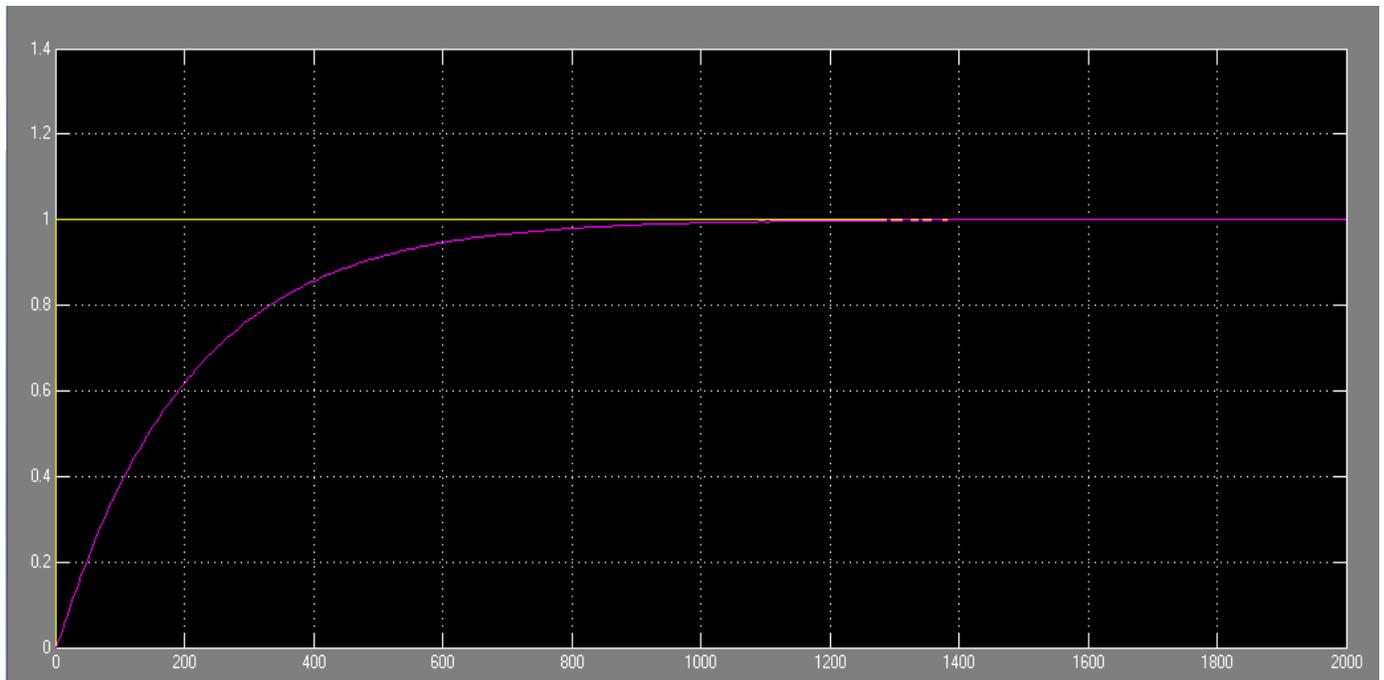


Figura 5.20 Respuesta al escalón del sistema con compensador de atraso y ganancia proporcional

A diferencia de los otros métodos aquí se calculó el compensador en tiempo continuo y como paso final se convirtió a tiempo discreto, con un tiempo de muestreo característico de la última gráfica. Se define por lo tanto el compensador discreto:

$$G(z) = \frac{0.004208 * z + 0.004208}{z + 0.7403} \quad (5.68)$$

5.3 Descripción de hardware

5.3.1 Panel de control

Como se menciona anteriormente, se utilizó un panel de control donde se ubicaron la mayoría de los elementos de hardware del proyecto, esto no solo desde un punto de vista de estética si no que por las condiciones de trabajo lo ideal era proteger en lo más que se pudiera los elementos electrónicos del agua y suciedad que estarán presentes, se muestra una foto del panel ya terminado.

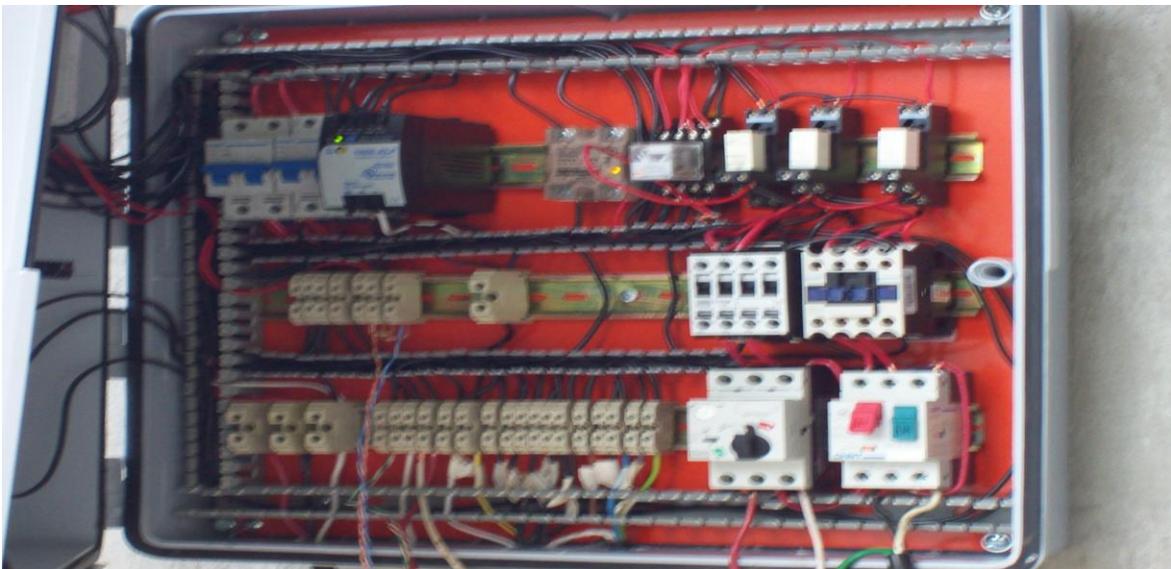


Figura 5.21 Interior del panel de control finalizado

Anteriormente se presento en las Figuras 5.1 y 5.2 el diagrama eléctrico del sistema, del diagrama observamos que se colocan dos disyuntores como protección del sistema, uno para la línea principal de alimentación y otro para la etapa de control que se maneja a 24 V. Se decidió por facilidad al operador de las máquinas configurar dos botoneras colgantes, una para cada máquina, por medio del selector automático se activa un relé de cuatro polos, el cual es el encargado de permitir o no el paso de las salidas provenientes del PLC.

En el caso de los motores cada uno cuenta con su respectiva protección formada por un contactor y guardamontor. Los contactores poseen un contacto auxiliar el cual permite el enclavamiento del encendido del motor con un solo pulso de su respectivo botón de arranque.

El panel cuenta además con un paro de emergencia que desactiva la alimentación de las máquinas, y las respectivas luces indicadoras del proceso, que informan sobre el estado de funcionamiento de ambas máquinas, otro indicador se usa para el modo manual o automático y la luz si se activó el paro de emergencia.

5.3.2 Sensores

El sistema va utilizar dos tipos de sensores, uno para medir temperatura del agua utilizada en el control de temperatura y otro para medir la presión con el fin de realizar el control de nivel de agua.

➤ Sensor de temperatura

Se decidió utilizar un transductor tipo RTD de platino (Pt100), si nos referimos a la sección 3.2.5 en el punto que se refiere a los datos teóricos de los sensores de temperatura, este tipo de dispositivo además de cumplir con el rango de temperatura deseado posee dos elementos de suma importancia, primer elemento es que presenta una respuesta lineal a diferencia del termopar, lo cual podría presentar mayor trabajo

en el desarrollo del control, segundo aspecto es que presenta mayor inmunidad al ruido. Por otro lado a pesar de que tener un precio un poco mayor brinda un diseño que facilita el montaje en la máquina.

Se presenta una tabla comparativa de ambos dispositivos que refleja los aspectos antes mencionados:

Tabla 5.2 Comparación entre sensores RTD y Termocupla

	RTD	TERMOCUPLA
VENTAJA	Más estable Más preciso Más lineal	Mas económico Amplia gama de temperaturas Robustos Respuesta más rápida
DESVENTAJA	Caro Necesita alimentación Más lento	No es lineal Ocupa nivel de referencia Menos estable Menos sensible Propenso a ser afectados por ruido de corrientes alternas

Es importante notar que era necesario realizar un acople entre el sensor y la entrada del PLC, ya que el sensor tiene una señal de salida en miliamperios mientras que la entrada analógica del PLC está en Voltios. En la siguiente gráfica se muestra dicha conexión, en la cual al utilizar una resistencia de 500Ω se logra pasar de $4\text{ mA} - 20\text{ mA}$ a una señal de $2\text{ V} - 10\text{V}$ por ley de Ohm que si cumple con los parámetros de la señal analógica del PLC.

