

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Sistema de monitorización remoto de las variables de proceso de una
planta Procesadora de Carnes y Embutidos**

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

Johan Gamboa Villegas


Cartago, Junio de 2009



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. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector



Ing. Néstor Hernández Hostaller

Profesor lector



Ing. Marvin Hernández Cisneros

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

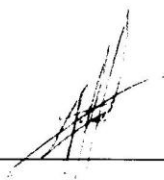
Cartago, junio 19, 2009

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.

Cartago, Junio de 2009



Johan Gamboa Villegas

Céd: 2-0609-0773

Resumen

En su afán de dar a sus clientes un producto de alta calidad, una planta Procesadora de Carnes y Embutidos ubicada en San José de la Montaña, Heredia ha iniciado una transformación en su modelo de producción para maximizar sus recursos y mejorar el proceso de elaboración de embutidos.

Para elaborar embutidos el control de temperatura en distintas etapas de la fabricación es fundamental para garantizar una adecuada capacidad de conservación, estabilidad del color y formación del aroma del embutido. Entre las etapas de mayor importancia están la cocción de los embutidos, y el almacenamiento de los mismos.

En la actualidad la monitorización del proceso de producción de la procesadora de carnes se realiza de forma manual. Esto implica un aumento en la probabilidad de que produzca alguna falla por causas humanas. Así por ejemplo los operadores pueden en algunas ocasiones olvidar hacer la ronda de monitorización de manera que estiman ellos mismos, según su experiencia, los valores para salir del apuro. Situaciones como estas impiden que se alcance un medio de estandarización del proceso por medio de la monitorización de las variables de proceso.

De esta forma, la empresa RF Automatización ha sido contratada para desarrollar una plataforma de monitorización y control de la temperatura en el proceso de elaboración de embutidos que permita asegurar la trazabilidad de los productos elaborados y así determinar la calidad de los mismos.

Palabras clave: PLC, monitorización, Controlador PID, temperatura, embutidos.

Summary

In their eagerness to bring customers a high quality product, a meat and sausages processing plant placed in San Jose de la Montaña Heredia, has begun a modernization their production in order to maximize resources and improve the sausages cooking process.

Throughout the sausages preparation, in different cooking stages, the temperature control is one of the most important parameters to ensure adequate storage capacity, color stability and sausage aroma.

Nowadays, the monitoring of the production process is done manually. This implies an increase in the probability of failure occurrence by human causes. For instance, the operators may forget to do his check round, so that they would make up a value for the real measuring one, based on their experience, to solve the situation. These types of situations, avoid reaching a standardization process by means of monitoring the process variables.

In this way, the RF Automation Company has been hired to develop a temperature monitoring and controlling for the sausages preparation process to ensure the product traceability and quality determination.

Key Words: PLC, monitoring, PID controller, temperature, sausages.

Dedicatoria

A Dios...

Por ser siempre quien ha iluminado mí camino en momentos que parecía desistir...

A mis padres...

Quienes siempre creyeron, aconsejaron y lucharon por hacer de mi lo que hoy soy...

A ellos les dedico este triunfo...

Agradecimientos

A Dios por ser el eje que me guió hasta donde estoy.

A mi familia, gracias por su incondicional y eterno apoyo.

A la familia Rojas Centeno, gracias por haberme brindado su cariño y por haber creído en mí.

A RF Automatización S.A. por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto junto a ellos. Le agradezco al Ing. Juan Carlos Rodríguez por su paciencia y enseñanzas, y a mi compañero de trabajo Josué Pavón por ser de gran apoyo.

A todos les debo este triunfo, Gracias inmensurables!

Johan Gamboa Villegas

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	11
1.1 Problema existente e importancia.....	11
1.2 Solución seleccionada	13
Capítulo 2: Meta y Objetivos	17
2.1 Meta.....	17
2.2 Objetivo general.....	17
2.3 Objetivos específicos.....	18
Capítulo 3: Marco teórico	19
3.1 Descripción del sistema a controlar	19
3.2 Antecedentes bibliográficos	19
3.2.1 Compensador PID	19
3.2.2 El predictor de Smith.....	21
3.3 Descripción de los principales conceptos matemáticos y electrónicos relacionados con la solución del problema	24
3.3.1 Modelado de la planta por medio del método de respuesta ante escalón	24
3.3.2 Modelado de la planta por medio de método estocástico por estimación de mínimos cuadrados.....	27
3.3.3 Técnica del lugar geométrico de las raíces.....	30
3.3.4 Cálculo de un compensador de adelanto-atraso en cascada.....	32
3.3.5 Cálculo del Compensador PID por medio del método Ziegler y Nichols.....	34
3.3.6 Calometría y Ley de Joule.....	36
Capítulo 4: Procedimiento metodológico	37
4.1 Reconocimiento y definición del problema	37
4.2 Obtención y análisis de información.....	37
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	38
4.4 Implementación de la solución	39
4.5 Reevaluación y rediseño	42
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	43
5.1 Análisis de soluciones y Selección final.....	43
5.2 Descripción del hardware	45
5.2.1 Fuente de poder Delta 120VAC/24VDC	45
5.2.2 Controlador Micrologix ML1100	45
5.2.3 Sensor de Temperatura RTD PT100 3 HILOS.....	46
5.2.4 Transmisor de temperatura Sitrans Tk, RTD Pt100 4 hilos.....	47
5.2.5 Sensor Detector de flama.....	48
5.2.6 Válvula solenoide	48
5.2.7 Relé de estado sólido	48
5.2.8 Sensores Limit Switch.....	49
5.2.9 Alarma sonoras.....	49
5.3 Descripción del software.....	49
5.3.1 Lógica de control del Controlador Micrologix 1100.....	49
5.3.1.1 Principal.....	50

5.3.1.2	Actualización de I/O's.....	50
5.3.1.3	Motor de alarmas.....	51
5.3.1.4	Mensajes de Alerta Locales.....	55
5.3.1.5	Mensajes de Alerta Remotos.....	57
5.3.1.6	Regulador PID.....	59
5.3.1.7	Verificación de Gas.....	60
5.3.1.8	Registro de Eventos.....	62
5.3.1.9	Proceso de Cocción de los embutidos.....	63
Capítulo 6: Análisis de Resultados.....		65
6.1	Comunicación Controlador Micrologix 1100 – PC – Operador.....	65
6.2	Respuesta a lazo abierto de la planta.....	68
6.3	Modelado de la Planta.....	69
6.4	Cálculo del Regulador.....	72
6.5	Predictor de Smith.....	80
6.6	Ecuación de diferencias.....	86
6.7	Resultados experimentales.....	87
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones.....		95
7.1	Conclusiones.....	95
7.2	Recomendaciones.....	96
Capítulo 8: Bibliografía.....		97
Capítulo 9: Apéndices.....		99
9.1	Glosario, abreviaturas y simbología.....	99
9.2	Cálculo del escalón aplicado.....	100
9.3	Planos gabinete de control.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama de la estructura básica de la planta Procesadora de Carnes y Embutidos.	13
Figura 1.2	Diagrama de solución implementada.....	16
Figura 3.1	Lazo genérico de control de planta con retardo.	22
Figura 3.2	Misma planta separando el retardo.....	22
Figura 3.3	Planta a lazo cerrado en el dominio discreto.....	22
Figura 3.4	Predicción de salida y realimentación.....	23
Figura 3.5	Aproximación de un sistema de orden mayor a uno de primer orden.....	26
Figura 3.6	Determinación de las constante R y L a partir del método Ziegler/Nichols.....	35
Figura 5.1	Distribución de los sensores de temperatura y sensores Limit Switch dentro de la Planta procesadora de carne.....	43
Figura 5.2	Solución implementada para controlar el calentamiento de temperatura del tanque de cocción.....	44
Figura 5.3	Micrologix 1100 de Allen Bradley.....	46
Figura 5.4	Sitrans TK-H.....	47
Figura 5.5	Esquema de conexión del Sitrans Tk-H.....	47
Figura 5.6	Sensor UV-Tron R2868.....	48
Figura 5.7	Sensor Limit –Switch para puertas.....	49
Figura 5.8	Diagrama de flujo de funcionamiento del motor de alarmas para Sirena 1.....	52
Figura 5.9	Diagrama de flujo de funcionamiento del motor de alarmas para sirena 2.....	53
Figura 5.10	Diagrama de flujo de funcionamiento del motor de alarmas para sirena 2 (continuación).....	54
Figura 5.11	Diagrama de flujo del orden de prioridad de las alertas locales.....	56
Figura 5.12	Diagrama de flujo del orden de prioridad de las alertas locales (Continuación).....	57
Figura 5.13	Lógica de Verificación de Flama.....	61
Figura 5.14	Lógica de registro de eventos involucrados con las puertas.....	62
Figura 5.15	Diagrama de flujo del proceso de cocción.....	64
Figura 6.1	Interfaz principal del sistema de monitorización.....	66
Figura 6.2	Interfaz de configuración.....	67
Figura 6.3	Respuesta a lazo abierto experimental de la planta debida al escalón máximo de temperatura.....	68
Figura 6.4	Respuesta a lazo abierto del la función de transferencia obtenida por medio del método estocástico basado en la medición de mínimos cuadrados.....	70
Figura 6.5	Respuesta a lazo abierto del la función de transferencia obtenida por medio del método gráfico.....	72
Figura 6.6	Método de Ziegler-Nichiols para determinar el PID.....	73
Figura 6.7	Respuesta a lazo cerrado de la planta cuando se implementa el regulador PID por el método de la función de Ziegler-Nichols.....	74
Figura 6.8	Simulación del efecto del compensador de adelanto en la respuesta de lazo cerrado de la planta sin retardo.....	78
Figura 6.9	Selección de la ubicación del cero para obtener la mejor respuesta del sistema a lazo cerrado.....	79
Figura 6.10	Simulación del efecto del regulador Adelanto-Atraso sobre la respuesta de lazo cerrado de la planta sin retardo.....	80
Figura 6.11	Sistema a lazo cerrado con regulador y planta sin retardo.....	83

Figura 6.12	Respuesta del sistema a lazo cerrado con regulador y planta sin retardo.....	83
Figura 6.13	Sistema a lazo cerrado con regulador y planta con retardo.	84
Figura 6.14	Respuesta del sistema a lazo cerrado con regulador y planta con retardo.	84
Figura 6.15	Sistema a lazo cerrado con regulador, Predictor de Smith y planta con retardo. ..	85
Figura 6.16	Respuesta del sistema a lazo cerrado con regulador, Predictor de Smith y planta con retardo.....	85
Figura 6.17	Panel eléctrico del sistema de monitorización para la Planta Procesadora de Carnes y Embutidos.....	88
Figura 6.18	Curva de calentamiento del agua de la marmita 1 con el regulador y Predictor de Smith implementados	88
Figura 6.19	Pruebas de respuesta de tiempo para diferentes canales de transmisión.	92
Figura 9.1	Variación de la presión atmosférica en Costa Rica con relación a la altitud.[20] ...	101
Figura 9.1	Diagrama eléctrico Panel del Sistema Monitorización, pag. 1	103
Figura 9.2	Diagrama eléctrico Panel del Sistema Monitorización, pag. 2	104
Figura 9.3	Diagrama eléctrico Panel del Sistema Monitorización, pag. 3	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1	Descripción del controlador Micrologix 1100.....	46
Tabla 5.2	Salidas del Controlador Programable Micrologix 1100.	50
Tabla 5.3	Entradas del Controlador Programable Micrologix 1100.	51
Tabla 5.4	Condiciones de activación de alertas críticas	58
Tabla 5.5	Estados del Proceso de cocción de embutidos.....	63
Tabla 6.1	Modelo de primer orden por método estocástico	69
Tabla 6.2	Comparación de especificaciones establecidas para definir el comportamiento de la planta ante un regulador.....	89
Tabla 9.1	Valores máximos y mínimos de temperatura de.....	100
	la respuesta a lazo abierto de la planta.....	100

Capítulo 1: Introducción

1.1 Problema existente e importancia

La susceptibilidad de un proceso al factor humano es mayormente dada al garantizar la homogeneidad y calidad final del producto por medio de criterios y métodos de control de calidad y homogeneidad que son establecidos mediante normas internas y/o certificaciones externas. En el caso de la fabricación de embutidos se debe garantizar en alta medida un control cruzado de sanitización, la regencia veterinaria, traceabilidad de los lotes de producto, el uso correcto de químicos, el uso correcto de vestimenta, lavado de manos, lavado de botas, lavado de gavacha. En fin, es todo un proceso donde el eslabón más débil puede introducir contaminación y afectar la calidad de producto.

El proceso de producción de embutidos de la Procesadora de Carnes se desarrolla de manera sistemática pero con un bajo nivel de automatización. Es el personal humano el encargado de velar por el cumplimiento de las condiciones óptimas para cumplir con los estándares de calidad establecidos, tanto en el proceso elaboración como en el almacenamiento de los mismos.

Uno de los parámetros más importantes que se debe controlar durante la elaboración de embutidos es la temperatura. La monitorización y control de la misma durante el proceso de curado es fundamental para garantizar una adecuada capacidad de conservación, estabilidad del color y formación del aroma del embutido. De igual manera, la correcta regulación de la temperatura en las cámaras de almacenamiento contribuye a la conservación de los embutidos.

En la procesadora de carnes y embutidos el control y monitorización de la temperatura es realizado por un operario y por ende el proceso de producción de los embutidos se hace susceptible en mayor grado a errores humanos. Estos errores pueden generar la pérdida de un medio que garantice los estándares de

calidad y en algunos casos han hecho que sea inevitable el desechar un lote de producto generando importantes pérdidas económicas.

Además, en la actualidad la Procesadora de Carnes no dispone de un método para registrar la temperatura de las diferentes etapas en el proceso de fabricación de embutidos y por lo tanto no es posible para ellos realizar estudios de trazabilidad de los lotes de producto para conocer el rendimiento que están alcanzando en la calidad de los embutidos o inclusive poder determinar las razones por las que un lote de producto no cumplió con los estándares de durabilidad establecidos.

En algunos casos los errores causados por factores humanos pueden ser prevenidos o corregidos por medio de un sistema de monitorización que se adapte a las necesidades de la empresa. Y es por esto que el sistema de control y monitorización desarrollado pretende reforzar las deficiencias presentes en el sistema de producción original, al mejorar la manera en la que se controla y monitorea la temperatura en las diferentes etapas del proceso de producción. Además el registro de las variables de proceso hace posible que la Procesadora de carnes y embutidos pueda realizar estudios de trazabilidad para controlar y mejorar de una manera más eficiente la calidad de sus productos.

1.2 Solución seleccionada

Para comprender el alcance de los requerimientos establecidos por la empresa en cuanto a los resultados esperados del proyecto, es necesario describir la forma en la que se desarrolla el proceso y la manera en la que esta distribuido físicamente en la planta. En la figura 1.1 se muestra un diagrama de la estructura que posee la planta de producción de embutidos y carnes.

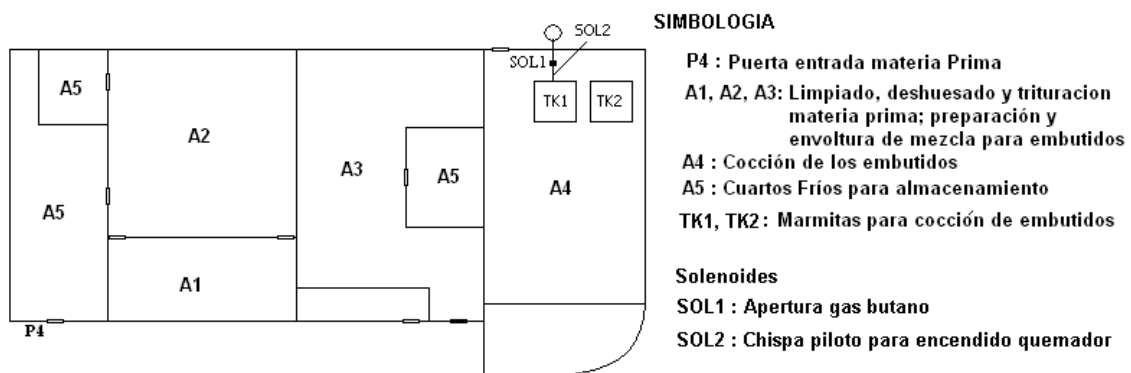


Figura 1.1 Diagrama de la estructura básica de la planta Procesadora de Carnes y Embutidos.

Una vez que la materia prima es mezclada, curada, condimentada y envuelta en tripas naturales o sintéticas en las zonas A1, A2 y A3; un operario debe trasladarla al área A4 para iniciar la cocción de la misma para que puedan alcanzar la consistencia y durabilidad deseada. En esta etapa el operador debe estar muy pendiente de la temperatura interna de los embutidos y la del agua utilizada para calentarlos pues de no terminar esta etapa en el momento que debe concluir el producto pierde calidad. La forma en la que operador verifica la temperatura es con un termómetro analógico que tiene a su disposición.

Las áreas marcadas como A5 corresponden a los cuartos en frío en donde se almacenan los embutidos una vez que han pasado por el proceso de cocción. La puerta P4 se utiliza para introducir la materia prima a unos de los cuartos fríos.

De esta manera, la empresa Procesadora de Carnes presenta la necesidad de implementar un sistema con el cual pueda monitorear, controlar y registrar la temperatura de diferentes elementos dentro de la fábrica, así como la monitorización de otras variables que puedan influir negativamente en la temperatura. En la siguiente lista se muestra con mayor detalle los requerimientos establecidos por la empresa en cuanto a los resultados esperados:

- Control automático del calentamiento de agua en la marmita 1, de manera que no dependa directamente de un operador que revise constantemente la temperatura del agua.
- Monitorización, almacenamiento y gráficas de la temperatura del agua de la marmita 1 y de la temperatura interna de los embutidos introducidos en ella durante su periodo de cocción.
- Monitorización de la temperatura de la marmita de choque térmico(TK2)
- Monitorización, almacenamiento de datos de las temperaturas de los cuartos en frío.
- Sistema de alerta para los operadores cuando alguno de los límites establecidos como seguros son infringidos.
- Sistema de alerta para gerentes y/o administradores, en caso de que los operadores no atiendan las alertas en un tiempo definido.
- Sistema de monitorización Remoto.

Para cumplir con los requerimientos planteados por la Procesadora de Carnes y embutidos se desarrolló el sistema de monitorización y control con un controlador lógico programable, más específicamente el Micrologix 1100 de Allen Bradley.

Debido a que la temperatura es un parámetro de gran importancia en las diferentes etapas del proceso de elaboración de embutidos, se estimó que con la

instalación de una serie de sensores de temperatura se podría establecer una relación directa entre el valor de temperatura en el periodo de cocción de los embutidos y la calidad de los embutidos alcanzada, lográndose definir un procedimiento que permita la trazabilidad de un proceso en el que se alcance un resultado de alta calidad.

Los valores de temperatura son obtenidos por las entradas analógicas del Micrologix 1100 y un módulo de expansión adicional de entradas analógicas. Además por medio del diseño y programación de aplicaciones en RSLogix500 y RSVIEW32 fue posible desarrollar una interfaz gráfica para facilitar la comunicación hombre-máquina (HIM).

Para la automatización del calentamiento de agua en la marmita 1, se estimó que por medio de un regulador PID se obtendría resultados satisfactorios. De esta manera se obtuvo la respuesta a lazo abierto de la planta y se calculó el regulador óptimo para alcanzar una temperatura de 80 °C en el menor tiempo posible.

Se clasificó las alertas del sistema en dos tipos: alertas locales y alertas remotas o críticas. Las primeras corresponden a las anomalías que si los operadores corrigen de inmediato, la calidad del producto no se ve disminuida. Las segundas por el contrario, son utilizadas para notificar a los administradores que los productos han empezado a disminuir su calidad y éstas se implementan como medida de control para verificar si los operarios se desempeñan de manera correcta y eficiente. Para notificar a los administradores de las alertas críticas, en el programa de control desarrollado se configuró que el Controlador Micrologix 1100 fuera capaz de comunicarse con una interfaz TAP para compañías de pager (beeper).

Para almacenar la lecturas de los diferentes parámetros se configuró un programa de intercambio de datos para almacenar las lecturas de las variables en una tabla en Excel por medio del software RSLinx.

Por último, el acceso remoto del sistema se realizó por medio de una compañía de redes de computadoras virtual. De esta manera es posible conectarse desde cualquier computadora con acceso a Internet, al escritorio de la computadora que se utiliza en la planta para observar, por medio del software programado, las condiciones de las variables de proceso asociadas a la producción de los productos de manera que es posible interactuar como si se estuviera enfrente de misma.

En la figura 1.2 se muestra el diagrama de conexión básico de la solución implementada.

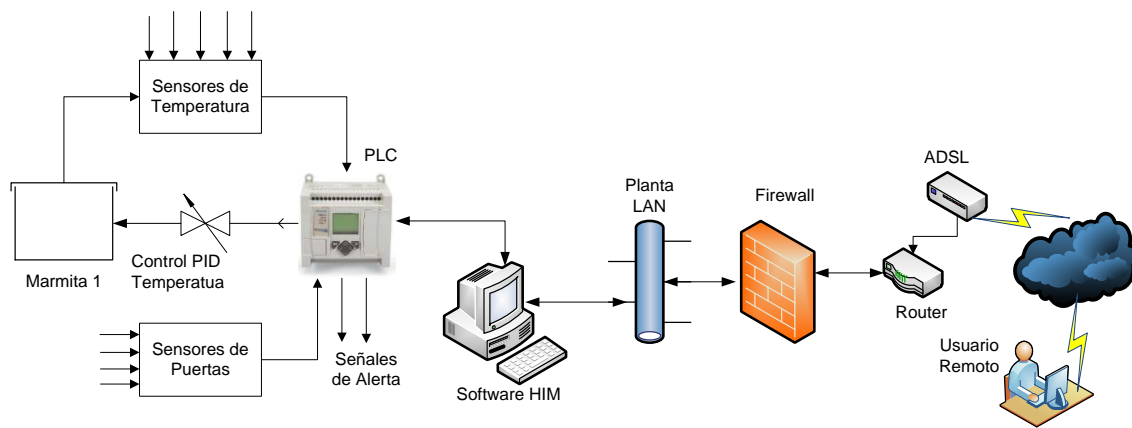


Figura 1.2 Diagrama de solución implementada

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Controlar de una manera más eficiente el proceso de producción de los embutidos mediante la monitorización y control de la temperatura en diferentes etapas del proceso de producción para evitar la disminución en la calidad o incluso la pérdida total de los productos a causa de calentamiento de los mismos por la sobre exposición en los tanques de cocción o un incorrecto almacenamiento.

Indicador: Análisis estadístico comparativo en el que se muestre la reducción de las pérdidas de los embutidos a causa de errores humanos una vez instalado el sistema de monitorización.

2.2 Objetivo general

Desarrollar un sistema de control, monitorización y alerta, de las variables de campo asociadas a las diferentes etapas del proceso de producción de embutidos¹, basado en un sistema SCADA (PLC-PC) que permita alertar anomalías detectadas, registrar los datos adquiridos, generar reportes estadísticos y acceder de forma remota.

Indicador: Existe disponible el sistema de monitorización que opera en simulación a través de RSEmulate500, por medio del cual es posible visualizar en tiempo real las condiciones de las variables monitoreadas, ya sea de manera local o remota.

1. Temperatura, Tiempo de apertura de puertas, Cantidad de veces por día que se abren las puertas y tiempo de exposición de los embutidos en los tanques de cocción.

2.3 Objetivos específicos

1. Diseñar e implementar un regulador para mantener la temperatura constante dentro del tanque 1(TK1).

Indicador: Se comprueba que la temperatura del agua en el tanque 1 se mantiene constante en la consigna establecida durante el periodo de cocción.

2. Diseñar los planos eléctricos del panel del sistema de control de temperatura, analizando tanto la instalación eléctrica requerida para el proyecto como la conexión del PLC y la PC.

Indicador: Existe a disposición, los planos eléctricos del panel apegados a los estándares de la empresa.

3. Determinar por medio de pruebas, la respuesta de tiempo y estabilidad del canal de transmisión elegido para transmitir los mensajes de alerta.

Indicador: La estabilidad del canal debe asegurar que se transmitan el %100 de las alertas generadas.

4. Configurar la red de computadoras virtual y PLC a utilizar para poder acceder de manera remota el sistema de monitorización desarrollado, esto incluye la jerarquía de accesos y control de seguridades de la información.

Indicador: La aplicación SCADA ejecutada desde la PC de la empresa puede ser vista desde cualquier computador fuera de la red privada de la embutidora.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Descripción del sistema a controlar

Con el fin de preparar embutidos para la venta la empresa Procesadora de carnes dispone de tanque o marmita en el que se lleva a cabo el proceso de cocción de los embutidos. La marmita tiene la capacidad para almacenar 100 L de agua y es calentado por medio de una fila de boquillas alimentadas con gas comercial.

El suministro del gas se habilita por medio de una válvula solenoide NC que se abre o cierra por completo.

Para la medición de la temperatura del agua los operadores utilizan un termómetro industrial analógico para bolsillo.

Por otro lado, como se presentó en el diagrama de la figura 1.1 existen 2 cuartos en frío y un congelador (Zonas A5) en los que se almacenan los embutidos una vez que haya sido completado el proceso de cocción. En estos cuartos es necesaria la monitorización de la temperatura y del estado de las puertas, si están abiertas o cerradas.

3.2 Antecedentes bibliográficos

3.2.1 Compensador PID

El controlador PID aplica una señal al proceso que es una combinación proporcional, integral y derivativa de la señal de actuación. Se expresa en el dominio del tiempo de la siguiente manera

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (\text{Ec. 1})$$

Y transformándolo al dominio S:

$$PID(s) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right\} \quad (\text{Ec. 2})$$

Debido a que la ecuación del controlador PID ideal es impropia, es decir tiene más ceros que polos, se presentan una serie de problemas matemáticos para realizar su simulación e implementación. Por lo tanto se agrega un polo parásito con una constante de tiempo muy pequeña y ganancia estática unitario. Así el PID real está constituido por dos polos y dos ceros de forma similar a un compensador de adelanto y un compensador de atraso con el polo en el origen.