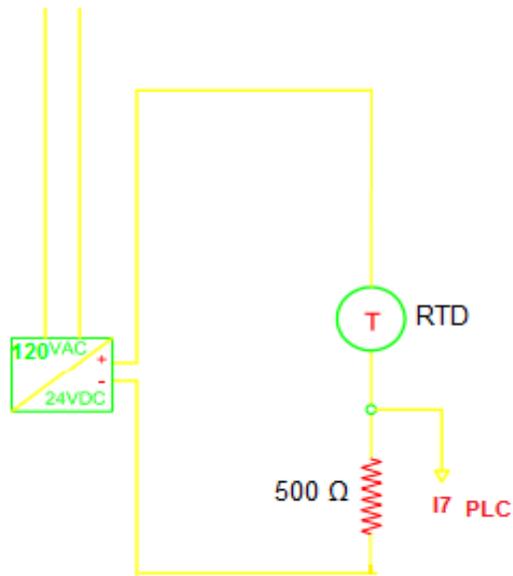


Figura 5.22 Conexión del sensor de temperatura con el PLC

➤ **Sensor de presión**

En cuanto al dispositivo para elaborar en control de nivel, se escogió el sensor de presión sobre los otros dispositivos que permiten ejecutar mediciones del nivel de un líquido.

Dicha elección tiene dos elementos por los cuales se encontró que era más apto para este sistema, y que a su vez descartan el uso de los otros dispositivos analizados:

- Por la estructura física de la máquina era sumamente complicado utilizar un sensor de nivel tipo flotador, ya que estas estructuras son grandes y esto implicaba un mayor costo en la modificación de la estructura para lograr su respectivo acople, por lo tanto se descartó esta opción.

- El proceso tiene dos aspectos que perjudican el uso de un sensor ultrasónico, estos son la presencia de mucho vapor por el agua hirviendo y el movimiento del agua lo que generaría un tipo de oleaje sobre la superficie del agua lo que provoca errores en las mediciones de este tipo de sensor, ante lo cual se desiste de utilizarlo.

El sensor utilizado de presión es el PX-309 de marca OMEGA, dicho sensor se definió con un rango de 0 a 1 psi, con alimentación a 24 V y con una respuesta lineal de 4 a 20 mA el cual se muestra en la siguiente figura.



Figura 5.23 Sensor de presión usado en el control de nivel de agua [7]

Al igual que en el caso del sensor de temperatura se debía de realizar por ley de ohm el paso de la señal entregada en miliamperios por el sensor a Voltios en la entrada del PLC, en la siguiente figura se presenta dicha conexión utilizada.

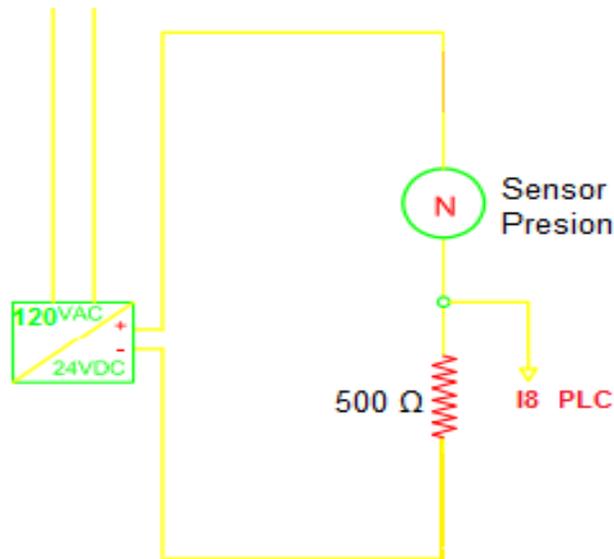


Figura 5.24 Conexión del sensor de presión con el PLC

5.3.3 Motores y reductores de velocidad

Como se mencionó en el desarrollo de la solución la empresa ya contaba con un motor de 2 HP monofásico de 1725 rpm, para reducir los costos se decidió utilizarlo para el uso de la peladora aunque fuese posible utilizar un motor de menor potencia de al menos 1 HP. La velocidad de giro en esta máquina se estableció en 100 rpm, por lo tanto se recurrió al uso de reductores mecánicos y de sistemas de poleas. En este caso se uso un reductor de 25 a 1, de donde se obtiene una velocidad de 69 rpm, al ser menor de las 100 rpm se procede a elevar dicha velocidad por un sistema de poleas (como se muestra en la Figura 3.6), para lo cual se utilizó una polea de 4 pulgadas y otra de 2.5 pulgadas, con lo que obtenemos una velocidad alrededor de los 110 rpm.

Para el caso de la escaldadora se tenía que comprar el motor, para el cual se calculó una aproximación de la potencia requerida para el proceso, basándonos en la información presentada en la sección 3.2.4 del marco teórico de la siguiente manera:

$$P = \frac{Q * v}{102 * \eta} \quad [W] \quad (5.69)$$

$$P = \frac{104.48Kg * 0.2076m/s}{102 * 0.85}$$

$$P = 0.2502[kW]$$

Esto para una eficiencia del motor de 85% y una cantidad de 10 pollos grandes (20 Kg), con lo cual se decidió adquirir un motor del doble de la potencia por seguridad, el motor adquirido fue de 0.75 HP (0.55 kW) monofásico de 1740 rpm.

Al motor primero se le redujo la velocidad usando una configuración de poleas (como la Figura 3.5) con tamaños de 2.5 pulgadas y 6 pulgadas, dicha reducción obtenemos 725 rpm, la cual por medio de un reductor de 67.5 a 1 se reduce todavía más a un valor de 10.74 rpm para finalmente utilizando un engranaje de piñones se reduce como si fuesen poleas con un piñón de 19 dientes y otro de 41 dientes obteniendo la velocidad deseada de 5 rpm.

Ambos motores son totalmente cerrados con protección IP65 por el ambiente y tipo de condiciones de trabajo en que se utilizaran.

5.3.4 Sistema de calentamiento

Para el calentamiento del agua de la máquina escaldadora se configuró un horno que permitiera disminuir la cantidad de energía perdida hacia el ambiente, dicha configuración requiere el uso de un tipo de quemador de gas especial, ya que el oxígeno necesario para realizar la combustión no es posible obtenerlo del ambiente al estar completamente cerrado.

Se decidió utilizar el quemador HSG-400 marca WAYNE, el cual presenta no solo un motor para la absorción del aire necesario para la combustión sino que además no ocupa una llama piloto ya que por sí solo por medio de un pulso de alto voltaje (7300 V) realiza un encendido automático.

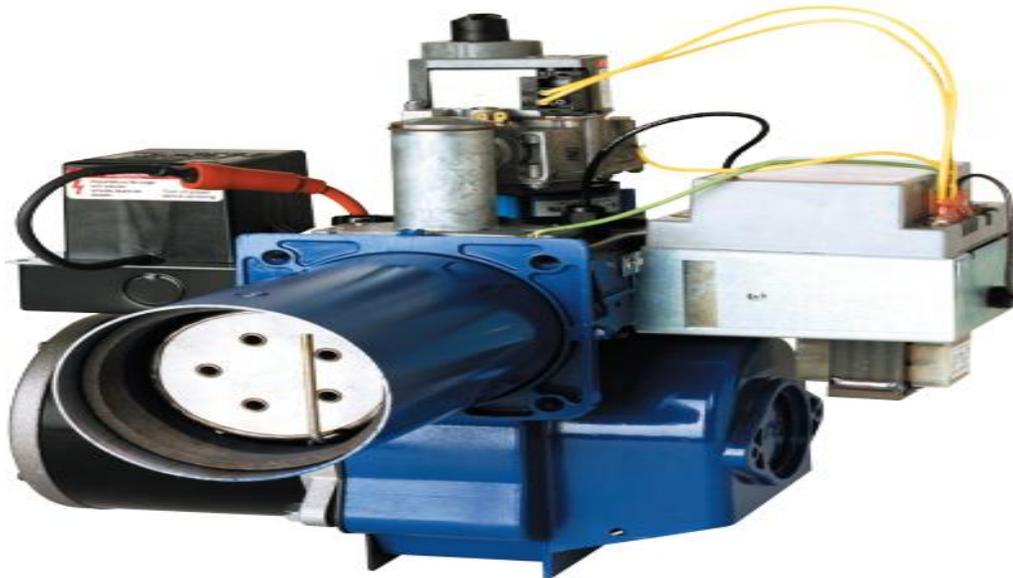


Figura 5.25 Quemador HSG-400 utilizado en la escaldadora

Dicho quemador presenta características importantes en cuanto a la seguridad en su funcionamiento, realiza una pre-purga esto es una limpieza del aire dentro del horno para evitar una explosión en caso de que se haya escapado el gas hacia el

horno en algún momento y se encuentre acumulado en gran cantidad, otro aspecto es que en el momento en que se acabe el gas inmediatamente apaga el quemador.

5.4 Descripción de software

Este proyecto se desarrolló utilizando como elemento base del sistema de control un PLC (Pico GFX-70) de la marca Allen Bradley. Tanto para su selección como para su implementación era necesario tener muy claro las características y funciones que debía de cumplir dentro del sistema a desarrollar.



Figura 5.26 PLC Pico-GFX 70 utilizado en el proyecto

Es de suma importancia comprender bien su funcionamiento ya que desde el PLC se llevan a cabo todas las tareas definidas para el sistema en su funcionamiento automático. Desde realizar la lectura de los sensores hasta la configuración de los controles PID utilizados, por lo tanto a continuación se realiza una explicación de los aspectos propios de este PLC utilizados para la implementación del proyecto.

5.4.1 Descripción general de las características utilizadas

Se presentan en este apartado una lista de los principales puntos que se tomaron bajo consideración a la hora de la selección del PLC:

➤ Costo económico

Se buscó dentro de una gran gama de opciones un dispositivo que tuviera un precio acorde con el presupuesto de la empresa, elemento que condujo a enfocar la selección del PLC en lo que se conocen comúnmente como Relé Inteligente. Que posee muchas de las funciones de un PLC común pero a menor escala lo que lo hace tener un precio más cómodo.

➤ Disponibilidad de equipo y software

Se contactaron a varias empresas que distribuyen estos equipos de los cuales fue el representante de la marca Allen Bradley (Elvatron) el que ofreció el dispositivo con una entrega mucho más rápida que los otros. Además de que se facilitaría un software temporal lo que reduciría los costos.

➤ Modulo de control PID

Un elemento de suma importancia era que el PLC contara con módulos de controles PID, los cuales se usarían en la implementación de los controladores diseñados en la teoría.

➤ Entradas Analógicas

Otro aspecto de mucha importancia era la presencia de entradas analógicas en el dispositivo, ya que eran necesarias al menos dos que permitieran las lecturas de los sensores utilizados en la realimentación de los sistemas de control de temperatura y nivel.

➤ **Salidas analógicas o de PWM**

Este aspecto se analizó principalmente en la búsqueda de opciones para la implementación de los controles PID, ya que por lo investigado eran dos de las formas de manejar a los elementos actuadores que se utilizan en los controles automáticos.

5.4.2 Explicación del funcionamiento de los bloques de programación

A continuación se presenta una lista de los bloques funcionales que se utilizaron del PLC Pico-GFX en su programación, se exponen sus funciones principales y su tarea dentro del código elaborado para el proyecto

Bloque de comparación de valor analógico:

Su función consiste en recibir dos datos, ya sean entradas del PLC o constantes, a partir de las cuales se puede realizar las comparaciones $>$, $<$ o $=$.

En el programa se utilizan con el fin de poder definir cuando el nivel de llenado es acorde con lo definido para permitir el inicio del escaldado.

Bloque Aritmético:

Su función es básicamente realizar las operaciones matemáticas de suma, resta, división y multiplicación de variables.

En el programa se aplica en el uso de la señal del sensor de presión, para poder referenciar el valor de la tensión entre cierto rango utilizado luego para su despliegue en pantalla como porcentaje.

Bloque de escalamiento de valores:

Permite pasar de un dato con un rango de valores a otro rango de valores distintos, a partir de la señal de entrada y los límites superior e inferior del rango actual y el rango deseado.

Para el proyecto fue de utilidad para pasar de las señales de voltaje en las entradas analógica con su respectivo valor en temperatura y porcentaje del nivel de agua.

Bloque de relé temporizado:

Este bloque permite definir un tipo de temporizador, el cual dará una señal cuando alcance un valor determinado, puede realizar conteos ascendentes o descendentes.

Se utilizó en nuestro programa específicamente para definir los tiempos de encendido y paro automáticos de los motores de las máquinas.

Bloque de PID:

Este bloque permite la implementación de controladores PID, PI, PD. Para lo cual se deben de asignar valores a constantes utilizadas en cada elemento, la ganancia del elemento Proporcional, las constantes de los elementos Derivativo e Integral y además de un tiempo de muestreo del sistema. Puede implementar hasta tres bloques de control distintos al mismo tiempo.

Por el tipo de proyecto se constituyo en el bloque de mayor importancia, ya que luego de los análisis teóricos y diseño de compensadores se debían de implementar utilizando estos bloques.

Bloque de PWM:

Este bloque permite la implementar los controles PID del bloque anterior, ya que utiliza la salida de dicho bloque, y a partir de dicha magnitud define un porcentaje de funcionamiento de la señal de salida, la cual es la que se conecta al elemento actuador.

Para el proyecto dicho bloque se uso con el fin de obtener la señal de actuación sobre el quemador y la electroválvula de agua, para los controles de temperatura y nivel respectivamente.

En el apéndice A2 se muestra el código final desarrollado para la ejecución del proyecto.

Capítulo 6: Análisis de resultados

En este apartado se presentan una serie de datos, gráficas, tablas y fotos, que permiten exponer los resultados obtenidos a través del desarrollo de las etapas anteriores del proyecto.

6.1 Diseño de las máquinas, costo y capacidad

Como parte del desarrollo del proyecto se tuvo que partir desde el diseño de las máquinas, por lo cual, luego de que se recopiló información a partir de una amplia investigación con respecto al proceso productivo en mataderos de pollos, dicha información que se ha presentado en capítulos anteriores permitió la elaboración de los equipos que se muestran a continuación.



Figura 6.1 Implementación final de las máquinas escaldadora y peladora

Ambas máquinas se construyeron utilizando acero inoxidable, lo cual permite no solo cumplir con lo que estipula la ley en cuanto al manejo de productos alimenticios, si no que logra darle una estructura rígida y apta para el proceso. Por ejemplo la máquina escaldadora a pesar de que como máximo trabaja a una temperatura de 60°C se llevo casi a los 80°C en pruebas y se comprobó que el material no presenta ningún daño. Además se probó la capacidad de las máquinas, en la escaldadora se logró procesar al mismo tiempo 8 pollos mientras que en la peladora se colocaron 4 pollos por tanda, cumpliendo con el parámetro establecido.

Como factor innovador en este diseño se encuentran la parte del calentamiento del agua en la escaldadora, ya que esta se encuentra montada sobre un tipo de horno, el cual se diseñó utilizando ladrillo y pegamento refractario, lo que permitió que el sistema no solo presentara una considerable menor cantidad de energía desperdiciada en comparación con otros equipos usados en este tipo de proceso donde los quemadores se encuentran al aire libre, además este tipo de estructura permite retener el calor generado lo que se refleja en las pruebas, ya que luego de llegar a una temperatura deseada si se apaga el quemador el sistema logra mantener dicha temperatura durante aproximadamente 15 minutos sin necesidad de encender el quemador, lo que implica una reducción en el consumo de gas mejorando la eficiencia y reduciendo gastos.

Otro elemento a tomar en cuenta son los costos de ambas máquinas en sus estructuras, seguidamente se muestra una tabla para cada una, donde se presentan los dispositivos usados y sus respectivos precios.

Tabla 6.1 Costo de máquina escaladora

Componente	Precio(colones)
Acero Inoxidable	350 000
Horno	100 000
Quemador	500 000
Motor	70 000
PLC	460 000
Panel de control	43 000
Dispositivos electrónicos	250 000
Mano de Obra	200 000
Total	1 973 000

Tabla 6.2 Costo de máquina peladora

Componente	Precio(colones)
Acero Inoxidable	300 000
Motor	90 000
Reductor de velocidad	150 000
Dedos de hule	200 000
Mano de obra	500 000
Total	1 240 000

Sumando el costo de ambas máquinas se puede determinar que los gastos se redujeron en la mitad en referencia a la máquina escaldadora en comparación si se hubieran comprado en la cotización que se muestra en el apéndice A3, ya que en esta cotización la estructura de la escaldadora es similar a la desarrollada en el proyecto.

6.2 Aplicación del control de temperatura

En este control se realizó un análisis por medio de un modelo teórico a si como a partir de un modelo obtenido de modo empírico, de ambos modelos se obtuvieron sus respectivas gráficas en simulaciones utilizando MATLAB 7.8, las gráficas que se obtuvieron se muestran en las Figuras 5.3 (teórico) y 5.13 (experimental), se puede observar que en ambos casos se tiene una respuesta sin sobreimpulso, pero presentan diferencias en cuanto al tiempo de estabilización (t_s) y al error de estado estacionario (e_{ss}).

En la Tabla 6.3 se muestran los datos de estas especificaciones, ante lo cual se puede establecer que la planta calculada experimentalmente presenta un error del 2.13% y un tiempo de estabilización de 10 000 segundos. Mientras que del modelo teórico de la planta se obtiene un error del 0% y un tiempo de estabilización de 1020 segundos.

Tabla 6.3 Comparación de la respuesta del modelado teórico y experimental

Modelo	Error e_{ss} (%)	t_s (segundos)
Experimental	2.13	10 000
Teórico	0	1020

De lo cual se puede deducir que el aspecto en el cual existe una mayor diferencia es con respecto al tiempo de estabilización, desde este punto se define que el modelo experimental se logra acercar más al comportamiento de la planta, ya que de la Figura 5.12 vemos que el tiempo de estabilización esta cerca de los 8 100 segundos, presentando mucha diferencia con el modelo teórico.

Esta diferencia puede surgir a partir de falta de exactitud de la información que se tenga de las características de los materiales como su conductividad o las características del agua del proceso, lo cual puede provocar esta diferencia.

Se procedió a realizar pruebas utilizando en el PLC los compensadores calculados en tiempo discreto obtenidos para ambos modelos, estos se muestran en las ecuaciones (5.27) y (5.31) en el caso teórico y (5.46) caso experimental, de dichas pruebas se definió que el mejor comportamiento lo presento el regulador del análisis experimental, respuesta que se presenta a continuación.