A continuación se muestran las ecuaciones teóricas y reales de los compensadores PI, PD y PID en el dominio S

a. Ecuaciones Teóricas

$$K_{PI}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$K_{PD}(s) = K_p + K_D s \quad (\text{Ec. 4})$$

$$K_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (\text{Ec. 5})$$

b. Ecuaciones Reales

$$K_{PI}(s) = K_P \frac{\left(s + \frac{K_I}{K_P} \right)}{s} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$K_{PD}(s) = K_D \frac{\left(s + \frac{K_P}{K_D} \right)}{(s + p_0)} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$K_{PID}(s) = K_D K_P \frac{\left(s + \frac{K_I}{K_P} \right)}{s} \frac{\left(s + \frac{K_P}{K_D} \right)}{(s + p_0)} = K \frac{(s + z_0)(s + z_1)}{s(s + p_0)} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

$$K_I = K_P / T_i \quad (\text{Ec. 9})$$

$$K_D = K_P * T_d \quad (\text{Ec. 10})$$

3.2.2 El predictor de Smith

Uno de los principales problemas de los controladores clásicos, como es el PID, es su comportamiento frente a plantas con un retardo considerable. [14]

Si ajustamos un regulador para una planta con y sin retardo los parámetros serán completamente diferentes. Con un Predictor de Smith no es posible compensar el retardo ya que es intrínseco al proceso pero sí se puede compensar su efecto sobre la realimentación. La idea está basada en que, al conocer el retardo, es posible saber qué es lo que sucederá luego del mismo, es decir podemos predecir el comportamiento del proceso. [14]

En la figura 3.1 se muestra un lazo genérico de control de una planta con retardo en donde se realimenta la salida afectada por la demora. Esto ocasiona un efecto degradante en el comportamiento en lazo cerrado.

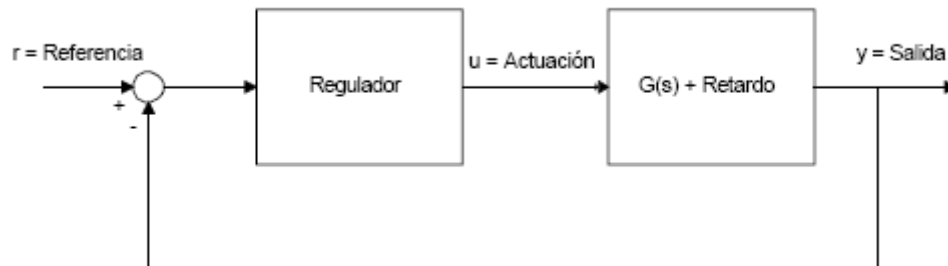


Figura 3.1 Lazo genérico de control de planta con retardo.

Entonces, utilizando lógica de bloques se puede llegar a obtener la figura 3.2.

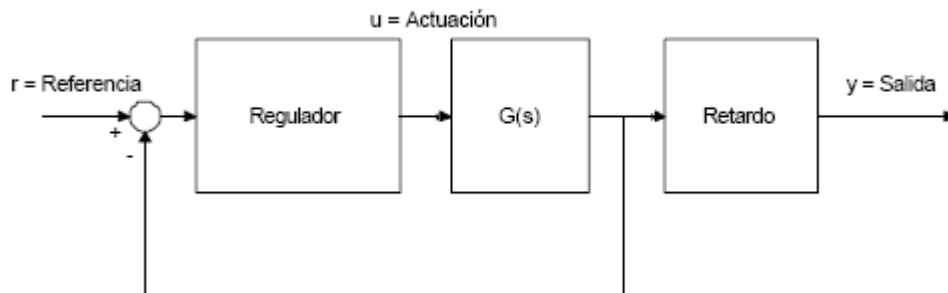


Figura 3.2 Misma planta separando el retardo.

Ahora discretizando el sistema a lazo cerrado completo se obtiene.

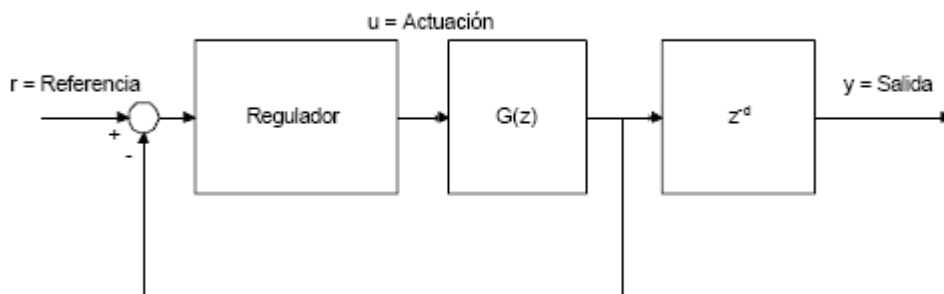


Figura 3.3 Planta a lazo cerrado en el dominio discreto.

En este caso podríamos ajustar el regulador como si la planta no tuviera retardo, elemento que se sumaría a después sin afectar la realimentación. Desafortunadamente, el punto elegido para realimentación es inaccesible, pero lo que sí es posible hacer es predecir el valor de la salida previa al retardo. Esto se consigue realimentando la salida del regulador como muestra la figura 3.4.

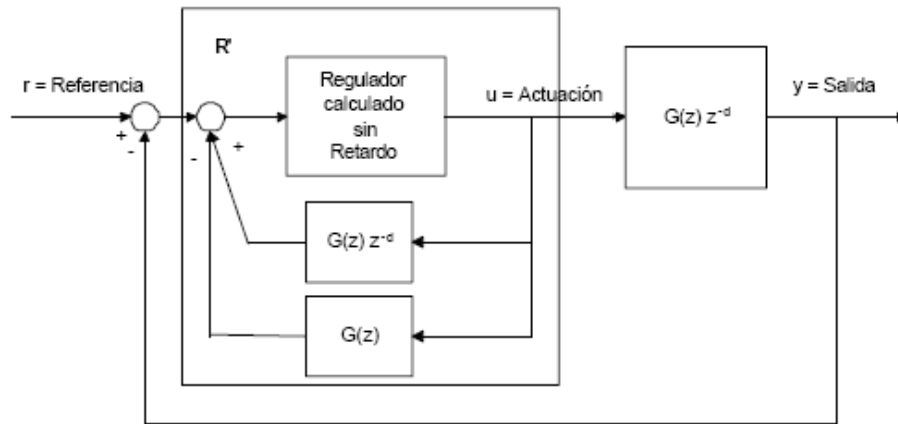


Figura 3.4 Predicción de salida y realimentación

Se puede demostrar que la figura 3.4 es equivalente al diagrama de bloques de la figura 3.3. A partir de la figura 3.3, en la que se simula la exclusión del tiempo de retardo de la planta en el lazo cerrado, se calcula la función de transferencia a lazo cerrado sin retardo. Este se muestra en la ecuación 11.

$$M_{SR}(z) = \frac{R(z)G(z)}{1 + R(z)G(z)} \quad (\text{Ec. 11})$$

Además la función de transferencia de lazo cerrado con retardo de tiempo y en tiempo discreto se muestra a continuación:

$$M(z) = \frac{z^{-d}R(z)G(z)}{1 + R(z)G(z)} \quad (\text{Ec. 12})$$

Ahora en la figura 3.4 se muestra el diagrama de bloques de un sistema en tiempo discreto en el que el regulador tiene integrado el Predictor de Smith. Entonces, para el bloque R' , la función de transferencia es la siguiente.

$$R'(z) = \frac{R(z)}{1 + R(z) \cdot G(z) \cdot (1 - z^{-d})} \quad (\text{Ec. 13})$$

Para esta misma configuración es posible obtener la función de transferencia a lazo cerrado del sistema con el regulador R' . Y precisamente se muestra a continuación.

$$M'(z) = \frac{z^{-d}G(z)R'(z)}{1 + z^{-d}R'(z)G(z)} = \frac{z^{-d}R(z)G(z)}{1 + R(z)G(z)} = z^{-d}M_{SR}(z) \quad (\text{Ec. 14})$$

De esta manera se comprueba que la introducción de un Predictor de Smith en la configuración del regulador produce que la nueva función de transferencia del sistema completo sea equivalente a la función del sistema si la planta no tuviera un retardo, más el retardo que inevitablemente aparece. Y de esta forma el regulador calculado para una planta sin retardo puede mantener su comportamiento al tomarse en cuenta el retardo e incluirse el predictor de Smith.

3.3 Descripción de los principales conceptos matemáticos y electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1 Modelado de la planta por medio del método de respuesta ante escalón

Para realizar el diseño de un controlador es necesaria la obtención previa de un modelo de la planta que caracterice su comportamiento dinámico. A partir del modelado de la planta es posible diseñar y validar por medio de simulaciones los parámetros del controlador que permitan obtener el comportamiento deseado.

La señal más simple que puede utilizarse para el análisis del transitorio es la función escalón. La respuesta de un sistema simple a la señal escalón puede

aproximarse generalmente mediante uno de los tres siguientes modelos paramétricos en el dominio continuo:

1. Modelo de primer orden con retardo:

$$G_{(s)} = \frac{k}{s + a} \cdot e^{-td \cdot s} \quad (\text{Ec. 15})$$

2. Modelo de segundo orden sobre-amortiguado con retardo:

$$G_{(s)} = \frac{k}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)} \cdot e^{-td \cdot s} \quad (\text{Ec. 16})$$

3. Modelo de segundo orden subamortiguado con retardo:

$$G_{(s)} = \frac{k}{\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2 \cdot \xi \cdot s}{\omega_n} + 1 \right)} \cdot e^{-td \cdot s} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde ξ es el coeficiente de amortiguamiento y ω_n la frecuencia natural del sistema.

Un sistema térmico puede aproximarse con un modelo de retardo de primer orden con tiempo muerto, tal y como se muestra en la figura 3.5.

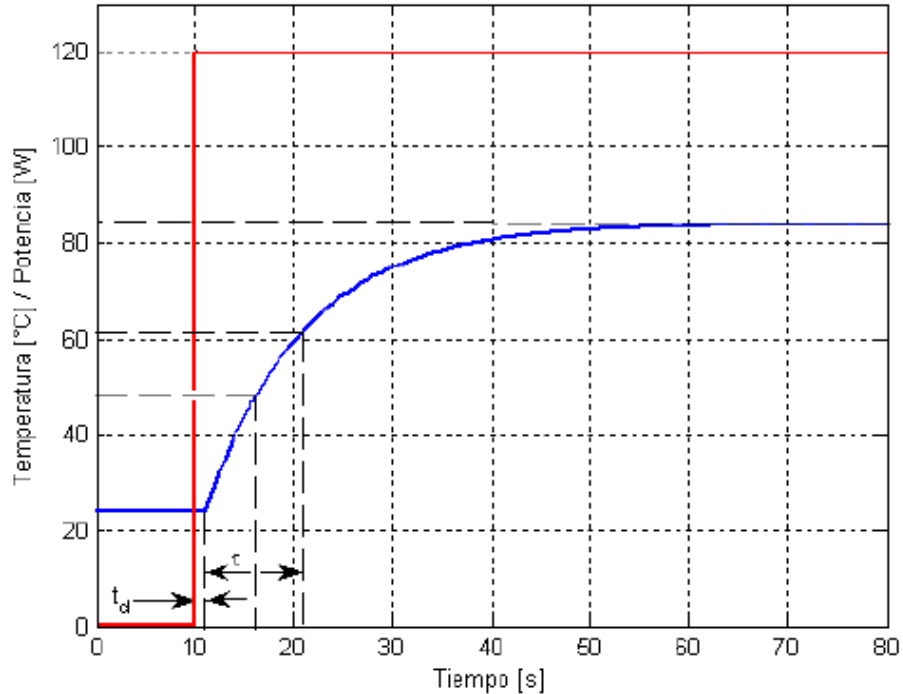


Figura 3.5 Aproximación de un sistema de orden mayor a uno de primer orden.

Así, los parámetros del modelo que deben calcularse son:

- La constante a es el recíproco de la constante de tiempo.

$$a = \frac{1}{\tau} \quad (\text{Ec. 18})$$

- La constante de ganancia estática es el cociente entre el valor final medido para la salida del sistema y la amplitud A del escalón aplicado, escalado por la constante a .

$$k = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y(t) - T_i}{A} * a = \frac{T_f - T_i}{A} * a = \frac{\Delta T}{A} * a \quad (\text{Ec. 19})$$

En donde T_f y T_i son la temperatura final e inicial respectivamente.

- El valor de la constante de tiempo puede calcularse así.

$$\tau = 2 \cdot (t_{63\%} - t_{39\%}) \quad (\text{Ec. 20})$$

$$td = t_{63\%} - (\tau - ti)$$

En donde $t_{63\%}$ y $t_{39\%}$ corresponden a los valores de tiempo en los que se alcanza el 63% y el 39% de la variable ΔT respectivamente.

- Td corresponde al tiempo muerto y se puede obtener por medio de la gráfica.

3.3.2 Modelado de la planta por medio de método estocástico por estimación de mínimos cuadrados

La función de transferencia en tiempo discreto de un proceso de primer orden con periodo de muestreo T y un tiempo muerto de d periodos de muestreo se muestra en la ecuación Ec. 21.

$$G(z) = \frac{K \cdot z^{-d}}{z - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (\text{Ec. 21})$$

La ecuación de diferencias de esta función de transferencia es:

$$c_n = e^{-\frac{T}{\tau}} \cdot c_{n-1} + k \cdot m_{n-1-d} \quad (\text{Ec. 22})$$

Para las muestras que son tomadas experimentalmente se puede asumir un error ε_n , sin correlación y con valor medio cero, producto de las varias fuentes de ruido en el proceso. De esta manera se puede reescribir la ecuación de diferencias como:

$$c_n = \alpha \cdot c_{n-1} + \beta \cdot m_{n-1-d} + \varepsilon_n \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

$$\alpha = e^{-\frac{T}{\tau}} \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\beta = k \quad (\text{Ec. 25})$$

Asumiendo que el tiempo muerto d se conoce es posible estimar los valores de mejor ajuste por mínimos cuadrados para α y β minimizando la suma de los errores al cuadrado. Esta cantidad puede expresarse como:

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^N \varepsilon^2 \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde N es el número de muestras. Entonces despejando de la ecuación Ec. 23 el error ε_n se obtiene:

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^N (c_n - \alpha \cdot c_{n-1} - \beta \cdot m_{n-1-d})^2 \quad (\text{Ec. 27})$$

Está establecido que el valor mínimo de la función suma de cuadrados puede ser obtenido igualando a cero las dos derivadas parciales de $S(\alpha, \beta)$. Las derivadas parciales son:

$$\frac{\partial S(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} = -2 \sum_{n=1}^N (c_n - \alpha \cdot c_{n-1} - \beta \cdot m_{n-1-d}) \cdot c_{n-1} \quad (\text{Ec. 28})$$

$$\frac{\partial S(\alpha, \beta)}{\partial \beta} = -2 \sum_{n=1}^N (c_n - \alpha \cdot c_{n-1} - \beta \cdot m_{n-1-d}) \cdot m_{n-1-d} \quad (\text{Ec. 29})$$

Al igualar estas derivadas a cero, se encuentra un conjunto de ecuaciones llamadas ecuaciones normales. Después de simplificar y manteniendo los mismos límites para las sumatorias el resultado es:

$$\hat{\alpha} \sum_{n=1}^N c_{n-1}^2 + \hat{\beta} \sum_{n=1}^N m_{n-1-d} c_{n-1} = \sum_{n=1}^N c_n c_{n-1} \quad (\text{Ec. 30})$$

$$\hat{\alpha} \sum_{n=1}^N m_{n-1-d} c_{n-1} + \hat{\beta} \sum_{n=1}^N m_{n-1-d}^2 = \sum_{n=1}^N c_n m_{n-1-d} \quad (\text{Ec. 31})$$

Los valores $\hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$ denotan que estos valores son los estimados para α y β . Y pueden ser obtenidos al resolver las ecuaciones Ec. 30 y Ec. 31. Lo que da como resultado:

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum c_n c_{n-1} \sum m_{n-1-d}^2 - \sum c_{n-1} m_{n-1-d} \sum c_n m_{n-1-d}}{\Delta} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum c_{n-1}^2 \sum c_n m_{n-1-d} - \sum c_n c_{n-1} \sum c_{n-1} m_{n-1-d}}{\Delta} \quad (\text{Ec. 33})$$

$$\Delta = \sum c_{n-1}^2 \sum m_{n-1-d}^2 - \left(\sum c_{n-1} m_{n-1-d} \right)^2 \quad (\text{Ec. 34})$$

Se puede presentar un pequeño problema si los valores de c y m son registrados iniciando en $n = 0$ con $d > 0$, se requieren muestras adicionales anteriores a los valores tomados en los datos. Existen dos formas de resolver el problema. Una es asumir que los valores iniciales son cero. La otra es iniciar las sumatorias con $n = d + 1$ en lugar de $n = 1$. Esto disminuye la cantidad de datos usados realmente para los cálculos; pero, generalmente no constituye un problema. Los estimados para T y k se obtienen de las ecuaciones Ec. 24 y Ec. 25. [2]

$$\hat{\tau} = \frac{-T}{\ln \hat{\alpha}} \quad (\text{Ec. 35})$$

$$\hat{k} = \hat{\beta} \quad (\text{Ec. 36})$$

3.3.3 Técnica del lugar geométrico de las raíces

La técnica del lugar geométrico de las raíces permite visualizar las trayectorias de las raíces de la ecuación característica de una función de transferencia cuando se hace variar un parámetro. Esta técnica le permite al diseñador controlar el desempeño del sistema mediante la adición de ceros y/o polos a la función de transferencia, ubicando las raíces del sistema con base a las condiciones de magnitud y ángulo. [21]

Considerando la función de transferencia en lazo cerrado de un sistema de un solo lazo se tiene que :

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad (\text{Ec. 37})$$

Se tiene que las raíces de la ecuación característica deben satisfacer:

$$G(s) \cdot H(s) = -1 \quad (\text{Ec. 38})$$

Ahora, suponiendo que $G(s) \cdot H(s)$ contiene un parámetro variable K , se determinarán las condiciones bajo las cuales la ecuación 38 se satisface. De acuerdo con la condición anterior:

$$G(s) \cdot H(s) = K \cdot G_1(s) \cdot H_1(s) = -1 \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde $G_1(s) \cdot H_1(s)$ no contiene el parámetro variable K . Ahora despejando K

$$G_1(s) \cdot H_1(s) = -\frac{1}{K} \quad (\text{Ec. 40})$$

Para satisfacer la ecuación 40, se deben cumplir simultáneamente las siguientes condiciones:

Condición de magnitud

$$|G_1(s) \cdot H_1(s)| = \frac{1}{|K|} \quad (\text{Ec. 41})$$

Condiciones de ángulo

$$\begin{aligned} \angle G_1(s) \cdot H_1(s) &= (2i+1)\pi \Rightarrow k \geq 0 & (\text{Ec. 42}) \\ &= \text{múltiplos impares de } 180^\circ, i = 0 \pm 1, \pm 2 \dots \end{aligned}$$

La construcción gráfica del lugar geométrico de las raíces se basa en el conocimiento de los polos y ceros de la función de $G(s) \cdot H(s)$. Entonces al escribir $G(s) \cdot H(s)$ de la forma

$$G(s) \cdot H(s) = K \cdot G_1(s) \cdot H_1(s) = K \frac{(s+z1)(s+z2)\dots(s+zm)}{(s+p1)(s+p2)\dots(s+pm)} \quad (\text{Ec. 43})$$

Así aplicando las propiedades de magnitud y ángulo se tiene:

$$|G_1(s) \cdot H_1(s)| = \frac{\prod_{k=1}^m |s+z_k|}{\prod_{j=1}^n |s+p_j|} = \frac{1}{|K|} \quad -\infty < K < \infty \quad (\text{Ec. 44})$$

$$\angle G_1(s) \cdot H_1(s) = \sum_{k=1}^m (\angle s+z_k) - \sum_{j=1}^n (\angle s+p_j) = (2i+1) \times 180^\circ \quad -\infty < K < \infty \quad (\text{Ec. 45})$$

Entonces para un punto s_1 perteneciente al lugar de las raíces debe satisfacer que las sumas de los ángulos de los vectores dibujados desde los ceros y aquellos desde los polos de $G(s) \cdot H(s)$ a s_1 debe ser un múltiplo de 180° .^[21]

Para determinar los valores de K a lo largo del lugar de geométrico se puede despejar de la ecuación 44, entonces:

$$|K| = \frac{\prod_{j=1}^n |s+p_j|}{\prod_{k=1}^m |s+z_k|} \quad (\text{Ec. 46})$$

Para determinar el valor de K en un punto S_1 específico sobre el lugar geométrico de las raíces se sustituye su valor en la ecuación 46.

3.3.4 Cálculo de un compensador de adelanto-atraso en cascada

El cálculo de un compensador de adelanto y atraso puede ser obtenido utilizando las propiedades de magnitud y ángulo descritas en la sección 3.3.3 junto con un par de ecuaciones analíticas.

El enfoque del lugar geométrico de las raíces es muy poderoso en el diseño cuando se incorporan las especificaciones en términos de las cantidades en el dominio del tiempo, tales como el factor de amortiguamiento relativo y la frecuencia natural no amortiguada de los polos dominantes en lazo cerrado, el sobrepaso máximo, el tiempo de levantamiento y el tiempo de asentamiento^[22].

Así a partir de las especificaciones es posible obtener el punto en el que hay que colocar los nuevos polos dominantes en el plano complejo para que el sistema que deseamos controlar se comporte de la manera que queramos. A partir del sobre-impulso (M_p) es posible obtener el factor de amortiguamiento (ζ) y a partir del tiempo de estabilización ($ts_{2\%}$) se puede obtener la frecuencia natural (ω_n).

$$M_p = e^{\frac{-\zeta \cdot \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (\text{Ec. 47})$$

$$ts_{2\%} = \frac{4}{\zeta \cdot \omega_n} \quad (\text{Ec. 48})$$

De esta manera los polos dominantes a colocar con el compensador de adelanto-atraso se definen tanto en el plano complejo como en el discreto de la siguiente manera.

$$s_1 = -\zeta \cdot \omega_n \pm i \cdot \omega_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2} \quad (\text{Ec. 49})$$

$$z_1 = e^{s_1 \cdot T} \quad (\text{Ec. 50})$$

Compensador de adelanto por el método de la bisectriz

La ecuación que define al compensador de adelanto es:

$$k_{lead}(s) = k_c \cdot \left(\frac{s + z_0}{s + p_0} \right) \quad (\text{Ec. 51})$$

Utilizando la condición de ángulo citada en 3.3.3 se tiene:

$$\varphi_{compensador} + \varphi_{planta} = (2 * l + 1) \cdot \pi = \pm 180^\circ \quad (\text{Ec. 52})$$

Entonces el ángulo que debe aportar el compensador de adelanto para colocar los polos dominantes en el lugar desea es

$$\varphi_{compensador} = \pm 180^\circ - \varphi_{planta} |_{s = s_1} \quad (\text{Ec. 67})$$

El ángulo del punto deseado es:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(s_1)}{|\text{Re}(s_1)|} \right) \quad (\text{Ec. 68})$$

De esta forma el polo y el cero del compensador se calcula:

$$z_0 = -|s_1| \cdot \frac{\cos\left(\frac{\theta + \phi_p}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta - \phi_p}{2}\right)} \quad (\text{Ec. 69})$$

$$p_0 = -|s_1| \cdot \frac{\cos\left(\frac{\theta - \phi_p}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta + \phi_p}{2}\right)} \quad (\text{Ec. 70})$$

Así se cumple que $|p_0| > |s_0|$. Por medio de la condición de ángulos se puede obtener el valor de la ganancia del compensador de adelanto:

$$K_c = \left| \left(\frac{s + s_0}{s + p_0} \right) \hat{G}(s) \right|_{s = s_1}^{-1} \quad (\text{Ec. 71})$$

Donde $\hat{G}(s)$ es la ecuación de la planta a lazo abierto sin el retardo de tiempo.

Compensador de atraso

Si se considera el problema de encontrar una red de compensación conveniente para un sistema que exhibe características satisfactorias de la respuesta transitoria, pero características insatisfactorias en estado estable. En este caso la compensación consiste, esencialmente, en incrementar la ganancia en lazo cerrado sin modificar en forma notable las características de la respuesta transitoria. Esto quiere decir que no debe cambiarse de manera significativa el lugar geométrico de las raíces en la vecindad de los polos dominantes en lazo cerrado, sino que debe incrementarse la ganancia en lazo abierto en la medida en que se necesite. Esto se consigue si se coloca un compensador de atraso.^[20]

$$k_{lag}(s) = \frac{(s + z_0)}{(s + p_0)} \quad (\text{Ec. 72})$$

Donde $|z_0| > |p_0|$. La ecuación anterior describe al compensador de atraso y se utiliza para eliminar el error en estado estacionario. Si se desea eliminar en un 100% el error entonces la ecuación 72 se redefine como:

$$k_{lag}(s) = \frac{(s + z_0)}{s} \quad (\text{Ec. 73})$$

3.3.5 Cálculo del Compensador PID por medio del método Ziegler y Nichols

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño se conoce como sintonización del controlador.^[3]

Ziegler y Nichols plantearon básicamente dos conjuntos de reglas. En este caso en particular solo se va a utilizar uno de los dos.

El primero de ellos es la aplicación de procesos cuya respuesta temporal al escalón tiene forma de “S”, figura 3.6 Si el proceso a controlar tiene una respuesta al escalón como la de dicha figura, se calcula la pendiente R en el punto de inflexión y la intersección de una recta (tangente) con esa pendiente y el eje temporal determina el retardo equivalente L . Así, los parámetros R y L permiten definir la constante de tiempo y el retardo de un sistema equivalente de primer orden con retardo ^[6].

A partir de los parámetros R y L , Ziegler y Nichols recomiendan la utilización de los siguientes valores para diseñar al controlador PID.

$$K_p = \frac{1,2}{R \cdot L} \quad (\text{Ec. 74})$$

$$T_i = 2L \quad (\text{Ec. 75})$$

$$T_d = 0,5L \quad (\text{Ec. 76})$$

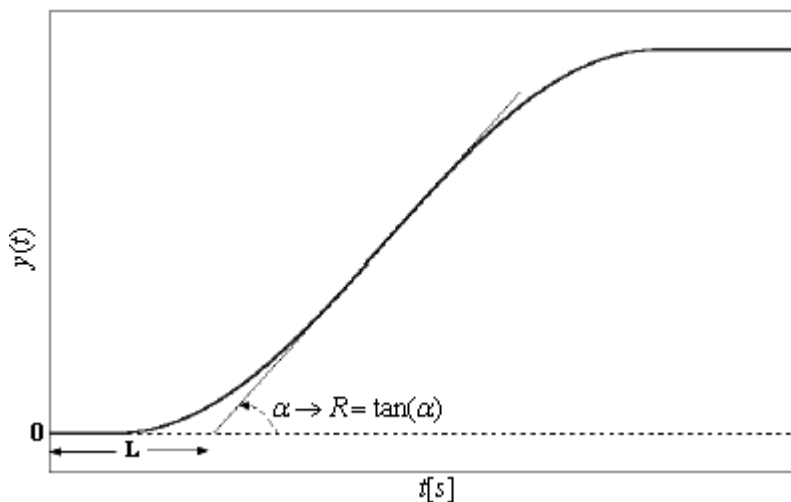


Figura 3.6 Determinación de las constante R y L a partir del método Ziegler/Nichols.