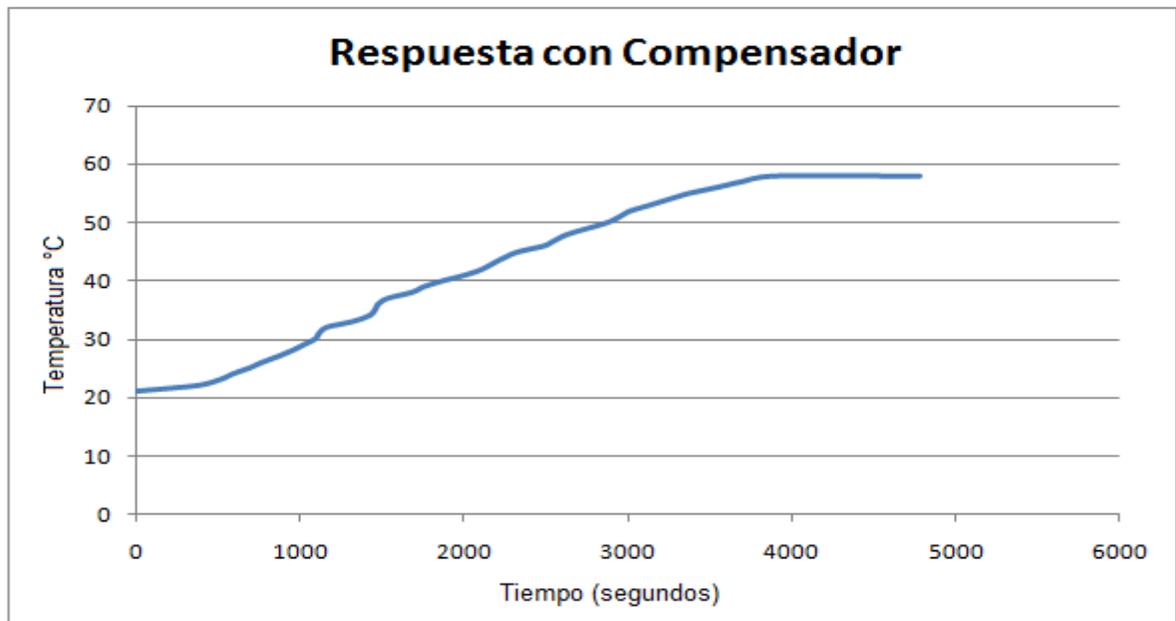


Figura 6.2 Respuesta de la planta con el control de temperatura aplicado

De la gráfica se puede apreciar que se cumple con lo establecido de obtener un error de estado estacionario menor al 2%, es importante mencionar que durante las pruebas se modificó el tiempo de muestro en el PLC, para mejorar la respuesta obtenida.

El control con el modelo teórico presento un sobreimpulso en el sistema, esto se debe a que en este modelo se generan tiempos mucho más cortos en su comportamiento, lo cual se ve reflejado en una ganancia de mayor magnitud de dicho compensador en su elemento proporcional del compensador PID aplicado en el PLC.

6.3 Aplicación del control de nivel

Este control se realizó solo un análisis usando un modelo teórico, de igual forma utilizando MATLAB 7.8 se generaron gráficas, de las cuales la respuesta al escalón del modelo obtenido mostrado en la Figura 6.3 nos indica que la planta presenta una respuesta sin sobreimpulso, en cuanto al tiempo de estabilización (t_s) es de 5.84 segundos y el error de estado estacionario (e_{ss}) de 61%.

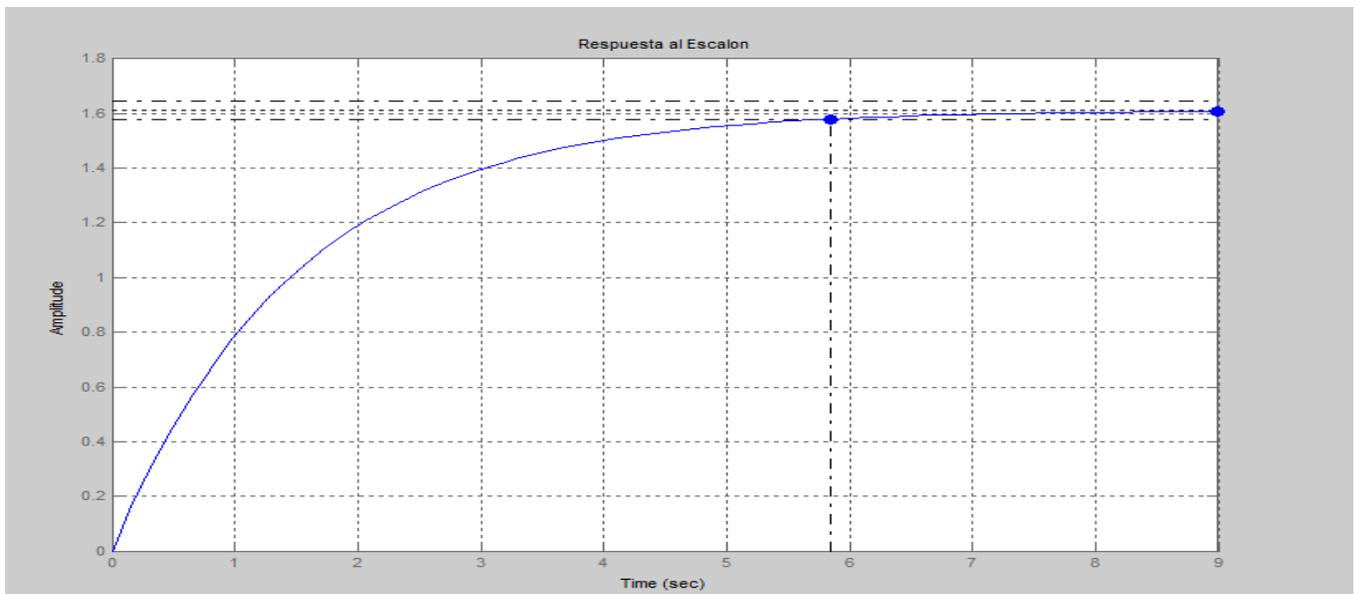


Figura 6.3 Respuesta del modelo de la planta para el control de nivel ante un escalón

En este caso se realizó un análisis en tiempo continuo a diferencia de lo realizado en el control de temperatura, el compensador aplicado se muestra en la Figura 5.19. Luego se procede a discretizar este compensador para ser implementado en el PLC, el cual finalmente es el mostrado en la ecuación (5.68).

Al aplicar este control se obtiene la siguiente gráfica del comportamiento de la planta.

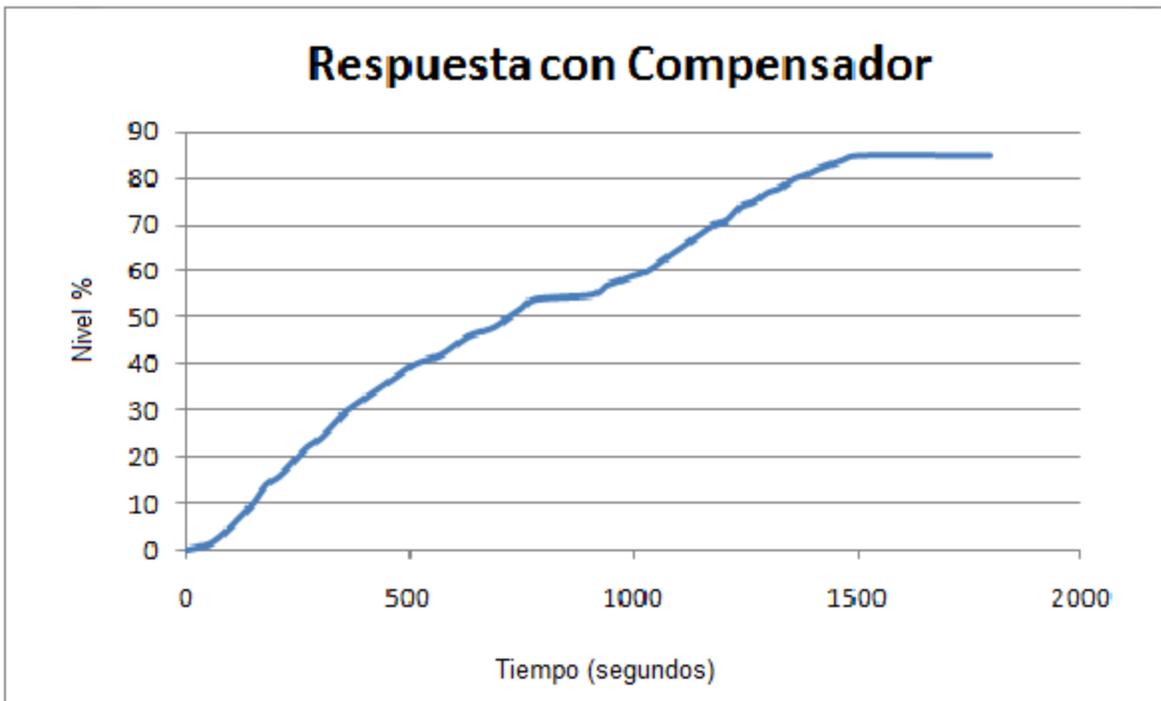


Figura 6.4 Respuesta de la planta con el control de nivel aplicado

A partir de la respuesta del sistema se observa que el comportamiento de la planta es el esperado en cuanto a obtener un error del 0%, en este caso que se definió el set point del control en un 85% del nivel de la escaldadora. La diferencia surge principalmente en lo que se refiere al tiempo de estabilización, ya que en el modelo teórico del sistema ya controlado de la Figura 5.20 se maneja un t_s cercano a los 800 s, mientras en la respuesta obtenida se puede tomar un t_s de 1500 segundos, dicha diferencia se basa principalmente en la capacidad de flujo que se aplique en el llenado del sistema, sin embargo no afecta el objetivo de obtener un e_{ss} del 0%.