3.3.6 Calometría y Ley de Joule

La capacidad de calor específico (C) es la habilidad de un material para absorber el calor. Se mide en Joules por gramos grados Celsius [Joule/(gr*°C)]. Por ejemplo, el agua tiene una capacidad de calor específico de 4,17 J/gr*°C. Este valor muestra que se absorben 4,17 Joules de energía de calor cuando se aumenta la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado.^[5]

Es posible medir los cambios en la energía de calor de un material por medio de la siguiente ecuación. Para encontrar los cambios de energía calórica es necesario tan solo conocer el cambio de temperatura, en °C, así como tener la masa y temperatura del material.

$$Q = \Delta t * m * C \quad (\text{Ec. 78})$$

$$\Delta t = \text{Temperatura final} - \text{Temperatura inicial} \quad (\text{Ec. 79})$$

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para realizar la formulación de la solución que permitiera el cumplimiento de los requerimientos establecidos por la empresa Procesadora de Carnes y Embutidos que fueron citados en la sección 1.2.1, fue necesario realizar una visita a la planta física de procesamiento de carnes para comprender el funcionamiento del proceso de elaboración de los embutidos y las variables más relevantes del mismo.

Además se contó con un asesor de proyecto por parte de la empresa RF Automatización debido a que dicha empresa fue contratada por la Procesadora de Carnes y Embutidos para desarrollar el proyecto.

4.2 Obtención y análisis de información

A partir de las visitas y las recomendaciones del asesor de proyecto fue posible establecer la definición del problema y determinar las variables de campo que se debían monitorear en el proceso de producción de embutidos.

El problema radica en que el proceso de producción de embutidos que realiza la planta carece de un parámetro de medición con el que se pueda monitorear todo el proceso de elaboración de embutidos y que permita realizar la trazabilidad de un lote de producto determinado de una mejor manera.

La solución diseñada nace de la comparación realizada por expertos en el tema, tecnólogos de alimentos e ingenieros, sobre soluciones similares que ofrece el mercado para monitorear y registrar el proceso de producción de manera que pueda realizarse de la forma más similar entre todo los lotes de producto que se producen; esto claro, cumpliendo los estándares de calidad establecidos. Así

este proyecto pretende innovar la manera en la que se realiza y controla el proceso de elaboración de los embutidos en dicha empresa.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Debido al tipo de requerimientos establecidos por la empresa de Procesadora Carnes y Embutidos, control de temperatura y monitorización de la temperatura en diferentes partes, era claramente necesario elaborar el control con un dispositivo que centralizara todas las funciones para un manejo más eficiente. Para esto se plantearon dos posibles soluciones: la utilización de un microcontrolador o un Controlador Lógico Programable (PLC).

El microcontrolador permite reducir el costo de los sistemas electrónicos y pese a que las últimas versiones son simples de utilizar todavía requieren de algunos detalles para su puesta en marcha y para que presenten un comportamiento estable durante su funcionamiento. Estos permiten una programación más flexible que un PLC y presentan la facilidad de poder ampliar la memoria de manera muy sencilla. Además la integración de diversos elementos como convertidores Analógico/Digital, moduladores de pulso (PWM), USARTs (Receptor /Transmisor Asíncrono Universal) les ha permitido ser aún más versátiles y capaces de abarcar una mayor gama de aplicaciones.

Los microcontroladores son dispositivos vulnerables a los ambientes ruidosos y con mucha vibración y no disponen de protección contra ambientes sucios.

Por otro lado, un controlador lógico programable (PLC) es conveniente cuando se desea realizar la integración de sistemas, pues se requiere tan solo de algunos dispositivos adicionales de fácil programación y sencilla puesta en marcha. A diferencia de los microcontroladores, éstos pueden fácilmente incrementar la cantidad de entradas y salidas por medio de Racks o módulos de expansión. Además son altamente inmunes al ruido eléctrico, tienen una

resistencia a la vibración por encima de los 60 Hz y físicamente hablando son muy robustos.

Debido a que el campo en donde se colocará el sistema de monitorización se puede considerar hostil, pues está expuesto a temperatura y humedad relativa muy altas, y a que se prevé que la planta aumentará su tamaño y capacidad de producción a mediano plazo y con ello la cantidad de señales a controlar se determina que lo adecuado es un dispositivo robusto y modular y es por esto que la elección es un PLC.

Se decide utilizar el PLC marca Allen Bradley® de Rockwell Automation®, más específicamente, el CPU del PLC modelo Micrologix 1100. Este puede comunicarse vía Ethernet/IP (Canal 1) a 10/100 Mbps por medio de un conector RJ45 o comunicación RS-232/485 (Canal 0, aislado). Dispone de un total de 12 Entradas (10 digitales y 2 analógicas) y 6 salidas (2 Analógicas y 4 Digitales). Por medio de módulos de expansión es posible incrementar la cantidad de entradas y salidas. Además dispone de la capacidad de transmitir correos electrónicos y trae implementada la lógica necesaria para generar un controlador PID de manera muy sencilla.

Se podría pensar que el costo de adquirir un equipo como un PLC en lugar de un económico microcontrolador no es justificable desde el punto de vista económico. Sin embargo en este caso es importante tomar en cuenta que el microcontrolador puede fallar en ambientes un tanto hostiles y una falla del procesador central podría causar la pérdida de muchos lotes de producto y con esto pérdidas económicas cuantiosas.

4.4 Implementación de la solución

Para cumplir con el desarrollo del proyecto se siguieron una serie de actividades basadas en los objetivos que se plantearon, de manera que para poder conocer el proceso de producción de los embutidos fue necesario hablar con toda

persona relacionada con dicho proceso, asesor de la empresa y operarios de la planta más específicamente.

Una vez realizado la investigación bibliográfica correspondiente, se procedió a iniciar la etapa de diseño. Se determinaron los puntos en los que se debía monitorear la temperatura para asegurar que el proceso de producción de embutidos se realizara bajo las condiciones deseadas. Dicho puntos se aprecian en la figura 5.1.

En cuanto al hardware, se analizaron distintas opciones para los sensores de temperatura, sensores para identificar puertas abiertas y sensor de flama con el fin de realizar la elección más adecuada.

En paralelo se realizaron diferentes pruebas de calentamiento de diferentes volúmenes de agua para conocer la respuesta natural de un sistema de este tipo, esto pues se debía obtener la misma de un tanque con la capacidad de 100 Litros.

Se procedió a visitar la planta procesadora para determinar la curva de calentamiento real de la planta, es decir, la marmita de 100 litros. Para realizar las mediciones fue necesario establecer la comunicación entre el Micrologix 1100 y la PC y la configuración de la base de datos para almacenar los valores adquiridos. Entonces por medio del software RSLinx se desarrolló el intercambio dinámico de datos, de manera que fue posible registrar en Excel los valores de las variables de interés adquiridas a través del PLC.

Para obtener la ecuación que describiera el comportamiento de la planta (curva de calentamiento del agua de la marmita 1) se utilizaron dos modelos matemáticos distintos, el método Estocástico por estimación de mínimos cuadrados y el método de Respuesta ante Escalón. Los fundamentos teóricos se

muestran en las secciones 3.3.1 y 3.3.2. Se comparó la curva obtenida de cada uno con la respuesta real y se seleccionó el más adecuado.

Una vez obtenida la ecuación que describía el comportamiento de la planta, se diseñó el controlador PID que permitiera regular el proceso de la manera deseada para independizar aún más el proceso de cocción del producto de un operador. Se utilizaron dos procedimientos para determinar el PID y mediante simulaciones y análisis se seleccionó el más idóneo.

Se realizó una visita a la planta para comprobar el efecto del PID y Predictor de Smith calculados sobre la respuesta a lazo cerrado del sistema.

Se inició la programación de la interfaz gráfica del software que va a controlar y monitorear las variables deseadas. En paralelo se inició la programación de las subrutinas empezando por el motor de alarmas, que es la subrutina encargada de definir las condiciones que darán alerta cuando se salgan de los valores normales.

También se programaron las subrutinas de mensajes de alerta locales que consisten en mensajes de notificación de alertas para el operador a través de alarmas sonoras e interfaz gráfica programada en una PC.

Los mensajes de alerta remotos se programaron en una subrutina por aparte. Se utilizó una estructura de envío de datos llamada "Message". De manera que solo fue necesario configurar la dirección IP de la computadora en la que se encuentra el software de monitorización, así como el servidor SMTP de donde provienen el mensaje y la dirección de origen y destino del mensaje de alerta.

Una vez integrado el software, se realizaron pruebas de transmisión y estabilidad del canal de envío de datos remotos para conocer su rendimiento.

Además se diseñó el plano eléctrico del panel y se implementó en un gabinete NEMA Tipo 1 para protegerlo de golpes.

Una vez diseñado e integrado el sistema de monitorización se procedió a realizar pruebas del mismo a través de una simulación corrida en RSEmulate500 para conocer su funcionamiento en general.

Por último se configuró la red de computadoras virtual para poder acceder de manera remota al sistema de monitorización desarrollado.

4.5 Reevaluación y rediseño

En el diseño inicial estaba contemplado el uso de un módulo de expansión de cuatro canales RTD ML 1100 AB, para cumplir con las 6 entradas analógicas de temperatura provenientes de los 6 PT100 a instalar en el Cuarto Frío 1, el Cuarto Frío 2, el Congelador, el Tanque 2 (Tanque de Choque térmico), la Marmita 1 y el interior del producto (Embutido). Sin embargo se analizó y concluyó que era posible reducir el costo del proyecto eliminando el módulo de expansión y cambiando las RTD's del Cuarto Frío 1, Cuarto Frío 2, Congelador, Tanque 2 (Tanque de Choque térmico) por termostatos pues en estos puntos tan solo era necesario saber cuando se alcanzaba una temperatura previamente establecida.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de soluciones y Selección final

Para cumplir con los requerimientos establecidos por la empresa Procesadora de Carnes y Embutidos comentados en la sección 1.2.1 se determinó que era necesario el muestreo constante de la temperatura en diferentes partes de la planta física, esto debido a que la temperatura es un factor fundamental para lograr que los embutidos alcancen un nivel de calidad y durabilidad adecuado. En la figura 5.1 se muestra el diagrama de la estructura física de la planta y los lugares en los que se decidió colocar los diferentes sensores para cumplir con los requerimientos establecidos por la Procesadora de Carnes y Embutidos.

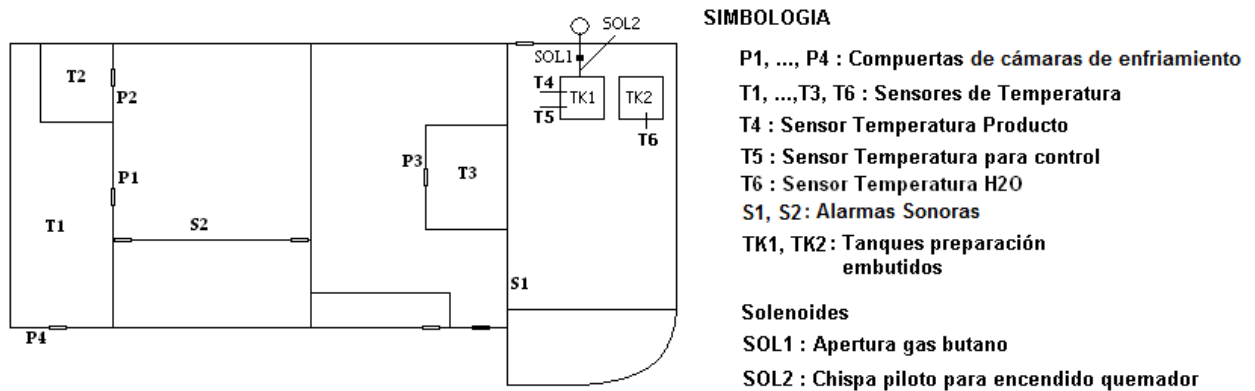


Figura 5.1 Distribución de los sensores de temperatura y sensores Limit Switch dentro de la Planta procesadora de carne

Los sensores de temperatura T1, T2 y T3 muestrean el valor de temperatura de los cuartos fríos que son los lugares en los que se almacenan los productos que han sido terminados.

El sensor de temperatura T4 es el que permite conocer la temperatura interna del lote de producto. Es importante mencionar que la temperatura interna de los embutidos debe estar a 72 °C durante un lapso de 10 minutos para poder

garantizar una adecuada capacidad de conservación, estabilidad del color y formación del aroma del embutido.

El sensor T5 es el utilizado para realizar la regulación de temperatura del agua de la marmita 1 (Tk1) de manera que pueda alcanzar un valor constante.

La solución implementada para controlar la temperatura del agua de la marmita 1 se muestra en la siguiente figura.

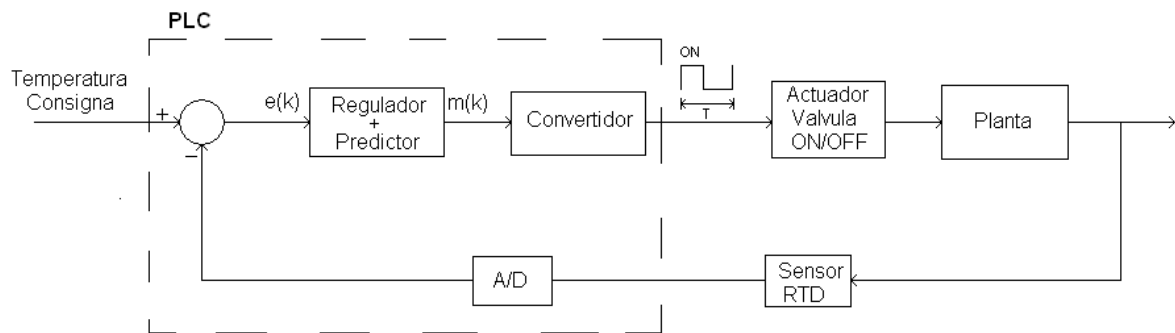


Figura 5.2 Solución implementada para controlar el calentamiento de temperatura del tanque de cocción.

El sensor T6 es el encargado de tomar los datos de temperatura del agua del tanque de choque térmico Tk2; en este se termina el periodo de curado pues al producir un choque térmico cuando se trasladan de la marmita con agua caliente al tanque de agua fría se completa el periodo de definición de la consistencia del embutido.

Conservar las bajas temperaturas dentro de los cuartos en frío es de suma importancia y por lo tanto se optó por realizar la monitorización de la cantidad de veces y el tiempo que está abierta cada una de las puertas P1, P2, P3 y P4. Para monitorear las puertas se utilizó un sensor de posición Limit Swich, de modo que al abrir una de las puertas, el sensor manda una señal a una entrada digital del PLC y éste inicia la cuenta del tiempo que esta la puerta abierta hasta

que sea cerrada. Cuando se cierra la puerta, se incrementa en uno el número de veces que se ha abierto.

El PLC es el encargado de centralizar el sistema pues todos los sensores anteriores son entradas del mismo. EL PLC se conectó a una PC que es la que brinda la interfaz grafica al usuario.

5.2 Descripción del hardware

5.2.1 Fuente de poder Delta 120VAC/24VDC

El Micrologix 1100 se alimenta con 24 VDC, de manera que es necesario un convertidor que tome una tensión de 120VAC y la pase a 24 VDC.

5.2.2 Controlador Micrologix ML1100

El Micrologix 1100 16BBB corresponde al módulo más importante del sistema, pues es este el que recibe los parámetros escaneados y toma decisiones a partir de los mismos. Puede comunicarse vía Ethernet/IP (Canal 1) a 10/100 Mbps por medio de un conector RJ45 o comunicación RS-232/485 (Canal 0, aislado). Dispone de un total de 12 Entradas (10 digitales y 2 analógicas) y 6 salidas.

Puede trabajar perfectamente hasta temperatura de 65 °C y en ambiente con una humedad relativa del 95%. En la figura 5.3 se muestra con un diagrama la descripción del controlador.

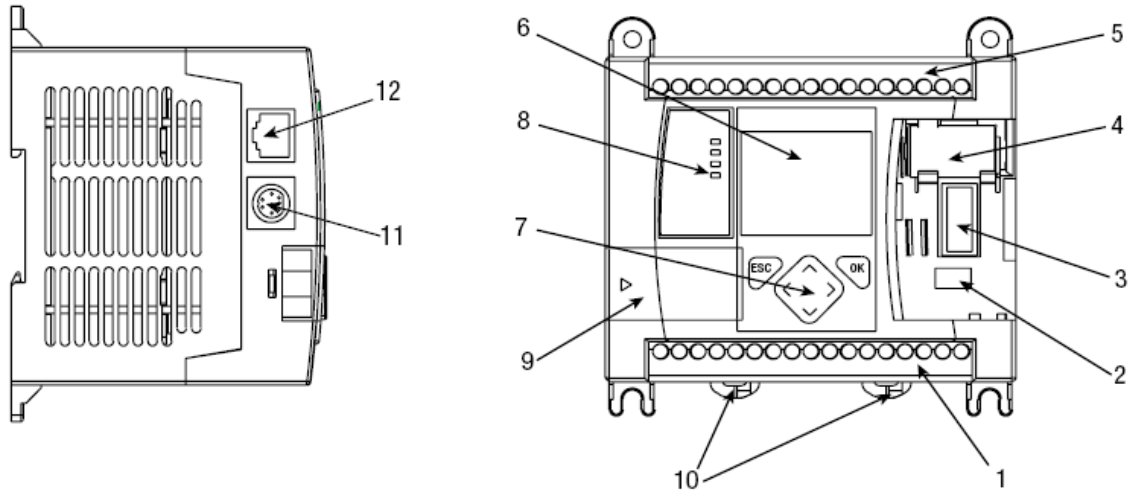


Figura 5.3 Micrologix 1100 de Allen Bradley.

Tabla 5.1 Descripción del controlador Micrologix 1100

Item	Descripción
1	Bloque de terminales de salida
2	Conector de la batería
3	Interfaz del conector de bus a las E/S de expansión
4	Batería
5	Bloque de terminales de entrada
6	Pantalla LCD
7	Teclado de pantalla LCD
8	Indicadores LED de estado
9	Cubierta del puesto del módulo de memoria o módulo de memoria
10	Seguros de riel DIN
11	Puerto de comunicación RS-232/485
12	Puerto Ethernet

5.2.3 Sensor de Temperatura RTD PT100 3 HILOS

Los RTD son sensores de temperatura resistivos. En ellos se aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que,

ante un aumento de temperatura, haya un aumento de la resistencia eléctrica que presentan. [8]

Un tipo de RTD son las Pt100. El sensor consiste en un arrollamiento fino de Platino bobinado entre capas de material aislante. Este sensor es un dispositivo lineal y presenta una resistencia de 100 Ω a 0 $^{\circ}\text{C}$.

5.2.4 Transmisor de temperatura Sitrans Tk, RTD Pt100 4 hilos

No se puede conectar directamente a una entrada analógica del Micrologix 1100 una RTD para medir temperatura. Se necesita un transductor que pase de mV a una señal en mA. Esto pues la entrada analógica se configuró para un lazo de corriente de 4 mA a 20 mA.

En la figura 5.4 se muestra el transductor para formar el lazo de 4 a 20 mA y en la figura 5.5 se observa la configuración utilizada para formar el lazo 4...20 mA con una RTD de 3 hilos. IAX y AI COM corresponden a las entradas analógicas del controlador Micrologix 1100.



Figura 5.4 Sitrans TK-H

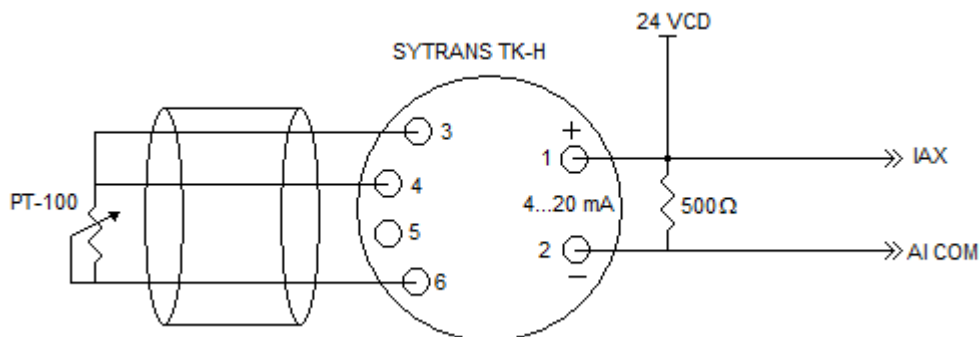


Figura 5.5 Esquema de conexión del Sitrans Tk-H

5.2.5 Sensor Detector de flama

El sensor R2868 es un detector ultravioleta que hace uso del efecto fotoeléctrico de los metales y del efecto de multiplicación del gas. Es sensible a un ancho de banda de entre 185 y 260 nm siendo totalmente insensible a la luz visible. En la figura 5.6 se muestra una fotografía del sensor. Este viene en una tarjeta UV Tron Driving Circuit C3704 Series la cual genera un pulso con salida de colector abierto.



Figura 5.6 Sensor UV-Tron R2868

5.2.6 Válvula solenoide

Para el cerrado y apertura del suministro de gas se utilizó una válvula solenoide ON/OFF marca “electromaz” cuya presión de trabajo es de 0-99,5 PSI. Voltaje: 110 VAC, Estado Inicial: NC Conexión: 3/8" NPT. Temperatura de Operación: -5 a +80°C Medio de Trabajo: Aire, Agua, Aceite, Gas.

Para generar la chispa se utilizó un Generador de ignición de chispa, modelo ZT 820, marca Satronic.

5.2.7 Relé de estado sólido

Las salidas digitales del controlador son de 24VCD, por tanto se requirió de un SSR para activar la válvula solenoide de 110 VAC y otro para activar el generador de chispa. Se utilizó uno marca “electromaz” de 10 A, $V_{in}=3-32VDC$, $V_{out}=24-280VAC$.

5.2.8 Sensores Limit Switch

Para la monitorización del estado de las puertas se plantea utilizar un sensor-limit switch de varilla y resorte ABB, LS25M91B11.



Figura 5.7 Sensor Limit –Switch para puertas.

5.2.9 Alarma sonoras

Para implementar el sistema de alerta sonora se plantea utilizar una sirena de rotación de 110 VAC. Sin embargo como las salidas del PLC son de 24 VCD entonces es necesario agregar un relé de 24VCD de bobina y 10 A.

5.3 Descripción del software

Para concretar el proyecto se utilizó una serie de paquetes de software pertenecientes a Rockwell Automation capaces de programar y configurar algunos de los dispositivos descritos en la sección 5.2 y la comunicación entre ellos.

5.3.1 Lógica de control del Controlador Micrologix 1100

La lógica de control programada en el Micrologix 1100 se realizó en el software RSLogix 500 v 8.10.00 (CPR 9) y se puede dividir en las siguientes secciones:

1. PRINCIPAL (Ladder 2, Establecida por defecto).
2. Actualización de I/O's (Ladder 3).
3. Motor de Alarmas (Ladder 4).
4. Mensajes de alerta Locales (Ladder 6).
5. Mensajes de alerta Remotos (Ladder 7).

6. PID (Ladder 8).
7. Verificación de Gas (Ladder 5).
8. Registro de Eventos (Ladder 10).
9. Proceso de cocción (Ladder 11)

A continuación se procederá a realizar una descripción detallada de cada uno para explicar su estructura y la manera en la que contribuyen al correcto funcionamiento del sistema general.

5.3.1.1 Principal

Es el módulo principal del programa y se encarga de llamar a las demás subrutinas en el orden mostrado anteriormente.

5.3.1.2 Actualización de I/O's

Esta subrutina se encarga de adquirir los datos provenientes de cada uno de los sensores y actualizar el estado de las salidas. Las entradas y salidas del Controlador Micrologix 1100 se muestran a continuación.

Tabla 5.2 Salidas del Controlador Programable Micrologix 1100.

Salida	Nombre	Descripción
O/0	MSB_Estado	Salida SSR, para bombilla más significativa del estado del proceso de cocción.
O/1	LSB_Estado	Salida SSR, para bombilla menos significativa del estado del proceso de cocción.
O/2	Señal del Regulador	Salida Digital, Control de válvula solenoide de apertura del gas
O/3	Chispa	Salida Digital, Control SSR de encendido de la chispa
O/4	Sirena 1	Salida Digital, Activación de alarma sonora S1
O/5	Sirena 2	Salida Digital, Activación de alarma sonora S2

Tabla 5.3 Entradas del Controlador Programable Micrologix 1100.

Entrada	Nombre	Descripción
I/0	Temperatura Cuarto Frío 1	Entrada Digital, Termostato en Cuarto Frio 1.
I/1	Temperatura Cuarto Frío 2	Entrada Digital, Termostato en Cuarto Frio 2.
I/2	Temperatura Congelador	Entrada Digital, Termostato en Congelador.
I/3	Temperatura Tanque 2	Entrada Digital, Termostato mide temperatura del Agua en Tanque 2.
I/4	Sensor Limit Swicth Puerta 1	Entrada Digital, Detecta puerta abierta.
I/5	Sensor Limit Swicth Puerta 2	Entrada Digital, Detecta puerta abierta.
I/6	Sensor Limit Swicth Puerta 3	Entrada Digital, Detecta puerta abierta.
I/7	Sensor Limit Swicth Puerta 4	Entrada Digital, Detecta puerta abierta.
I/8	Reconocimiento de Sirenas	Entrada Digital, Apaga alarmas sonoras.
I/9	Sensor de Flama	Entrada Digital, Reconoce presencia de flama
IV1(+)	Temperatura Marmita 1	Entrada Analógica, obtiene temperatura del agua de marmita 1.
IV2(+)	Temperatura Producto	Entrada Analógica, obtiene temperatura interna del producto.

5.3.1.3 Motor de alarmas

En esta subrutina está programada la lógica de activación de las dos alarmas sonoras instaladas para alertar a los operarios que existe algún parámetro fuera de los rangos establecidos como seguros. En los diagramas de flujo de las Figura 5.8, 5.9 y 5.10 se visualizan la lógica de activación de cada sirena.

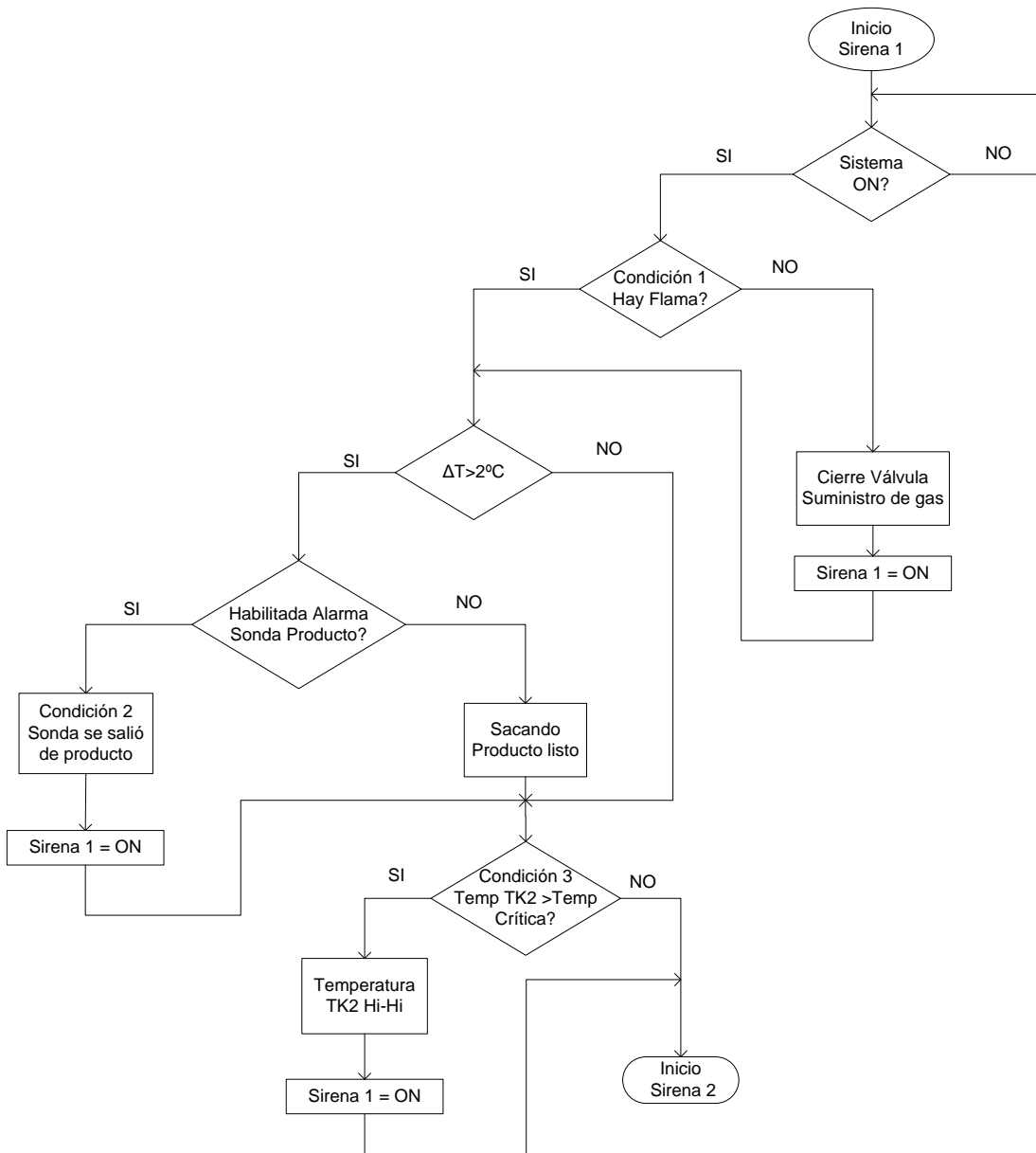


Figura 5.8 Diagrama de flujo de funcionamiento del motor de alarmas para Sirena 1

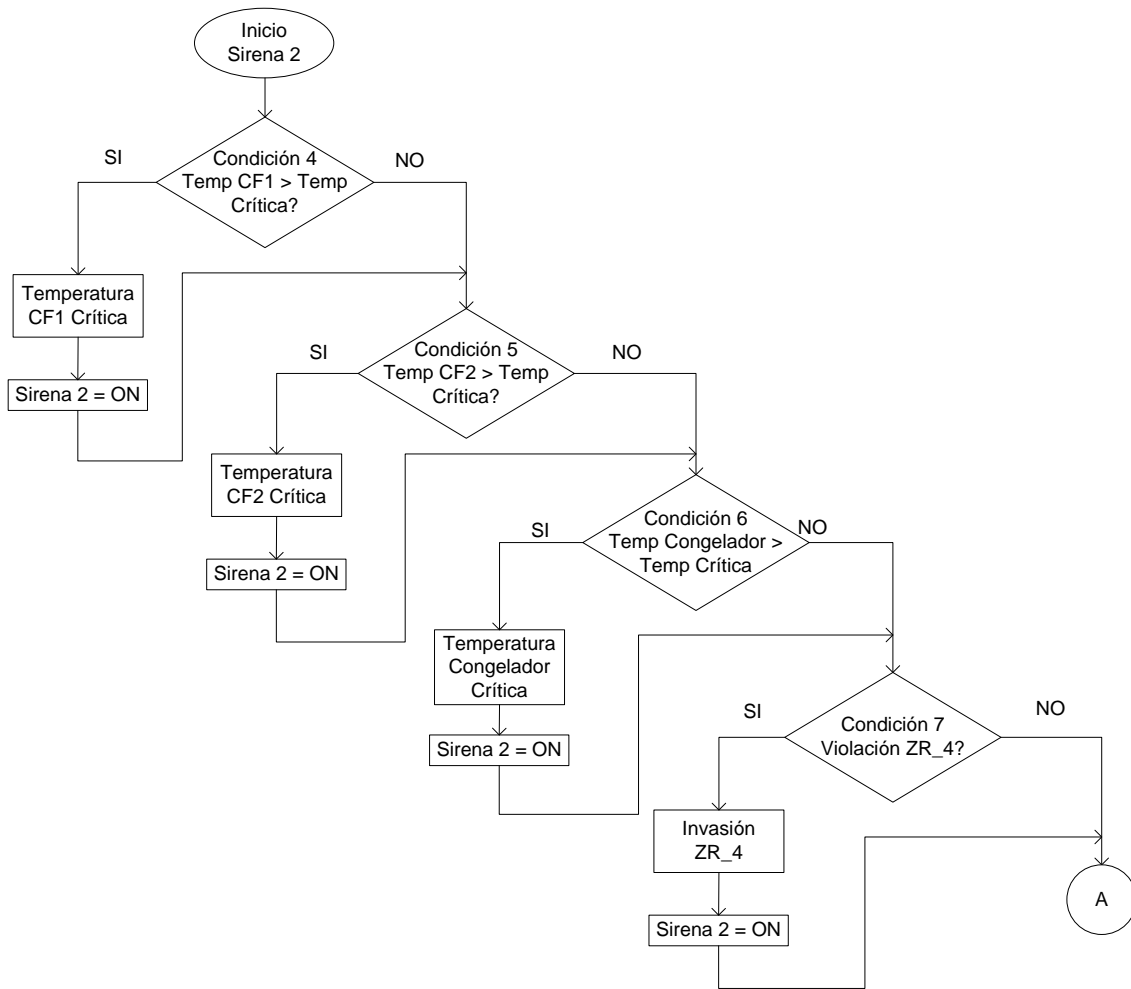


Figura 5.9 Diagrama de flujo de funcionamiento del motor de alarmas para sirena 2

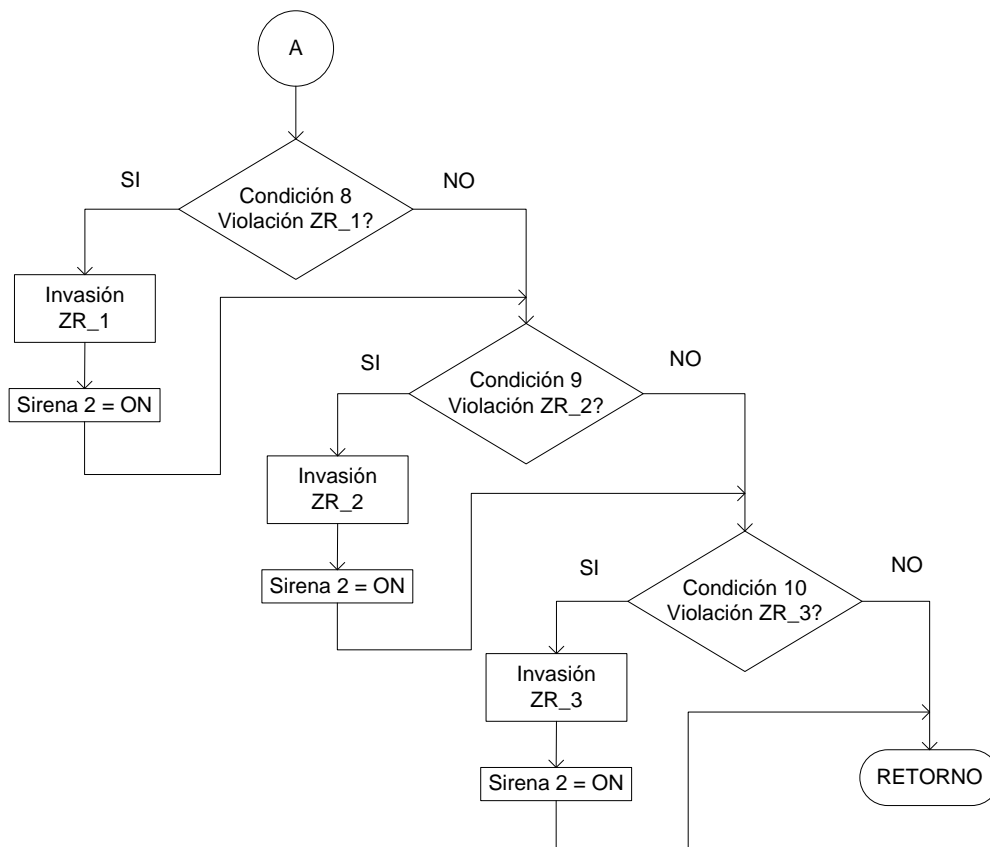


Figura 5.10 Diagrama de flujo de funcionamiento del motor de alarmas para sirena 2 (continuación).

En la Figura 5.8 es posible observar que la Sirena 1 puede ser activada por tres condiciones, estas son: ¿Hay Flama?, ¿Sonda fuera del producto? y ¿Temperatura de agua de marmita 2 es mayor a la crítica?

Como ya se ha mencionado anteriormente, una sonda de temperatura se introduce en el interior de los embutidos para saber cuando alcanza el punto de cocción deseado. Pero puede presentarse el problema de que la sonda se salga accidentalmente del producto lo que haría que el proceso de cocción no se completara correctamente pues el controlador PID seguiría funcionando hasta alcanzar la consigna, sin embargo el producto no llegaría a cocinarse bien, pues en el momento que la sonda se salió del producto ésta empezó a medir la temperatura del agua dentro de la marmita 1 y hay que recordar que el agua

dentro de la marmita debe alcanzar los 80°C y la del producto solo alcanza los 72°C; de manera que el sistema avisaría mucho antes de lo debido que el proceso de cocción terminó no lográndose dar la durabilidad y calidad debida del producto. Por lo anterior era necesario que el sistema fuera capaz de detectar cuando la sonda de temperatura se salía del producto.

Como se muestra en la Figura 6.3, la curva de temperatura del sistema controlado con el regulador PID necesita de algunas horas para alcanzar la estabilidad del sistema, es decir, pasar de la temperatura ambiente a 80°C. De manera que un cambio de temperatura de 2°C solo puede darse por dos condiciones: Se salió la sonda del producto accidentalmente o alguien la sacó del embutido. Para diferenciar entre las dos condiciones y evitar que la alarma sonora se active cada vez que el operador saque el producto, se agregó al diseño una señal digital que deshabilite la condición que identifica cuando la sonda sale del interior del embutido. De esta manera el operador puede desactivar la alarma para sacar el producto y volverla activar cuando introduce un nuevo lote de producto.

En la Figura 5.9 se muestra la serie de condiciones que activan la sirena #2, las cuales ya fueron citadas anteriormente.

5.3.1.4 Mensajes de Alerta Locales

En las figuras 5.11 y 5.12 se muestra la lógica conformada en esta subrutina. En realidad es sencillo, cada vez que se dé la activación de alguna condición de alerta, se va a mostrar en la pantalla del LCD del Micrologix 1100.

Ahora bien, en el Software de programación RSLogix500 el código se escribe en estructura de escalera y en el caso en que dos o más condiciones toman acción sobre un mismo registro de memoria, entonces la prioridad la tiene la condición

que este escrita en la parte baja de la escalera. Es decir, el resultado que se va a observar en dicho registro es el asignado por la condición que se encuentre escrita de última. Esta característica permitió asignar prioridad a las diferentes alertas, de manera que si hay varias activadas al mismo tiempo va a observarse en la pantalla solo la de mayor prioridad y si esta se apaga y las otras aún están activas las demás, entonces se muestra la siguiente de mayor prioridad y así sucesivamente.

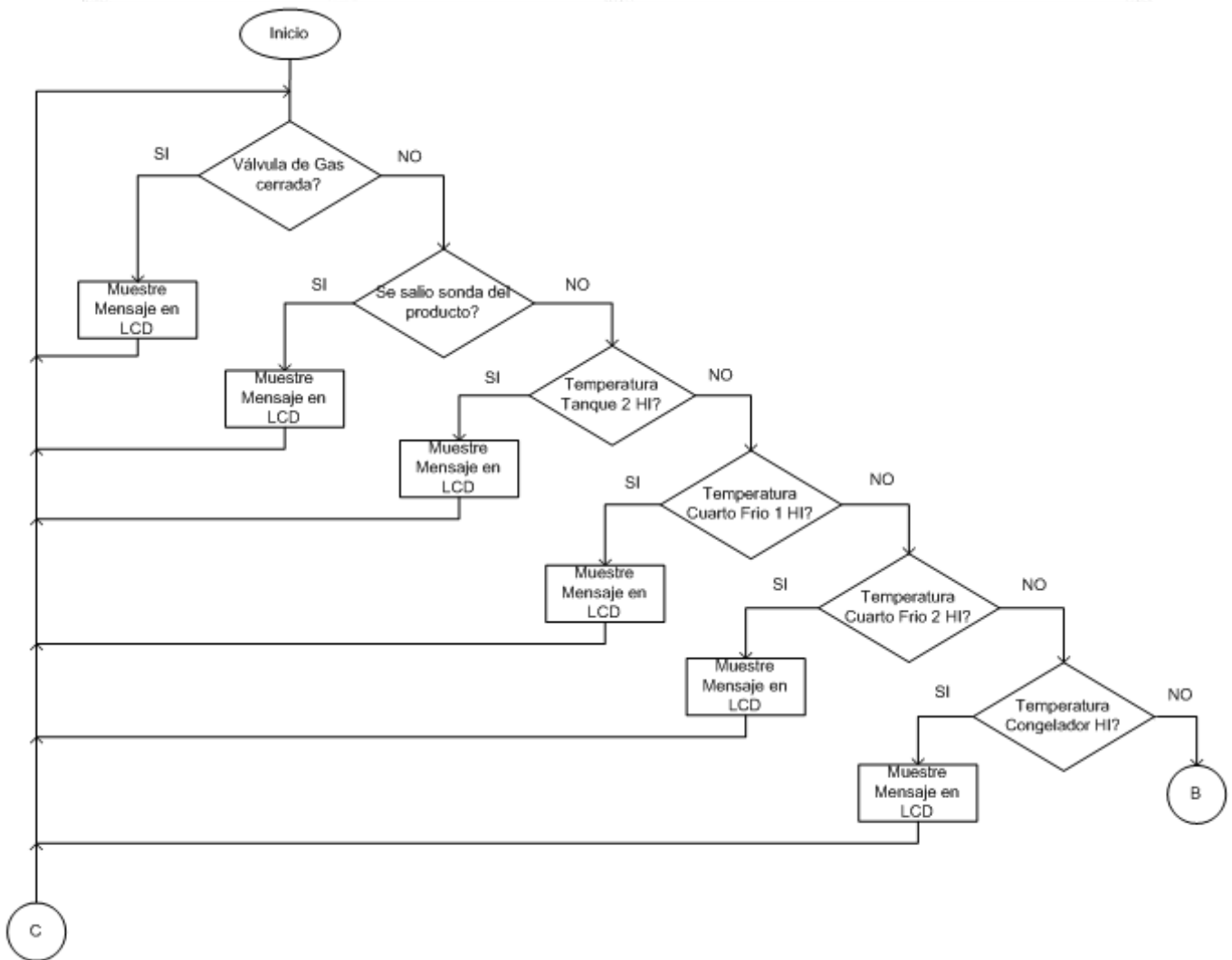


Figura 5.11 Diagrama de flujo del orden de prioridad de las alertas locales.

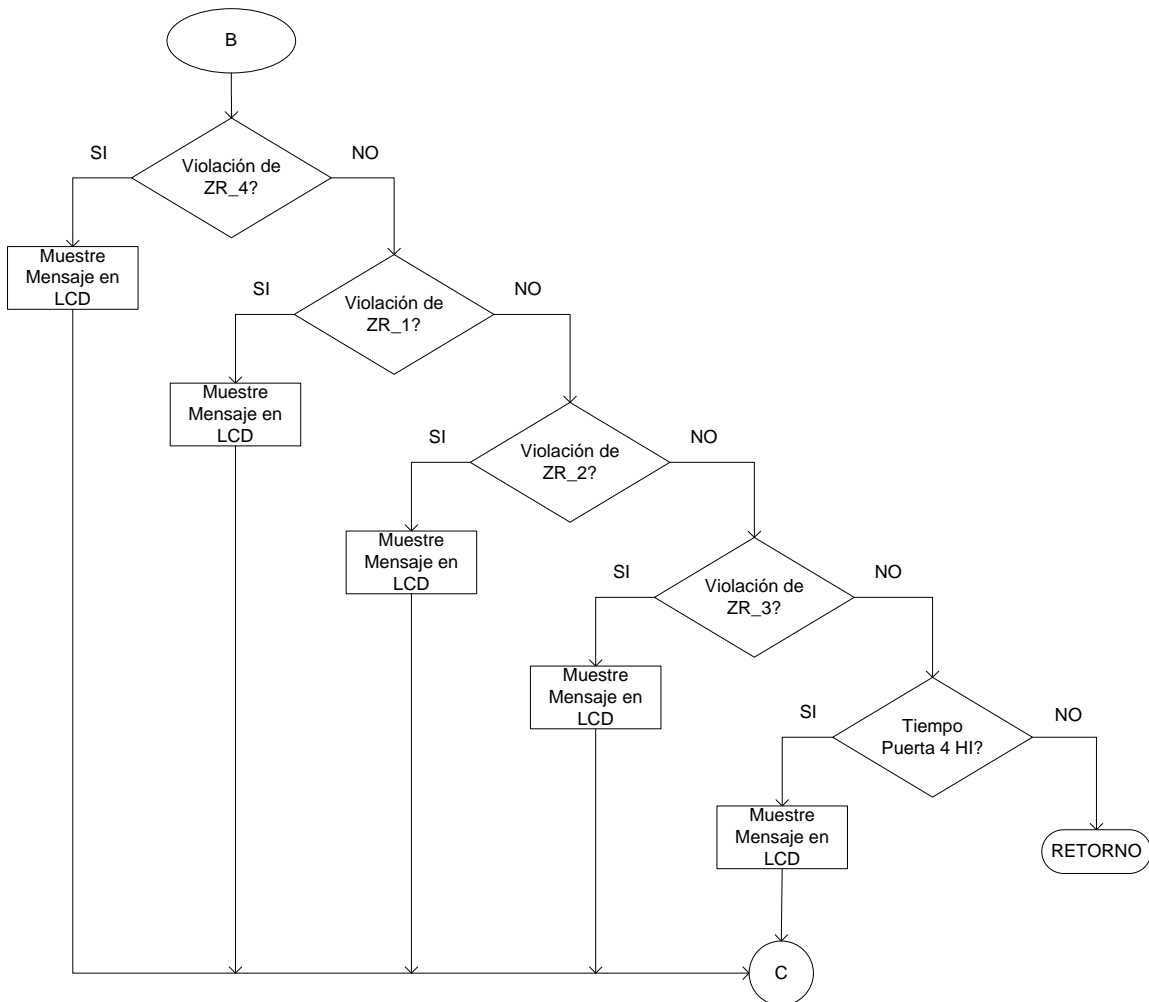


Figura 5.12 Diagrama de flujo del orden de prioridad de las alertas locales (Continuación).

5.3.1.5 Mensajes de Alerta Remotos

A diferencia de la subrutina de Mensajes de Alerta Locales, la de Mensajes de Alertas Remotos no posee una estructura de prioridades. Esta manda una sola vez cualquier mensaje de alerta en el momento justo en que se da la falla.

Dichos mensajes de alerta se dan cuando en la planta se presenta una alerta y con el transcurrir del tiempo el operador aun no ha atendido la misma. Es decir funcionan como condiciones críticas y éstas son enviadas a un Beeper manejado por un supervisor. En la Tabla 5.4 se nombran todas las condiciones de activación de las alertas críticas.

Tabla 5.4 Condiciones de activación de alertas críticas

Condición de Activación	Mensaje
Temperatura Cuarto Frío 1 > 8 °C	Temperatura Cuarto Frío 1: HI-HI
Temperatura Cuarto Frío 2 > -2 °C	Temperatura Cuarto Frío 2: HI-HI
Temperatura Congelador > 12 °C	Temperatura Congelador: HI-HI
Temperatura del Agua en Tanque 2 > 40 °C	Temperatura del Agua en Tanque 2: HI-HI
Tiempo Puerta Abierta > 3 minutos	Tiempo Puerta Abierta: HI-HI
Violación de ZR_1: Cuarto Frío 1	Violación de Zona Restringida 1
Violación de ZR_2: Cuarto Frío 2	Violación de Zona Restringida 2
Violación de ZR_3: Congelador	Violación de Zona Restringida 3
Violación de ZR_4: Puerta introducción de Carnes	Violación de Zona Restringida 4

La configuración realizada al Micrologix 1100 para poder transmitir los mensajes a un beeper fueron:

- Configuración del Canal 1 del Controlador programable, que corresponde al puerto Ethernet:
 - a. Dirección IP asignada al Micrologix dentro de la empresa
 - b. Máscara de la Subnet en el que está el Micrologix.
 - c. Dirección IP del Gateway que el Micrologix utiliza para salir.
 - d. Habilitación del servidor HTTP.
 - e. Habilitación del SMTP Client.
- Configuración del SMTP Client:

- a. Dirección IP del Servidor SMTP.
- b. Dirección del Email que va a ser reconocida como origen.
- c. Dirección destino.

5.3.1.6 Regulador PID

En esta subrutina se definió la lógica necesaria para realizar, por medio del compensador de adelanto/atraso y un Predictor de Smith, el control de temperatura del agua de la marmita 1.

La ecuación de diferencias mostrada en la sección 6.6 es la función de transferencia de regulador y el Predictor de Smith discretizadas, es decir, que la salida del regulador está en función de la diferencia entre el valor actual de temperatura y el valor deseado, los estados anteriores de dicha diferencia y los estados anteriores de la salida. Y en donde los estados anteriores de T corresponden a $(T-1)$, $(T-2)$, $(T-3)$, $(T-4)$...

Por lo general la señal de control que sale del regulador se utiliza de dos maneras, la primera consiste en una salida analógica en la que se regula la amplitud de la señal de control en un porcentaje de 0 a 100%. La segunda es una salida digital que el PID activa/desactiva para generar una ventana de tiempo, de modo que el PID controla el porcentaje de la ventana de tiempo que se mantiene encendido o activado. Este porcentaje abarca también del 0% al 100% de la ventana.

La salida del regulador implementado es proporcional, lo que quiere decir que la señal de control va a variar de 0 a 100% dentro del rango de operación de 0-1023 según lo necesite la planta para alcanzar la respuesta deseada. La resolución del convertidor analógico/digital del PLC es de 10 bits y por lo tanto

el rango del valor de $m(k)$ varía entre 0 y 1023. Para evitar que se dé la saturación se implementó en el software un saturador que impida que el valor de $m(k)$ fluctúe del valor permitido es decir 0-1023. Así si el valor de $m(k)$ es mayor de 1023, lo almacena como 1023. O si es menor que 0 entonces lo almacena como 0.

El actuador utilizado, una válvula solenoide NC, no dispone de una apertura proporcional para responder a la variación de la señal $m(k)$ de 0-1023, sino de una ON-OFF (Abierta-Cerrado) y por lo tanto fue necesario implementar un convertidor que generara una ventana de tiempo a partir de los valores de $m(k)$.

Así por ejemplo, el periodo utilizado en el desarrollo del proyecto fue de 110 segundos. De modo que si el PID dice que la señal de control debe estar al 60 % entonces la salida digital de 24 VDC va a estar 66 segundos activa y 44 segundos apagada antes de iniciar el siguiente ciclo.

5.3.1.7 Verificación de Gas

En la Figura 5.13 se muestra la lógica utilizada para verificar si la llama se ha extinguido o nunca se encendió. Brevemente se puede decir que habilita la salida del regulador y se dispara la señal para activar el generador de chispa durante 5 segundos. Así si $m(k) > 47$, es decir 5 segundos y el sensor de flama nunca detectó alguna llama entonces se deshabilita el regulador, se cierra la válvula de gas y se activa la alerta para que el operador revise si hay gas o hay alguna falla física en el suministro del gas. Por el contrario, si durante los 5 segundos se detectó la presencia de una flama, entonces el regulador continua con la válvula abierta hasta que el valor de $m(k)$ diga cuando en la ventana de 110 segundos debe cerrar la válvula.

Una vez que finaliza el periodo de acción del regulador, es decir los 110 segundos, entonces se vuelve a iniciar el ciclo de verificación para determinar si aún hay llama mientras inicia la acción del regulador para el nuevo ciclo.