6.4 Control de velocidad de los motores

Con respecto a otro elemento fundamental en el funcionamiento de las máquinas se realizaron los ajustes para el funcionamiento de los motores que se utilizan. Como se mencionó anteriormente ya se contaba por parte de la empresa con un motor de 2 HP que se usaría en la peladora, por lo que solo fue necesario adquirir el motor de la escaldadora, dicho motor es de 0.75 HP.

Se implemento un sistema de reducción de velocidad en ambos casos utilizando engranajes mecánicos, este método se utilizó en vez de el uso de un variador de frecuencia que era otra opción, esto se debe porque la alimentación disponible en las instalaciones no es trifásica, lo que condiciona el uso de motores monofásicos y a su vez el uso de variadores de frecuencia y como segundo punto que la empresa ya contaba con reductores de engranajes que solo era necesario que darles un poco de mantenimiento para ser utilizados.

Se logró establecer una velocidad de 5 rpm para la escaldadora y de 110 rpm para la peladora, parámetros que eran los buscados según los datos teóricos de funcionamiento de ambas máquinas. A continuación se presentan imágenes de los acoples de reducción de velocidad diseñados.



Figura 6.5 Montaje para el funcionamiento del motor de la máquina escaldadora



Figura 6.6 Montaje para el funcionamiento del motor de la máquina peladora

6.5 Panel de control y botoneras, con opción manual y automático

Se configuró un panel de control, en el cual se instalaron todos los dispositivos electrónicos que se seleccionaron, a continuación se muestra tanto el exterior como el interior del panel.

En su parte externa se tiene la pantalla del PLC, en el cual se despliega los valores de temperatura y nivel de agua de la escaldadora, dos luces indicadoras del funcionamiento (activación del motor) tanto de la peladora como de la escaldadora que se encuentran en la parte inferior izquierda de color verde. Cuenta además con una luz amarilla que se activa cuando se selecciona el modo automático.



Figura 6.7 Panel de control diseñado (Parte externa)

En la parte superior izquierda se colocó un pulsador tipo hongo con enclavamiento que es el paro de emergencia, ya sea en manual o automático al presionarlo todas las señales de las máquinas se desactivan paralizando completamente el proceso, dicho paro de emergencia cuenta a su vez con su respectiva luz roja que se enciende al activar el pulsador.

Como se observa en la siguiente figura internamente se encuentran todos los dispositivos, relés, contactores, guardamotores, fuente de 24 VCD, disyuntores. Además se dejó espacio en caso de modificaciones o si se desea agregar otros componentes.

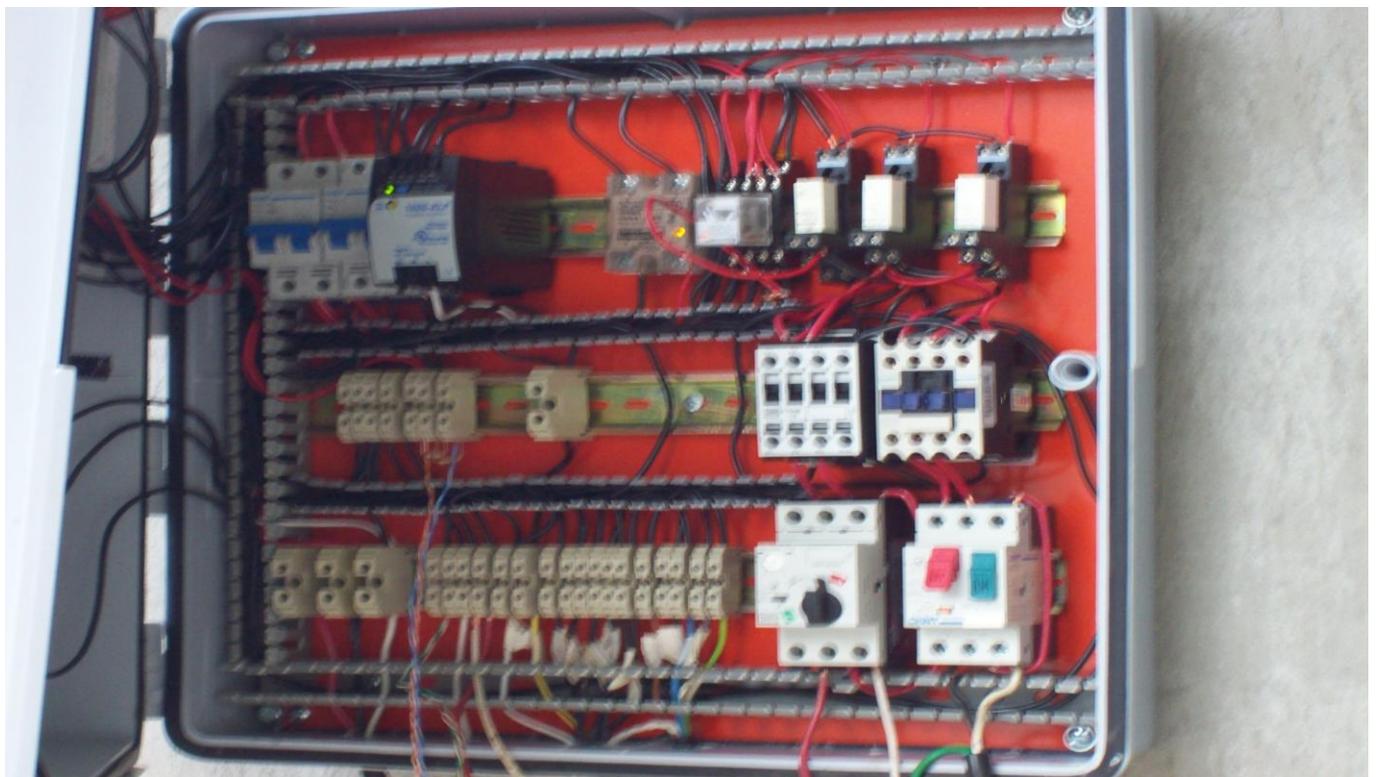


Figura 6.8 Panel de control diseñado (Parte interna)

Con el fin de facilitar el proceso y reducir tiempos de operación, se implementó un manejo de las máquinas por medio de botoneras colgantes, las cuales poseen todas las señales necesarias para desarrollar el proceso productivo y se ubicaron de manera que no sean un obstáculo en el proceso, a continuación se presentan ambos módulos de mando.

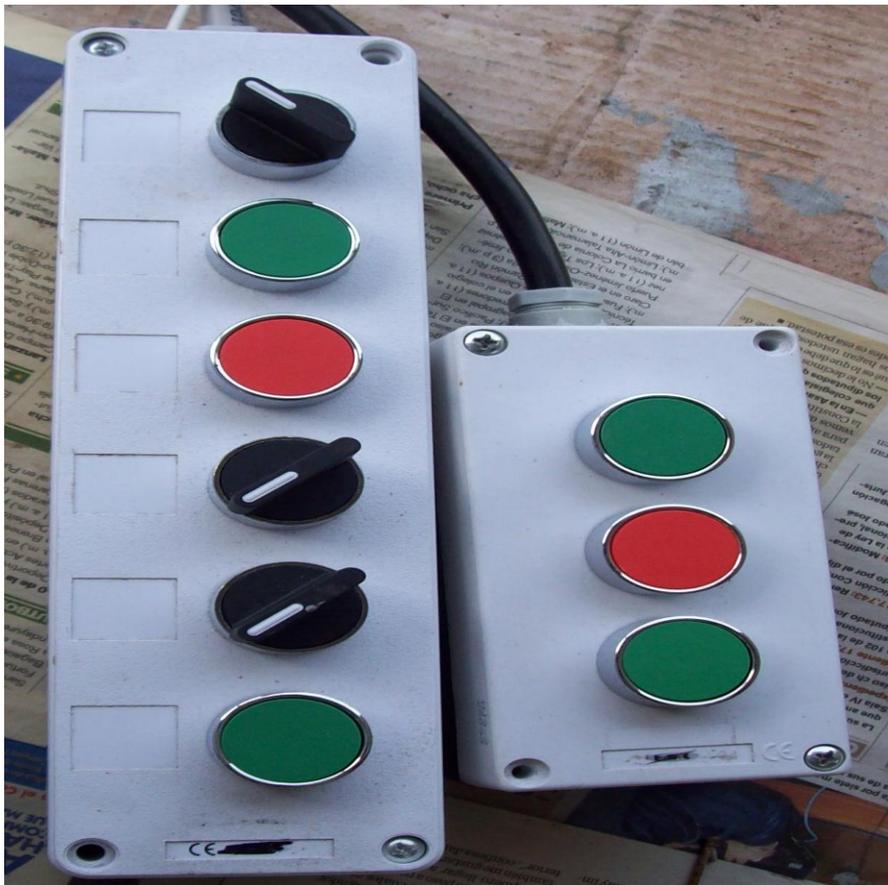


Figura 6.9 Botoneras colgantes implementadas para el manejo de las máquinas

6.5 Implementación del software

El programa desarrollado en PLC no solo implicaba la aplicación de los reguladores de control, si no que se debía de implementar todo el manejo de los equipos durante el proceso y desplegar una interfaz con el usuario fácil de manejar. Parte de dicha interfaz se muestra a continuación.



Figura 6.10 Interfaz grafica del proceso en la pantalla del PLC

En las pruebas además de probar la activación de motores, el quemador y la válvula de agua bajo sus respectivos parámetros y condiciones, se comprobó la flexibilidad del sistema en cuanto al uso del equipo en modo manual o automático, ya que en todo momento permitió dicha manipulación sin presentar algún inconveniente.