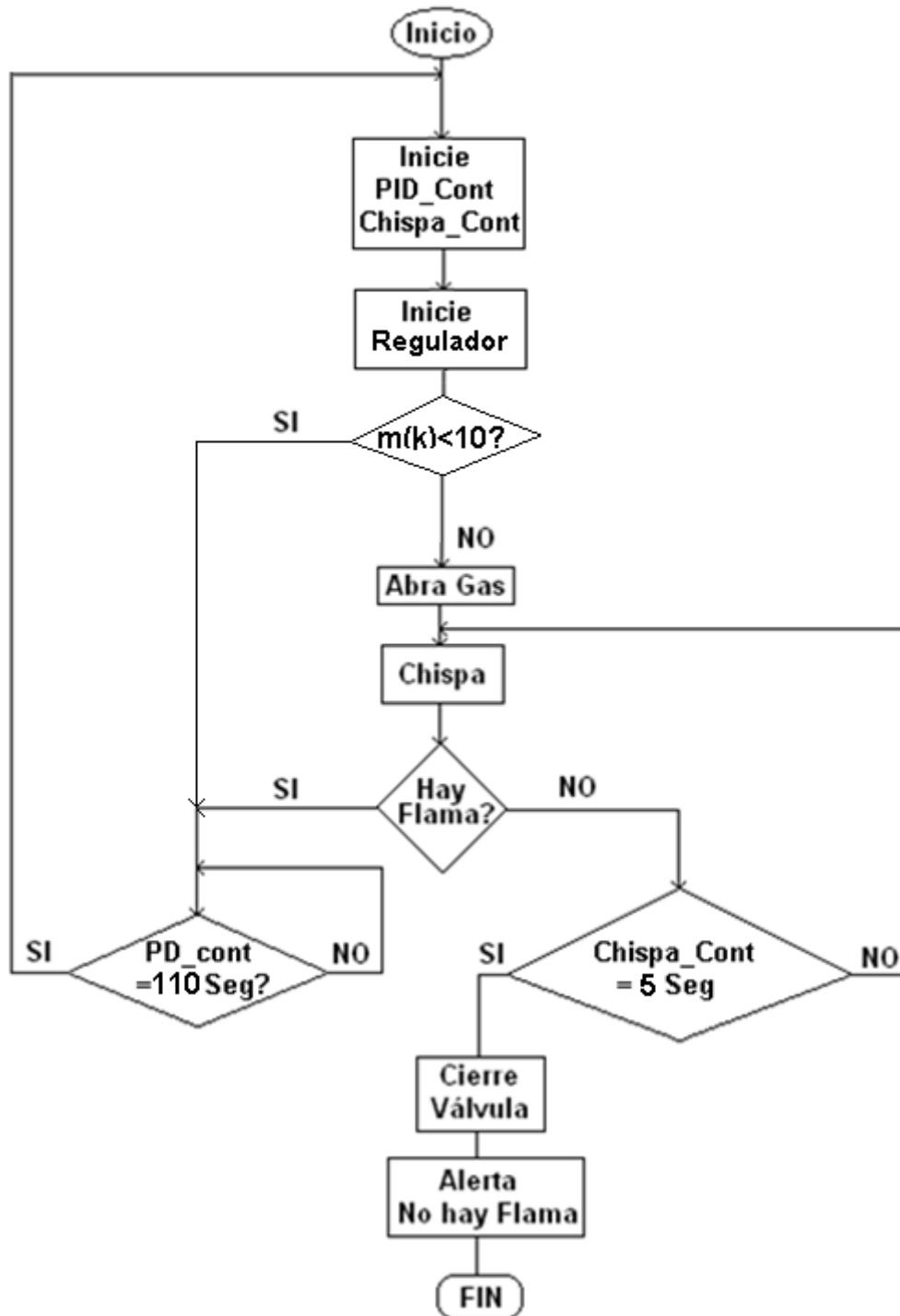


Figura 5.13 Lógica de Verificación de Flama

5.3.1.8 Registro de Eventos

En la Figura 5.14 se muestra la lógica diseñada para almacenar la cantidad de tiempo que se abre la puerta #1, Puerta del Cuarto Frío 1, y el tiempo que estuvo abierta cada vez. La lógica para las otras puertas es la misma y esta subrutina las ejecuta en paralelo.

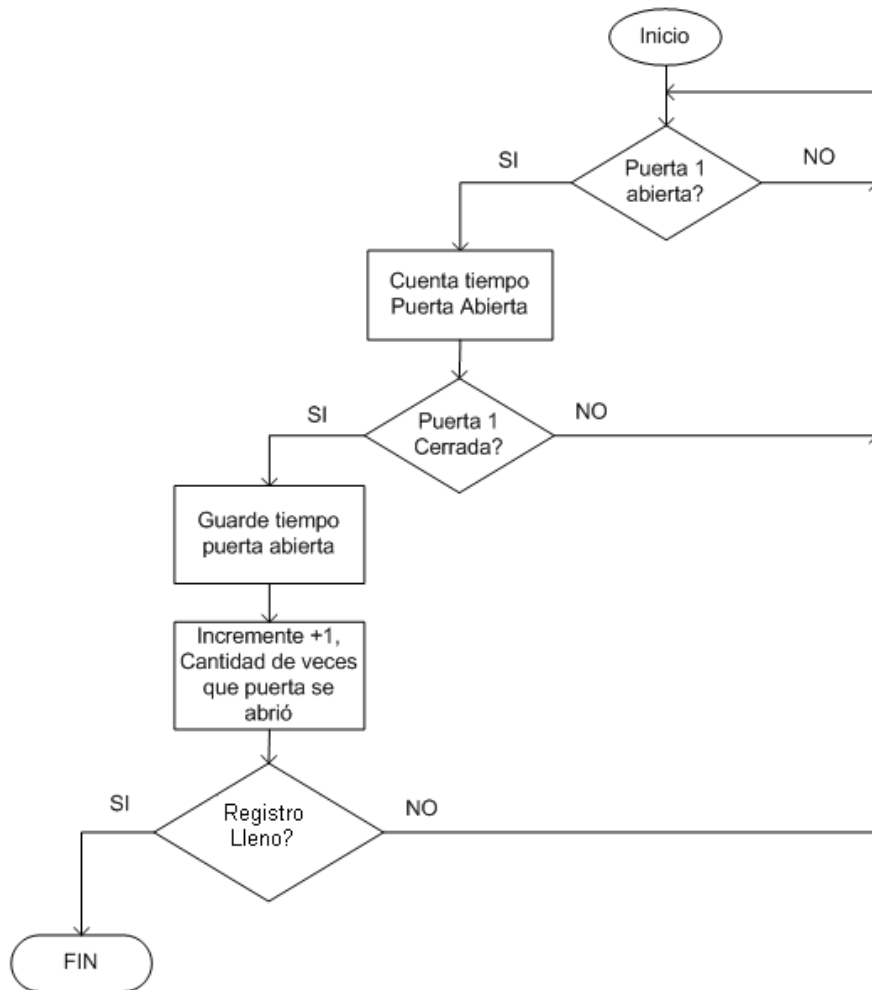


Figura 5.14 Lógica de registro de eventos involucrados con las puertas

Además se almacena el tiempo que se tardan los operadores en sacar un lote de producto que esté listo.

5.3.1.9 Proceso de Cocción de los embutidos

El proceso de cocción de los embutidos es un proceso que ha sido desarrollado por expertos en tecnología de alimentos y que ya ha sido probado en numerosas situaciones. De este proceso en particular es que depende directamente la durabilidad y consistencia de los embutidos; de ahí que sea de suma importancia realizarlo de una manera rigurosa.

La empresa Procesadora de Carnes y Embutidos ha acogido estos procedimientos y los han adaptados a sus necesidades, de modo que ya tienen establecido que algunos valores de parámetros deben ser siempre los mismos para garantizar la calidad de su producto. Los principales son los siguientes: la temperatura interna del producto durante el tiempo de cocción debe llegar a los 72 °C y una vez que es alcanzada esta temperatura, se deben esperar un periodo de 10 minutos antes de sacarlo de la marmita 1 para garantizar el proceso de sanitización. Además una vez que se sacan de la marmita 1 se debe realizar un choque térmico para darle la consistencia deseada a los embutidos. Está establecido que la temperatura del agua con la que se produce el choque térmico no puede ser mayor a 40 °C.

En la Tabla 5.5 se muestra la cantidad de estados en las que se dividió el proceso de cocción de los embutidos.

Tabla 5.5 Estados del Proceso de cocción de embutidos

Estado	Bit MSB	Bit LSB	Descripción
0	0	0	Apagado: Proceso no ha iniciado
1	0	1	Calentando el agua de la marmita 1
2	1	0	Temperatura del agua lista; aumentando Temperatura del producto
3	1	1	Ciclo de espera de 10 minutos
4	0	0	Bits Alternando su estado (Parpadeando)
	1	1	Indica que el proceso de cocción terminó

En la Figura 5.15 se muestra el proceso de cocción completo, el cual a grandes rasgos se cita a continuación: El estado 1 corresponde al calentamiento del agua de la marmita hasta 80 °C. Una vez que la temperatura del agua ha alcanzado los 80 °C y la mezcla haya sido empacada en tripas naturales o sintéticas se introducen en la marmita y se mide la temperatura interna del producto hasta que alcance 72° C en su interior, esto corresponde al estado 2. Entonces se inicia el estado 3 el cual consta de un periodo de 10 minutos en el que se cocina a los embutidos a 72 °C. Cuando termina el periodo de 10 minutos se pasa al estado 4 que corresponde a la alerta que indica que finalizó el proceso de cocción.

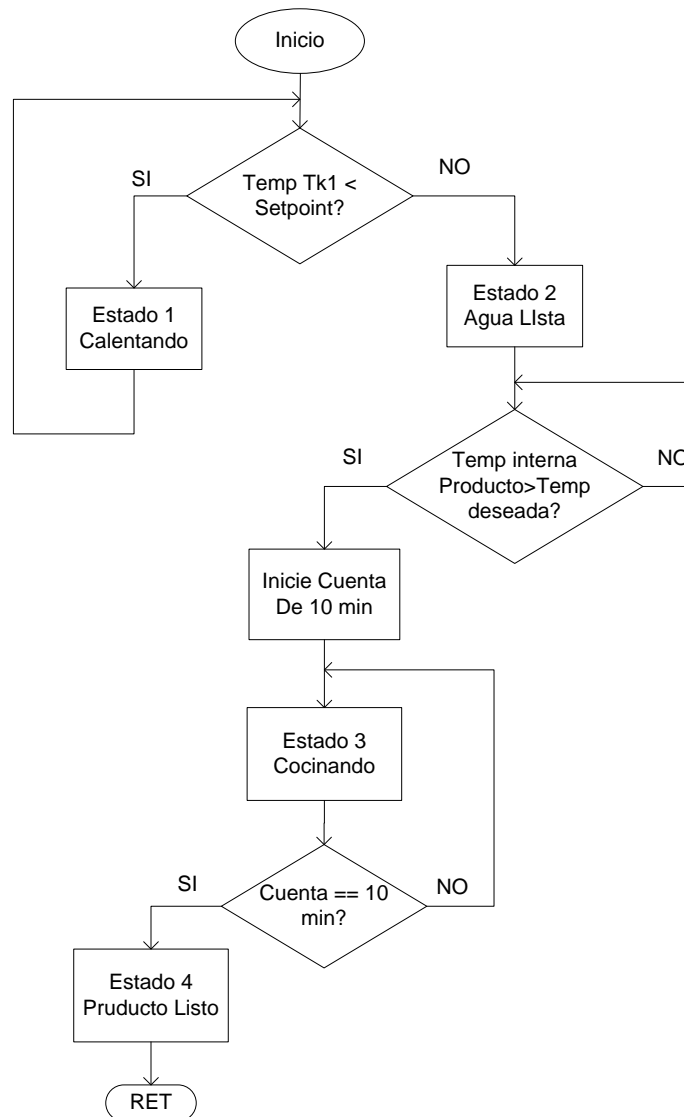


Figura 5.15 Diagrama de flujo del proceso de cocción

Capítulo 6: Análisis de Resultados

A continuación se muestra la interfaz gráfica desarrollada para ver el sistema de control. Además los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a la planta. Por otro lado, se presenta el análisis realizado obtener el modelo de la planta a partir de la respuesta a lazo abierto de la misma.

6.1 Comunicación Controlador Micrologix 1100 – PC – Operador

Para establecer la comunicación entre el controlador programable y la PC en la que se va a visualizar el software de monitorización y control, se utilizó RSLinx y se programó la interfaz gráfica para los usuarios por medio del RsView32. En las figuras 6.1 y 6.1 se muestra la interfaz gráfica diseñada para la solución del problema planteado.

En la zona izquierda de la interfaz principal en la Figura 6.1 se muestra la emulación del panel de control del que dispone el operador. Esta tiene 4 luces, dos de ellas se encienden en el momento en que se activan las dos alarmas sonoras y las otras dos se encienden y apagan según sea el estado que se encuentre el proceso de cocción de los embutidos. En la Tabla 5.5 de la sección 5.3.1.9 se muestra la clasificación de cada estado.

En la parte inferior izquierda se visualiza el estado de las puertas, cuando las luces están en rojo indica que las puertas están cerradas y si se vuelven verdes entonces que están abiertas. Por otro lado, si los nombres asignados a cada luz se vuelven de color rojo, indica que esa puerta se ha vuelto zona restringida y por lo tanto no debe abrirse. Si se abre se activa una alerta. Además la interfaz principal permite observar en tiempo real las curvas de calentamiento del agua de la marmita 1 y la de la temperatura interna del producto.

Un procedimiento que se tiende a seguir en un sistema de alertas es el de colocar un botón para reconocer las alertas; éste solo apaga el sonido pero la

alerta sigue activa hasta que la condición que la activó sea vuelta a la normalidad.

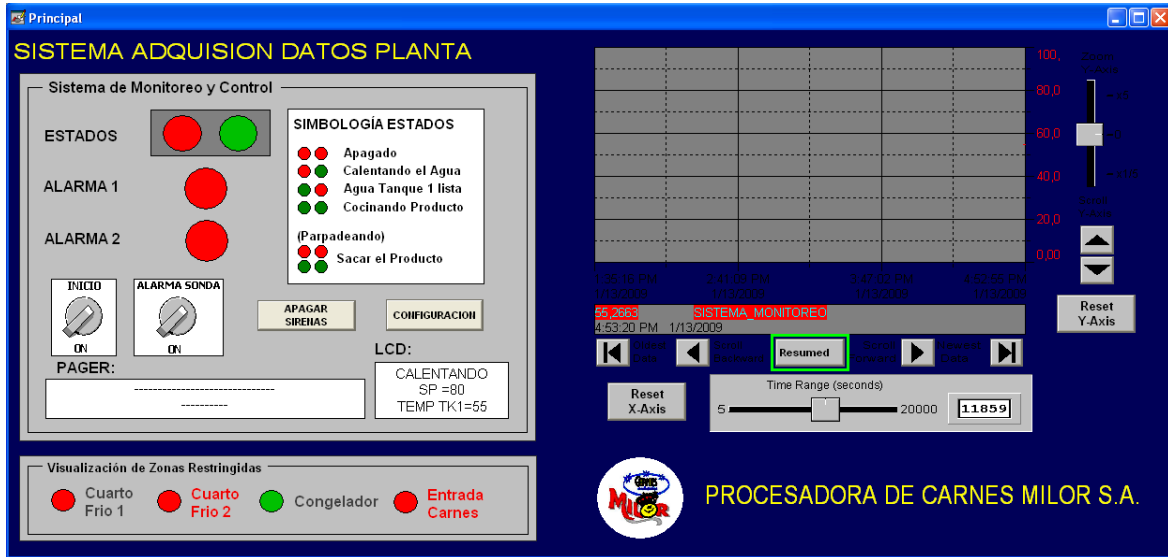


Figura 6.1 Interfaz principal del sistema de monitorización

En la Figura 6.2 se muestra la interfaz gráfica con la que es posible configurar todos los parámetros inmersos en el proceso de producción de embutidos. A continuación se cita y explica que función tiene cada bloque de parámetros de configuración:

- Los límites de activación de alertas locales corresponden a los valores de temperatura o tiempo que solo van a activar las alertas y por ende a las alarmas sonoras.
- Los límites de activación de alertas remotas corresponden a valores críticos de temperatura o tiempo que el sistema va a soportar antes de dar notificación a los administradores de la planta por medio de un mensaje a sus beepers. Estos se utilizan para notificar a los administradores que un lote de producto está en peligro de perderse pues una o varias alertas no han sido atendidas probablemente por negligencia de los operadores.

- Los parámetros de configuración que tiene que ver con la marmita 1 son el valor (SetPoint) que debe alcanzar la temperatura del agua, el valor de temperatura interna que debe alcanzar el producto que se encuentre en la marmita y el tiempo de cocinado que deben estar los embutidos una vez que se ha alcanzado la temperatura interna deseada.

- Además se puede establecer la temperatura máxima que puede alcanzar el tanque en el que se da el choque térmico antes de que se active una alerta que indique que es necesario enfriar el agua del tanque.

- Por último, es posible restringir el acceso de las puertas de los cuartos fríos para saber si alguna persona no autorizada accede las cámaras cuando no debe.



Figura 6.2 Interfaz de configuración

6.2 Respuesta a lazo abierto de la planta

Para determinar la curva de calentamiento de la planta se aplicó el escalón máximo de temperatura que podía dar el actuador, es decir se abrió la boquilla del gas para que este pudiera salir.

Por restricciones en el presupuesto no fue posible adquirir algún instrumento para determinar la magnitud del escalón aplicado, así que fue necesario recurrir a un análisis matemático para aproximar el valor del escalón aplicado. Dicho análisis se muestra en el apéndice 9.2.

En la figura 6.3 se muestra la respuesta experimental de la planta cuando se aplicaba el escalón máximo de temperatura. Para la obtención de la misma se utilizó una PC, el controlador Micrologix 1100 y un sensor de temperatura RTD PT100 de 3 Hilos. El Micrologix tomaba datos de temperatura cada 10 seg y los almacenaba en la PC en una tabla autogenerada en Microsoft Excel.

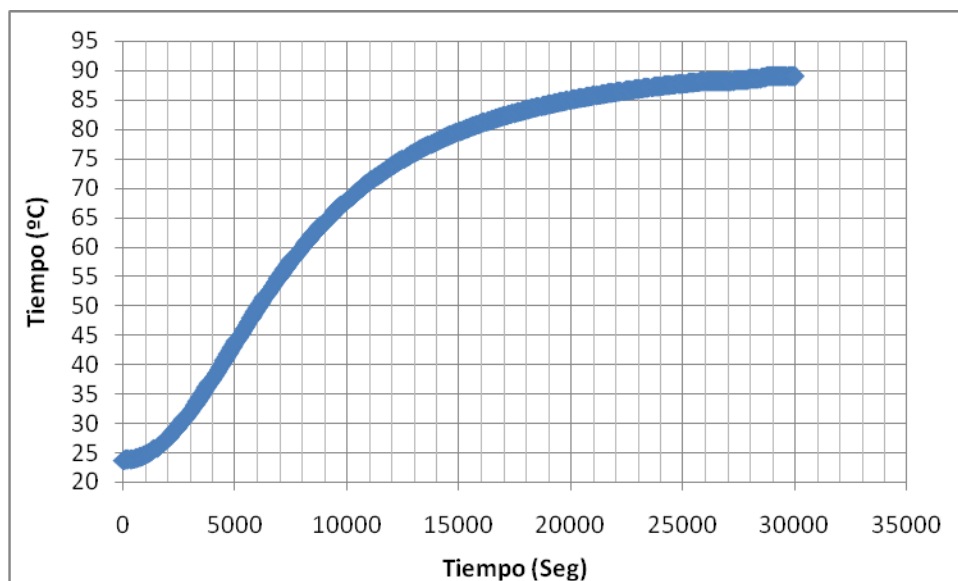


Figura 6.3 Respuesta a lazo abierto experimental de la planta debida al escalón máximo de temperatura.

6.3 Modelado de la Planta

Para calcular la ecuación que modelara el comportamiento real se utilizaron dos métodos. A continuación se presentan los datos calculados.

Método Estocástico por estimación de mínimos cuadrados

Los fundamentos teóricos de este método están explicados en la sección 3.3.2 pero como requiere un análisis estadístico de las muestras tomadas de la entrada y la salida, se utilizó como complemento una función llamada stochastic2 desarrollada en Matlab.[13]

La función stochastic2 permite estimar los parámetros para una estructura del modelo de orden n. Pero como se mencionó anteriormente, la curva características de un calentamiento de agua se puede aproximar por medio de una ecuación de primer orden con un tiempo muerto. De esta forma solo se estimaron los parámetros para una ecuación de orden 1. Los resultados de aplicar dicho método se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.1 Modelo de primer orden por método estocástico

matriz varianza-covarianza		coeficientes estimados +/- su incertidumbre		G(z)
1.418e-007	-1.0163e-005	990.9748e-003	741.3518e-006	0.89198 T=110 Seg
-1.0163e-005	0.00078376	891.9778e-003	55.1158e-003	----- z ¹⁰ (z-0.991)

Al aplicar un escalón a la función de transferencia obtenida por medio del método estocástico por mínimos cuadrados se obtuvo la respuesta en lazo abierto de la función que se observa en la figura 6.4. Al compararla con la respuesta a lazo abierto real (Figura 6.3) es posible apreciar cierta similitud pues, con ésta, se modela de manera muy aproximada el tiempo muerto y el tiempo que tarda en alcanzar los 80 °C, sin embargo cuando la curva tiende a 30000 segundos ella no alcanza aun un valor estable como si sucedió en la real.

Por tanto en busca de una mejor aproximación se procedió a modelar el comportamiento de la curva de calentamiento por el método gráfico de respuesta ante escalón.

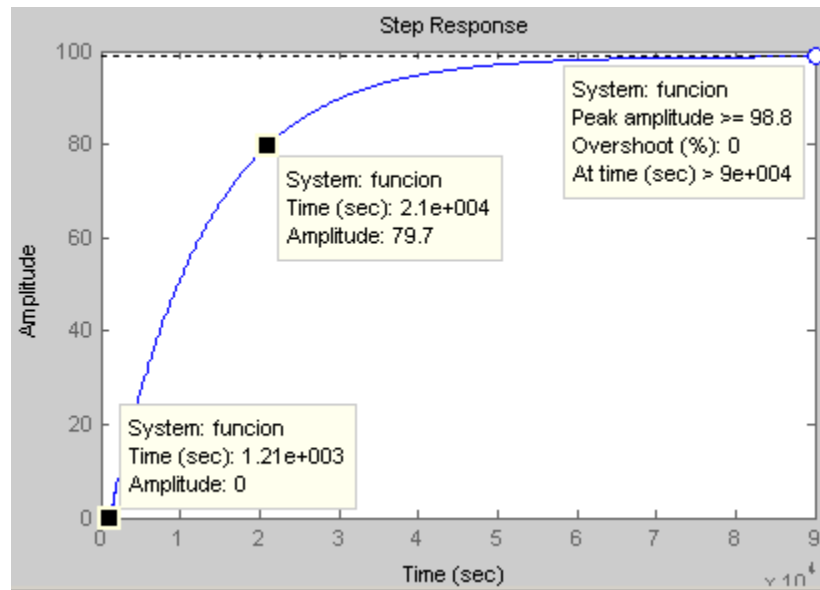


Figura 6.4 Respuesta a lazo abierto de la función de transferencia obtenida por medio del método estocástico basado en la medición de mínimos cuadrados

Método Gráfico de respuesta ante un escalón

A partir del procedimiento descrito en la sección 3.3.1 y la gráfica de la curva a lazo abierto de la planta en la figura 6.3 se tiene

$$\tau = 2 * (9167 - 6000) = 6334 \text{ seg}$$

$$a = \frac{1}{\tau} = 1.57878 \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$$

$$k = \frac{a * \Delta T}{A} = \frac{1.57878 \times 10^{-4} \text{ seg}^{-1} * 65.4308^\circ \text{C}}{914.972} = 11.2900546 \times 10^{-6}$$

$$td = t_{63\%} - (\tau - ti) = 9167 - (6334 - 800) = 2033 \text{ seg}$$

Así la función obtenida, por medio de este método, que describe la curva de calentamiento del agua de la marmita 1 a lazo abierto es:

$$G(s) = \frac{11,29 \times 10^{-6} e^{-2033s}}{s + 1.57878 \times 10^{-4}} \quad (\text{Ec. 81})$$

Discretizando por medio de una la función $cd2(G(s),T)$ en Matlab para un periodo de muestreo de 110 Segundos, se obtiene la función en el dominio discreto.

$$G(z) = \frac{0,001231}{z - 0.9828} \cdot z^{-19} \quad (\text{Ec. 82})$$

Así, aplicando un escalón unitario a la función de transferencia de la planta discretizada (Ec. 82) se obtuvo la respuesta simulada de la curva de calentamiento a lazo abierto obtenida por medio del método gráfico. Esta curva se presenta en la figura 6.5 y la función utilizada en Matlab se muestra en la Ec. 83.

$$\text{step}(G(z)*914.972+23.7) \quad (\text{Ec. 83})$$

Al comparar la curva del modelo la planta por medio del método gráfico con la curva de la planta a lazo abierto (figura 6.3) es posible observar que dicho método nos da una aproximación aceptable y que es más aproximado que el modelo obtenido por medio del método estocástico. Por lo tanto se utilizó como la función que describe a la planta en lazo abierto.

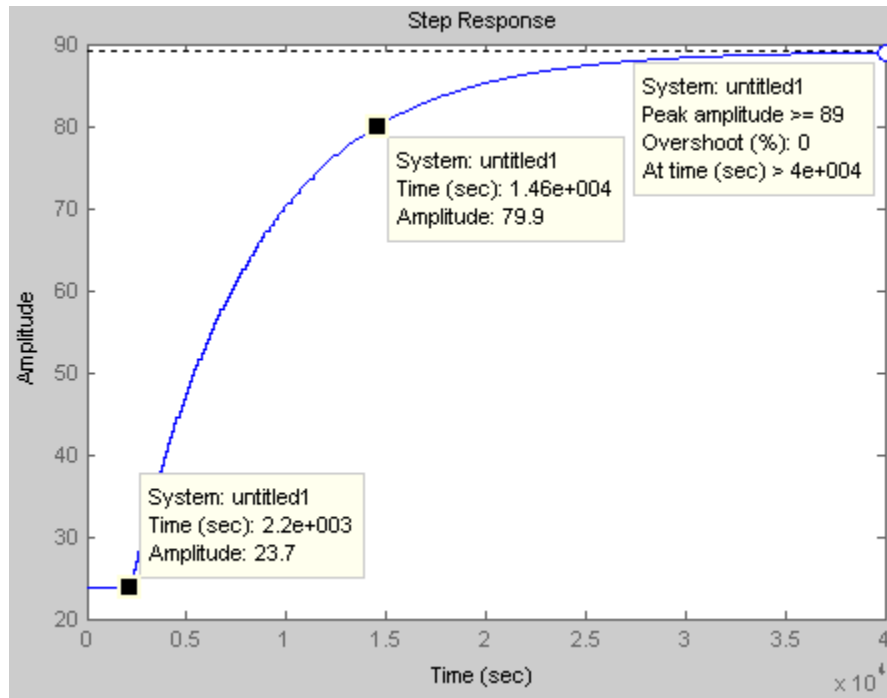


Figura 6.5 Respuesta a lazo abierto de la función de transferencia obtenida por medio del método gráfico

6.4 Cálculo del Regulador

Para realizar el cálculo del regulador se utilizaron dos métodos diferentes y por medio de simulaciones del sistema se verificó cual podía dar un mejor rendimiento. Dichos métodos se detallan a continuación.

Método de Ziegler-Nichols para regulador PID

Debido a que la curva de calentamiento presenta una forma de "S" es posible utilizar el método de Ziegler-Nichols para determinar un controlador PID. Así utilizando el procedimiento explicado en la sección 3.3.3 se obtuvieron los siguientes valores.

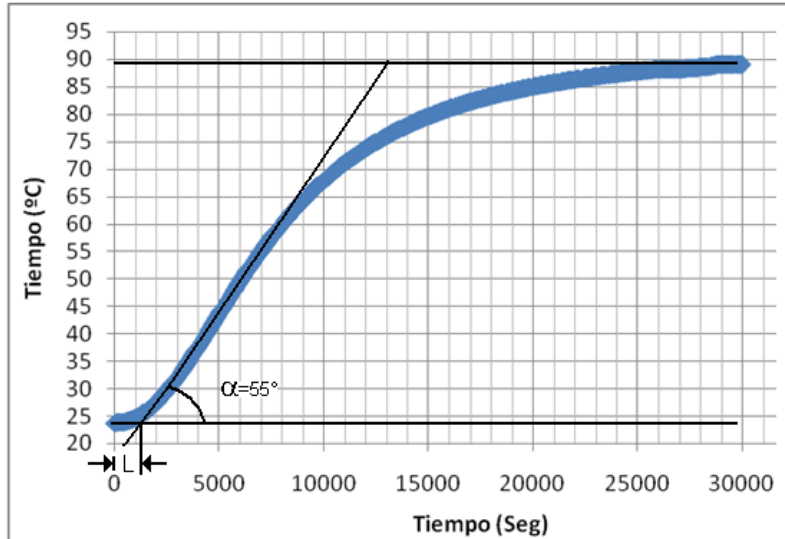


Figura 6.6 Método de Ziegler-Nichols para determinar el PID

$$L = 1100$$

$$R = \tan \alpha = \tan 55^\circ = 1.428148$$

Así

$$K_p = \frac{1.2}{R \cdot L} = \frac{1.2}{1.428148 \cdot 1100} = 763,8628 \times 10^{-6}$$

$$T_i = 2 \cdot L = 2 \cdot 1100 = 2200$$

$$T_d = 0.5 \cdot L = 0.5 \cdot 1100 = 550$$

Sustituyendo las constantes en las Ec. 9, 10 y 5 de la sección 3.2.1 se obtuvo el siguiente regulador PID.

$$PID(s) = 763,8628 \times 10^{-6} + \frac{347,21 \times 10^{-9}}{s} + 420,1245 \times 10^{-3} \cdot s \quad (\text{Ec. 84})$$

$$PID(s) = \frac{420,1245 \times 10^{-3} \cdot s^2 + 763,8628 \times 10^{-6} \cdot s + 347,21 \times 10^{-9}}{s}$$

Se aplicó en Matlab, un escalón unitario a la planta con el regulador obtenido a través de Ziegler-Nichols para ver su respuesta en lazo cerrado. Dicha curva se presenta en la figura 6.7 y la función utilizada en Matlab se muestra a continuación.

$$\text{Step}(\text{Feedback}(G(s)*\text{PID}(s),1)) \quad (\text{Ec. 85})$$

Como es posible apreciar el controlador es capaz de eliminar el error en estado estacionario, sin embargo el tiempo de estabilización es extremadamente grande. Y es por esta razón que se desechó este diseño.

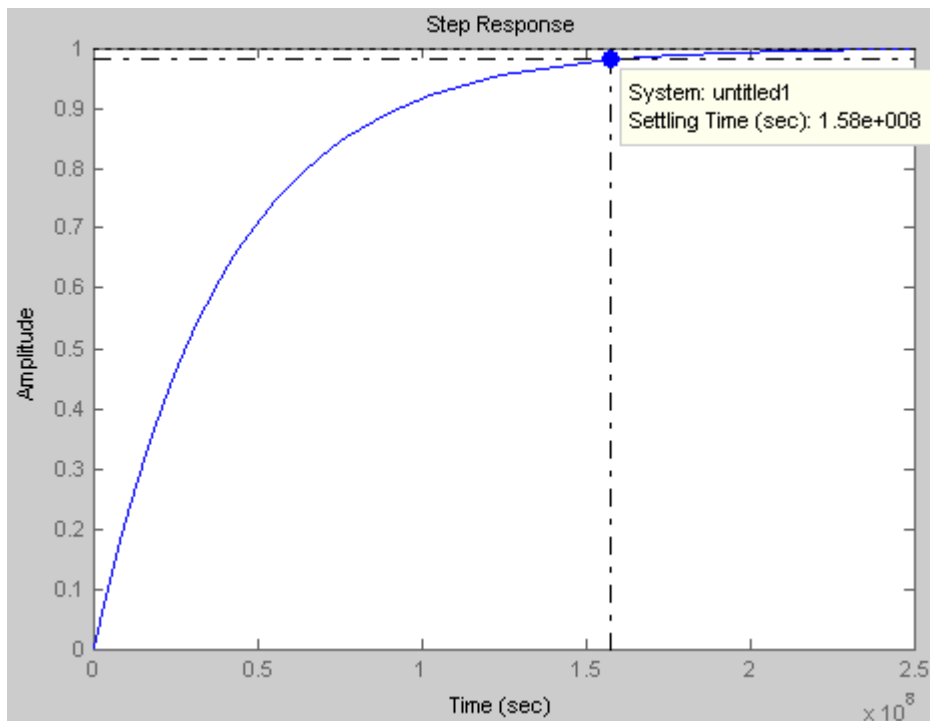


Figura 6.7 Respuesta a lazo cerrado de la planta cuando se implementa el regulador PID por el método de la función de Ziegler-Nichols.

Método de compensador de atraso y compensador de adelanto

El comportamiento proporcional, derivativo, e integral de un controlador PID puede emularse al poner en cascada un compensador de adelanto y un compensador de atraso. Para obtener estos compensadores se debe establecer los parámetros con los cuales se va a definir el comportamiento de los mismos. El compensador de adelanto se obtuvo por medio del método de la bisectriz en tiempo continuo. Así se definió que se deseaba un tiempo de estabilización $T_{s2\%} \leq 15000$ seg y un sobre impulso de $M_p \leq 1\%$. A partir del sobre impulso se puede obtener el factor de amortiguamiento ζ y junto con el tiempo de estabilización $T_{s2\%}$ se pudo determinar la frecuencia ω_n .

$$M_p = e^{\frac{-\zeta \cdot \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} = 0.01$$

Despejando se obtiene $\zeta = 0.8261$.

$$T_{s2\%} = \frac{4}{\zeta \cdot \omega_n} = 15000 \text{ seg}$$

Despejando se tiene $\omega_n = 3.23 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$.

Así, es posible determinar, en el plano continuo y discreto, el punto por donde se van a colocar los polos dominantes para cumplir con los requerimientos establecidos.

$$s_1 = -\zeta \cdot \omega_n \pm i \cdot \omega_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2} = -2.67 \times 10^{-4} + i \cdot 1.8202 \times 10^{-4}$$

$$z_1 = e^{s_1 T} = e^{(-2.67 \times 10^{-4} + i \cdot 1.8202 \times 10^{-4}) \cdot 110}$$

$$z_1 = 0.97088059786 + i \cdot 0.01944 = 0.971075 \angle 1.147176^\circ$$

El compensador de adelanto se obtuvo por medio del método de la bisectriz explicado en la sección 3.3.4.

Las ecuaciones del método de la bisectriz se utilizan a continuación:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(s_1)}{|\text{Re}(s_1)|} \right) = 34.28315^\circ$$

El ángulo que debe aportar el compensador de adelanto para colocar los polos dominantes que cumplen con las condiciones establecidas debe cumplirse con la condición de fase.

$$\begin{aligned} \phi &= \pm 180 - \angle(G_{(s)}|_{s=s_1}) \Rightarrow \\ \phi_1 &= 300.9429^\circ \\ \phi_2 &= -59.0571^\circ \end{aligned}$$

Se elige el ángulo $\phi_2 = -59.0571^\circ$ por estar entre el rango $\pm 180^\circ$. Para facilitar el análisis se trabaja con el complemento del ángulo elegido. Así el ángulo que debe que debe aportar el compensador de adelanto es:

$$\phi = 180 - 59.78357^\circ = 120.2164^\circ \quad (\text{Ec. 86})$$

No obstante el ángulo que puede aportar el polo del compensador no puede ser mayor 90° pues resulta físicamente imposible. Así que es necesario utilizar un compensador de orden 2, es decir, dos compensadores de adelanto en cascada. Así las ecuaciones de la sección 3.3.4 se alteran de la siguiente manera:

La condición de fase del compensador es ahora:

$$\phi_p = \frac{\phi}{2} = \frac{120.2164^\circ}{2} = 60.47^\circ \quad (\text{Ec. 87})$$

La condición de magnitud de ganancia estática es:

$$Kc = \left| \left(\frac{s + s_0}{s + p_0} \right)^2 \hat{G}(s) \right|_{s=s_1}^{-1} \quad (\text{Ec. 88})$$

Donde $\hat{G}(s)$ es la ecuación de la planta a lazo abierto sin el retardo de tiempo.

Entonces por medio de las ecuaciones 69 y 70 se obtiene el valor del cero y el polo del compensador de los compensadores de adelanto.

$$z_0 = -|s_1| \cdot \frac{\cos\left(\frac{34.2831 + 60.47}{2}\right)}{\cos\left(\frac{34.2831 - 60.47}{2}\right)} = -224.662 \times 10^{-6}$$

$$p_0 = -|s_1| \cdot \frac{\cos\left(\frac{34.2831 - 60.47}{2}\right)}{\cos\left(\frac{34.2831 + 60.47}{2}\right)} = -464.788 \times 10^{-6}$$

Así se cumple que $|p_0| > |s_0|$.

Una vez calculada la ubicación del cero y el polo se procedió a calcular la ganancia Kc del compensador de adelanto, esto por medio de la condición de magnitud de la ecuación 88.

$$Kc = \left| \left(\frac{s + 224.662 \times 10^{-6}}{s + 464.788 \times 10^{-6}} \right)^2 \cdot \frac{11,29 \times 10^{-6}}{s + 1.57878 \times 10^{-4}} \right|_{s=s_1}^{-1} = 38.8888$$

De esta forma el compensador de adelanto obtenido es:

$$k_{lead}(s) = 38.8888 \cdot \left(\frac{s + 224.662 \times 10^{-6}}{s + 464.788 \times 10^{-6}} \right)^2 \quad (\text{Ec. 89})$$

En la siguiente figura se observa el efecto del compensador de adelanto en la respuesta de lazo cerrado de la planta. Como es posible observar el

compensador de adelanto disminuye el tiempo de estabilización y corrige parcialmente el error en estado estacionario.

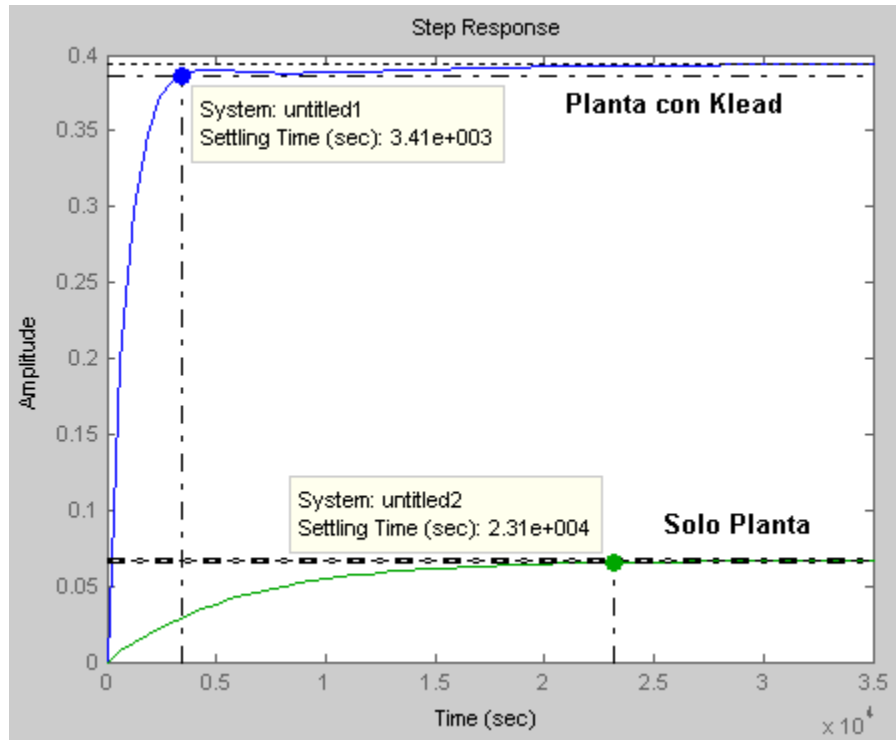


Figura 6.8 Simulación del efecto del compensador de adelanto en la respuesta de lazo cerrado de la planta sin retardo

Sin embargo para lograr un $ess=0$ se requiere de un compensador de atraso o PI con un polo en el eje jw . La ecuación obtenida para el compensador de atraso se presenta a continuación.

$$k_{lag}(s) = \frac{(s + 450 \times 10^{-6})}{s}$$

Mediante pruebas simuladas se obtuvo que el cero que brindó el tiempo de estabilización deseado y sobreimpulso de cero fue el de -450×10^{-6} . Estas pruebas consistieron en graficar la respuesta a lazo cerrado del sistema con el

regulador variando el valor del cero. La grafica de las pruebas correspondientes se muestra a continuación

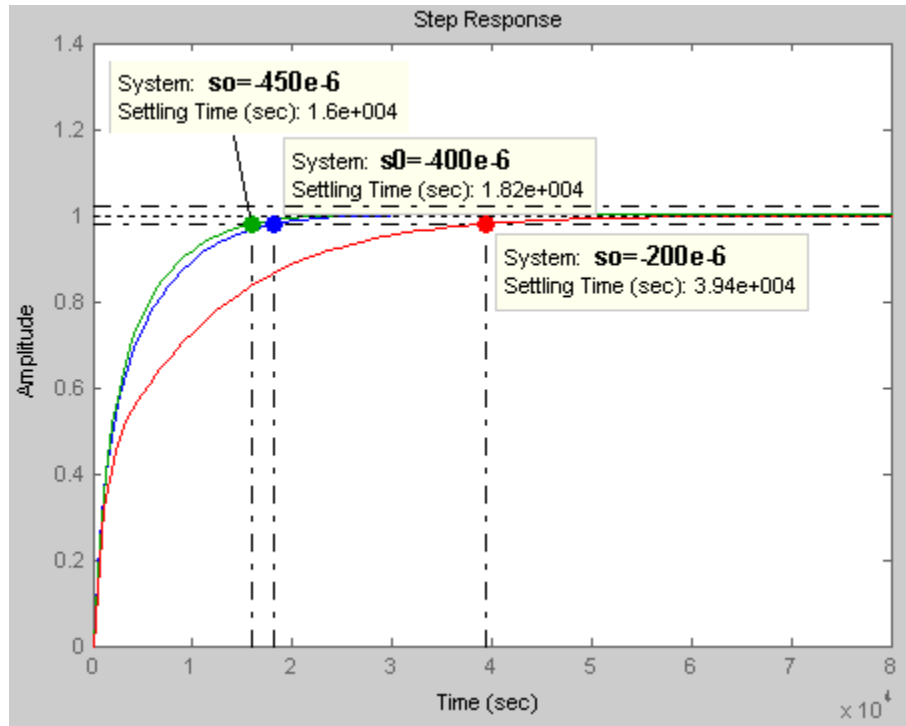


Figura 6.9 Selección de la ubicación del cero para obtener la mejor respuesta del sistema a lazo cerrado

Así la ecuación que describe el regulador PID es:

$$G_{reg}(s) = k_{lead}(s) * k_{lag}(s) \quad (\text{Ec. 90})$$

$$G_{reg}(s) = 38.8888 \cdot \left(\frac{s + 224.662 \times 10^{-6}}{s + 464.788 \times 10^{-6}} \right)^2 \cdot \left(\frac{s + 450 \times 10^{-6}}{s} \right)$$

Y la respuesta a lazo cerrado ante el escalón unitario se muestra a en la figura 6.10. Aplicando el método de retenedor de orden cero, se transforma la ecuación del regulador en tiempo discreto con un T=110 seg. Así:

$$Greg(z) = \frac{38.8888 \cdot z^3 - 112.88837 \cdot z^2 + 109.22446 \cdot z - 35.223775}{z^3 - 2.9003166z^2 + 2.8031174 z - 0.90280079} \quad (\text{Ec. 91})$$

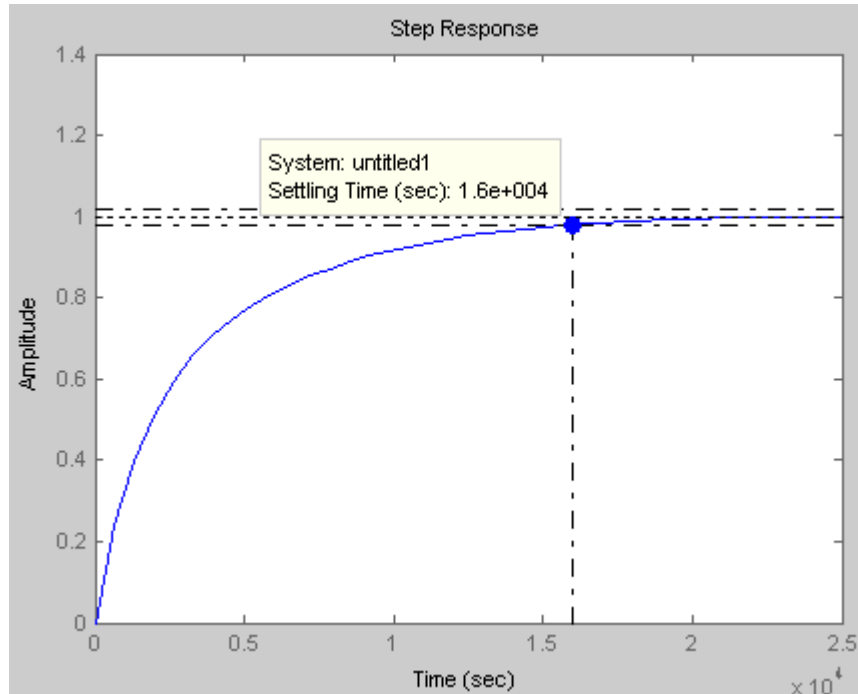


Figura 6.10 Simulación del efecto del regulador Adelanto-Atraso sobre la respuesta de lazo cerrado de la planta sin retardo

6.5 Predictor de Smith

Nótese que en las secciones anteriores se calculó el regulador necesario para controlar la planta pero sin tomar en cuenta el retardo de la misma. Ese regulador cumple con los parámetros establecidos para la respuesta deseada de la planta. Sin embargo, el retardo de 2033 segundos inherente en la planta origina que dicho regulador no sea capaz de cumplir con los requerimientos deseados y por tanto la respuesta de la planta puede entrar en oscilación.

Según se detalló en la sección 3.2.2 por medio de la Ec. 13 se obtiene el regulador con Predictor de Smith.

$$R'(z) = \frac{k_{reg}(z)}{1 + k_{reg}(z) \cdot \hat{G}(z) \cdot (1 - z^{-19})} \quad (\text{Ec. 92})$$

Kreg es el compensador de adelanto-atraso que se muestra en la Ec. 94 y $\hat{G}(z)$ es la función discreta que describe la planta pero sin el tiempo de retardo. Así:

$$R'(z) = \frac{38.8888 \cdot z^{19} \cdot (z - 0.9828) \cdot (z - 950.25583 \times 10^{-3})}{(z - 1) \cdot (z - 981.37691 \times 10^{-3}) \cdot (z - 963.07512 \times 10^{-3}) \cdot (z - 950.25023 \times 10^{-3})} \cdots$$

$$\cdots \frac{z^2 - 1.9525946 \cdot z + 953.17099 \times 10^{-3}}{(z + 827.21563 \times 10^{-3}) \cdot (z^2 - 1.7911922 \cdot z + 849.94559 \times 10^{-3})} \cdots$$

$$\cdots \frac{(z^2 - 1.4978041 \cdot z + 0.78049398) \cdot (z^2 - 1.0983183 \cdot z + 0.74649928)}{(z^2 - 0.60927143 \cdot z + 0.7252006) \cdot (z^2 - 72.38696 \times 10^{-3} \cdot z + 0.71056899)} \cdots$$

$$\cdots \frac{(z^2 + 0.4622804 \cdot z + 0.70019081) \cdot (z^2 + 0.94363066 \cdot z + 0.69288376)}{(z^2 + 1.2499264 \cdot z + 613.09203 \times 10^{-3}) \cdot (z^2 + 1.4818832 \times 10^{-3} \cdot z + 610.60902 \times 10^{-3})} \cdots$$

Expandiendo la ecuación:

$$R'(z) = \frac{38.8888 \cdot z^{23} - 151.10828 \cdot z^{22} + 220.17115 \cdot z^{21} - 142.56957 \cdot z^{20} \cdots}{z^{23} - 3.8352445 \cdot z^{22} + 5.514583 \cdot z^{21} - 3.5232493 \cdot z^{20} + 843.91215 \times 10^{-3} \cdot z^{19} \cdots}$$

$$\cdots \frac{+ 34.617926 \cdot z^{19}}{-47.872113 \times 10^{-3} \cdot z^3 + 138.96558 \times 10^{-3} \cdot z^2 - 134.45531 \times 10^{-3} \cdot z + 43.360467 \times 10^{-3}}$$

El objetivo de expresar la ecuación del Predictor de Smith en términos de ceros y polos es que así es posible visualizar los efectos del Predictor sobre el sistema, los cuales son:

Se anula el efecto del retardo del sistema mediante el factor z^{19} y con esto el regulador calculado para el sistema sin retardo funciona para el sistema con retardo.

Se anula el efecto del polo dominante de la planta ($z-0.9828$) por medio del cero ($z-0.9828$).

La función del regulador se mantiene, por tanto las características dinámicas y de estado estable se mantienen.

A continuación se muestra la simulación de tres condiciones, la primera corresponde a la respuesta de la planta sin retardo y con el regulador implementado. La segunda muestra el efecto que tiene el agregar el retardo inherente del sistema; y la tercera condición muestra como al agregar el Predictor de Smith el sistema vuelve a comportarse como si este no tuviera retardo y por tanto se vuelve a introducir dentro de los parámetros establecidos.

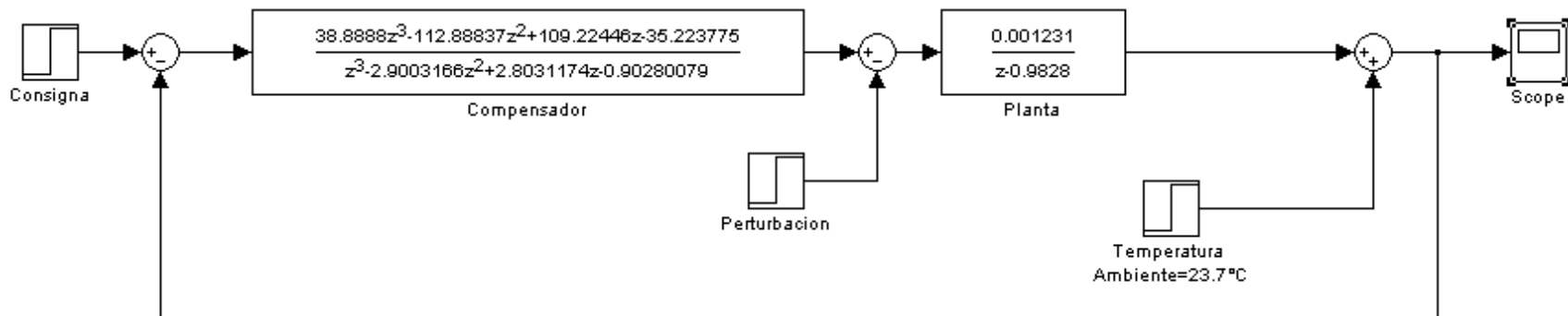


Figura 6.11 Sistema a lazo cerrado con regulador y planta sin retardo.