Otro aspecto de importancia que se probó fue el uso del paro de emergencia, el cual se activó en modo manual y automático obteniendo iguales resultados, que fue el paro inmediato de aquellas señales que se encontraban en funcionamiento.

6.6 Implementación del proceso productivo

Como prueba fundamental se pusieron a trabajar las máquinas con 8 pollos, en la etapa de escaldado se estableció un parámetro de temperatura de 58°C en un tiempo de escaldado de 2 minutos en modo automático. Y en el proceso de pelado se estableció un tiempo de 30 segundos.

En el caso del escaldado no presento problemas en cuanto al proceso, la máquina manejó la cantidad de 8 pollos sin problemas. En la etapa de pelado al introducir un quinto pollo la máquina se noto un poco lenta, por lo que se decidió manejar solo 4 pollos por tanda.

A continuación se presentan fotografías del proceso productivo realizado como prueba.



Figura 6.11 Fotografías del proceso productivo en funcionamiento

Capítulo 7:

Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- El modelado experimental del control de temperatura representa de manera más fiable la planta física del sistema que el modelo teórico.
- Tanto el control de temperatura como el de nivel lograron obtener un error de estado estacionario que cumple con los parámetros solicitados.
- Los reguladores diseñados en la teoría deben ser ajustados en la práctica para obtener un mejor resultado.
- Se logró reducir el gasto al realizar el diseño e implementación de los equipos por la misma empresa en vez de comprarlos.
- La implementación de un modo manual y un modo automático facilita al operario la tarea durante el aprendizaje del proceso productivo.
- Las velocidades de funcionamiento de los motores cumplieron adecuadamente con el proceso productivo.
- Las máquinas funcionan correctamente ya que se obtuvieron los pollos de la prueba totalmente desplumados.

7.2 Recomendaciones

- Buscar la manera de que el agua que se agregue al proceso de escaldado llegue un poco caliente con el fin de no enfriar mucho el agua de la máquina y evitar así un mayor gasto del gas para el quemador.
- Cambiar la versión del quemador cuando se tenga mayor presupuesto por uno con manejo proporcional o al menos una versión que presente en su funcionamiento una pre purga de menor duración, ya que es un tiempo perdido en el calentamiento del sistema.

Bibliografía

- [1] Cervantes López, Eduardo. "MEJORANDO LA PRODUCTIVIDAD EN LAS PLANTAS DE BENEFICOS DE AVES". <<http://www.engormix.com/MA-avicultura/industria-carnica/articulos/mejorando-productividad-plantas-beneficios-t1997/471-p0.htm>> [Consulta: 12 abril 2010].
- [2] López Guillen, María Elena. "Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua". <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/controlclase/Identificacion_de_sistemas.PDF> [Consulta: 10 mayo 2010].
- [3] "Algunos conceptos básicos: Calor y Temperatura". <http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/> [Consulta: 15 junio 2010].
- [4] "Sistema Termodinámico". <<http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo1p/sistema.html>> [Consulta: 15 junio 2010].
- [5] Cagigal Díez, Gerardo. "Calculo de la potencia de los motores". Universidad de Cantabria. Curso de Tracción Eléctrica 2000-2001.
- [6] Chávez Campos, Pablo Antonio. "Sensores analógicos utilizados en la automatización industrial". Universidad de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Eléctrica.
- [7] Free Literature. "Flow and Level Measurement". <<http://www.omega.com/literature/transactions/>> [Consulta: 20 Septiembre 2010].
- [8] PEPPER+FUCHS. "Sensores Ultrasónicos". <http://files.pepperl-fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/doct/tdoct0614a_spa.pdf> [Consulta: 25 Septiembre 2010].
- [9] GE Measurement and Control Solutions. "Pressure and Level". <<http://www.ge-mcs.com/en/pressure-and-level.html>> [Consulta 4 Octubre 2010].
- [10] Empresa JLM. México. <<http://www.polloso-equipos.com/>> [Consulta: 3 Noviembre 2010]
- [11] Video: "Quicker Plucker Showcase". <<http://www.youtube.com/watch?v=RgXwhftkXUE&feature=related>> [Consulta: 3 Noviembre 2010]
- [12] "Multiplicador de velocidad (poleas)". <http://www.iesmarenostrum.com/departamentos/tecnologia/mecanoso/mecanica_basica/mecanismos/mec_pol_multiplicador.htm> [Consulta: 20 Septiembre 2010]

- [13] Sensors. http://www.efunda.com/designstandards/sensors/rtd/rtd_intro.cfm [Consulta: 10 Septiembre 2010].
- [14] **Universidad de Guadalajara. Departamento de Electrónica. “MEDICIÓN DE TEMPERATURA”**
<http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/teoria/temperatura/Temperatura.html> [Consulta: 10 Septiembre 2010].
- [15] Interiano E. “**Introducción al Control automático**”.
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/Clase1Introduccion.pdf> [Consulta: 20 Septiembre 2010].
- [16] Interiano E. “**Control por realimentación de estado**”.
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/ControlPorRealimentaciondeEstado.pdf>
[Consulta: 21 Septiembre 2010].
- [17] **Smith, Carlos. 1991. “Control Automático de Procesos, Teoría y Práctica”**. México: LIMUSA.
- [18] Interiano E. “**Sistemas en tiempo discreto**”.
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/ModelosenTiempoDiscreto.pdf> [Consulta: 5 Octubre 2010].
- [19] Interiano E. “**Diseño usando el lugar de las raíces en tiempo discreto**”.
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/LugardelasraicesenTiempoDiscreto.pdf> [Consulta: 9 Octubre 2010].
- [20] Interiano E. “**Control de un sistema térmico**”.
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/EjemploControldeunSistemaTermico.pdf> [Consulta: 25 Septiembre 2010].
- [21] **Seborg, Dale. 1989. “Process Dynamics and Control”**. United States of America: Hamilton.
- [22] Kuo, Benjamín C. “**Sistemas de control automático**”. 5ª Ed. México, Prentice-HALL HISPANOAMERICANA, 1996.
- [23] **Jean-Francois Magni. “ROBUST MODAL CONTROL with a Toolbox for Use with MATLAB”**. Toulouse.France:Plenum Publishers.
- [24] **Branilav Kisacanin. “Linear Control Systems with solved and MATLAB examples”**. Plenum Publishers.

Apéndices

A1. Linealización y Variables de desviación

Una variable de desviación se define como la diferencia entre el valor de la variable o señal y su valor en el punto de operación:

$$X(t) = x(t) - \bar{x}$$

$X(t)$ = Variable de desviación

$x(t)$ = Variable absoluta correspondiente

\bar{x} = El valor de x en su punto de operación (valor base)

Se considera que una función no es lineal cuando existe algún factor en el cual se encuentre una o más variables con una relación de multiplicación o elevadas a alguna potencia diferente de 1.

Para tales efectos se puede linealizar usando variables de desviación de la siguiente manera:

$$f(x(t), y(t)) \approx f(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y}) [x(t) - \bar{x}] + \frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y}) [y(t) - \bar{y}]$$

$f(x(t), y(t))$ = Función que se desea linealizar

$f(\bar{x}, \bar{y})$ = Función en su punto de operación

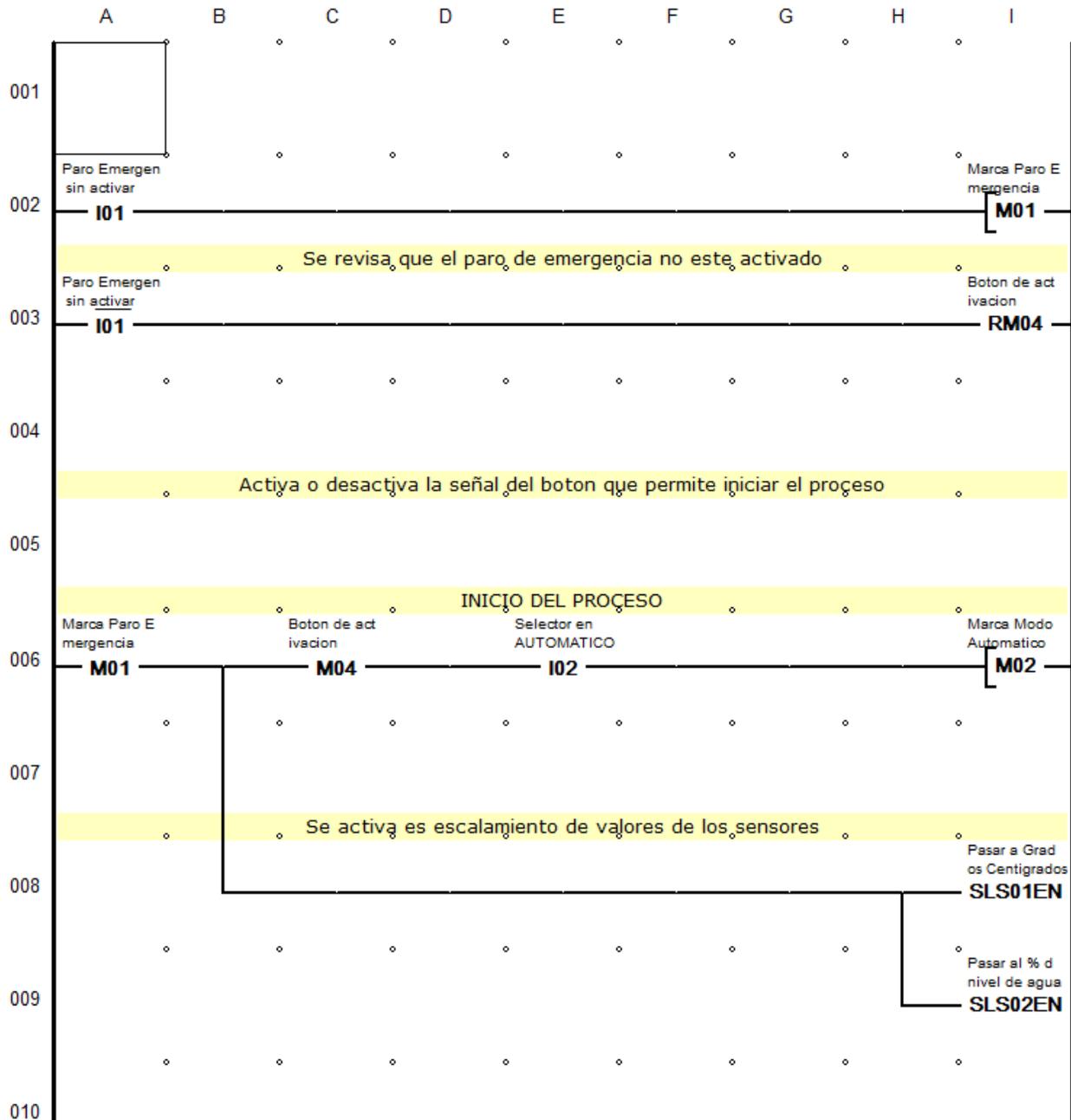
$\frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y})$ = Derivada de la función con respecto a la variable x absoluta, evaluada con los valores de las variables en su punto de operación.