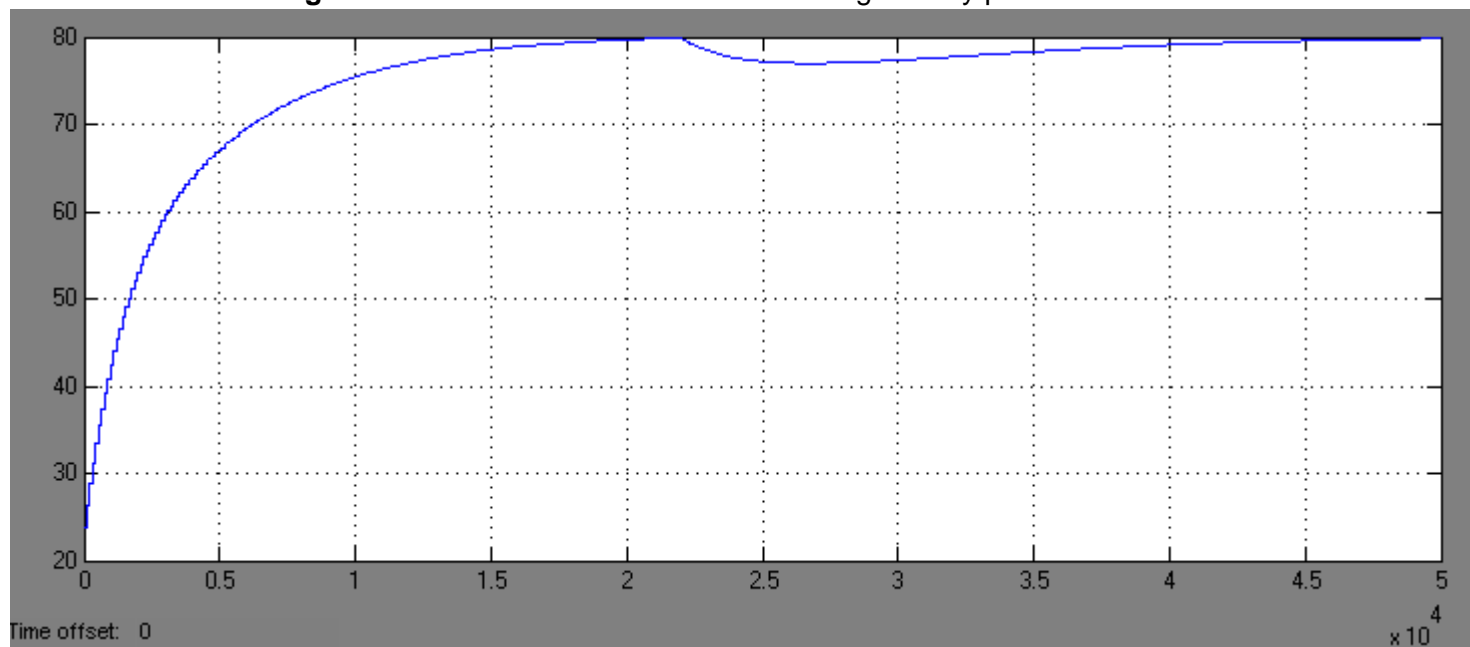


Figura 6.12 Respuesta del sistema a lazo cerrado con regulador y planta sin retardo.

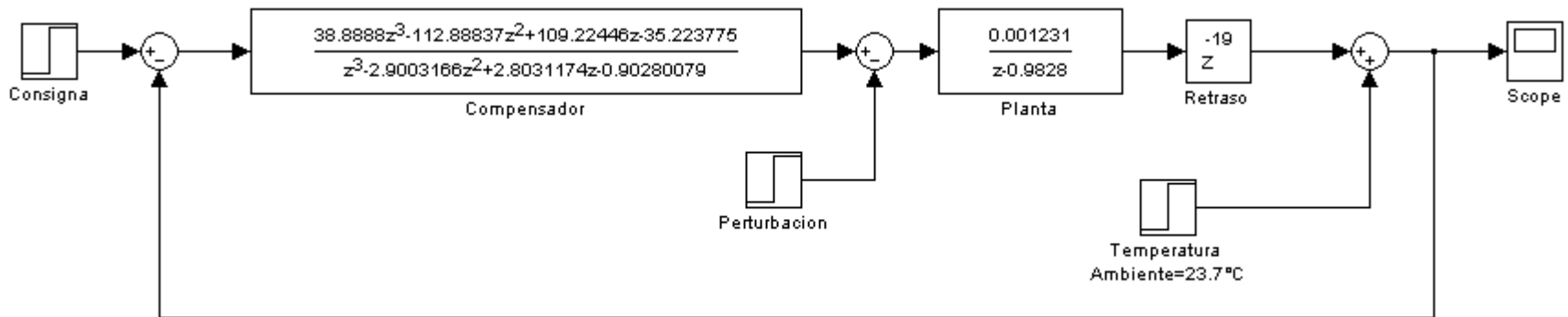


Figura 6.13 Sistema a lazo cerrado con regulador y planta con retardo.

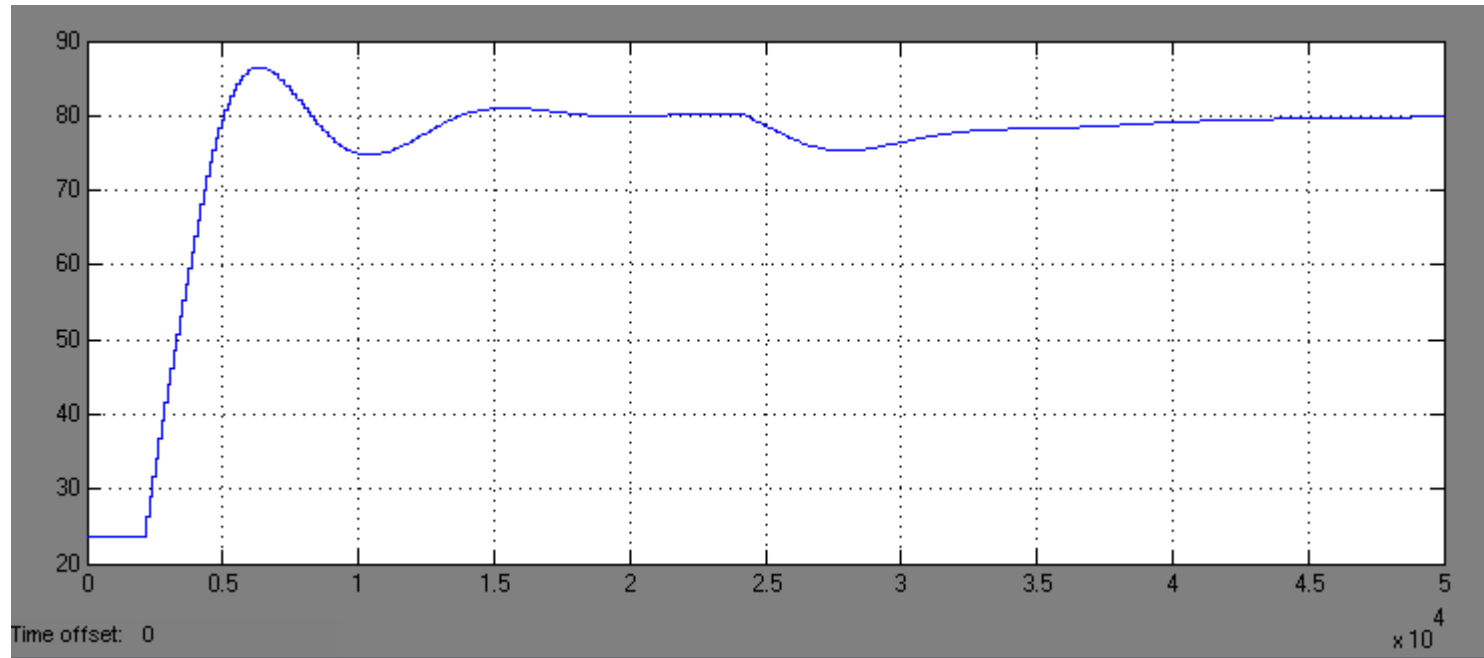


Figura 6.14 Respuesta del sistema a lazo cerrado con regulador y planta con retardo.

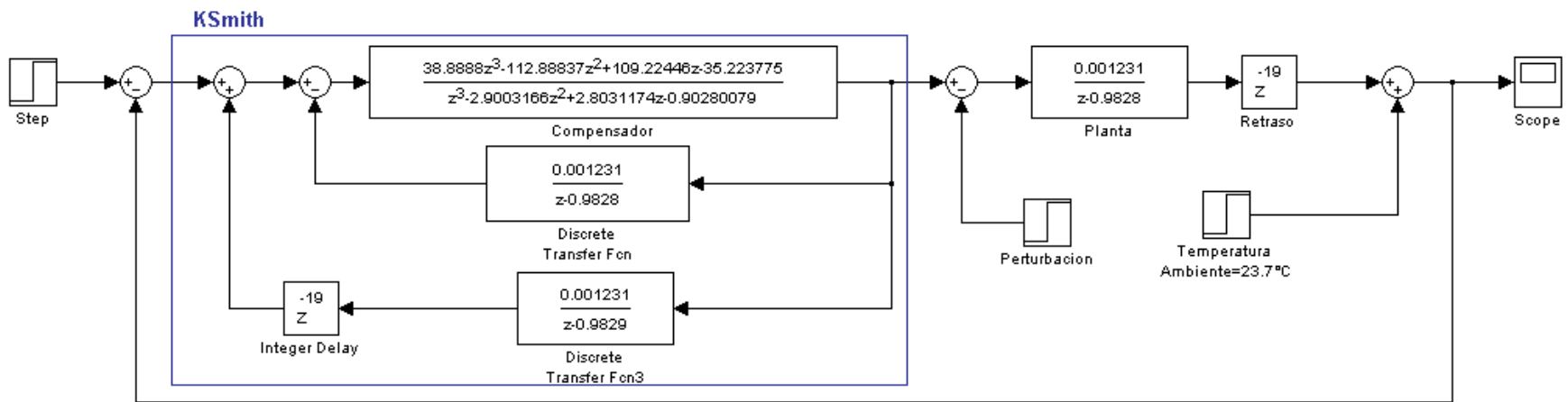


Figura 6.15 Sistema a lazo cerrado con regulador, Predictor de Smith y planta con retardo.

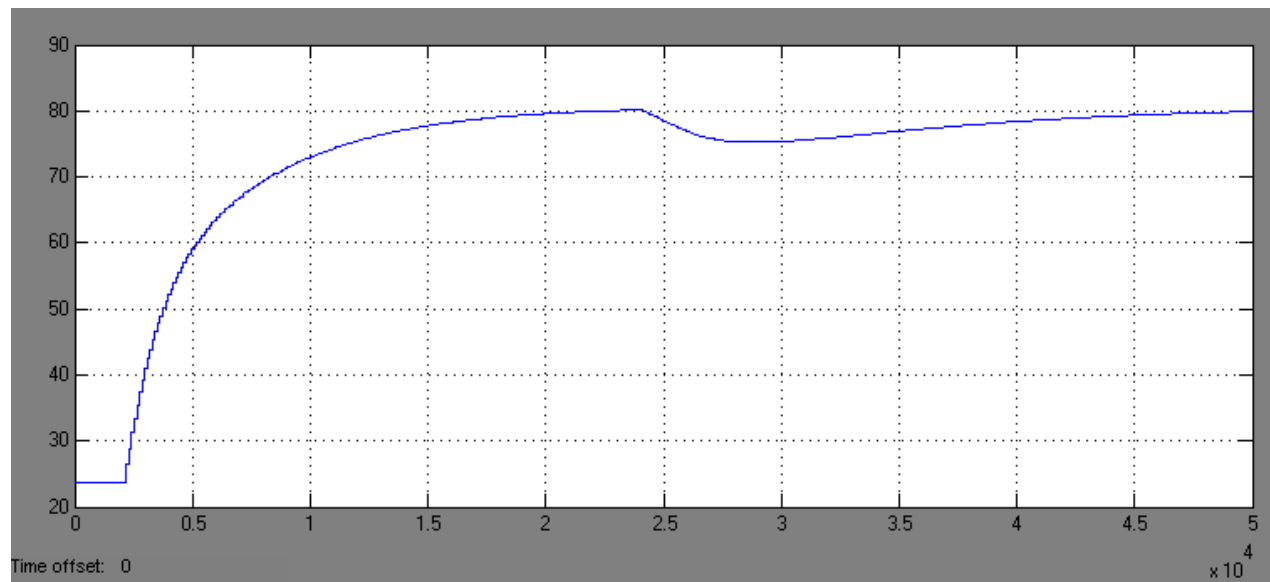


Figura 6.16 Respuesta del sistema a lazo cerrado con regulador, Predictor de Smith y planta con retardo.

6.6 Ecuación de diferencias

La ecuación de diferencias nos permite desarrollar la manera de representar los diferentes estados de la planta y brindar una forma sencilla la implementación del regulador dentro de un procesador.

La función de transferencia se descompone en una sola ecuación de diferencias en la que la salida depende no solo de la diferencia entre el valor actual de temperatura y el deseado, sino también de los estados anteriores de dicha diferencia y de los estados anteriores de la salida

A continuación se muestra el procedimiento realizado para obtener la ecuación de diferencias:

$$\frac{M(z)}{E(z)} = R'(z) \quad (\text{Ec. 93})$$

Donde $R'(z)$ fue calculado en la sección 6.5. Entonces

$$M(z) \cdot (z^{23} - 3.8352445 \cdot z^{22} + 5.514583 \cdot z^{21} - 3.5232493 \cdot z^{20} + 843.91215 \times 10^{-3} \cdot z^{19} - 47.872113 \times 10^{-3} \cdot z^3 + 138.96558 \times 10^{-3} \cdot z^2 - 134.45531 \times 10^{-3} \cdot z + 43.360467 \times 10^{-3}) = E(z) \cdot (38.8888 \cdot z^{23} - 151.10828 \cdot z^{22} + 220.17115 \cdot z^{21} - 142.56957 \cdot z^{20} + 34.617926 \cdot z^{19})$$

Sacando factor común de z^{23} :

$$M(z) \cdot (1 - 3.8352445 \cdot z^{-1} + 5.514583 \cdot z^{-2} - 3.5232493 \cdot z^{-3} + 843.91215 \times 10^{-3} \cdot z^{-4} - 47.872113 \times 10^{-3} \cdot z^{-20} + 138.96558 \times 10^{-3} \cdot z^{-21} - 134.45531 \times 10^{-3} \cdot z^{-22} + 43.360467 \times 10^{-3} \cdot z^{-23}) = E(z) \cdot (38.8888 - 151.10828 \cdot z^{-1} + 220.17115 \cdot z^{-2} - 142.56957 \cdot z^{-3} + 34.617926 \cdot z^{-4})$$

Ahora transformando y despejando m_k Se tiene la ecuación que se introduce en el PLC y que tiene un tiempo de muestreo de 110 seg. Dicha ecuación se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
m(k) = & 38.8888 \cdot e(k) - 151.10828 \cdot e(k-1) + 220.17115 \cdot e(k-2) & \text{(Ec. 76)} \\
& - 142.56957 \cdot e(k-3) + 34.617926 \cdot e(k-4) + 3.8352445 \cdot m(k-1) \\
& - 5.514583 \cdot m(k-2) + 3.5232493 \cdot m(k-3) - 843.91215 \cdot 10^{-3} \cdot m(k-4) \\
& + 47.872113 \cdot 10^{-3} \cdot m(k-20) - 138.96558 \cdot 10^{-3} \cdot m(k-21) \\
& + 134.45531 \cdot 10^{-3} \cdot m(k-22) - 43.360467 \cdot 10^{-3} \cdot m(k-23)
\end{aligned}$$

6.7 Resultados experimentales

Se ha desarrollado un sistema de monitorización, control y alerta del valor de la temperatura en lugares en donde es de suma importancia controlar dicho parámetro para cumplir con estándares de calidad. En este sistema se da la interacción entre el controlador Micrologix 1100 y una PC lo que permite alertar anomalías detectadas, registrar los datos adquiridos y acceder de forma remota. Por lo anterior se puede asegurar que se cumplió a cabalidad con el objetivo general del proyecto.

En la Figura 6.17 se muestra el panel implementado y en el apéndice 9.3 los planos eléctricos del mismo. El diseño de los planos del panel está apegado a los estándares de la empresa RF Automatización y la instalación del sistema de monitorización en un panel eléctrico permite establecer una estructura ordenada de manera que si falla algún elemento del sistema puede detectarse con relativa facilidad. Además la utilización de un PLC para realizar el control proporciona una gran flexibilidad al sistema pues de ese modo resulta sencillo realizar actualizaciones al programa de control o inclusive expansiones del mismo.

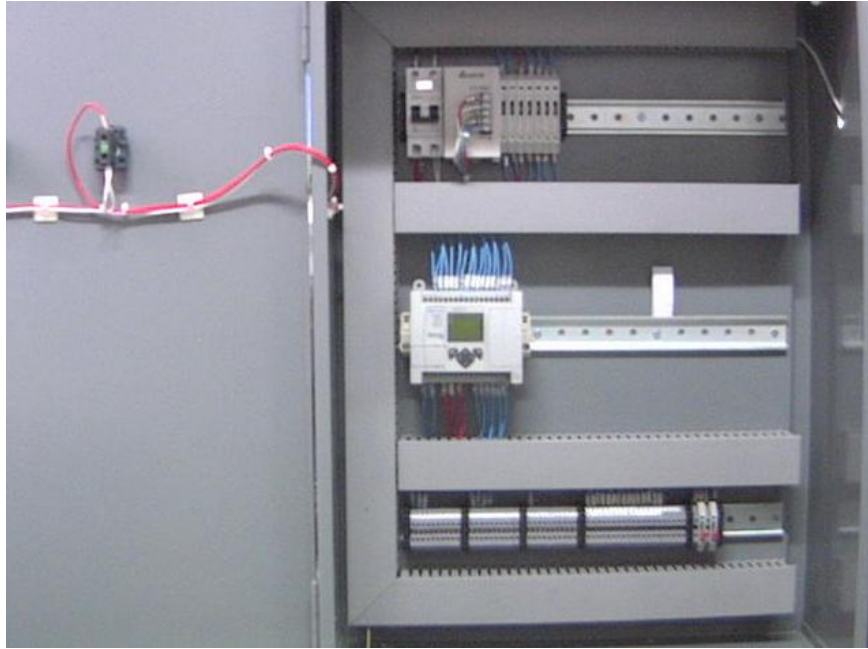


Figura 6.17 Panel eléctrico del sistema de monitorización para la Planta Procesadora de Carnes y Embutidos.

En la Figura 6.18 se muestra la curva de calentamiento del agua dentro de la marmita 1 una vez que se implementó en el PLC el regulador y Predictor de Smith obtenidos. La captura de datos fue realizada por medio del PLC con un periodo de muestreo de 110 segundos. La adquisición de datos de autogenera en un documento de Microsoft Excel.

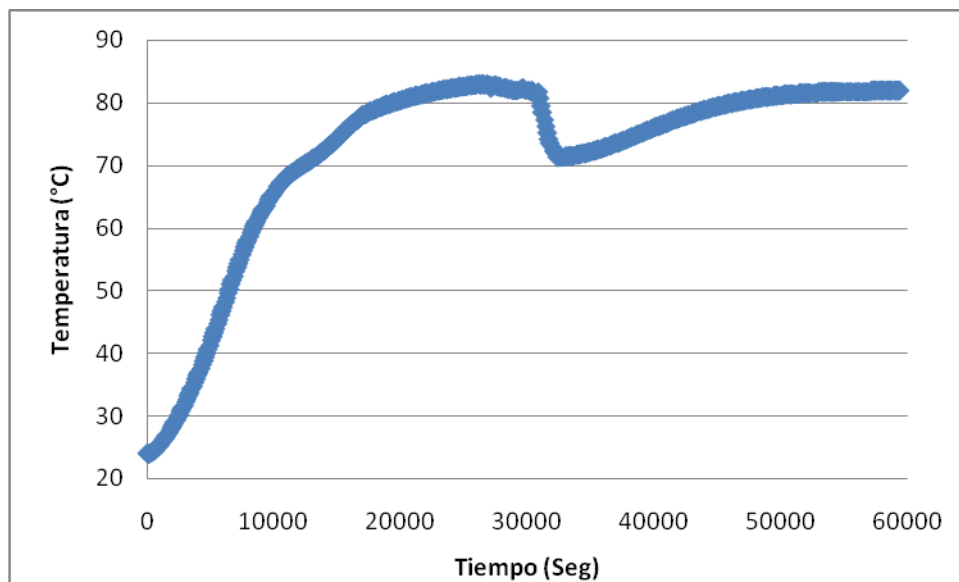


Figura 6.18 Curva de calentamiento del agua de la marmita 1 con el regulador y Predictor de Smith implementados

Como es posible observar en la figura 6.18 el regulador logra controlar de manera aceptable el sistema. En la tabla 6.1 se muestra la comparación entre los parámetros establecidos para definir el comportamiento de la planta y el comportamiento real.

Tabla 6.2 Comparación de especificaciones establecidas para definir el comportamiento de la planta ante un regulador.

Especificación	Deseada	Real	% de Error
Tiempo de estabilización del 2% (Seg)	15000	17000	-13.33
Valor en estado estable (°C)	80	82	-2.5

Si bien es cierto el error en estado estacionario no es cero, este es muy pequeño. Y en la práctica lo fundamental es alcanzar un valor cercano a 80 °C. Esto pues a la temperatura de 80°C es posible alcanzar los 72°C en el producto introducido en el tanque.

Es importante recordar que el modelado de sistema de control depende de muchas variables físicas externas y por lo general, cuando se calcula un regulador y se implementa en la práctica, es necesario realizar un pequeño ajuste a los parámetros obtenidos.

El tiempo de estabilización es aceptable, pues otra ventaja de automatizar el control de temperatura con el regulador es que se releva a los operadores de esta tarea para que puedan realizar otras sin la necesidad de estar atendiendo constantemente el proceso para verificar su estado y realizar los cambios pertinentes en el calentamiento para tener las condiciones adecuadas.

Si bien es cierto el agregar un Predictor de Smith eleva la complejidad de la ecuación del regulador, se optó por utilizarlo pues como los mismos autores Ziegler y Nichols mencionaron en una de sus publicaciones “Sus conocidas fórmulas de sintonía en el control de sistemas sujetos a grandes retardos perdían la característica de ser controlado de forma apropiada con estas fórmulas de

sintonía”. Según los autores, el problema no consistía en una incorrecta elección de los parámetros del regulador, sino que por el contrario, el problema radicaba en el proceso en sí. Así concluyeron que los retardos y grandes constantes de tiempo tanto de la instrumentación, como del proceso, son factores determinantes en la potencialidad que dichos sistemas tienen de ser ”controlados”. [18] Y por lo tanto los métodos tradicionales para calcular reguladores no son del todo validos debido a que estos no toman en cuenta el retraso de tiempo que presenta el sistema.

En la figura 6.11 se muestra el diagrama del sistema a lazo cerrado cuando la planta no tiene retardo y el regulador es solamente el de adelanto-atraso. Como es posible observar su respuesta es totalmente controlada y apegada a los parámetros establecidos (figura 6.12). Sin embargo, al agregar al sistema el retardo inherente de la planta (Figura 6.13), se visualiza que la respuesta del sistema a lazo cerrado (Figura 6.14) se sale de los parámetros establecidos pues oscila en un sistema que es sumamente lento, situación que es indeseable. Ahora si además del compensador de adelanto-atraso se agrega la lógica del Predictor de Smith (nótese que figura 6.15 es equivalente al sistema de la figura 3.4) entonces la respuesta del sistema a lazo cerrado (figura 6.16) vuelve a estar dentro de los parámetros deseados, es decir, se comporta como si la planta no tuviera el retardo.

Así la implementación del Predictor de Smith viene a resolver el problema de grandes retardos pues es justamente una estructura dedicada al control de procesos con grandes retardos.

Con la implementación del sistema de monitorización de las variables de proceso de la planta procesadora es posible garantizar un incremento en la regulación del proceso de producción. Con éste se puede detectar si la temperatura de cocción o de almacenamiento no cumple con los parámetros establecidos antes de que puedan afectar negativamente la calidad del producto. Así el sistema de monitorización y control desarrollado innova la manera en la que se alcanzan los

parámetros de calidad establecidos (durabilidad, color y aroma) dando lugar a una mejor estandarización de calidad entre lotes de producto.

Como ya se ha mencionado, si las condiciones que activan las alertas no son atendidas en un lapso de tiempo determinado entonces el sistema de monitorización y control procede a notificar las alertas críticas a los administradores de la planta por medio de un protocolo simple de transferencia de correo, SMTP por sus siglas en inglés.

Para realizar la transmisión de los mensajes de alerta se analizaron dos diferentes canales de transmisión; se realizaron pruebas de tiempo de respuesta y estabilidad del canal; en la Figura 6.4 se muestran los resultados obtenidos.

En esta gráfica es posible ver que el tiempo de respuesta de la plataforma para beeper es de alrededor de 1 minuto y para correo electrónico tan solo un par de segundos; no obstante se determinó que el beeper era la mejor opción debido a la flexibilidad que tiene pues el administrador puede ser notificado de alguna falta grave casi en cualquier lugar en el que se encuentre y no así con el correo electrónico. Además un lapso de un minuto es un valor prácticamente insignificante comparado con la velocidad con la que se incrementa la temperatura en el proceso de cocción de los embutidos en el periodo de cocción o con la velocidad que podría incrementar la temperatura en los cuartos fríos si estos se apagaran y/o se les dejara la puerta abierta.

Por otro lado, se comprobó que ambos canales de transmisión tiene una excelente estabilidad pues como es posible ver en la Figura 6.19 de las 20 muestras enviadas se transmitieron satisfactoriamente el 100 % de los mensajes.

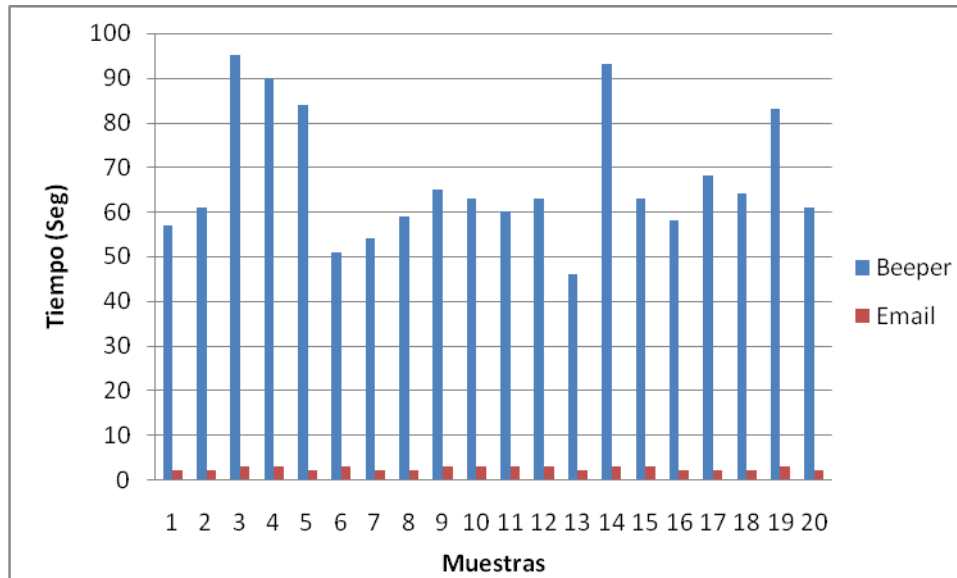


Figura 6.19 Pruebas de respuesta de tiempo para diferentes canales de transmisión.

A lo largo del diseño e implementación del sistema de monitorización fue necesario realizar algunas modificaciones a la solución inicial propuesta. A continuación se mencionan las más importantes.

Como se muestra en la figura 5.1, fue necesario monitorear la temperatura en seis diferentes puntos. Y como el controlador Micrologix solo dispone de 2 entradas analógicas se había propuesto inicialmente adquirir un módulo de expansión de 4 canales RTD ML 11100 AB para poder colocar una PT-100 en cada punto. Sin embargo en pos de una solución eficiente y más barata se observó que los puntos en los que la medición de temperatura debía ser muy precisa era solo en la temperatura del agua de la marmita 1 y la temperatura interna del producto; esto pues solo estas debían poder graficarse en tiempo real. Así que se decidió eliminar el módulo de expansión y sustituir las RTD del cuarto frío 1, cuarto frío 2, el congelador y el que se instala en el tanque 2 por termostatos los cuales son más baratos que las RTD's. Entonces al diseño inicial se le cambiaron 4 entradas analógicas por 4 entradas digitales y dicho diseño se muestra en el apéndice 9.3.

Este cambio fue posible porque en los cuartos fríos, congelador y tanque de choque térmico (tanque 2) tan solo debe reconocerse en que momento sobrepasan un valor de temperatura establecido. Estos termostatos activan una señal en el momento en que la temperatura a su alrededor alcanza el valor configurado por medio de una perilla.

Por otro lado, la temperatura interna del producto se mide con una sonda de temperatura y para evitar fallas en el sistema de monitorización debió diseñarse una lógica para identificar el momento en el que la sonda se salía por accidente del producto. La lógica utilizada fue la siguiente, debido a que la curva de calentamiento interno del producto puede llevar un par de horas para incrementar unos 20 °C, no es posible que se dé un cambio de temperatura muy alto de un periodo de muestreo a otro a no ser por las siguientes dos condiciones: se sale la sonda del producto y empieza a medir la temperatura del agua o el operador saca la sonda del producto pues éste ya está listo. Inicialmente no se había tomado en cuenta la segunda condición, así que para poder diferenciar cuando un ΔT se daba por alguna de las razones anteriores se ideó agregar un botón para que el operador pudiera desactivar la alarma cuando fuera a sacar el producto. De esta manera la alerta se activaría solo en los periodos del proceso de cocción que interesan.

En la sección de 5.3.1.8 se muestran las variables de tiempo de son almacenadas en el controlador. La razón por la que se guardan los diferentes parámetros mencionados en esa sección no es únicamente para identificar algunas de las razones por la que un lote de producto se pudo haber dañado, como por ejemplo que se llega a identificar a través de estos registros que la puerta en donde se almacenó el lote que resultó defectuoso estuvo abierta un par de horas. Sino que también es para llevar un registro de la eficiencia de los operarios, pues es posible saber si están tardando más de lo necesario en las diferentes etapas del proceso. Es decir, con el historial de los parámetros es posible controlar de una mejor forma el desempeño de los operarios.

Para el desarrollo del acceso remoto se utilizó un software freeware llamado RealVNC. Este tiene dos componentes el servidor, que en este caso corresponde a la PC que se instalaría dentro de la planta procesadora, y los clientes que son los usuarios que desean conectarse al servidor.

La configuración realizada se describe a continuación. Tanto en la PC del servidor como la del cliente se configuró el puerto 5900 (TCP) como el puerto por el que “escucha” el servidor. Se habilitó dicho puerto en el firewall de cada PC para evitar que ser bloqueado.

En el cliente se asignó una IP estática para asegurar que solo esta dirección pueda entrar. Así en el servidor se filtró el acceso de IP para que se permitiera acceder solo a la IP estática del cliente conocido.

De esta manera el cliente puede acceder por medio de una contraseña a la PC servidor y observar el sistema de monitorización del proceso de producción de los embutidos.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. Debido a que el sistema de control, monitorización y alerta cuenta con una amplia gama de alertas específicas sobre las condiciones de producción y almacenamiento se puede garantizar un proceso de producción de embutidos más estandarizado y confiable con respecto a la calidad del producto final.
2. El modelo de la planta obtenido por medio del método de respuesta ante escalón es una aproximación válida para el sistema.
3. Con el diseño de los planos eléctricos del panel se estableció una estructura ordenada que permitirá en un futuro la sencilla identificación de fallas de hardware o cableado y de esta forma sea sencillo corregirlas.
4. Se comprobó que la estabilidad del canal de transmisión de mensajes remotos, es decir comunicación entre PLC y beeper, es confiable al 100 %.
5. Se comprobó por medio de la simulación del sistema con el regulador calculado, que el retardo de la planta afecta negativamente el resultado de la regulación.
6. Se comprobó por medio de la simulación del sistema con el regulador calculado que mediante la adición de Predictor de Smith es posible anular el efecto negativo del retardo en la planta.
7. La utilización del Software RealVNC permitió implementar de manera muy sencilla el acceso remoto del sistema de monitorización y control de la Planta Procesadora de Carnes y Embutidos, pues tan solo se necesita configurar las direcciones IP y puertos de comunicación entre cliente y servidor.

7.2 Recomendaciones

1. Se recomienda generar algún tipo de tablas o informes en donde el operario pueda observar el rendimiento de los últimos días para que tenga un parámetro tangible con el cual pueda comparar con el rendimiento de ese momento. Debido a que en este momento no se lleva ningún tipo de control.
2. Se recomienda a los administradores generar algún tipo de tabla para medir el rendimiento de los operadores en la planta en función de la cantidad de mensajes de alerta crítica que se den.
3. Para facilitar la visualización de los registros que contienen los contadores de la cantidad de veces que se abren las puertas y el tiempo que están abiertas se recomienda programar en la interfaz gráfica la visualización de los mismo por medio de una tabla.
4. Se recomienda implementar en el sistema de control de la temperatura de la marmita 1 un modo Automático/Manual. Donde el automático representa la acción del regulador y el manual corresponde a un valor establecido por el usuario. Así éste puede variar el porcentaje que la ventana de tiempo de 110 seg esta activa y con esto regular manualmente el proceso de cocción.
5. Se recomienda ampliar el desarrollo de la seguridad de acceso a ciertos sectores de la interfaz gráfica dependiendo del usuario y su grado de profundidad requerida en el sistema. De manera que solo los administradores y no los operarios puedan alterar los tiempos establecidos para las alarmas críticas.

Capítulo 8: Bibliografía

- [1] López G. M.Elena. "Identificación de Sistemas, Aplicación al modelado de un motor de continua". Sistemas de control avanzado. 2006-2007 Consulta: 11 Noviembre 2008. [En línea: http://www.depeca.uah.es/docencia/ING-ECA/ctr_avz/Identif.PDF].
- [2] Interiano, Eduardo. "Modelado estocástico por estimación de mínimos cuadrados". ITCR, En línea: <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/Laboratorio/3.6ModeladoEstocastico.pdf>.
- [3] Gitierrez John A. "Reglas de sintonización para controladores PID". Universidad de San Buenaventura. En línea: <http://www.angelfire.com/electronic/jagp/sem7/pidcont1.html>
- [4] Tacón, Eugenio y otros. "Controladores Basados en Estrategias PID". Primera Edición. LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP. 2005. En línea: <http://www.ing.unlp.edu.ar/cys/pdf/Apunte%20PID.pdf>
- [5] "CALORIMETRIA", Instituto de Chile, ciudad de Limache, Chile. En línea: <http://www.hverdugo.cl/calorimetria.htm>.
- [6] CAP IV. Electromecánica: Potencia Calorífica y calor. Ley de Joule. En línea: <http://www.ifent.org/lecciones/electrodinamica/eldinami42.asp>
- [7] Siemens, "Sitrans TK/TK-H Transmitter for temperture, Instrucciones de servicio". En línea: http://cache.automation.siemens.com/dnl/TM0NTU1OQAA_7306717_HB/sitranstk_tkh_c12_5sp.pdf
- [8] Wikipedia La enciclopedia Libre. "RTD". En línea: <http://es.wikipedia.org/wiki/RTD>
- [9] Interiano, Eduardo. "Regulador PID y ajuste del PID". ITCR, En línea: <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/>
- [10] Rockwell Automation, "Referencia del conjunto de instrucciones". En línea: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/1785-rm001-es-p.pdf>

- [11] Rockwell Automation, "MicroLogix 1100 Programmable Controllers, User Manual". En línea: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1763-um001-en-p.pdf>
- [12] Rockwell Automation, "MicroLogix 1100 Programmable Controllers, Instruction Set Reference Manual". En línea: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/1763-rm001-en-p.pdf>
- [13] Interiano, Eduardo. "Stochastic2", ITCR. E línea: <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/TrabajosMatlab/stochastic2.zip>
- [14] Interiano, Eduardo. "*Predictor de Smith*". Instituto Tecnológico de Costa Rica. [En línea:] http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/Laboratorio/5.16-Predictor_de_Smith.pdf
- [15]] Interiano, Eduardo. "*El regulador PID*". Instituto Tecnológico de Costa Rica. [En línea:] <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/Clase2008/EIReguladorPID.pdf>
- [16] Interiano, Eduardo. "*El regulador PID*". Instituto Tecnológico de Costa Rica. [En línea:] <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/Clase2008/CompensadorAdelantoRlocus.pdf>
- [17] Handbook of Chemistry and Physics, CRC press, 64th Ed. [En línea:] http://www.pg.gda.pl/chem/Dydaktyka/Analityczna/MISC/Water_density_Pipet_Calibration_Data.pdf
- [18] Alamo C., Teodoro. "Diseño del Controlador PID". [En línea:] www.esi2.us.es/~alamo/Archivos/Certificaciones/Sec_9_Otras_Publicaciones/Docente/AlamoPIDTotal.pdf
- [19] "Density of Fluids - Changing Pressure and Temperature" [En línea:] http://www.engineeringtoolbox.com/fluid-density-temperature-pressure-d_309.html.
- [20] Hugo M. Victor. "Costa Rica, Historia natural" pag 93. [En línea:] http://www.engineeringtoolbox.com/fluid-density-temperature-pressure-d_309.html.
- [21] Kuo, Benjamín C. **Sistemas de control automático**. 5ª Ed. México, Prentice-HALL, 1996.
- [22] Ogata, Katsuhi. **Ingenieria de Control Moderna**. 3ª Ed. México, Prentice-HALL, 1998.

Capítulo 9: Apéndices

9.1 Glosario, abreviaturas y simbología

9.1.1 Glosario

Controladores Lógicos Programables: Dispositivo electrónico basado en un microcontrolador programable mediante software.

Hardware: Dispositivo físico, eléctrico, electrónico y mecánico que forma una computadora.

Software: Subrutinas de programación utilizadas para el control del hardware.

Relé: Tipo de interruptor electromecánico. Contiene una bobina como electroimán que utiliza para cerrar o abrir contactos.

Termocupla: Dispositivo que produce un voltaje CD en el orden de los mV que aumenta proporcionalmente a la temperatura.

Curado: En la preparación de alimentos, el curado hace referencia a diversos procesos para preservar o para dar sabor.

RTD : Sensor de temperatura resistivo.

PT100 : Es un tipo de RTD hecha de platino y con una $R= 100 \Omega$.

9.1.2 Abreviaturas

I/O = Abreviación para entrada / salida.

HIM = Interfaz Hombre Maquina.

PC = Computador personal

PLC = Controlador Lógico Programable

DC = Corriente directa.

AC = Corriente alterna

MSB = Bit más significativo (More Significant Bit)

LSB = Bit menos significativo (Less Significant Bit)

SSR = Relé de estado sólido (Solid State Relay)

9.2 Cálculo del escalón aplicado

Tabla 9.1 Valores máximos y mínimos de temperatura de la respuesta a lazo abierto de la planta

	Tiempo (Seg)	Temperatura (°C)
Inicial	0	23,7
Final	30000	89,2

Volumen tanque cocción = 100 litros.

$$\Delta T = 89.2 - 23,7 = 65,4308 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t = 30000 - 0 = 30000 \text{ seg} * 1 / 3600 = 8,33 \text{ h.}$$

Cálculo:

Para elevar la temperatura 1 °C se necesita 4,2 J/gramo*°C

La planta se encuentra a 1800 m sobre el nivel del mar. A partir de los datos de la figura 9.1, se puede obtener que la presión atmosférica a 1800 m es igual 619.72 mm Hg = 0.826223 Bar. Además se puede aproximar la densidad del agua para una presión atmosférica de 0.826223 Bar y 24°C [19].

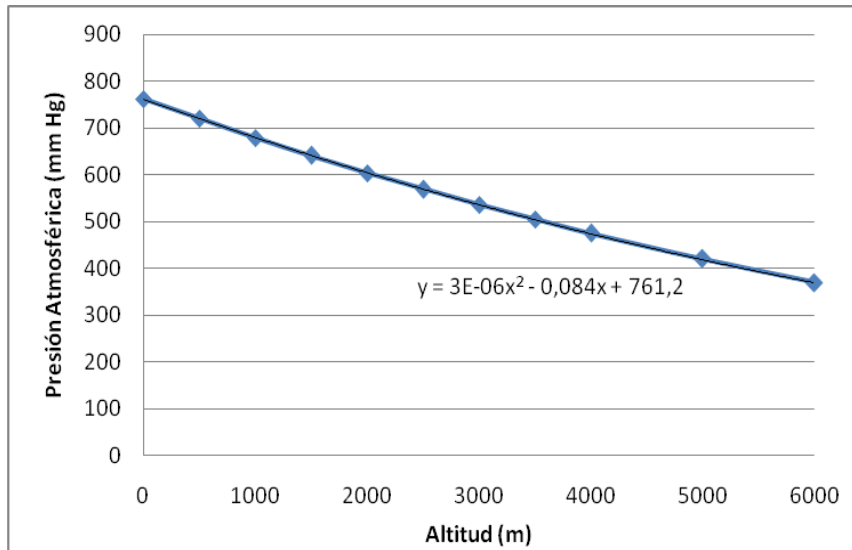


Figura 9.1 Variación de la presión atmosférica en Costa Rica con relación a la altitud.[20]

Así la densidad del agua a 24°C y a una presión atmosférica de 0.826223 Bar es de 0.9973 g/ml [19]. Por lo tanto tenemos que 1 Litro de H₂O ≈ 997.3 g de masa, entonces.

$$4,2 \left[\frac{J}{gr \cdot ^\circ C} \right] \cdot 1 \text{Litro} = 4,2 \left[\frac{J}{gr \cdot ^\circ C} \right] \cdot 997.3 \text{gramos} = 4188.7 \left[\frac{J}{^\circ C} \right]$$

Se requiere de 4188.7 J/°C para tener un ΔT= 1 °C en un litro de agua o 997.3 g. Así la energía que se aplicó para pasar 100 litros de H₂O de 23,7 °C a 89,2 °C es:

$$Q = 4188.7 \left[\frac{J}{^\circ C} \right] \cdot 100 \cdot 65,5^\circ C = 27435985 J$$

Además realizando una transformación de unidades de energía

$$1 J = 2,778 \times 10^{-7} \text{ KW} \cdot \text{h}$$

Se obtiene que:

$$27435985 J \cdot 2,778 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{KW} \cdot \text{h}}{J} \right] = 7.6217 \text{ KW} \cdot \text{h}$$

Así se puede decir que la potencia calórica que se aplicó a la planta fue de:

$$P = \frac{7.62192 \text{ KW} \cdot h}{8,33h} = 914,972W$$

9.3 Planos gabinete de control

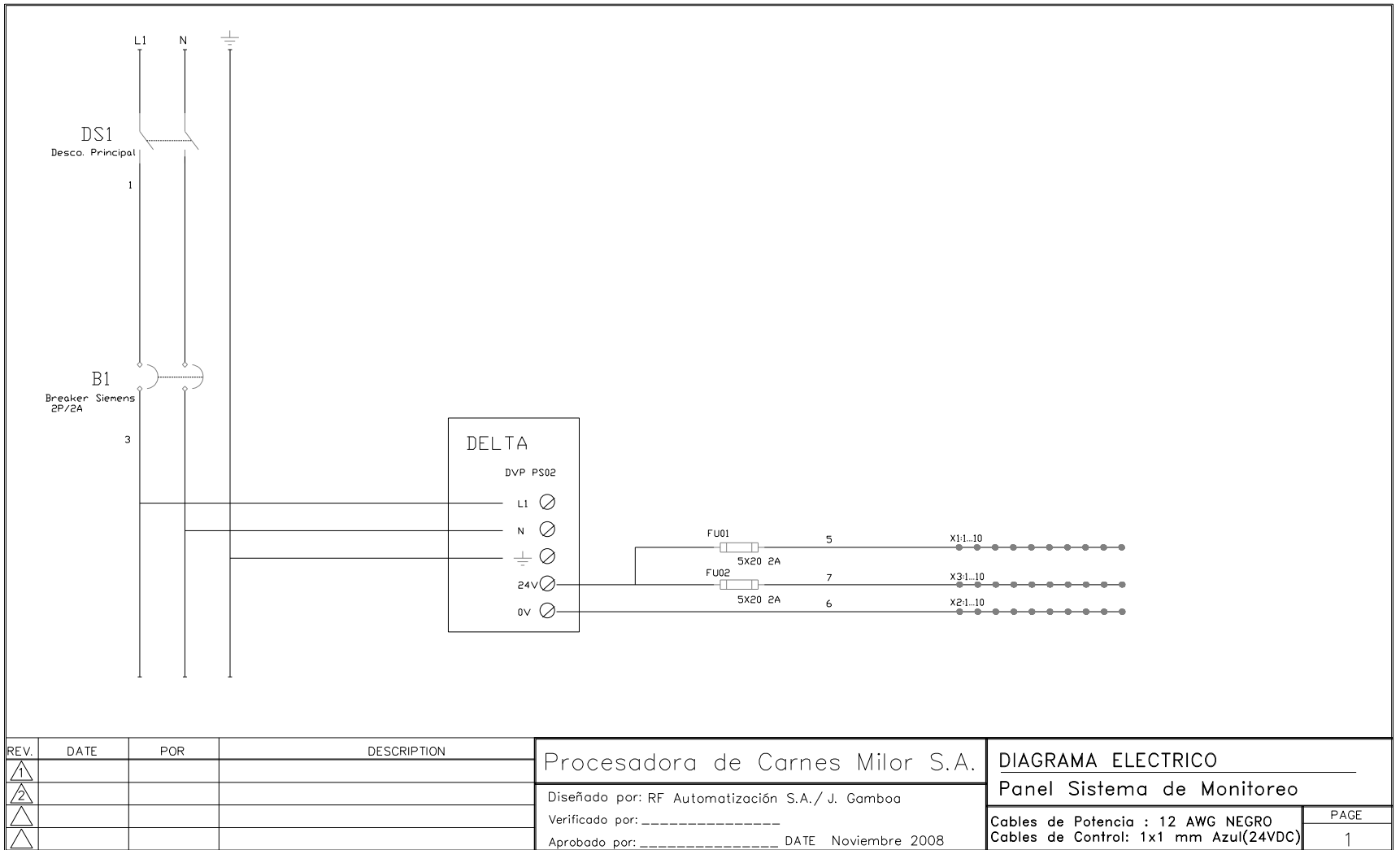


Figura 9.1 Diagrama eléctrico Panel del Sistema Monitorización, pag. 1

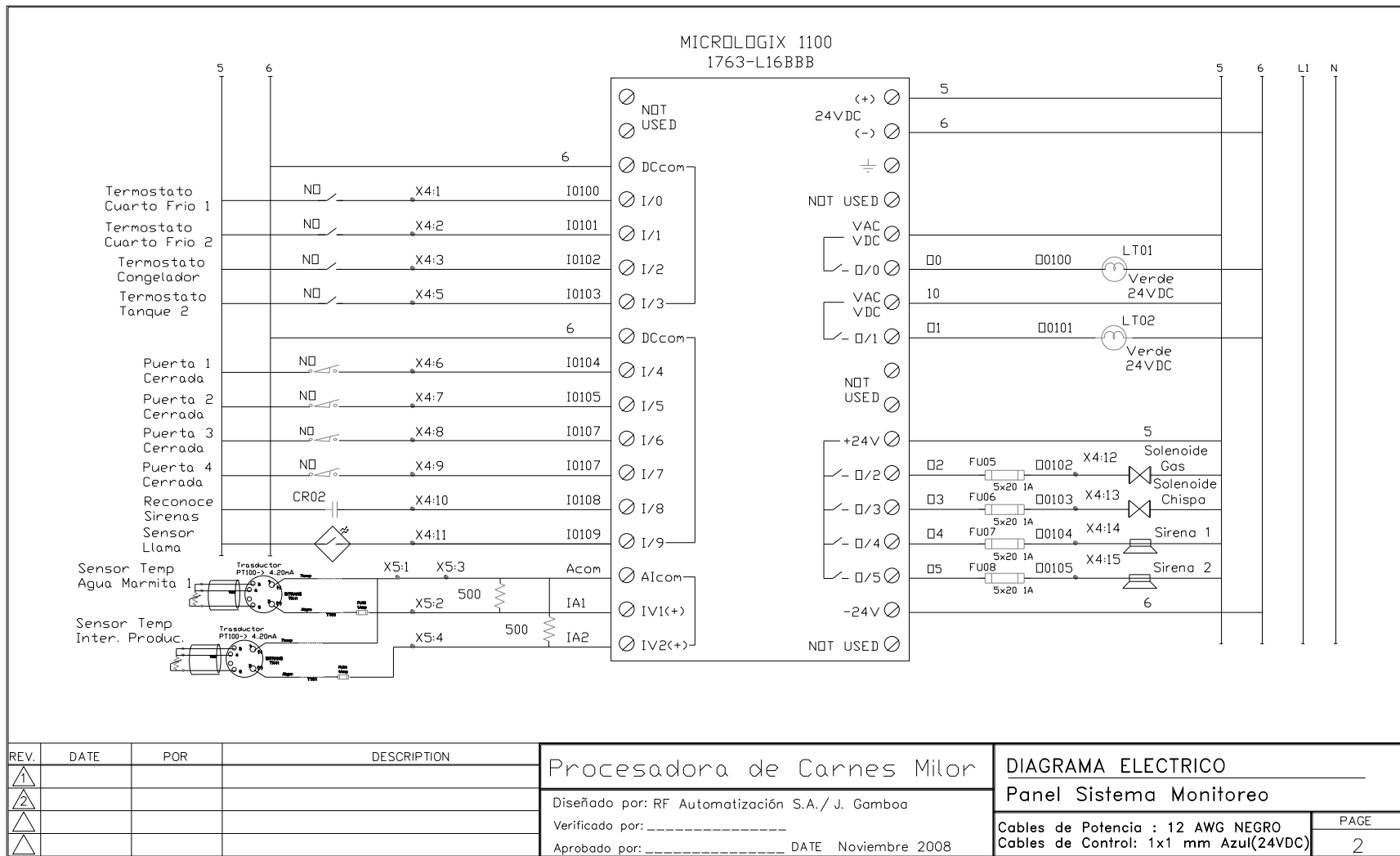


Figura 9.2 Diagrama eléctrico Panel del Sistema Monitorización, pag. 2

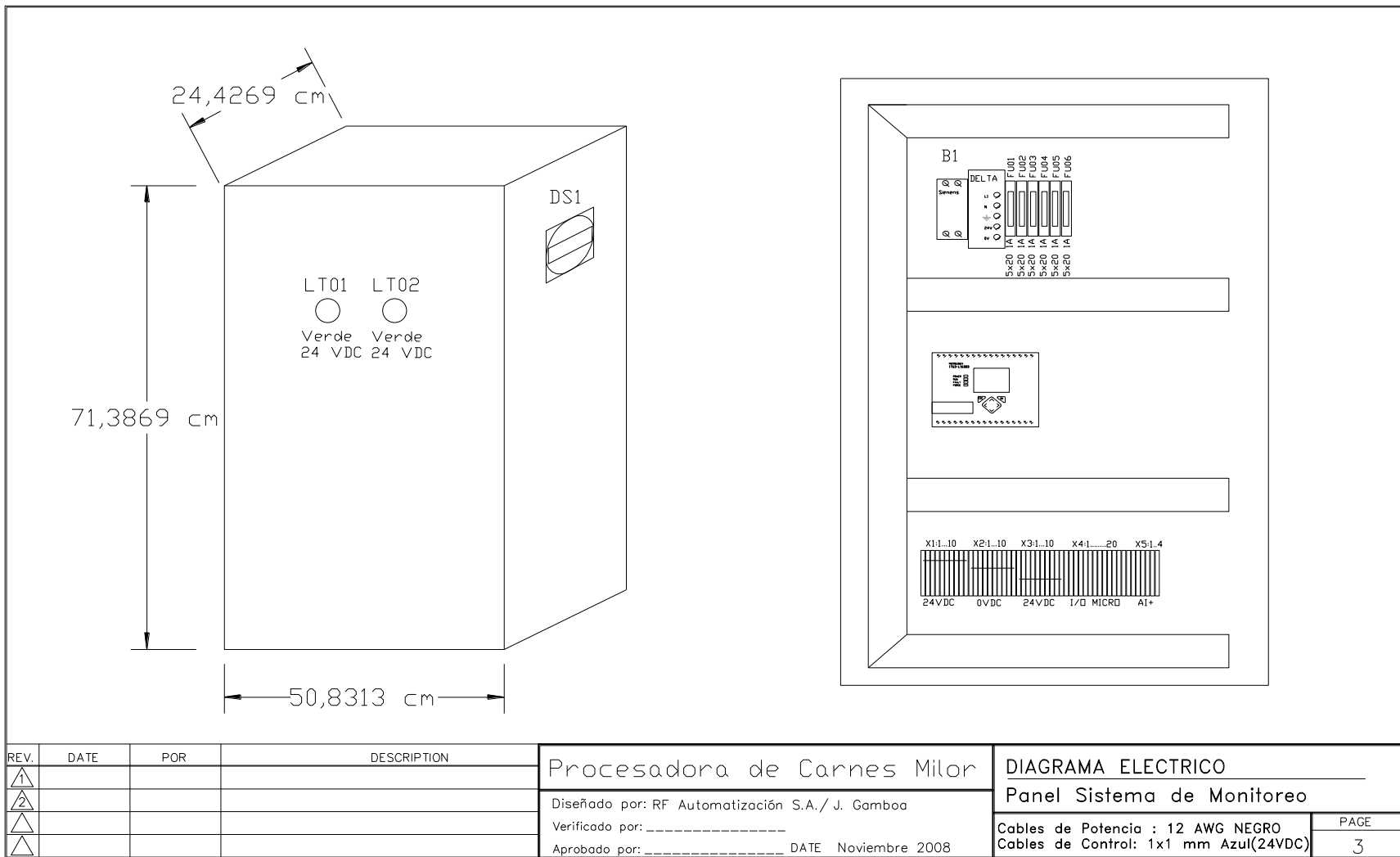


Figura 9.3 Diagrama eléctrico Panel del Sistema Monitorización, pag. 3