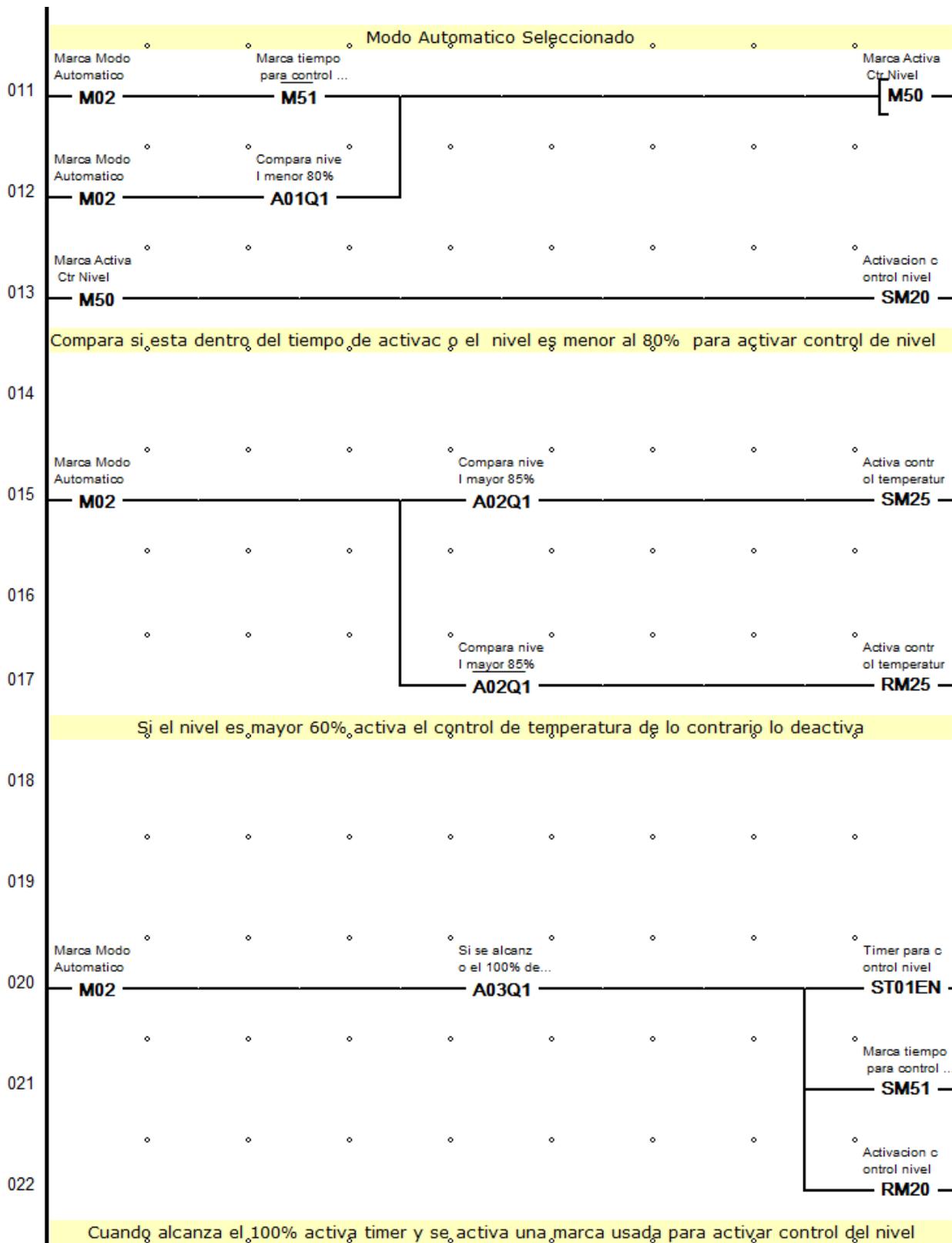
$\frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y})$ = Derivada de la función con respecto a la variable absoluta y, evaluada con los valores de las variables en su punto de operación.

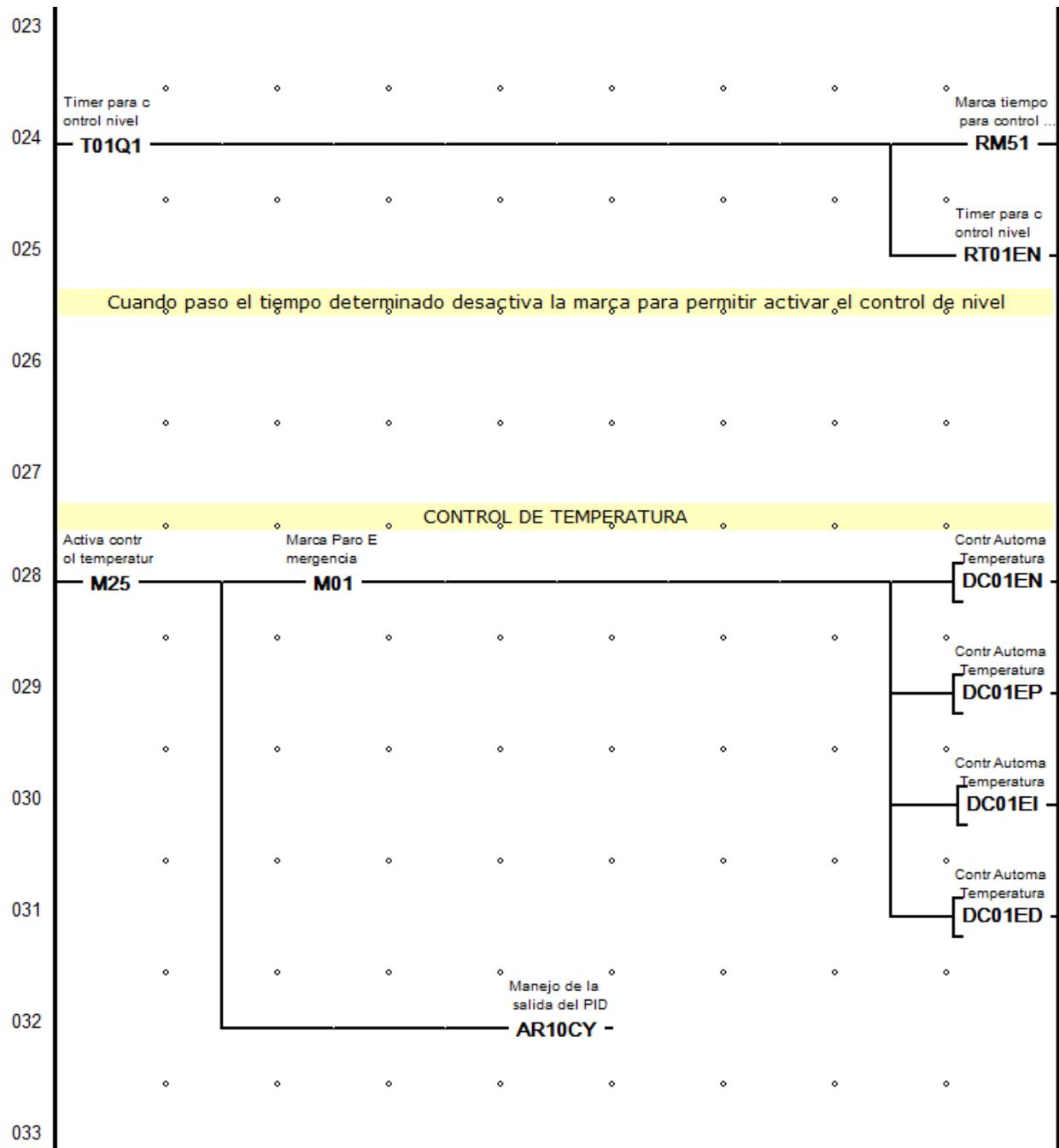
$x(t) - \bar{x}$ = Variable de desviación para la variable absoluta x.

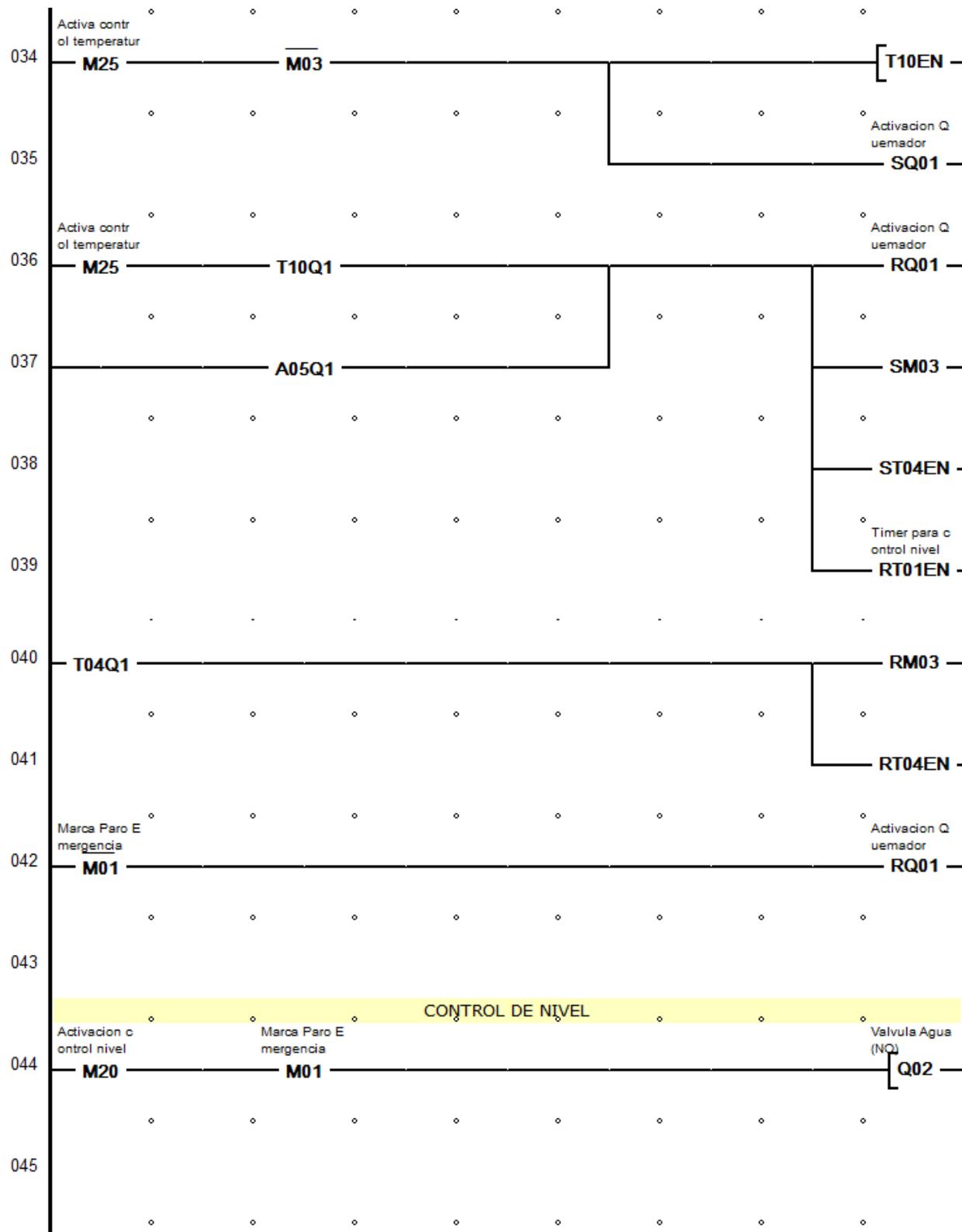
$y(t) - \bar{y}$ = Variable de desviación para la variable absoluta y.

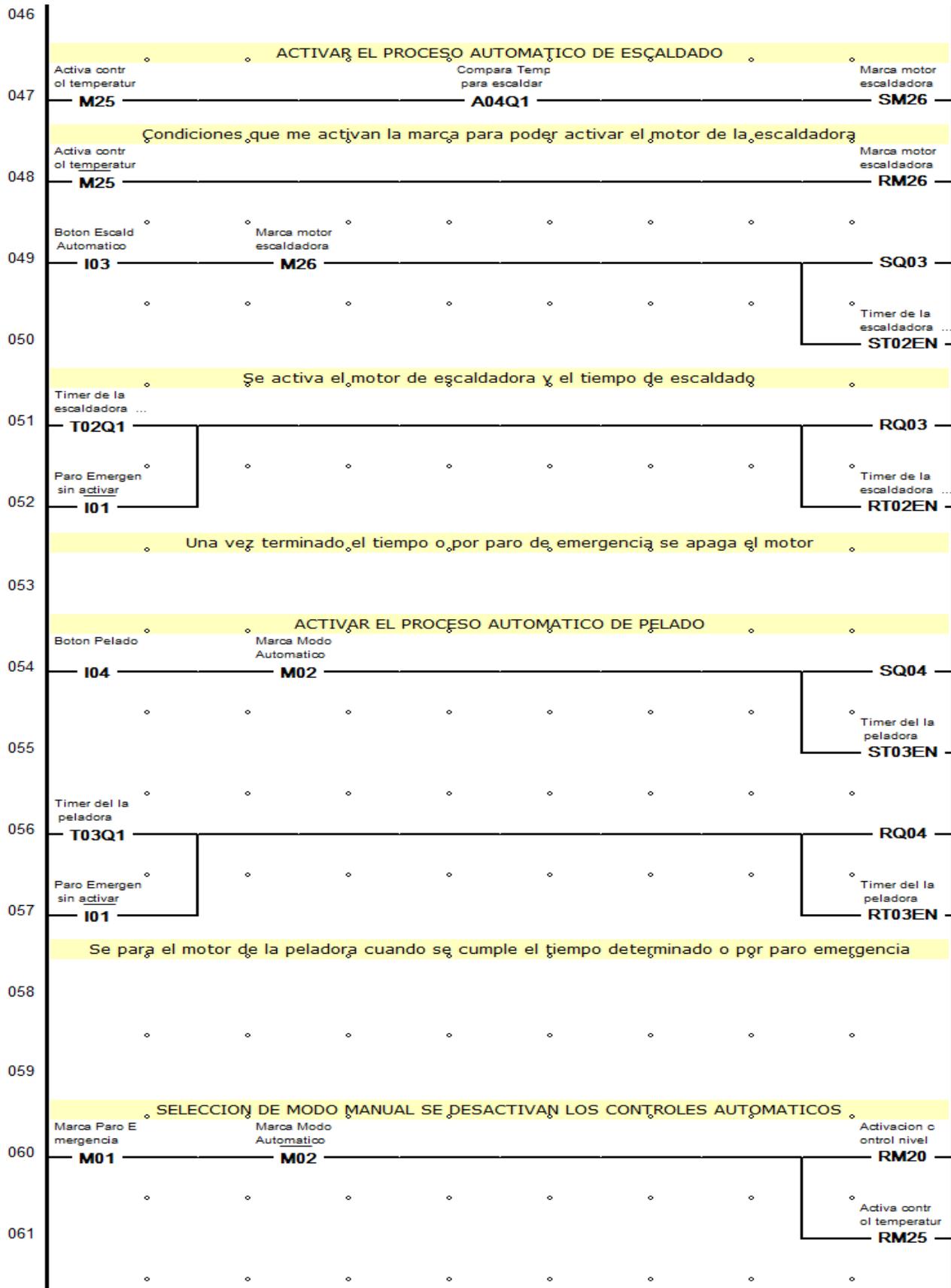
A2. Código implementado en el PLC Pico GFX-70











A.3 Datos de la cotización realizada a Repagro S.A.

ESCALDADORA A VAPOR AGITADA POR AIRE

MODELO EAV
200

- Estructura y tanque fabricados completamente en acero inoxidable
- Escaldadora de 2 pasos / Longitud de escaldado efectivo 2.0 mt
- Sistema de calentamiento del agua a través de vapor
- Incluye sistema de control automático de temperatura y manejo del vapor
- Sistema de agitación para homogenizar la temperatura del agua en el tanque y mojar completamente el pollo compuesto por turbina para la inyección de aire y difusores en acero inoxidable.
- Incluye gabinete de control para el motor de la turbina

PRECIO	\$11.005
---------------	-----------------

DESPLUMADORA DE DISCOS TIPO TUNEL

MODELO DDT
164

- Fabricada completamente en acero inoxidable con 16 unidades de desplume
- Conformada por 2 gabinetes, cada uno con la posibilidad de ajuste de la altura, inclinación, rotación y aproximación mediante manivelas, de acuerdo con el tamaño del pollo
- Cada gabinete tiene 2 filas con 4 unidades de desplume cada una
- Cada fila tiene 1 motor que acciona las 4 unidades de desplume mediante un arreglo con correas
- Cada unidad de desplume tiene 12 dedos DURAM M 90 # 1
- Incluye gabinete de control para los motores

PRECIO	\$28.925
---------------	-----------------